

ВЫСШЕЕ

ОБРАЗОВАНИЕ

В. В. Плошкин

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебник
3-е издание

УМО ВО
РЕКОМЕНДУЕТ

 **Юрайт**
ИЗДАТЕЛЬСТВО

В. В. Плошкин

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УЧЕБНИК ДЛЯ ВУЗОВ

3-е издание, переработанное и дополненное

Рекомендовано Учебно-методическим отделом высшего образования в качестве учебника для студентов высших учебных заведений, обучающихся по инженерно-техническим направлениям и специальностям

**Книга доступна на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва • Юрайт • 2021

УДК 620.18(075.8)

ББК 30.3я73

ПЗ9

Автор:

Плошкин Всеволод Викторович — профессор, доктор технических наук, профессор кафедры безопасности труда факультета экологии и техносферной безопасности Российского государственного социального университета.

Плошкин, В. В.

ПЗ9 Материаловедение : учебник для вузов / В. В. Плошкин. — 3-е изд перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2021. — 408 с. — (Высшее образование). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-12089-9

В издании рассмотрено кристаллическое строение металлов, воздействие на их структуру и свойства процессов кристаллизации, пластической деформации и рекристаллизации, описаны фазы, образующиеся в сплавах. Представлены основы современного металлургического производства, механические свойства металлов и сплавов, процессы термической и химико-термической обработки стали и др.

Рассмотрены конструкционные, инструментальные, нержавеющие и жаропрочные стали, сплавы с особыми физическими свойствами и сплавы на основе цветных металлов, неметаллические и композиционные машиностроительные материалы, особенности нанокристаллических материалов. Освещены вопросы стандартизации, сертификации и управления качеством материалов.

Изложение всех вопросов отражает современное состояние физического материаловедения. Для объяснения связи структуры материалов с их физико-механическими и эксплуатационными свойствами, при воздействии различных технологических методов используется минимальный математический аппарат и многочисленные иллюстрации.

Соответствует актуальным требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования.

Для студентов не машиностроительных и экономических специальностей вузов, бакалавров техники и технологии и студентов учреждений среднего профессионального образования в качестве дополнительного материала.

УДК 620.18(075.8)

ББК 30.3я73

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.

ISBN 978-5-534-12089-9

© Плошкин В. В., 2011

© Плошкин В. В., 2014, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2021

Оглавление

| | |
|--|-----|
| Введение | 6 |
| Глава 1. Современное металлургическое производство | 9 |
| 1.1. Производство чугуна | 14 |
| 1.2. Производство стали..... | 18 |
| 1.3. Разливка стали | 26 |
| 1.4. Способы повышения качества металла | 30 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 33 |
| Глава 2. Структура металлов и методы ее исследования | 34 |
| 2.1. Излом | 34 |
| 2.2. Макроструктура металлов | 36 |
| 2.3. Микроструктура металлов | 37 |
| 2.4. Внутреннее строение кристаллических тел | 42 |
| 2.5. Кристаллическая структура металлов | 51 |
| 2.6. Особенности строения реальных кристаллов | 60 |
| 2.7. Диффузия | 65 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 68 |
| Глава 3. Деформация и разрушение металлов | 69 |
| 3.1. Упругая и пластическая деформации металлов | 69 |
| 3.2. Разрушение металлов..... | 75 |
| 3.3. Механические свойства металлов | 75 |
| 3.4. Влияние нагрева на структуру и свойства металлов | 81 |
| 3.5. Холодная и горячая деформации | 84 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 85 |
| Глава 4. Формирование структуры металлов и сплавов | 86 |
| 4.1. Кристаллизация металлов..... | 86 |
| 4.2. Строение металлического слитка..... | 91 |
| 4.3. Фазы в металлических сплавах | 93 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 97 |
| Глава 5. Диаграммы состояния двойных систем | 98 |
| 5.1. Классификация двойных систем..... | 100 |
| 5.2. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях..... | 103 |
| 5.3. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику | 107 |

| | |
|--|------------|
| 5.4. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют перитектику | 116 |
| 5.5. Диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением одного из компонентов | 117 |
| 5.6. Диаграмма состояния сплавов с полиморфными превращениями компонентов и эвтектоидным превращением | 118 |
| 5.7. Диаграммы состояния систем с промежуточными фазами | 118 |
| 5.8. Физические и механические свойства сплавов в равновесном состоянии | 121 |
| <i>Приложение</i> | 122 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 123 |
| Глава 6. Зависимость между структурой и свойствами металлов | 124 |
| 6.1. Влияние атомной структуры | 125 |
| 6.2. Влияние деформации пространственной решетки | 127 |
| 6.3. Влияние размеров и ориентации зерен | 128 |
| 6.4. Гетерогенная структура | 132 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 134 |
| Глава 7. Железо и его сплавы | 135 |
| 7.1. Диаграмма состояния сплавов железо — цементит (метастабильное равновесие) | 135 |
| 7.2. Диаграмма состояния сплавов железо — углерод (стабильное равновесие) | 143 |
| 7.3. Легирующие элементы в железоуглеродистых сплавах | 145 |
| 7.4. Из истории диаграммы железо — углерод | 147 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 172 |
| Глава 8. Основы термической обработки стали | 174 |
| 8.1. Фазовые превращения при нагреве стали (аустенизация) | 175 |
| 8.2. Превращение переохлажденного аустенита (диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита) | 178 |
| 8.3. Виды и разновидности термической обработки | 183 |
| 8.4. Термомеханическая обработка (ТМО) | 193 |
| 8.5. Химико-термическая обработка (ХТО) | 194 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 199 |
| Глава 9. Конструкционные материалы | 201 |
| 9.1. Углеродистые конструкционные стали | 203 |
| 9.2. Легированные стали | 208 |
| 9.3. Легированные конструкционные стали | 210 |
| 9.4. Чугуны | 222 |
| 9.5. Выбор марки стали и вида ее обработки для типовых деталей машин | 231 |
| 9.6. Инструментальные стали | 239 |
| 9.7. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами | 246 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | 249 |

| | |
|---|------------|
| Глава 10. Цветные металлы и их сплавы | 251 |
| 10.1. Сплавы на основе алюминия | 251 |
| 10.2. Сплавы на основе меди | 260 |
| 10.3. Антифрикционные сплавы на основе свинца и олова | 268 |
| 10.4. Титан и его сплавы | 270 |
| 10.5. Магний и его сплавы | 275 |
| 10.6. Порошковые материалы | 276 |
| 10.7. Аморфные сплавы..... | 281 |
| 10.8. Наноструктурные материалы | 283 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | <i>290</i> |
| Глава 11. Неметаллические материалы | 291 |
| 11.1. Классификация полимеров | 291 |
| 11.2. Пластические массы | 296 |
| 11.3. Резиновые материалы | 301 |
| 11.4. Клеи и герметики | 302 |
| 11.5. Неорганические неметаллические материалы (стекло, ситаллы, полиморфные модификации углерода и нитрида бора) | 304 |
| 11.6. Композиционные материалы..... | 314 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | <i>317</i> |
| Глава 12. Основы управления качеством металлопродукции | 318 |
| 12.1. Качество промышленных материалов | 318 |
| 12.2. Показатели качества материалов | 323 |
| 12.3. Контроль качества металлопродукции..... | 325 |
| 12.4. Экспертиза качества материалов | 332 |
| 12.5. Управление качеством материалов | 338 |
| 12.6. Современные системы менеджмента качества..... | 342 |
| 12.7. Сертификация продукции, производств и систем качества | 346 |
| <i>Контрольные вопросы и задания</i> | <i>350</i> |
| Литература | 351 |
| Новые издания по дисциплине «Материаловедение» и смежным дисциплинам | 352 |
| Словарь-справочник основных терминов и понятий | 354 |

Введение

«Семь металлов создал свет по числу семи планет» — в этом простом стихотворении был заключен один из важнейших постулатов средневековой алхимии — на том этапе науки было известно лишь семь металлов и столько же небесных тел (Солнце, Луна и пять планет, не считая Земли). Стройная алхимическая теория гласила, что золото представлено на небесах Солнцем, серебро — это типичная Луна, медь связана родственными узами с Венерой, железо олицетворяется Марсом, ртуть соответствует Меркурию, олово — Юпитеру, свинец — Сатурну. Поэтому до XVII в. металлы и обозначались в литературе соответствующими астрономическими символами.

Металловедение — наука, изучающая связи состава, строения и свойств металлов и сплавов, а также закономерности их изменения при тепловых, механических, физико-химических и других видах воздействия. Условно разделяют на теоретическое металловедение, где рассматривают общие закономерности строения и процессов, происходящих в металлах и сплавах при различных воздействиях, и прикладное металловедение (материаловедение), изучающее основы технологических процессов обработки (термическая обработка, литье, обработка давлением) и конкретные классы металлических материалов.

Развитие науки о металлах неразрывно связано с именами П. П. Аносова (1799—1851) и основателя научной школы русских металлургов и металлургов Д. К. Чернова (1839—1921).

Горный инженер Павел Петрович Аносов, работавший на Златоустовской оружейной фабрике, показал существование связи между строением стали и ее свойствами. Применяв микроскоп для исследования структуры металлов, П. П. Аносов разработал (1831) теорию и восстановил технологию изготовления клинков из булатной стали: узор на поверхности зависит непосредственно от структуры во всем объеме стали.

Исключительно велико значение трудов русского ученого в области металлургии, металловедения и термической обработки металлов Дмитрия Константиновича Чернова:

- в 1866—1868 гг. в результате практического изучения причин брака при изготовлении орудийных поковок установил зависимость структуры и свойств стали от ее горячей механической и термической обработки, что впоследствии было подтверждено рентгеноструктурным анализом;

- найденная по цветам каления графическая зависимость температуры аллотропических превращений в твердой стали от содержания в ней углерода явилась прототипом диаграммы фазового равновесия Fe—C;

- изучая длительности выдерживания стали при той или иной температуре, раскрыл основные принципы кинетики фазовых превращений и формирования структуры стали. Только в 1888 г. Ф. Осмонд (Франция) измерил эти температуры при помощи термоэлектрического термометра, изобретенного его соотечественником Ле Шателье;

- в работах по кристаллизации и строению слитка (1878) изложил основные идеи теории затвердевания стали, не утратившие научного и практического значения и в настоящее время.

Материаловедение относится к числу основополагающих дисциплин для многих специальностей. Это связано с тем, что разработка и получение новых материалов, способы их обработки являются основой современного производства и во многом определяют научно-технический уровень развития и экономический потенциал страны. Проектирование рациональных, конкурентоспособных изделий, организация их производства и эксплуатация невозможны без достаточного уровня знаний в области материаловедения.

В XX в. основными конструкционными материалами являлись металлические материалы (стали, чугуны, сплавы на основе меди и алюминия и др.). В последние десятилетия материаловедческая наука была связана не только с совершенствованием традиционных металлических материалов, но и с созданием принципиально новых классов конструкционных материалов — полупроводников и пластических масс, композиционных материалов и металлокерамики, аморфных сплавов и сверхпроводящих керамик, наноструктурных материалов и технологий. Задачами материаловедения стало изучение не только строения и свойств каждого из указанных классов материалов, но и их совместного поведения в конструкциях и изделиях.

В учебном пособии «Материаловедение» разобраны основы современного металлургического производства, изложены основные вопросы кристаллического строения, кристаллизации, пластической деформации и рекристаллизации металлов, механические свойства металлов и сплавов, описаны фазы, образующиеся в сплавах при их термической обработке. Кратко рассмотрены металловедческие вопросы истории развития диаграммы железо — углерод и определения природы фаз, входящих в состав сталей и чугунов.

Рассмотрены конструкционные стали и сплавы, сплавы на основе цветных металлов, неметаллические и композиционные машиностроительные материалы, особенности нанокристаллических материалов. Проанализированы вопросы управления качеством металлопродукции. В словаре-справочнике приведены наиболее существенные установившиеся и новые понятия по материаловедению.

В соответствии с профессиональными компетенциями Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования третьего поколения в результате изучения дисциплины студент должен:

- **знать** основы современного металлургического производства; механические свойства металлов и сплавов; механизмы образования фаз при процессах термической и химико-термической обработки стали; основные свойства современных металлических и неметаллических материалов;

- **уметь**, используя знания физической сущности явлений, происходящих в материалах при их обработке и эксплуатации, выбирать материал и назначать его обработку с целью получения свойств, обеспечивающих высокую надежность и долговечность деталей машин;

- **владеть** возможностью оценки технического состояния и остаточного ресурса действующего технологического оборудования и технологических показателей материалов и готовых изделий машиностроения, контролем качества металлопродукции.

Автор выражает глубокую признательность рецензентам: доктору технических наук, профессору А. В. Манухину и кандидату технических наук, профессору В. Н. Прохорову за ценные замечания, сделанные при рецензировании рукописи.

Глава 1

СОВРЕМЕННОЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Историческая справка. Железо было известно еще в доисторические времена, однако широкое применение нашло значительно позже, так как в свободном состоянии встречается в природе крайне редко, а получение его из руд стало возможным лишь на определенном уровне развития техники. Способ получения железа из руд был изобретен в западной части Азии во II тыс. до н. э. В Европе и Древней Руси в течение многих веков железо получали по сыродутному процессу: железную руду восстанавливали древесным углем в горне, устроенном в яме; в горн мехами нагнетали воздух, продукт восстановления — крицу ударами молота отделяли от шлака и из нее выковывали различные изделия.

По мере усовершенствования способов дутия и увеличения высоты горна температура процесса повышалась и часть железа науглероживалась, т. е. получался чугун; этот сравнительно хрупкий продукт считали отходом производства. Отсюда название чугуна «чушка», «свинское железо» — английское *pig iron*. Позже было замечено, что при загрузке в горн не железной руды, а чугуна также получается низкоуглеродистая железная крица, причем такой двухстадийный процесс оказался более выгодным, чем сыродутный. В XIV в. чугун начали выплавлять не только как полупродукт для дальнейшего передела, но и как материал для отливки различных изделий. К тому же времени относится и реконструкция горна в шахтную печь («домницу»), а затем и в доменную печь.

В середине XVIII в. в Европе начал применяться тигельный способ получения стали, который был известен на территории Сирии еще в ранний период Средневековья, но в дальнейшем оказался забытым — расплавление мелких кусков сплавов железа с углеродом и чугуна в небольших сосудах (*тиглях*) из высокоогнеупорной массы. Таким способом изготовляли, в частности, булат и его разновидность — дамасскую сталь. Булат (от перс. *булад*) — углеродистая литая сталь, которая благодаря особому способу изготовления отличается своеобразной структурой и видом («узором») поверхности, высокой твердостью и упругостью. Узорчатость булатной стали связана с особенностями выплавки и кристаллизации. Тигельная сталь характеризовалась весьма высоким качеством, но процесс был дорогим и малопроизводительным.

Промышленный переворот XVIII — начала XIX в., изобретение паровой машины, железных дорог, крупных мостов и парового флота вызвали громадную потребность в железе и его сплавах. Массовое производство стали началось в середине XIX в., когда были разработаны бессемеровский, томасовский и мартеновский способы плавания.

Поиски металла, превосходящего по свойствам чугуна и более дешевого, чем тигельная сталь, привели к созданию Генри Бессемером (Англия) конвертора, в котором жидкий чугун превращался в железо при выжигании углерода продувкой воздухом (1856). Новый способ получения металла назвали *бессемеровским*. Сидни Томас (Англия) усовершенствовал бессемеровский процесс (1878), что позволило перерабатывать железные руды с большим содержанием фосфора. Однако и томасовская сталь была низкого качества.

В 1864 г. Пьер Мартен (Франция) разработал процесс получения стали с использованием предложенного незадолго до этого Ф. Сименсом (Германия) способа регенерации тепла отходящих газов для повышения температуры в рабочем пространстве плавильных печей. При поступлении в печь подогретых газа и воздуха создавалась высокая температура, позволяющая переплавлять железный лом, которого в промышленно развитых странах становилось все больше и больше. Сталь получали не в виде теста, а в жидком состоянии, ее выпускали в ковш и использовали не только для литья, но и для проката. В отличие от конверторных способов получения стали мартеновский процесс характеризовался малой требовательностью к химическому составу исходного материала, качество мартеновской стали было выше конверторной. Поэтому мартеновская печь и заняла ведущее место в железоделательном производстве.

В XX в. получил распространение электросталеплавильный процесс, дающий сталь высокого качества, но главенствующее положение среди способов производства стали занимал мартеновский процесс, на долю которого приходилось около 80 % выплавляемой в мире стали.

Вместе с вдуваемым воздухом в конвертор попадало большое количество азота (воздух состоит на 1/5 из кислорода и на 4/5 из азота), который повышает хрупкость металла. Идея подавать в конвертор вместо воздуха кислород известна давно, но производство кислорода в больших количествах было дорогим. В 1960-х гг. начали применять в конверторах кислород, подавая его сверху по трубке (днище в конверторах, работающих на кислороде, сплошное, без отверстий). Так появился новый способ производства стали — *кислородно-конверторный*.

Основой современной металлургии стали является двухступенчатая схема, которая состоит из доменной выплавки чугуна и различных способов его передела в сталь заданного химического состава (рис. 1.1).

Важнейшей продукцией черной металлургии являются:

1) *чугуны* — переделный (до 90 %), используемый для передела на сталь, и литейный для производства фасонных чугунных отливок на машиностроительных заводах;

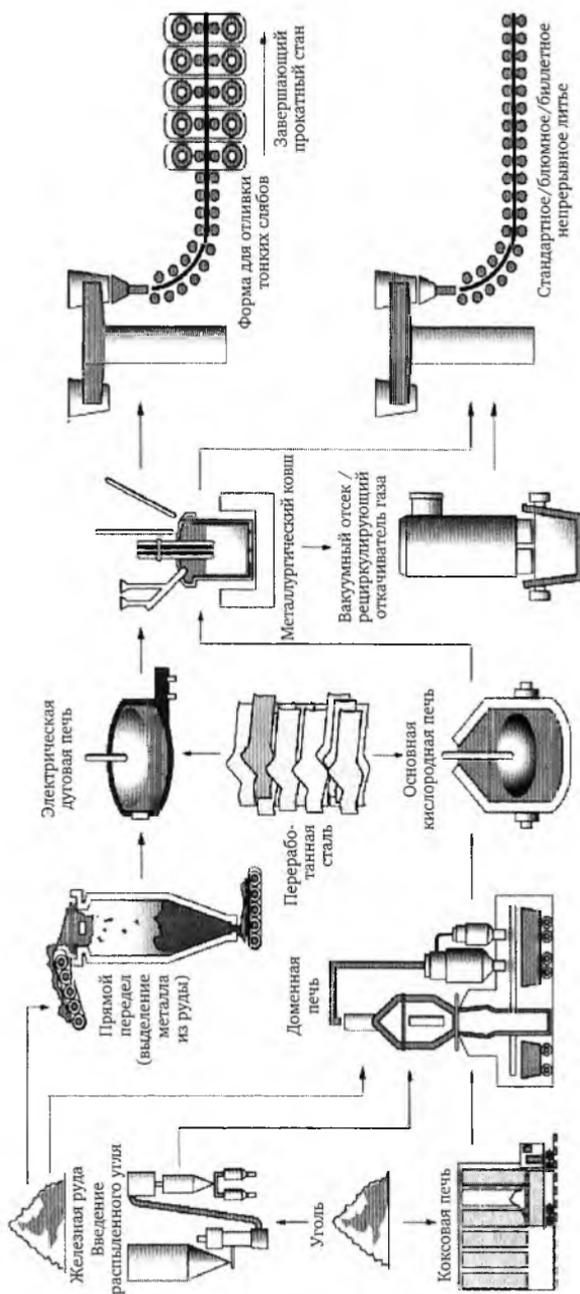


Рис. 1.1. Общая схема процесса производства чугуна и стали

2) *ферросплавы* — сплавы железа с повышенным содержанием марганца, кремния, ванадия, титана для производства легированных сталей;

3) стальные слитки для производства сортового проката (рельсов, балок, прутков, полос, проволоки), а также листа, труб и т. д.;

4) стальные слитки для производства крупных кованых деталей машин (валов, роторов, турбин, дисков и т. д.).

Цветные металлы и сплавы на их основе¹, которые имеют не сходные с черными металлами и сплавами физико-механические свойства, используют в машиностроении, самолетостроении, электронике и т. д. Наиболее широко применяют медь (Cu), алюминий (Al), магний (Mg), никель (Ni), титан (Ti), вольфрам (W), бериллий (Be), германий (Ge), кремний (Si).

Основная продукция цветной металлургии:

1) слитки цветных металлов для сортового проката (уголков, полос, прутков и т. д.);

2) слитки (чушки) цветных металлов для фасонных отливок на машиностроительных заводах;

3) *лигатуры* — сплавы цветных металлов с легирующими элементами для производства сложных легированных сплавов для фасонных отливок;

4) слитки чистых и особо чистых металлов.

Материалы для производства металлов и сплавов — руда, флюсы, топливо и огнеупорные материалы.

В природе большинство металлов находится в виде химических соединений (оксидов, силикатов, карбонатов, сернистых соединений), входящих в состав различных минералов, образующих горные породы (*руды*).

Промышленной рудой называют горную породу (содержащую искомый металл или его соединения, пустую породу и примеси), из которой при данном уровне развития техники целесообразно извлекать металлы или их соединения. Например, железа должно быть не менее 30 %, меди — 3—5 %, молибдена (Mo) — 0,005—0,02 %.

Руды обычно называют по металлам, которые в них содержатся, — железные, медные, алюминиевые, марганцевые, медно-никелевые, железомарганцевые и т. д. В зависимости от содержания добываемого материала руды бывают богатые и бедные. Богатая железная руда (более 50 % железа) содержит оксиды железа Fe_3O_4 , Fe_2O_3 , $FeCO_3$, $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ и пустую породу SiO_2 , Al_2O_3 , CaO, MgO. Бедные руды специально обрабатывают (*обогащают*) — удаляют часть пустой породы для получения концентрата с повышенным содержанием добываемого металла.

Комплексные руды кроме основного металла содержат сопутствующие металлы и другие элементы, имеющие потребительскую ценность. Например, железные руды содержат в значительных количествах S, Co,

¹ Основы производства цветных металлов рассмотрены в гл. 10.

Ni, V, Cu, Zn, Pb, которые связаны не с главным минералом — магнетитом, а с сульфидами, которые при простой схеме обогащения переходят в концентрат, являющийся самостоятельной рудой, содержащей 45—50 % S, 0,2—0,4 % Co, 0,7—1,2 % Cu.

Флюсом называется материал, загружаемый в плавильную печь для образования легкоплавких соединений (*шлаков*) из оксидов, сульфидов и других соединений, образующихся при плавке. Шлаки играют важную роль в физико-химических процессах металлургического производства: предохраняют расплавленный металл от вредного воздействия газовой среды печи (т. е. от окисления и газонасыщения), обеспечивая получение металла с требуемыми химическим составом и свойствами, очищая металл от нежелательных примесей.

Если какое-либо вещество растворяется в двух соприкасающихся, но не смешивающихся жидкостях, то его распределение между этими жидкостями происходит до установления определенного соотношения, постоянного для данной температуры. В процессе плавки в металлургической печи образуются *несмешивающиеся* расплавленный металл и шлак с меньшей, чем у металла, плотностью; изменяя состав шлака, можно удалять в него нежелательные примеси из металла (серы, фосфора и т. д.). Регулирование состава шлака с помощью флюсов является одним из основных путей управления металлургическими процессами.

В современных металлургических агрегатах процессы плавки происходят при температурах 1600—1800 °С, поэтому внутреннюю облицовку (*футеровку*) металлургических печей и ковшей для разливки металла делают из огнеупорных материалов, способных выдерживать нагрузки при высоких температурах, противостоять резким изменениям температур, химическому воздействию шлака и печных газов. Огнеупорные материалы применяют в виде кирпичей разных размеров и форм, порошков и растворов, необходимых для заполнения швов между кирпичами при кладке печей.

По химическим свойствам огнеупорные материалы подразделяют на кислые (большое количество кремнезема SiO_2), основные (CaO, MgO) и нейтральные (много Al_2O_3 и Cr_2O_3). Если рабочее пространство плавильной печи выложено из кислых огнеупорных материалов, то печь называют *кислой*, а если из основных — *основной*.

При высоких температурах в рабочем пространстве плавильных печей шлаки взаимодействуют с футеровкой печи, поэтому в печах с кислой футеровкой применяют кислые шлаки, а в печах с основной футеровкой — основные шлаки. Шлак называют кислым, если в его составе преобладают кислотные оксиды (SiO_2 , P_2O_5), и основным, если в его составе преобладают основные оксиды (CaO, MgO, FeO и т. д.).

Основным топливом доменного процесса является искусственное неспекающееся твердое топливо повышенной прочности — кокс (нем. *koks*, англ. *coke*), которое служит также и химическим реагентом для восстановления железа из руды. Его получают из каменного угля (80—88 % C; 8—12 % золы; 2—5 % влаги; 0,5—1,8 % S; 0,02—0,2 % P и до 1,2 % ле-

тухих продуктов) в коксовых печах сухой перегонкой (без доступа воздуха) за 14—16 ч при температуре 950—1050 °С. Важными для доменной плавки показателями качества кокса являются зольность, содержание серы (ухудшает свойства металла), кусковатость — размер кусков кокса должен быть 25—60 мм, механическая прочность (кокс не должен разрушаться в доменной печи под действием массы шихтовых материалов). Теплота сгорания кокса составляет около 29,3 МДж/кг.

Из газообразных продуктов, выделяющихся в процессе коксования из угольной массы, извлекают бензол, фенолы, каменноугольную смолу и другие ценные продукты. В зависимости от вида сырья различают каменноугольный, пековый электродный и нефтяной кокс. Естественные виды топлива (природный газ, мазут) не обладают необходимыми свойствами, так как спекаются и недостаточно прочны.

1.1. Производство чугуна

Чугун — важнейший первичный продукт, используемый для передела при производстве стали и как компонент шихты при вторичной плавке в чугунолитейном производстве. В современном машиностроении на долю деталей из чугуна приходится около 75 % от общей массы отливок — у чугуна хорошие литейные и прочностные свойства (по прочности некоторые чугуны незначительно уступают углеродистой стали). Производство чугуна в мире показано на рис. 1.2.

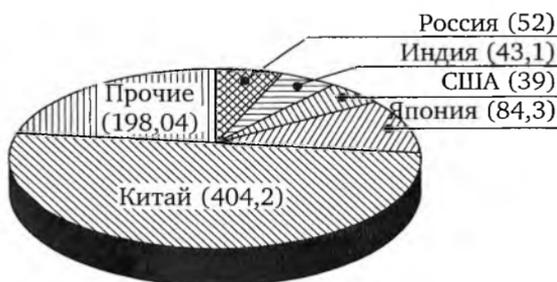


Рис. 1.2. Производство чугуна на мировом рынке (данные за 2010 г.), млн т

Для выплавки чугуна в доменных печах используют железные руды, топливо и флюсы. Железные руды содержат железо в различных соединениях:

- магнитный железняк — более 70 % в виде магнетита Fe_3O_4 (Курская магнитная аномалия);
- красный железняк — 55—60 % Fe в виде гематита Fe_2O_3 (Курская магнитная аномалия);
- бурый железняк (лимонит) — 35—55 % Fe в виде смеси гидроксидов трехвалентного железа $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ и $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (Керченское, Аятское и Лисаковское месторождения);

- шпатовый железняк — до 40 % Fe в виде FeCO_3 (Бакальское месторождение).

При использовании для выплавки чугуна комплексных руд получают природнолегированные чугуны. Это железомарганцевые, содержащие, кроме железа, до 20 % Mn (Атасуйское месторождение), хромоникелевые — 37—47 % Fe, до 2 % Cr и до 1 % Ni (Халиловское месторождение), железованадиевые руды, содержащие до 0,17—0,35 % V (Качкарское месторождение).

Пустая порода железных руд содержит оксиды, температура плавления которых значительно выше развиваемых в доменной печи (Al_2O_3 — 2040 °C, CaO — 2570 °C, MgO — 2800 °C). Однако при их определенном количественном соотношении образуются легкоплавкие шлаки (температура плавления ниже 1300 °C) с хорошей текучестью при 1450—1600 °C. Для удаления серы из металла, в который она переходит из кокса и железной руды при плавке, шлаки в доменной печи должны содержать основные оксиды (CaO, MgO).

Подготовка руд к доменной плавке. Производительность доменной печи, расход кокса и качество получаемого чугуна зависят от состава исходных материалов (*шихты*) для плавки. Установлено, что в шихтовых материалах оптимальное содержание железа должно быть 60—61 %, поэтому перед плавкой железные руды *обогащают* — увеличивают содержания железа в шихте, повышают ее однородность по кусковатости и химическому составу.

Способы обогащения руд основаны на использовании различия физических свойств минералов, входящих в их состав: плотности, магнитной восприимчивости, физико-химических свойств поверхности и др. Используют:

- промывку руды водой, что позволяет отделить плотные составляющие рудных минералов от пустой рыхлой породы (песка, глины);
- гравитацию (отсадку), основанную на отделении руды от легкой пустой породы при пропускании струи воды через дно вибрирующего сита, на котором лежит руда, или погружением в жидкость, плотность которой выше плотности пустой породы;
- магнитную сепарацию, основанную на различии магнитных свойств железосодержащих минералов и частиц пустой породы;
- окускование, которое производят для переработки концентратов, полученных после обогащения, в кусковые материалы необходимых размеров. Применяют два способа — агломерацию и окатывание. *Агломерация* заключается в спекании при 1300—1500 °C шихты, состоящей из железной руды (40—50 %), известняка (15—20 %), возврата мелко-го агломерата (20—30 %), коксовой мелочи (4—6 %), влаги (6—9 %). *Окатывание* применяют для обработки тонко измельченных концентратов. Шихта из измельченных концентратов, флюса и топлива увлажняется и при обработке во вращающихся барабанах (грануляторах) приобретает форму шариков-окатышей диаметром до 30 мм, которые высушивают и обжигают при 1200—1350 °C.

Выплавка чугуна. Сущность процесса получения чугуна заключается в восстановлении оксидов железа, входящих в состав руды. Те элементы, которые образуют более прочные соединения с кислородом, чем Fe, восстанавливаются частично или совсем не восстанавливаются: V восстанавливается на 75—90 %, Mn — на 40—75 %, Si и Ti — в небольших количествах, Al, Mg и Ca не восстанавливаются.

Доменная печь шахтного типа (рис. 1.3) имеет стальной кожух, выложенный изнутри огнеупорным шамотным кирпичом. В верхней части (колошнике) находится засыпной аппарат, через который в печь загружают шихту (офлюсованный агломерат и окатыши). Из бункеров шихтовые материалы подают в вагон-весы, на которых взвешивают определенные порции шихты, и передают в вагонетку скипового подъемника. Две скиповые вагонетки с помощью лебедки передвигаются по наклонному мосту к засыпному аппарату и, опрокидываясь, высыпают шихту в приемную воронку распределителя шихты.

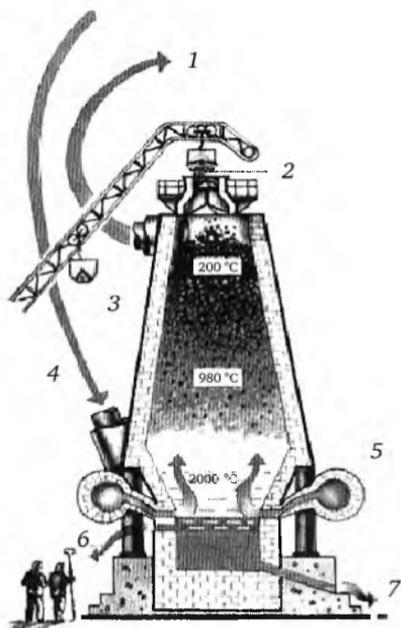


Рис. 1.3. Схема устройства доменной печи:

- 1 — доменный (колошниковый) газ; 2 — колошник; 3 — скиповый подъемник;
 4 — горячий воздух для горения; 5 — фурмы для подачи воздуха;
 6 — шлаковая летка; 7 — чугунная летка

В процессе работы печи шихтовые материалы постепенно опускаются вниз, а через загрузочное устройство в печь подают новые порции шихтовых материалов в таком количестве, чтобы весь полезный объем печи (расстояние между осью чугунной летки и нижней кромкой большого загрузочного конуса в опущенном состоянии) был заполнен. Современные доменные печи достигают высоты более 35 м и имеют полезный объем 2000—5000 м³.

Важнейшими технико-экономическими показателями работы доменных печей являются коэффициент использования полезного объема доменной печи (КИПО) и удельный расход кокса. КИПО определяют как отношение полезного объема печи V (м^3) к ее среднесуточной производительности передельного чугуна. Для большинства доменных печей $\text{КИПО} = 0,5 \div 0,7 \text{ м}^3/\text{т}$. Удельный расход кокса $K = A / P$ — отношение расхода кокса за сутки (A) к количеству в тоннах передельного чугуна, выплавленного за то же время (P).

Непрерывная работа (кампания) доменной печи от задувки до выдувки (остановки на капитальный ремонт) продолжается до 6 лет и более, в течение которых печь 1—2 раза останавливают для замены изношенной кладки шахты. Выплавка чугуна за одну кампанию достигает более 5—8 млн т.

Управление работой (ходом) доменной печи заключается в регулировании (в соответствии с качеством сырых материалов и видом выплаваемого чугуна) состава шихты, количества, температуры и влажности дутья, а также величины подачи или последовательности загрузки отдельных компонентов шихты и уровня засыпи. Ход доменной печи контролируют измерительными приборами, регистрирующими основные параметры загрузки, дутья, колошникового газа, температуру кладки печи на разных горизонтах.

Горение топлива. В результате горения кокса ($\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + 393,51 \text{ кДж}$) и частичного перехода в присутствии твердого углерода кокса диоксида углерода в оксид углерода ($\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO} - 171,88 \text{ кДж}$) в доменной печи выделяется теплота и образуется газовый поток, содержащий CO , CO_2 и другие газы, и в печи немного выше уровня фурм температура становится более 2000°C . Горячие газы, поднимаясь вверх, нагревают шихтовые материалы, охлаждаясь до $400\text{—}300^\circ\text{C}$ у колошника. В зоне печи, где температура газов достигает $700\text{—}450^\circ\text{C}$, часть оксида углерода разлагается с образованием сажистого углерода, оседающего на шихтовых материалах. Остальная часть газа (*колошниковый газ*), состоящего в основном из CO , CO_2 , N_2 , H_2 , CH_4 , отводится из печи по трубам и после очистки используется как топливо для воздухонагревателей.

В нагретой шихте (агломерат, кокс), опускающейся навстречу потоку газов, происходят химические превращения: удаляется влага, из топлива выделяются летучие вещества, а при прогреве шихты до температуры 570°C начинается основной процесс — восстановление оксидов железа, содержащихся в агломерате. Этот процесс протекает в результате взаимодействия оксидов железа с оксидом углерода и твердым углеродом кокса, а также водородом. Восстановление твердым углеродом называют *прямым*, а газами — *косвенным*. В результате процессов восстановления оксидов железа, части оксидов марганца и кремния, фосфатов и сернистых соединений, растворения в железе C , Mn , Si , P , S в печи получается чугун.

В нижней части печи в результате сплавления оксидов, пустой породы, руды, флюсов и золы топлива постепенно образуется шлак. Его состав изменяется по мере скапливания на поверхности жидкого чугуна благодаря меньшей плотности и зависит от состава применяемых шихтовых материалов и выплавляемого чугуна. Оксиды Al_2O_3 , CaO , MgO , содержащиеся в пустой породе, полностью переходят в шлак. В шлаке также содержится часть не восстановившихся оксидов SiO_2 , MnO , FeO и CaS .

По мере накопления чугуна и шлака их выпускают из печи: чугун через 3—4 ч выпускают из чугунной летки (см. рис. 1.3), а шлак — через 40—50 мин после выпуска чугуна. С небольшими перерывами выпуск шлака продолжают до последующего выпуска чугуна с тем, чтобы обеспечить максимальную выдачу шлака через шлаковые летки. Чугунную летку открывают бурильной машиной, а после выпуска чугуна закрывают огнеупорной массой. Чугун и шлак сливают по желобам в чугуновозные ковши и шлаковозные чаши, установленные на железнодорожных платформах. Емкость чугуновозных ковшей 90—140 т, в них чугун транспортируют в кислородно-конверторные или мартеновские цеха для передела в сталь.

Чугун, не используемый в жидком виде, поступает на разливочные машины, где затвердевает в виде чушек-слитков массой 45 кг. Часто жидкий шлак из доменной печи не сливают в шлаковозные чаши, а для удобства дальнейшего использования подвергают мокрой грануляции: на него направляют струю воды, под действием которой он рассыпается на мелкие гранулы.

Продукты доменного производства и их применение. Их подразделяют на основные и побочные.

Основные продукты:

- *передельный* чугун, который выплавляют для передела его в сталь в конверторах или мартеновских печах; содержит 4,0—4,4 % С; до 0,6—0,8 % Si; до 0,25—1,0 % Mn; 0,07—0,3 % P и 0,03—0,07 % S;
- *литейный* чугун (до 2,75—3,25 % Si) используют для переплава на машиностроительных заводах при производстве фасонных отливок;
- *доменные ферросплавы* (сплавы железа с кремнием, марганцем и другими металлами) для раскисления и легирования стали: доменный ферросилиций с 9—13 % Si и до 3 % Mn; доменный ферромарганец с 70—75 % Mn и до 2 % Si; *зеркальный* чугун с 10—25 % Mn и до 2 % Si.

Побочные продукты:

- из шлаков производят шлаковату, шлакоблоки, цемент;
- колошниковый газ после очистки от пыли используют как топливо для нагрева воздуха, вдуваемого в доменную печь, а также в цехах металлургических заводов.

1.2. Производство стали

Сущностью любого металлургического передела чугуна в сталь является снижение содержания углерода и примесей в процессе плавки передельного чугуна и стального лома (*скрапа*). В результате окисли-

тельных реакций, осуществляемых на первом этапе, углерод в виде СО выделяется в атмосферу печи. Кремний, марганец, фосфор, сера образуют оксиды или другие соединения, не растворимые или малорастворимые в жидком металле (SiO_2 , MnO , CaS и др.), которые в процессе плавки частично удаляются в шлак. Однако в полной мере окислить примеси не удастся, так как по мере снижения содержания примесей начинает окисляться железо, насыщая металл кислородом.

Сталь, содержащая кислород, *непригодна* для обработки давлением (ковка, прокатка), так как в ней образуются трещины при деформации в нагретом состоянии. Для уменьшения содержания кислорода в процессе плавки сталь *раскисляют*, вводя элементы с большим сродством к кислороду, чем у железа. Взаимодействуя с кислородом жидкой стали, эти элементы образуют нерастворимые оксиды (неметаллические включения), частично всплывающие в шлак. Для раскисления используют ферросплавы — ферросилиций, ферромарганец, а также алюминий. Раскисление является завершающим этапом выплавки стали.

Чугун переделывают в сталь в *различных* по принципу действия металлургических агрегатах — кислородных конверторах, мартеновских и дуговых электропечах. Объем производства стали, выплавляемой в высокопроизводительных агрегатах — кислородных конверторах и крупных электропечах, возрастает, а выплавляемой в мартеновских печах постепенно уменьшается (рис. 1.4, а, б).

Производство стали в кислородном конверторе. Кислородный конвертор представляет собой стальной сосуд грушевидной формы, выложенный изнутри основным кирпичом емкостью 130—350 т жидкого чугуна (рис. 1.5). В процессе работы конвертор можно поворачивать вокруг горизонтальной оси на 360° для завалки скрапа, заливки чугуна, слива стали, шлака и т. д.

Во время продувки чугуна кислородом конвертор находится в вертикальном положении. Кислород в конвертор под давлением $0,9\text{—}1,4\text{ МН/м}^2$ подают с помощью водоохлаждаемой фурмы, которую вводят в конвертор через его горловину. Фурму устанавливают строго вертикально по оси конвертора, и конвертор нельзя повернуть, пока из него не удалена фурма. Шихтовыми материалами для конверторного процесса являются жидкий передельный чугун, стальной лом, известь, железная руда, боксит, плавиковый шпат. Чугун для переработки в кислородных конверторах содержит 3,7—4,4 % С; 0,7—1,1 % Мп; 0,4—0,8 % Si; 0,03—0,08 % S; до 0,15—0,3 % Р. Известь должна содержать более 90 % СаО и минимальное количество серы. Боксит и плавиковый шпат применяют для разжижения шлака.

После выпуска очередной плавки конвертор наклоняют и через горловину с помощью завалочных машин загружают скрапом, заливают чугун при температуре $1250\text{—}1400^\circ\text{C}$ из чугуновозных ковшей. Затем его поворачивают в вертикальное рабочее положение, внутрь вводят кислородную фурму и подают кислород. Одновременно с началом продувки в него загружают шлакообразующие материалы (известь, боксит, железную руду).



Рис. 1.4. Структура производства стали:

а — по географическим регионам, млн т; б — по способам выплавки, % (по данным 2011 г.)

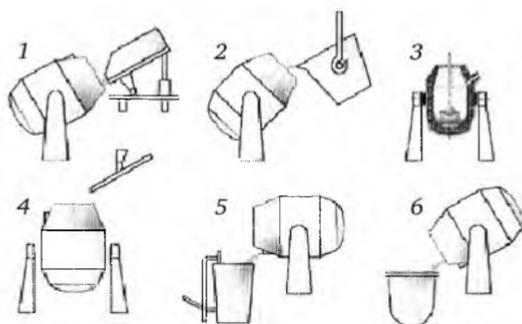


Рис. 1.5. Производство стали в кислородном конверторе:

1 — загрузка стального скрапа; 2 — заливка чугуна; 3 — продувка кислородом; 4 — загрузка извести и железной руды с началом продувки и по ходу плавки; 5 — выпуск стали; 6 — слив шлака

Струи кислорода, поступающие под большим давлением, проникают в металл, вызывают его циркуляцию в конверторе и перемешивание со шлаком. Благодаря интенсивному окислению примесей чугуна при взаимодействии с кислородом в зоне под фурмой температура достигает 2400 °С. Подачу кислорода заканчивают в момент, когда содержание углерода в металле соответствует заданному содержанию в стали и производят выпуск стали в ковш.

При выпуске стали в ковш ее раскисляют вначале ферромарганцем, затем ферросилицием и алюминием. Производительность конвертора емкостью 300 т достигает 400—500 т/ч стали. В кислородных конверторах выплавляют углеродистые и низколегированные стали, содержащие до 2—3 % легирующих элементов. Легирующие элементы в расплавленном виде вводят в ковш перед выпуском в него стали.

Производство стали в мартеновских печах. Мартеновская печь (рис. 1.6) по устройству и принципу работы является пламенной отражательной регенеративной печью. В плавильном пространстве сжигают газообразное топливо или мазут. Высокая температура для получения стали в расплавленном состоянии обеспечивается регенерацией тепла печных газов. Современная мартеновская печь представляет собой вытянутую в горизонтальном направлении камеру, сложенную из огнеупорного кирпича. Рабочее плавильное пространство ограничено снизу подиной 12, сверху сводом 11, а с боков передней 5 и задней 10 стенками. Подина имеет форму ванны с откосами по направлению к стенкам печи. В передней стенке имеются загрузочные окна 4 для подачи шихты и флюса, а в задней — отверстие 9 для выпуска готовой стали.

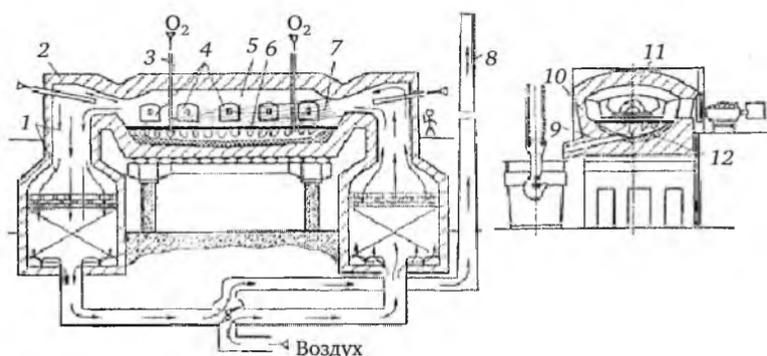


Рис. 1.6. Схема мартеновской печи:

- 1 — регенератор; 2 — головка печи; 3 — фурма; 4 — загрузочные окна; 5 — передняя стенка; 6 — шихта; 7 — факел; 8 — дымовая труба; 9 — отверстие для выпуска готовой стали; 10 — задняя стенка; 11 — свод; 12 — подина

Характеристикой рабочего пространства является площадь пода печи, которую подсчитывают на уровне порогов загрузочных окон. С обоих торцов плавильного пространства расположены головки печи 2,

которые служат для смешивания топлива с воздухом и подачи этой смеси в плавильное пространство. В качестве топлива используют природный газ, мазут. Рабочее пространство печи, рассчитанное на 200—900 т жидкой стали, и шихту нагревают факелом пламени с температурой 1750—1800 °С. Факел имеет окислительный характер, что создает условия для окисления примесей шихты на протяжении всей плавки. Кислород для продувки ванны вводится через фурмы 3, опускаемые в отверстия в своде.

Для подогрева воздуха и газа при работе на низкокалорийном газе печь имеет два регенератора 1. Регенератор — камера, в которой размещена насадка — огнеупорный кирпич, выложенный в клетку, предназначен для нагрева воздуха и газов. Отходящие от печи газы имеют температуру 1500—1600 °С. Попадая в регенератор, газы нагревают насадку до температуры 1250 °С. Через один из регенераторов подают воздух, который, проходя через насадку, нагревается до 1200 °С и поступает в головку печи, где смешивается с топливом; на выходе из головки образуется факел 7, направленный на шихту 6. Отходящие газы проходят через противоположную головку (левую), очистные устройства (шлаковики), служащие для отделения от газа частиц шлака и пыли, и направляются во второй регенератор. Охлажденные газы покидают печь через дымовую трубу 8 высотой до 120 м.

В зависимости от состава металлической шихты (стальной скрап, жидкий и твердый чугуны), используемой при плавке, различают следующие разновидности мартеновского процесса:

1) *скрап-процесс* (основная часть шихты — стальной скрап, 25—46 % чушкового передельного чугуна) применяют на металлургических заводах, расположенных в крупных промышленных центрах, где много металлолома;

2) *скрап-рудный процесс* (основная часть шихты состоит из жидкого чугуна — 55—75 %, скрапа и железной руды) чаще применяют на металлургических заводах, имеющих доменные печи.

Кислым мартеновским процессом выплавляют сталь, содержащую значительно меньшее количество растворенных газов (водорода и кислорода) и неметаллических включений, чем сталь, выплавленная в основной печи. Поэтому она имеет более высокие показатели механических свойств, особенно ударной вязкости и пластичности, и ее используют для ответственных деталей: коленчатых валов крупных двигателей, роторов мощных турбин, шарикоподшипников, стволов орудий и т. д.

Наибольшее количество стали получают скрап-рудным процессом в мартеновских печах с основной футеровкой, так как в этом случае возможно переделывать в сталь различные шихтовые материалы, в том числе и с повышенным содержанием фосфора и серы. Такая плавка происходит следующим образом. После осмотра и ремонта пода печи с помощью завалочной машины загружают железную руду и известняк и после их прогрева подают скрап. По окончании прогрева заливают

жидкий чугун, который, проходя через слой скрапа, взаимодействует с железной рудой.

В период плавления за счет оксидов железа руды и скрапа интенсивно окисляются примеси чугуна. Оксиды SiO_2 , MnO , P_2O_5 , а также CaO из известки образуют шлак, который вспенивается выделяющимся оксидом углерода (CO) и выпускается из печи в шлаковые чаши. Образование и спуск шлака продолжаются почти до полного расплавления шихты. В этот период полностью окисляется кремний, почти полностью марганец и большая часть углерода, а также интенсивно удаляется фосфор.

Для ускорения плавления и окисления примесей после окончания заливки чугуна ванну продувают кислородом через водоохлаждаемые фурмы, которые опускаются в отверстия в своде печи. При этом выделяется значительное количество теплоты, металл интенсивно перемешивается, что позволяет в два-три раза сократить период плавления, уменьшить расход топлива и железной руды.

По окончании расплавления шихты наступает период кипения ванны. Углерод, содержащийся в металле, начинает интенсивно окисляться и выделяющийся оксид углерода вспенивает шлак, который начинает вытекать из печи через порог завалочного окна в шлаковые чаши (скачивание шлака). Вместе с ним удаляется значительное количество фосфора и серы. Для более полного удаления из металла фосфора и серы в печи наводят новый шлак путем подачи на зеркало металла (поверхность расплавленного металла) известки с добавлением боксита или плавикового шпата для уменьшения вязкости шлака. Процесс кипения считают окончившимся, если содержание углерода в металле по результатам анализов соответствует заданному, а содержание серы и фосфора минимально.

Раскисляют металл в два этапа: 1) в период кипения прекращают подачу руды в печь и раскисление происходит за счет углерода металла; 2) подавая в ванну раскислители (ферромарганец, ферросилиций и алюминий). Окончательно раскисляют алюминием и ферросилицием в ковше при выпуске стали из печи. После отбора контрольных проб плавку выпускают в сталеразливочный ковш через сталевыпускное отверстие в задней стенке. При выплавке легированных сталей легкоокисляющиеся легирующие элементы вводят в ванну после раскисления перед выпуском металла из печи.

Экономически оптимальными считаются мартеновские печи с ванной емкостью до 500—600 т. Широко применяются двухваннные мартеновские печи, позволяющие полнее использовать теплоту отходящих газов. В то время как в одной ванне протекают процессы, требующие большой затраты теплоты (завалка, прогрев, плавление), в другой происходит продувка кислородом и возникающий избыток теплоты с отходящими газами используется в первой ванне.

Производство стали в электропечах. Электроплавильные печи имеют преимущества по сравнению с другими плавильными агрега-

тами, так как можно быстро нагревать, плавить и точно регулировать температуру металла, создавать окислительную, восстановительную, нейтральную атмосферу или вакуум. В них можно выплавлять сталь и сплавы любого состава, более полно раскислить металл с образованием минимального количества продуктов раскисления — неметаллических включений. Поэтому электропечи используют для выплавки конструкционных сталей ответственного назначения, высоколегированных, инструментальных, коррозионно-стойких (нержавеющих) и других специальных сталей и сплавов.

В дуговых электросталеплавильных печах в качестве источника теплоты используют электрическую дугу, возникающую между электродами и металлической шихтой. Дуговая электросталеплавильная печь (рис. 1.7) питается трехфазным переменным током и имеет три цилиндрических электрода 9, изготовленных из графитированной массы.

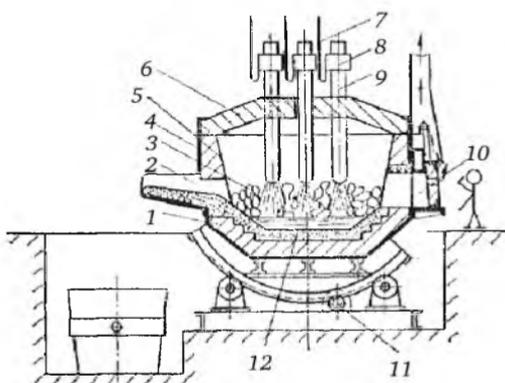


Рис. 1.7. Схема дуговой электрической плавильной печи:

- 1 — огнеупорный кирпич; 2 — желоб; 3 — кожух; 4 — шихта; 5 — стенка; 6 — свод; 7 — гибкий кабель; 8 — электрододержатель; 9 — электрод; 10 — окно; 11 — механизм для наклона; 12 — подина

Электрический ток от трансформатора гибкими кабелями 7 и медными шинами подводится к электрододержателям 8, а через них к электродам 9. Между электродами и металлической шихтой 4 возникает электрическая дуга, электроэнергия превращается в теплоту, которая передается металлу и шлаку излучением. Рабочее напряжение 180—600 В, сила тока 1—10 кА. Во время работы печи длина дуги регулируется автоматически путем вертикального перемещения электродов.

Печь имеет стальной сварной кожух 3, который изнутри футерован теплоизоляционным и огнеупорным кирпичом 1 (основным — магнезитовым, магнезитохромитовым или кислым — диносовым). Подина 12 печи набивается огнеупорной массой. Плавильное пространство ограничено стенками 5, подиной 12 и сводом 6, имеющим отверстия для прохода электродов. В стенках печи имеются рабочее окно 10 (для управления ходом плавки) и летка — для выпуска готовой стали по желобу 2 в ковш.

Печь загружают при снятом своде. Механизмом 11 ее можно наклонять в сторону загрузочного окна и летки. Емкость дуговых электропечей 0,5—400 т. В металлургических цехах обычно используют дуговые электропечи с основной футеровкой, а в литейных цехах — с кислой.

Технико-экономические показатели в печах зависят от емкости печи и технологии плавки. Расход электроэнергии на 1 т стали зависит от емкости печи — с увеличением емкости он уменьшается. Например, для печи емкостью 25 т он составляет 750 кВт·ч, а для печи емкостью 100 т — 575 кВт·ч. Расход графитированных электродов составляет 6—9 кг/т выплавленной стали.

Электроиндукционные печи. Индукционная тигельная сталеплавильная печь (рис. 1.8) состоит из водоохлаждаемого индуктора 3, внутри которого находится тигель 4 с металлической шихтой. Через индуктор проходит однофазный переменный ток повышенной частоты (500—1000 кГц). Ток создает переменный магнитный поток, который, пронизывая куски металла в тигле, наводит в них мощные вихревые токи (токи Фуко), нагревающие металл 1 до расплавления и необходимых температур перегрева. Тигель емкостью 60—25 т может быть изготовлен из кислых (кварцит) или основных (магнетитовый порошок) огнеупорных материалов. Для уменьшения потерь теплоты при плавке применяется съемный свод 2.

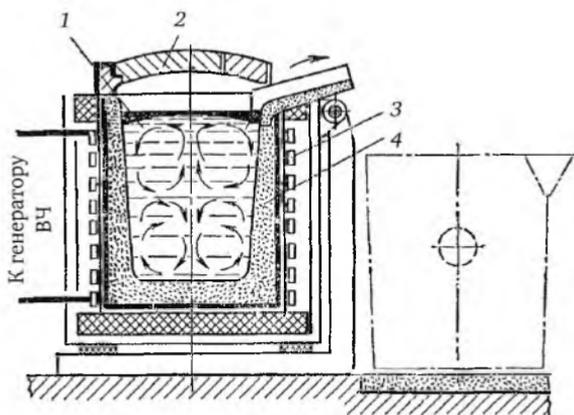


Рис. 1.8. Схема индукционной тигельной сталеплавильной печи:

1 — металл; 2 — съемный свод; 3 — водоохлаждаемый индуктор; 4 — тигель

Индукционные печи имеют преимущества перед дуговыми печами:

- в них отсутствует электрическая дуга, что позволяет выплавлять металлы с низким содержанием углерода, газов и малым угаром элементов; это особенно важно при выплавке высококачественных сталей и сплавов;

- при плавке в металле возникают электродинамические силы, которые перемешивают металл в печи и способствуют выравниванию химического состава, всплыванию неметаллических включений;

- индукционные печи имеют небольшие габаритные размеры, что позволяет помещать их в закрытые камеры, в которых можно создавать любую атмосферу, а также вакуум.

Однако эти печи имеют малую стойкость футеровки, шлак в них нагревается теплотой металла и его температура оказывается недостаточной для интенсивного протекания металлургических процессов между металлом и шлаком.

Обычно в индукционных печах выплавляют сталь и сплавы из легированных отходов методом переплава или из чистого шихтового железа и скрапа с добавкой ферросплавов методом сплавления. В большинстве случаев печи имеют кислую футеровку, основную же используют для выплавки сталей и сплавов с высоким содержанием марганца, никеля, титана и алюминия. Продолжительность плавки в индукционной печи емкостью 1 т около 45 мин. Расход электроэнергии на 1 т стали составляет 600—700 кВт·ч.

Вакуумная плавка в индукционных печах позволяет получать сталь и сплавы с очень малым содержанием газов и неметаллических включений, легировать сталь и сплавы любыми элементами. При вакуумной индукционной плавке индуктор с тиглем, дозатор шихты и изложницы помещают в вакуумные камеры, где плавят металлы, вводят легирующие добавки и раскислители с помощью специальных механизмов без нарушения вакуума. Металл в изложницы разливают в вакууме или инертных газах под избыточным давлением. Заливку под давлением инертного газа проводят для повышения плотности слитков.

1.3. Разливка стали

Выплавленную сталь выпускают из плавильной печи в разливочный ковш, из которого ее разливают в изложницы или кристаллизаторы установок для непрерывной разливки стали, где сталь затвердевает в слитки, которые затем подвергают прокатке или ковке.

Сталеразливочный ковш (рис. 1.9) имеет стальной сварной кожух 1, выложенный изнутри огнеупорным кирпичом 2. В дне ковша имеется керамический стакан 3 с отверстием 4 для выпуска стали. Отверстие 4 закрывается и открывается стопорным устройством со стальной штангой 6, на конце которой укреплен пробка 5 из огнеупорного материала. На штангу надеты трубки 7 из огнеупора, предохраняющие ее от расплавления жидкой сталью. Стопор поднимают и опускают (вручную или приводом с дистанционным управлением) рычажным механизмом 11. Ковш за две цапфы 8 поднимают краном. Емкость ковша выбирают в зависимости от емкости плавильной печи с учетом слоя шлака 9 (100—200 мм), предохраняющего зеркало металла 10 в ковше от охлаждения при разливке. Обычно емкость ковшей 5—260 т, для крупных плавильных агрегатов применяют ковши емкостью 350—480 т.

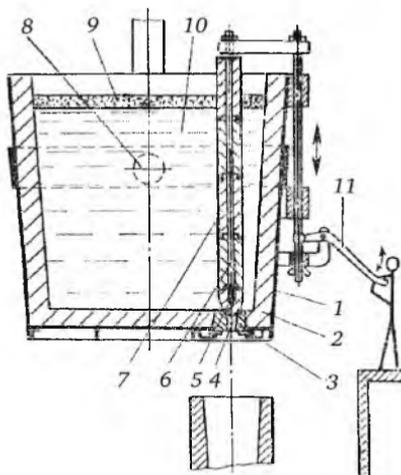


Рис. 1.9. Схема ковша для разливки стали:

1 — сварной кожух; 2 — огнеупорный кирпич; 3 — керамический стакан;
 4 — отверстие для выпуска стали; 5 — пробка; 6 — стальная штанга; 7 — трубка;
 8 — цапфа; 9 — шлак; 10 — зеркало металла; 11 — рычажный механизм

Изложницы — чугунные формы для изготовления слитков. Конфигурация изложниц характеризуется формой поперечного и продольного сечений и зависит от сорта заливаемой стали и назначения слитка. Их выполняют с квадратным (а), прямоугольным (б), круглым (в) и многогранным (г) поперечными сечениями (рис. 1.10). Слитки квадратного сечения прокатывают на сортовой прокат (двутавровые балки, швеллеры, уголки и т. д.); прямоугольного сечения с отношением ширины к толщине 1,5—3,0 — на лист; из слитков круглого сечения изготавливают трубы, колеса, многогранные используют для поковок.

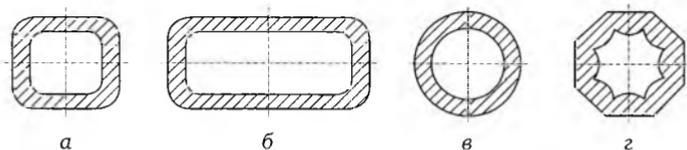


Рис. 1.10. Поперечные сечения изложниц для разливки стали в слитки:

а — квадратное; б — прямоугольное; в — круглое; г — многогранное

Для разливки спокойной стали применяют изложницы, расширяющиеся кверху, кипящей — книзу (рис. 1.11). Изложницы, расширяющиеся кверху, обычно имеют дно, а расширяющиеся книзу делают сквозными, без дна. Для предупреждения транскристаллизации дно квадратных и прямоугольных изложниц закруглено. Изложницы для разливки спокойной стали имеют прибыльные надставки 8, футерованные изнутри огнеупорной массой 9 с малой теплопроводностью. Сталь в них дольше находится в жидком состоянии и питает затвердевающий слиток металлом, благодаря чему уменьшается глубина усадочной

раковины, улучшается качество слитка, уменьшаются отходы при обрезке его головной части.

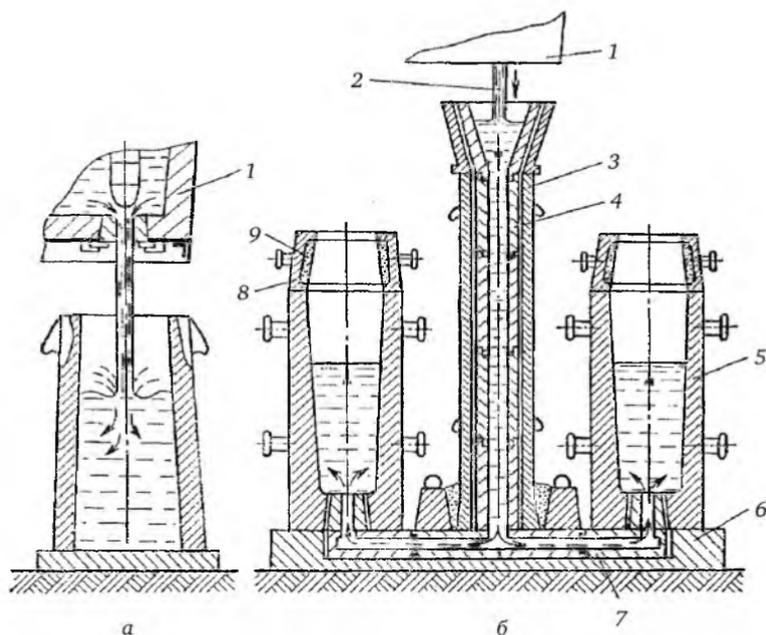


Рис. 1.11. Разливка стали в изложницы:

a — сверху; *б* — сифоном; 1 — ковш; 2 — жидкая сталь; 3 — литник; 4 — огнеупорная трубка; 5 — изложница; 6 — поддон; 7 — огнеупорный пустотельный кирпич; 8 — надставка; 9 — огнеупорная масса

Размеры изложниц зависят от массы слитка. Для прокатки отливают слитки массой 200 кг — 25 т; для поковок — до 250 т. Экономически более целесообразна разливка стали в крупные слитки, так как при этом сокращаются затраты на огнеупоры, потери металла, уменьшается продолжительность разливки. Однако масса слитка ограничивается мощностью прокатного оборудования и ухудшением его качества из-за неравномерности химического состава.

Способы разливки стали. Применяют три основных способа разливки стали: в изложницы сверху, в изложницы сифоном, на установках непрерывной разливки стали (УНРС).

В изложницы сверху (рис. 1.11, *a*) сталь заливают непосредственно из ковша 1. При этом исключается расход металла на литники, проста подготовка оборудования к разливке, температура заливаемой стали может быть ниже, чем при сифонной заливке. Однако при разливке сверху сталь падает в изложницу с большой высоты, брызги металла застывают на стенках и ухудшают поверхность слитка, образуя оксидные пленки (пленка, ж. — дефект поверхности металла или металлического изделия, выступающий в виде тонкой пленки или трещины). Они не свариваются с телом слитка даже при прокатке, после которой не-

обходимо зачищать поверхность заготовки для улучшения ее качества, что является очень трудоемкой операцией.

Сифонная разливка основана на принципе сообщающихся сосудов: жидкая сталь 2 из ковша 1 поступает в центральной литник и через каналы заполняет изложницы 5 снизу (рис. 1.11, б). При этом способе сталью заполняют одновременно несколько изложниц (до 60 шт.). Их устанавливают на поддоне 6, в центре которого находится центральной литник 3, футерованный огнеупорными трубками 4, соединенный каналами, выполненными из огнеупорных пустотелых кирпичей 7, с нижними частями изложниц.

Этот способ обеспечивает плавное, без разбрызгивания заполнение изложниц, поверхность слитка получается чистой, сокращается продолжительность разливки, можно разливать большую массу металла одновременно на несколько мелких слитков. Однако повышается трудоемкость подготовки оборудования, увеличивается расход огнеупоров, появляется необходимость в расходе металла на литники (до 1,5 % от массы заливаемой стали), перегреве его в печи до более высокой температуры, так как при течении по каналам он охлаждается.

Один из путей снижения технологических отходов — применение *непрерывной разливки стали*. Этот способ состоит в том, что жидкая сталь непосредственно из ковша или через промежуточное разливочное устройство непрерывно заливается в водоохлаждаемую форму, называемую кристаллизатором. Перед началом разливки в него вводят специальное устройство с замковым захватом (затравку) как дно для первых порций металла. После затвердевания металла затравка при помощи тянущих механизмов вытягивается из кристаллизатора, увлекая за собой формирующийся слиток. Поступление жидкого металла продолжается, и слиток непрерывно наращивается.

В кристаллизаторе затвердевают лишь поверхностные слои металла, образуя твердую оболочку слитка, имеющего жидкую фазу по центральной оси, поэтому за ним расположена зона вторичного охлаждения, называемая также второй зоной кристаллизации. В ней в результате форсированного поверхностного охлаждения того или иного вида заготовка затвердевает по всему сечению. Этот процесс позволяет получать слитки неограниченной длины. По сравнению с разливкой в изложницы резко уменьшаются потери металла на обрезку концов слитков, которые, например, при литье спокойной стали составляют 15—25 %. Кроме того, благодаря непрерывности литья и кристаллизации достигается полная равномерность структуры слитка по всей его длине.

Для осуществления процесса непрерывного литья или разливки стали сначала применялись машины вертикального типа (рис. 1.12, а), в которых формирование слитка и его резка происходили на вертикальном участке. Высота таких машин могла превышать 40 м, поэтому их размещение требовало сооружения башен или колодцев. Стремление уменьшить высоту привело к созданию машин радиального типа (рис. 1.12, б). В них кристаллизатор и зона вторичного охлаждения рас-

положены по дуге определенного радиуса (обычно радиус равен 30—40 толщинам слитка). В конце радиального участка слиток проходит через тянущие ролики и выводится в горизонтальное положение, в котором проводится его резка. На горизонтальный участок выходит не полностью затвердевший слиток, что позволяет значительно повысить скорость литья при крупных сечениях слитка, так как участок резки может быть расположен на достаточно большом расстоянии от кристаллизатора (30—35 м). Высота таких машин, как правило, не превышает 12 м.

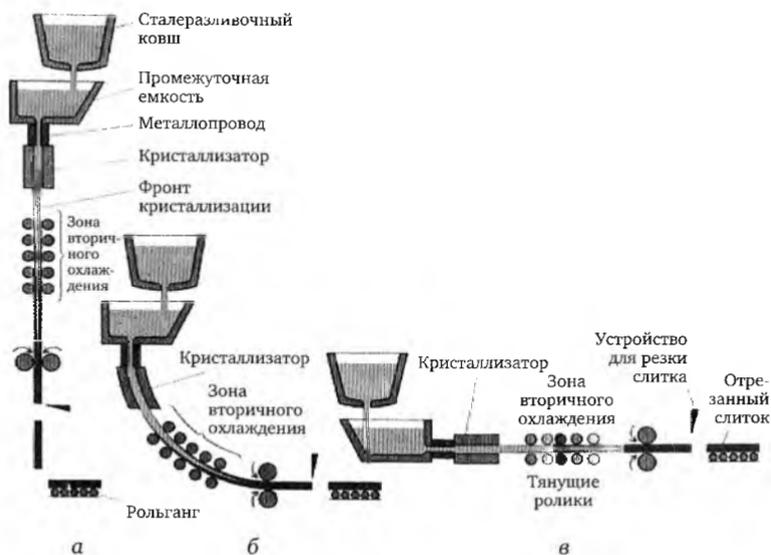


Рис. 1.12. Схемы установок для непрерывной разливки стали (УНРС):

а — вертикального типа; б — радиального типа; в — горизонтального типа

Следующим достижением в развитии непрерывно-литейного производства стало создание машин горизонтального типа (рис. 1.12, в). Они имеют высоту не более 8 м и могут быть установлены не только на металлургических предприятиях, но и на машиностроительных.

1.4. Способы повышения качества металла

Развитие специальных отраслей машиностроения и приборостроения предъявляет жесткие требования к качеству металла: прочности, пластичности, газосодержанию, анизотропии механических свойств, которые не удастся достигнуть в обычных плавильных агрегатах. Улучшить эти показатели можно уменьшением содержания неметаллических включений, газов, вредных примесей. Для этого разработаны технологические процессы: обработка металла синтетическим шлаком, электрошлаковый переплав (ЭШП), вакуумирование металла при разливке, плавка в вакуумных печах, вакуумно-дуговой переплав (ВДП),

вакуумно-индукционный переплав (ВИП), переплав металла в электронно-лучевых и плазменных печах.

Обработка металла синтетическим шлаком. Сущность процесса заключается в ускорении взаимодействия между сталью и шлаком за счет интенсивного их перемешивания при заполнении сталью ковша. Синтетический шлак, состоящий из 55 % CaO, 40 % Al₂O₃, небольших количеств SiO₂, MgO и минимума FeO, выплавляют в специальной электропечи и заливают в ковш. В этот же ковш затем заливают с некоторой высоты (обычно из электропечи) сталь. В результате их перемешивания поверхность взаимодействия резко возрастает и металлургические реакции между металлом и шлаком протекают в сотни раз быстрее, чем в обычной плавильной печи. Сталь, обработанная таким способом, содержит меньше серы, кислорода и неметаллических включений, поэтому улучшаются ее пластические и прочностные характеристики.

Вакуумная дегазация стали. Этот способ относится к *внепечным* способам обработки, осуществляемым в ковше или изложнице (вакуумирование стали в ковше, при переливе из ковша в ковш, при заливке в изложницу и др.). Его проводят для уменьшения содержания растворенных газов и неметаллических включений сталей, выплавляемых в мартеновских и электропечах. Сущность процесса заключается в снижении растворимости в жидкой стали газов при понижении давления *над зеркалом металла*, благодаря чему газы выделяются из металла, что приводит к улучшению его качества.

Электрошлаковый переплав (ЭШП). Ему подвергают выплавленный в электродуговой печи и прокатанный на круглые прутки металл. Источником тепла при ЭШП является шлаковая ванна, нагреваемая за счет прохождения через нее электрического тока (рис. 1.13). Ток подводят к переплавляемому электроду, погруженному в шлаковую ванну, и к поддону, установленному внизу в водоохлаждаемой металлической изложнице (кристаллизаторе), в которой находится шлак. Выделяющаяся в шлаковой ванне теплота нагревает ее до 1700 °С и более и вызывает оплавление конца электрода. Капли жидкого металла проходят через шлак и собираются, образуя под шлаковым слоем металлическую ванну.

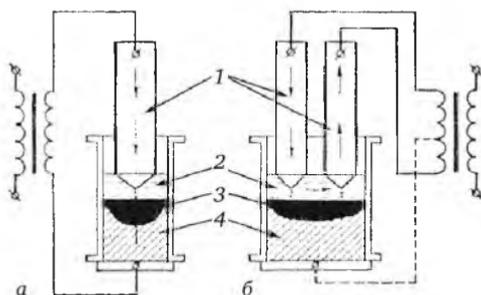


Рис. 1.13. Схема электрошлакового переплава с одним (а) и двумя (б) расходными электродами:
1 — расходный электрод; 2 — шлаковая ванна; 3 — металлическая ванна;
4 — слиток

Перенос капель металла через шлак, их интенсивное перемешивание способствуют активному взаимодействию, в результате чего происходит удаление из металла неметаллических включений и растворенных газов. Металлическая ванна, непрерывно пополняемая за счет расплавления электрода, под воздействием водоохлаждаемого кристаллизатора постепенно формируется в слиток. После полного застывания слитка опускают поддон и извлекают его из кристаллизатора. Слитки выплавляют круглого, квадратного, прямоугольного сечений массой до 40 т. Они отличаются большой плотностью, однородностью, их поверхность — хорошим качеством. Все это обуславливает высокие механические и эксплуатационные свойства сталей и сплавов электрошлакового переплава.

Вакуумно-дуговой переплав (ВДП) осуществляется в вакуумных дуговых печах (емкость — до 50 т) с расходующимися электродами для удаления из металла вредных примесей и неметаллических включений, а также получения необходимой литой структуры. Сущность процесса заключается в снижении растворимости газов в стали при снижении давления (создании вакуума), устранении взаимодействия ее с огнеупорными материалами футеровки печи, так как процесс осуществляется в водоохлаждаемых медных изложницах, и направленной кристаллизации металла. Слитки, полученные в вакуумных дуговых печах, содержат очень небольшое количество газов, неметаллических включений, отличаются высокой равномерностью химического состава, имеют плотную макроструктуру, поэтому металл, полученный ВДП, отличается повышенными механическими свойствами и пластичностью. Из слитков ВДП изготавливают ответственные детали турбин, двигателей, авиационных конструкций.

Плавка в электронно-лучевых печах. Таким способом выплавляют жаропрочные сплавы и специальные стали, а также чистые тугоплавкие металлы (молибден, ниобий, цирконий и др.). Нагрев, плавление и перегрев металла в этих печах (рис. 1.14) происходят за счет энергии, выделяющейся при резком торможении свободных электронов, пучок которых направлен на металл. Получение электронов, их разгон, концентрация в луч и направление луча 2 в зону плавления осуществляют электронной пушкой 1.

Плавка происходит в вакуумных камерах при остаточном давлении около 0,1 мПа, плавление металла 3 и его затвердевание — в водоохлаждаемых кристаллизаторах 4. Низкие остаточные давления воздуха внутри печи, большой перегрев и высокие скорости охлаждения слитка способствуют удалению газов и примесей, получению металла 5 высокого качества. Однако процесс электронно-лучевой плавки требует дорогостоящего и сложного оборудования. Кроме того, при переплаве шихты, содержащей *легкоиспаряющиеся* элементы, изменяется химический состав металла. Обычно электронно-лучевые печи имеют небольшую емкость, однако есть оборудование для выплавки слитков массой до 15 т.

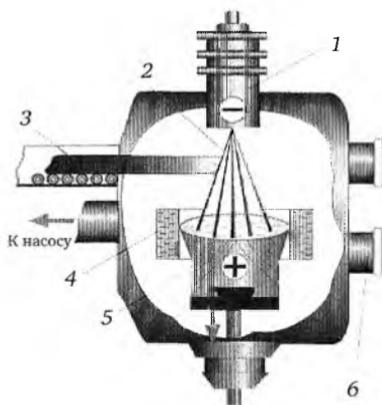


Рис. 1.14. Схема выплавки стали в электронно-лучевой печи:

- 1 — электронная пушка; 2 — электронные лучи; 3 — расплавляемый металл;
4 — кристаллизатор; 5 — наплавляемый слиток; 6 — смотровое окно

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите исходные положения современной металлургии.
2. Назовите основную продукцию черной металлургии.
3. Опишите материалы для производства металлов и сплавов (руда, флюсы, топливо и огнеупорные материалы).
4. Расскажите о производстве чугуна.
5. Расскажите о подготовке руд к доменной плавке.
6. Какие есть способы производства стали?
7. Назовите способы разлива стали.
8. Расскажите о способах повышения качества металла.

Глава 2

СТРУКТУРА МЕТАЛЛОВ И МЕТОДЫ ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Излом

Самым простым и доступным методом оценки внутреннего строения металлов является наблюдение вида излома, связывающего внутреннюю структуру металла с его качеством. Еще в 1722 г. Р. Реомюр (Франция), исследуя под микроскопом изломы стали и ковкого чугуна, сделал предположение, что разница между железом, сталью и чугуном заключается в основном в содержании углерода.

Аморфное тело, не имеющее кристаллического строения, (стекло, канифоль, эбонит, целлулоид), дает на изломе кривые поверхности (рис. 2.1, а). Вещество, состоящее из кристаллических зерен (мрамор, сталь, литое железо и другие металлы), дает зернистый или кристаллический излом, представляющий собой плоскости скалывания отдельных зерен (рис. 2.1, б). Поэтому при зернистом изломе можно наблюдать зерно излома, которое дает представление о внутреннем кристаллическом строении металла (рис. 2.2).

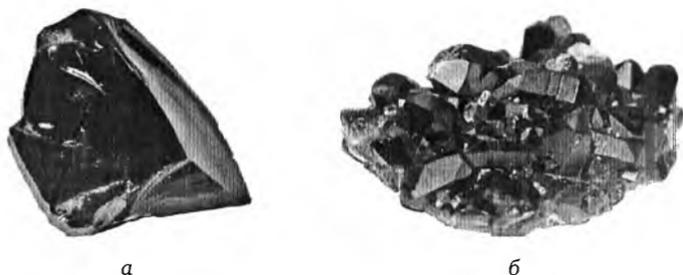


Рис. 2.1. Виды излома:

а — аморфный, стекловидный излом вулканического стекла (оксид кремния SiO_2 без кристаллической структуры); б — кристаллический излом друзы мориона (черный или темно-бурый кварц (SiO_2), иногда называемый черным хрусталем)

Зерна металла называют *кристаллитами*, чтобы отличать их от кристаллов, которые имеют правильную огранку, состоящую из закономерно расположенных в пространстве геометрически правильных

плоскостей. Поверхность (или границы) зерен металлов обыкновенно случайна и неправильна, но внутреннее их строение всегда оказывается кристаллическим.

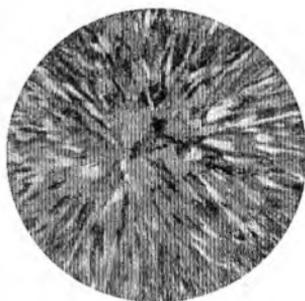


Рис. 2.2. Мелкие кристаллики, видимые на изломе металла

Хрупкие кристаллические изломы подразделяют на изломы *межкристаллические*, т. е. проходящие между кристаллитами (по их границам) и *транскристаллические*, т. е. пересекающие кристаллиты. Отличить межкристаллический излом от транскристаллического достаточно трудно, в особенности при малых размерах кристаллитов.

Если излому предшествует пластическая деформация металла, искажающая действительную форму зерна, то такой излом называют *волокнистым* (рис. 2.3). При волокнистом изломе структура металла (по форме зерна) не обнаруживается.

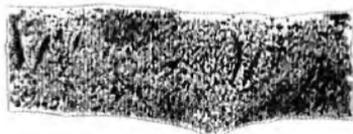


Рис. 2.3. Структура волокнистого излома гомогенной брони, имеющей по всему сечению одинаковый химический состав и одинаковые механические свойства

Описание поверхности металлических изломов с целью анализа причин и протекания процесса разрушения называется *фрактографией* (от лат. *fractus* — излом и ...графия). Фрактографическое исследование проводят невооруженным глазом, с помощью лупы, оптического или электронного микроскопа. В просвечивающем электронном микроскопе изучают отпечаток (реплику) с поверхности излома, оттененный слоем металла, в растровом (сканирующем) электронном микроскопе — саму поверхность разрушения. Вид излома зависит от способа нагружения (статическое, ударное, переменное) и условий нагружения (температура, среда и т. п.), а также от характера распространения трещины (внутризеренный или межзеренный излом) и от степени развития пластической деформации при разрушении (хрупкий или вязкий излом).

Например, изучая излом стали, можно видеть, что размеры ее зерен могут колебаться в широких пределах: от нескольких сантиметров — в литой и медленно остывшей болванке, до тысячных долей миллиметра — в кованом и правильно закаленном бруске. В большинстве случаев мелкозернистый вид излома отвечает лучшему качеству — более высоким механическим свойствам (рис. 2.4). На рис. 2.5 показан излом преимущественно зернистого строения штампованной детали из алюминиевого сплава АК4-1Т1, свидетельствующий о наличии перекоса, приведшего к увеличению нагрузки. Макроскопически наблюдаются две зоны: длительного развития трещины (стрелка 1) и долома (стрелка 2).

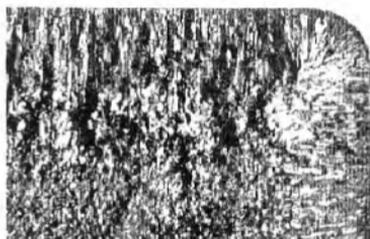


Рис. 2.4. Излом 1500-килограммового слитка самозакаливающейся хромоникелевой стали в литом состоянии, показывающий все три зоны кристаллизации ($\times 2$): мелкозернистую, столбчатую и равномерных кристаллов

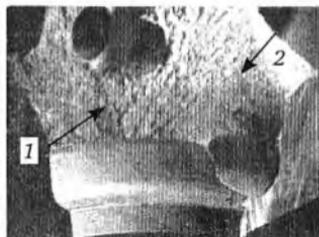


Рис. 2.5. Разрушение детали из сплава АК4-1Т1 при длительном статическом нагружении, $\times 8$

2.2. Макроструктура металлов

Другим способом исследования строения металла и его дефектов является так называемое макроскопическое травление. Образец металла разрезают, шлифуют для создания ровной поверхности, на которой можно обнаружить невооруженным глазом или при небольшом (до 10 раз) увеличении отдельные дефекты металла: пузыри, пустоты, трещины и крупные шлаковые включения.

В результате травления поверхности кислотами (серной, азотной, соляной, пикриновой, хромистой или их смесями) или же специальными реактивами обнаруживают кристаллическую структуру, возникшую в процессе кристаллизации, неоднородность металла (сегрегацию) и создающуюся в металле при обработке давлением волокнистую структуру.

ру. Ввиду важности направления волокон для технической прочности изделия (рис. 2.6) этот способ получил широкое применение для совершенствования технологий процессовковки и штамповки специальных изделий (коленчатых валов, шестерен и пр.).

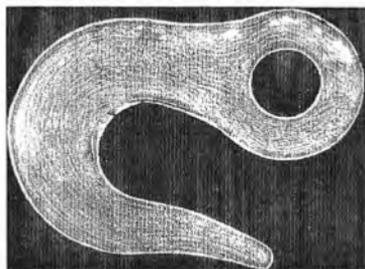


Рис. 2.6. Сечение через плоскость симметрии соединительного крюка железнодорожного вагона. Химическое травление выявило волокнистую структуру, повторяющую форму крюка

Другим очень распространенным способом исследования неоднородности стали является отпечаток по способу Баумана. Способ этот состоит в том, что на шлифованную поверхность образца накладывают бромосеребряную фотографическую бумагу, предварительно смоченную слабой серной кислотой. Вследствие реакции между H_2SO_4 и включениями сернистого марганца образуется газ сероводород (H_2S), реагирующий с бромистым серебром фотобумаги, которое он переводит в черное сернистое серебро. В результате на фотобумаге получается точный отпечаток распределения серы в стали (рис. 2.7).

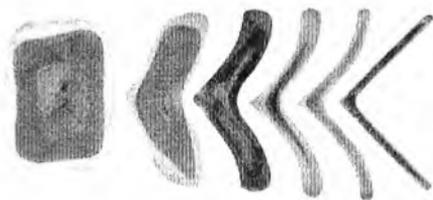


Рис. 2.7. Последовательные стадии прокатки углового железа от заготовки до готового изделия. Видны ликвации различных форм, деформированные прокаткой с различной степенью обжатия. Зоны ликвации соприкасаются с внутренним углом профиля

Для исследования структуры при более сильных увеличениях, а также для более детального изучения различных структурных элементов металла в металлографии применяется исследование полированной поверхности металла.

2.3. Микроструктура металлов

Одно из главных мест в металловедении занимает микроскопический метод исследования структуры металлов и сплавов. Сущность ме-

тогда заключается, как показывает название, в изучении структуры металлов под микроскопом при увеличении обычно от 50 до 2000 раз. Микроскопическое исследование структуры металлов и сплавов производится на специально приготавливаемых микрошлифах, т. е. на тщательно отшлифованной плоской поверхности исследуемого участка образца.

Микроскопы, применяемые при исследовании металлов, отличаются от биологических или медицинских микроскопов способом освещения объекта. В биологии исследуют тонкие прозрачные препараты, поэтому в биологических микроскопах для освещения используются лучи, проходящие через исследуемый объект. При исследовании металлов, являющихся непрозрачными телами, используется свет, отраженный от плоскости рассматриваемого шлифа. Рассматривая в такой микроскоп плоский, зеркально отполированный микрошлиф, видим ровную блестящую поверхность без каких-либо признаков внутренней структуры. Железо и сталь, никель и платина будут выглядеть совершенно одинаково. Взяв медь или золото, мы, конечно, заметим разницу окраски, но это видно и без микроскопа и, очевидно, не в этом цель микроскопического метода.

Для выявления структуры металла достаточно обработать поверхность микрошлифа кратковременным воздействием слабого раствора кислоты (азотной, пикриновой, соляной и др.) — и на протравленном шлифе становится отчетливо видимой структура металла. Действие кислоты заключается в том, что она по-разному растворяет микрочастицы металла, если металл неоднороден по своему строению, как неоднородны бывают минералы и горные породы. В результате этого зеркальная поверхность микрошлифа приобретает рельеф, выступающие над поверхностью частицы отбрасывают от себя тени и становятся отчетливо видимыми, так как освещение поверхности микрошлифа никогда не бывает строго вертикальным. Кроме того, поверхность протравленного кислотой металла хуже отражает свет (становится менее блестящей), что еще более увеличивает контраст между выступающими частицами и основным фоном (рис. 2.8).

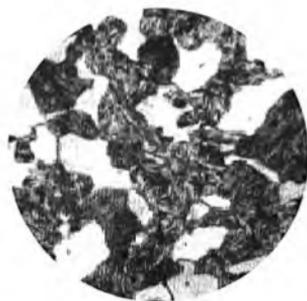


Рис. 2.8. Сталь 45 (0,45 масс. % С). Неполная закалка. Сохраняется избыточный феррит (светлые включения), существовавший перед началом охлаждения, и наблюдается образовавшийся при закалке мартенсит (матрица) с небольшим количеством остаточного аустенита между его иглами, $\times 100$

При травлении образца, состоящего из однородных кристаллических зерен, например чистого металла, однородного твердого раствора (см. гл. 4) или чистого химического соединения двух металлов, наблюдаются поверхности различно протравленных зерен и границы зерен в форме тонкой темной сетки (рис. 2.9). Первое объясняется тем, что поверхность шлифа пересекает по-разному ориентированные в пространстве кристаллические зерна металла (по различным кристаллографическим направлениям), поэтому и степень воздействия кислоты на них различна: одни зерна остаются совершенно нетронутыми, блестящими, другие сильно протравливаются, темнеют, сильнее рассеивая свет. Второе — вытравливание границ — объясняется тем, что физическая природа границ двух соседних зерен, т. е. поверхность их стыка, иная, чем природа самого кристалла.

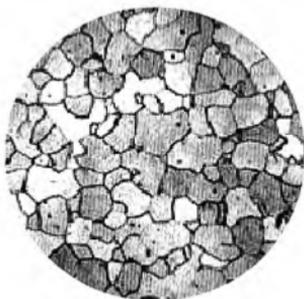


Рис. 2.9. Равноосные зерна феррита в техническом железе. Темные пятна — дефекты полировки («грязь»), $\times 100$

Оригинальным способом определения разнообразных структурных элементов металла служат так называемые цвета побежалости, появляющиеся на полированной поверхности металла при нагреве.

Приведенная в табл. 2.1 градация цветов относится только к очень короткому нагреву; при более длительном нагреве можно получить последовательно всю гамму цветов при какой-либо одной температуре; например при 230 °С после 15 мин — темно-желтый, более 30 мин — коричнево-красный, более 45 мин — темно-синий.

Таблица 2.1

Температуры нагрева и соответствующие им цвета побежалости

| Температура нагрева, °С | Цвет побежалости | Температура нагрева, °С | Цвет побежалости |
|-------------------------|------------------|-------------------------|-------------------|
| 220 | Светло-желтый | 265 | Коричнево-красный |
| 230 | Желтый | 285 | Фиолетовый |
| 240 | Темно-желтый | 300 | Темно-синий |
| 255 | Коричневый | 330 | Серый |

Иногда приходится прибегать к особым средствам, чтобы выделить ту или иную структурную составляющую. Например, в стали твердый цементит от мягкого феррита можно легко отличить под микроскопом, сделав предварительно отпечатки алмазной пирамидкой, вдавливающейся в образец под определенной нагрузкой. В мягких участках получается отпечаток, значительно больший по размерам, чем на твердом цементите (рис. 2.10).

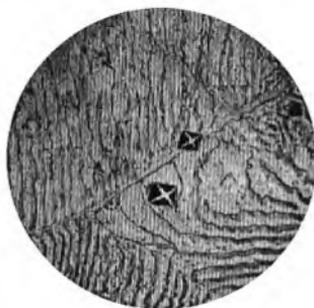


Рис. 2.10. Отпечатки, полученные с помощью прибора для измерения микротвердости, характеризующие более высокую твердость цементита в стали, $\times 700$

Применение микроскопа к изучению металлов позволило получить представление об их строении, что и легло в основу науки о структуре и свойствах металлов — металлографии. С 1920-х гг., когда был введен термин «металловедение», термин «металлография» характеризует только учение о макро- и микроструктуре металлов и сплавов.

Первым исследователем, применившим микроскопическое изучение полированной и протравленной поверхности металлических изделий для оценки их качества, был горный инженер Павел Петрович Аносов, работавший в 1840-х гг. в Златоусте на Урале над возрождением утраченного способа изготовления булатных клинков, родиной которых являются Персия и Индия. Эти клинки славятся не только своими замечательными механическими качествами (сочетание высокой твердости и упругости), но и красивым узором на поверхности (рис. 2.11), который не гравировался снаружи, а был непосредственным проявлением внутреннего строения материала — после полировки и травления узор на клинке восстанавливается.

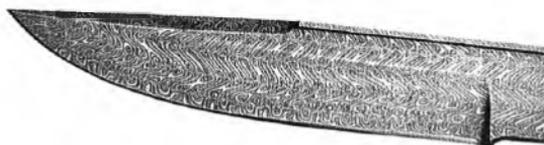


Рис. 2.11. Булатная сталь, благодаря особому способу изготовления отличается своеобразной структурой и видом («узором») поверхности, высокой твердостью и упругостью. Узорчатость булатной стали связана с особенностями выплавки и кристаллизации

Специалисты оценивали качество клинков по характеру узора. Аносов в своих опытах по изготовлению булатных клинков также сопоставлял качество клинков с характером узора, выявлявшегося на их поверхности после шлифовки и травления. Это исторически первый, сохранившийся в научной литературе, пример металлографического исследования.

Однако металловедческие работы П. П. Аносова не получили соответствующего развития. Уже в наше время златоустовские металлурги попытались воспроизвести технологию производства булата, но легендарной упругости клинков достичь не удалось.

Применение микроскопа для исследования металлов широко используется только с 1870-х гг. Общеизвестно, что микроскопическую металлографию основали независимо трое ученых: П. П. Аносов (Россия), Г. Сорби (Англия) и А. Мартенс (Германия). При этом Сорби и Мартенс уже в первых своих работах описывали технику приготовления шлифов (шлифование, полирование, травление) и фиксировали изображения структур не только с помощью рисунка, но и на фотографиях. В России первая металлографическая лаборатория была организована в 1895 г. А. А. Ржешотарским на Обуховском заводе в Петербурге.

Однако применение микроскопа ограничено физической природой света и законами его отражения. Глаз может видеть предметы только с помощью отраженных лучей света, и условием «видимости» является способность предмета отражать световые лучи. Но эта способность ограничена некоторыми предельными размерами предмета, определяемыми длиной световой волны.

Разрешающая способность оптического микроскопа, т. е. минимально различимая величина объекта (детали структуры), не превышает 0,2 мкм (2000 Å)¹. Применение больших увеличений бесполезно, так как меняется только масштаб изображения, а разрешающая способность, определяемая волновой природой света, не меняется.

Применение электронных микроскопов, использующих электронные лучи с длиной волны 4—12 нм, дает возможность различать детали изучаемого объекта размерами до 20—50 нм, т. е. подробно изучать тонкую структуру (субструктуру) металла. Одно из наиболее важных достижений электронной микроскопии — возможность прямого наблюдения дефектов кристаллической структуры.

Рентгеноструктурный анализ. В 1912 г. немецкими физиками М. Лауэ, В. Фридрихом и П. Книппингом была открыта дифракция рентгеновских лучей на кристаллах. Направив узкий пучок рентгеновских лучей на неподвижный кристалл, они зарегистрировали на помещенной за кристаллом фотопластинке дифракционную картину, которая состояла из большого числа закономерно расположенных пятен. Каждое пятно — след дифракционного луча, рассеянного кристаллом.

¹ Ангстрем, единица длины, равная десятиллиардной доле метра. Обозначается Å. $\text{Å} = 10^{-10} \text{ м} = 10^{-8} \text{ см} = 0,1 \text{ нм}$. Применяется главным образом в оптике, атомной и молекулярной физике. Название «ангстрем» дано по имени шведского физика А. Й. Ангстрема, который первый ввел ангстрем в употребление в 1968 г.

Разработанная Лауэ теория дифракции рентгеновских лучей на кристаллах позволила связать длину волны излучения и присущее веществу в кристаллическом состоянии правильное расположение атомов (ионов, молекул), характеризующееся периодической повторяемостью в трех измерениях — параметрами элементарной ячейки кристаллической решетки a , b , c .

2.4. Внутреннее строение кристаллических тел

Классификация твердых тел. Назначение материала определяется требованиями конструкции (конструкционные критерии — прочность, долговечность, коррозионные свойства и т. п.) и возможностью переработки в изделие резанием, сваркой, обработкой давлением и т. п. Чтобы получить материал с заданным набором свойств, необходимо создать его внутреннюю структуру (взаимное расположение атомов, форму и местонахождение образовавшихся фаз), обеспечивающую эти свойства.

В Периодической системе элементов Д. И. Менделеева 76 элементов являются металлами, обладающими рядом характерных свойств из-за особенностей их атомного строения (табл. 2.2):

- металлический блеск, отражательная способность;
- термоэлектронная эмиссия;
- высокая тепло- и электропроводность;
- повышенная способность пластического деформирования;
- положительный температурный коэффициент электросопротивления.

Межатомные связи в металлах, сплавах и металлических соединениях определяются взаимодействием электронов внешних оболочек атома. Значениям энергии электрона, находящегося в стационарных состояниях свободного атома, соответствует система квантовых чисел n , l , m_l , m_s :

- главное квантовое число $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, \dots$, определяющее энергию электрона, может принимать только целочисленные положительные значения и с увеличением n энергия уменьшается;
- орбитальное квантовое число $l = n - 1$ (т. е. 0, 1, 2, 3, 4, ...) указывает значение орбитального момента количества движения электрона M ;
- магнитное квантовое число $m_l = 2l + 1$ определяет величину проекции орбитального момента количества движения электрона на заданное направление M_z и проекцию магнитного момента электрона на направление слабого внешнего магнитного поля;
- квантовое число m_s определяет значение проекции спина электрона на заданное направление. Спин электрона может быть равен $-1/2$ или $+1/2$ (в единицах h — $h/2n$).

Оболочки атомов, образуемые совокупностью электронов, обладающих одинаковыми главными квантовыми числами, обозначаются буквами K ($n = 1$), L ($n = 2$), M ($n = 3$), N ($n = 4$), O ($n = 5$), P ($n = 6$), Q ($n = 7$). Главное квантовое число n определяет номер оболочки, которую занимает электрон, и ставится перед буквой, указывающей значение орбитального квантового числа l ; орбитальные квантовые числа $0, 1, 2, 3, 4, 5, \dots$ обозначаются $s, p, d, f, g, h, i, k, \dots$. Совокупность электронов с одинаковым значением числа l представляет подгруппу данной оболочки. Над этими буквами указывается число электронов, занимающих данный энергетический уровень. Так, электронная конфигурация $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^1$ выражает распределение по оболочкам и подгруппам 13 электронов свободного атома Al.

Электроны в свободном невозбужденном атоме, имеющем минимальную свободную энергию, занимают самые низкие энергетические уровни. Согласно принципу Паули каждое квантовое состояние электрона в атоме, определяемое совокупностью четырех квантовых чисел, может быть занято только одним электроном, поэтому максимальное общее число электронов, которое может находиться на данной оболочке, $N_n = 2n^2$.

С возрастанием главного квантового числа n энергия электрона в центральном кулоновском поле водородоподобного атома уменьшается, поэтому в соответствии с принципом минимума энергии при возрастании атомного номера электроны сначала будут заполнять оболочку K , затем оболочку L и т. д. Таким образом, оболочки K, L, M, N, O, P, Q и подгруппы каждой оболочки должны заполняться последовательно. Это означает заполнение уровней в последовательности s, p, d, f, g, h, i, k .

Как показало изучение атомных спектров, заполнение подоболочек происходит согласно правилам Гунда: сначала заполняется половина оболочки неспаренными электронами, а при заполнении второй ее половины последующие электроны образуют пары с антипараллельными спиновыми моментами. Поэтому определенную устойчивость проявляют не только заполненные электронные оболочки и подгруппы s^2, p^6, d^{10} и f^{14}, g^{18} , но и наполовину заполненные конфигурации p^3, d^5 и f^7, g^9 .

Последовательность заполнения оболочек $1s^2$ и $2s^2 2p^6$ наглядно может быть показана векторными схемами, на которых электроны обозначены стрелками. На рис. 2.12 слева изображено заполнение ячеек на плоскости, отвечающее атому во внешнем магнитном поле, а справа приведены пространственные векторные модели свободных атомов, соответствующие представлениям об *электронных орбиталях*. Спины электронов расположены по осям прямоугольных координат.

В реальных атомах для легких элементов с малым числом электронов и слабым взаимодействием между ними заполнение оболочек происходит без отклонений от идеальной схемы. Сначала от водорода к гелию заполняется оболочка $1s^2$. Второй период начинается с лития ($1s^2 2s^1$) и бериллия ($1s^2 2s^2$), у которых заполняется подгруппа $2s^2$. За-

тем появляется первый электрон на $2p$ -уровне у бора ($1s^2 2s^2 2p^1$) и происходит постепенное заполнение оболочки $2s^2 2p^6$ у углерода ($2s^2 2p^2$), азота ($2s^2 2p^3$), кислорода ($2s^2 2p^4$), фтора ($2s^2 2p^5$) и неона ($2s^2 2p^6$).

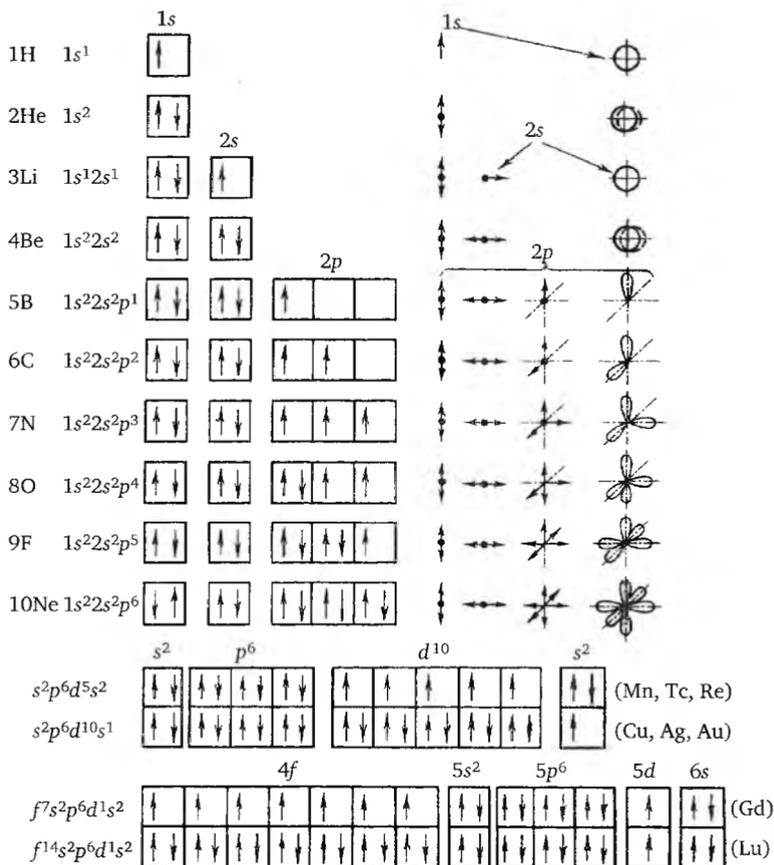


Рис. 2.12. Распределение s -, p -, d -, f -электронов по энергетическим уровням свободного атома

Третий период начинается с натрия ($1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$), у которого появляется один электрон на $3s$ -уровне над заполненной оболочкой неона. Далее от магния до аргона происходит заполнение третьей оболочки ($3s^2$, $3p^6$) по той же схеме, что и заполнение второй оболочки. Только при переходе к меди ($3d^{10} 4s^1$) и цинку ($3d^{10} 4s^2$) уровень $3d$ оказывается заполненным (см. рис. 2.12). Далее от галлия до криптона заполняется оболочка $4p^6$ у шести неметаллических элементов. Вследствие такой последовательности заполнения оболочек 18 элементов оказываются не в третьем, а в четвертом периоде.

В пятом периоде энергетически выгодным также оказывается заполнение $5s$ -уровня у рубидия и стронция, а затем уже у переходных металлов от иттрия до палладия достраивается более глубокий $4d$ -уровень предшествующей оболочки. Причем у этих элементов также

один или два электрона располагаются над незаполненной оболочкой $4d$ на уровне $5s$, и только палладий имеет конфигурацию $4d^{10}$. Затем у серебра и кадмия достраивается уровень $5s^2$, а далее заполняется более высокий уровень $5p^6$ у неметаллических элементов от индия до ксенона. Вследствие этого в пятом периоде, как и в четвертом, оказывается 18 элементов, а уровень $4f$ остается вакантным.

В шестом периоде после заполнения $6s$ -оболочки у цезия и бария и появления первого электрона на $5d$ -оболочке у лантана начинается застройка более глубокой $4f^{10}$ -оболочки и после ее заполнения оказывается 32 элемента.

В седьмом периоде после заполнения $7s^2$ -оболочки у франция — радия и появления первого $6d$ -электрона у актиния начиная с тория и протактиния происходит заполнение более глубокой $5f$ -оболочки, заканчивающееся у менделевия. Далее заполняется $7s$ -уровень.

Таким образом, каждый период Периодической системы элементов Менделеева начинается со щелочного металла и заканчивается благородным газом, чему отвечает заполнение s^2 -, p^6 -, d^{10} -, f^{14} -оболочек и возрастание числа элементов в периодах в последовательности: 2, 8, 18, 18, 32, 32.

Межатомные связи в металлах. Периодическая система Менделеева отражает основное состояние элементов, находящихся в виде свободных атомов с невозмущенными электронными оболочками при давлении $p = 0$ и температуре $T = 0$ К, от которого практически мало отличаются состояния элементов при нормальных давлениях ($p = 1$ атм) и температурах до 2000—3000 К. Поэтому она так точно определяет физико-химические свойства и поведение элементов при обычных химических реакциях. Если бы номер в Периодической системе совпадал с главным квантовым числом n , число элементов в периоде отвечало бы формуле $N_n = 2n^2$, а заполнение подуровней в оболочке шло в соответствии с выражением $N_l = 2(2l + 1)$ последовательно, без всяких нарушений, то свойства тяжелых элементов ($Z \geq 47$) в ней были бы совершенно непохожи на свойства тех же элементов в обычных условиях, т. е. были бы *вырождены*.

На рис. 2.13 показаны зависимости сил притяжения и отталкивания, действующих на один атом, от расстояния между атомами в кристаллической решетке твердого тела. При больших межатомных расстояниях потенциальная энергия условно принимается равной нулю, поскольку в этих условиях атомы не взаимодействуют друг с другом. Кривая полной энергии имеет резкий минимум, определяющий величину межатомного расстояния a , соответствующего максимальной устойчивости, а также величину энергии, необходимой для увеличения или уменьшения этого расстояния только при совершении определенной работы против сил отталкивания или притяжения. Поэтому закономерное расположение атомов соответствует минимальной энергии взаимодействия атомов.

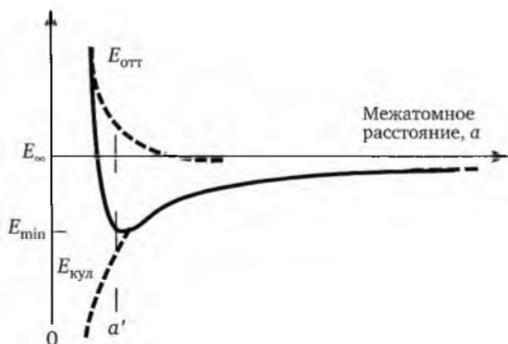


Рис. 2.13. Изменение энергии взаимодействия двух атомов в зависимости от межатомного расстояния. Сплошной линией показано изменение суммы энергий:

$E_{кул}$ связанной с кулоновскими силами притяжения,
и $E_{отт}$, вызванной отталкиванием при перекрытии
электронных оболочек. Равновесное расстояние равно a'

Можно отметить, что величина $E_{\infty} - E_{\min}$ соответствует энергии (теплоте) сублимации, так как именно эта энергия должна быть подведена для полного разделения атомов или ионов.

В металлах дискретные уровни валентных электронов расширяются в полосы (рис. 2.14) и образуют энергетический спектр из перекрывающихся s -, p -, d -, f -полос, вследствие чего распределение валентных электронов по уровням в металлических кристаллах и расплавах ближе к распределению их при высоких давлениях, чем к распределению в свободных невзаимодействующих атомах.

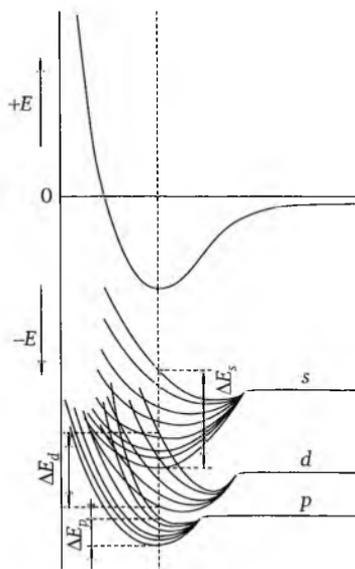


Рис. 2.14. Энергетические полосы электронов в решетке металла

Коллективизированные электроны образуют *вырожденный электронный газ*, давление которого $p = K\rho^{5/3}$ зависит от его плотности ρ . Чем выше концентрация электронного газа, тем больше энергия решетки. Следовательно, роль внешнего фактора (давления) в металлических сплавах играет электронная концентрация, определяющая сближение ионов внутренними силами. Например, при легировании низковалентного металла, допустим меди, более высоковалентным никелем температура плавления возрастает так же, как с повышением давления.

Представление о перекрывании электронных орбиталей соседних атомов и обменном направленном взаимодействии двух электронов с антипараллельными спинами составляет основу современной теории строения молекул. Преимущество такого подхода заключается в сохранении за валентными электронами в металле функции осуществления металлического взаимодействия с решеткой и электронных свойств металла и в привлечении к образованию направленных связей подвалентных электронов внешней оболочки металлических ионов, определяющих структуру металла.

Решениями волнового уравнения Шредингера

$$\nabla^2\Psi + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E - U)\Psi = 0$$

для электронов атомных оболочек являются волновые функции Ψ , квадрат модулей которых $|\Psi|^2$ интерпретируют как плотность вероятности нахождения соответствующих электронов в пространстве вокруг центрального поля ядра. В полярной системе координат эти функции для всех s -состояний электронов, независимо от главного квантового числа n , являются сферически симметричными (рис. 2.15, а), поскольку они зависят лишь от значения радиуса-вектора $r - \Psi = R_{ns}(r)$.

Для всех p -состояний электронов, также независимо от главного числа n , волновые функции представляют собой гантели, вытянутые вдоль осей прямоугольных координат (рис. 2.15, б). Гантелеобразную форму имеют и d -орбитали.

Плотность вероятности нахождения электронов $|\Psi|^2$ для s -состояний представляет собой шаровой слой, а для p_x -, p_y - и p_z -состояний имеет вид трех гантелей, совмещенных в общем центре, где располагается ядро, и вытянутых вдоль трех осей прямоугольных координат. Электроны оболочки p^6 образуют вытянутые электронные облака, состоящие из трех пар таких совмещенных гантелей, образуемых электронами с антипараллельными спинами (рис. 2.15, в).

Главными типами валентных связей в молекулах и ковалентных кристаллах являются двухэлектронная двухцентровая обменная σ -связь (перекрывание волновых функций электронов с антипараллельными спинами) и двухэлектронная π -связь (перекрывание двух параллельных орбиталей в направлении, перпендикулярном их осям).

Схематически образование σ - и π -связей в простейших молекулах представлено на рис. 2.16. С увеличением кратности связи (например, двойные, тройные связи) сокращается межатомное расстояние и растет энергия связи.

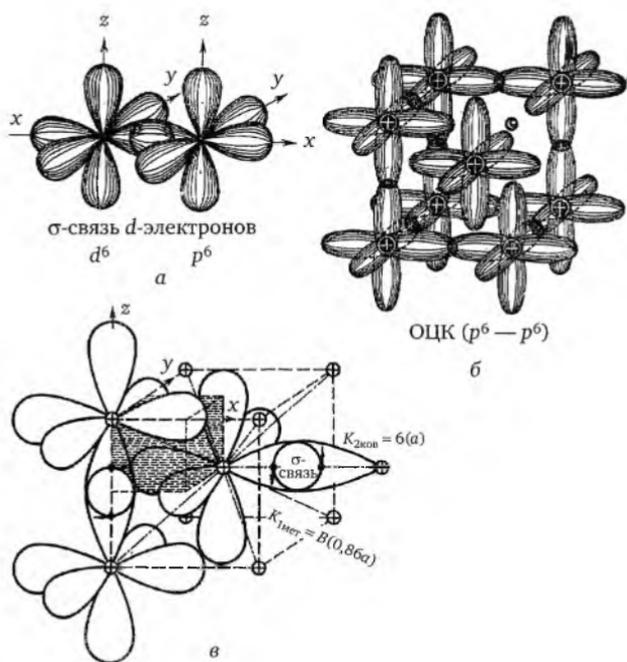


Рис. 2.15. Обменные σ -связи металлических ионов с внешними p^6 (или d^6)-оболочками (а); образование ОЦК-решетки (б) и металлическое взаимодействие ионов первой координационной сферы с электронным газом по направлениям $\langle 111 \rangle$ и валентные связи по направлениям $\langle 100 \rangle$ в ОЦК-решетке (в)

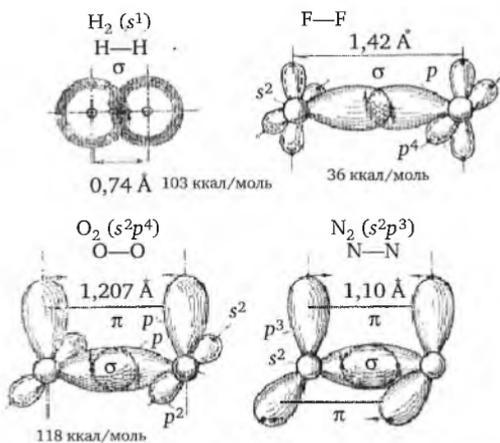


Рис. 2.16. Образование σ - и π -связей в молекулах водорода, фтора, кислорода и азота

Общая характеристика металлов. Межатомное притяжение в материалах приводит к образованию четырех типов атомных связей.

- *Металлическая* связь представляет собой взаимодействие закономерно расположенных положительно заряженных ионов, окруженных свободными электронами. Связь не направленная, действует только в металлах и сплавах на их основе и обуславливает особенности их физико-механических свойств. Подвижность электронов в металле связана с терминами «электронный газ» и «электронное облако».

- *Ионная* связь образуется в результате взаимодействия между разноименно заряженными ионами под действием кулоновских сил, что обеспечивает электростатическое взаимодействие. Такие связи в сравнительно чистом виде образуются в галогенидах щелочных металлов, например KF.

- *Ковалентная* связь образуется за счет обобществления атомами своих валентных электронов с противоположными спинами. Связь направленная и характерна для элементов IVA—VIIA-подгрупп периодической системы.

- *Молекулярная* связь возникает в результате взаимодействия между отдельными молекулами — электрическими диполями (точечные электрические заряды, равные по величине и противоположные по знаку, находящиеся на некотором расстоянии друг от друга) и характеризуется силами Ван-дер-Ваальса (0,8—8,16 ккал/моль). Она не имеет ориентации в пространстве и характерна для органических веществ, например полимеров.

Все металлы и многие неметаллические материалы имеют *кристаллическое* строение, т. е. закономерное расположение атомов в пространстве внутри каждого кристалла. Атомы располагаются на таком расстоянии, когда силы связи, действующие на них, равны между собой (см. рис. 2.13).

Такой подход позволяет объяснить характерные свойства металлов. Высокая электропроводность металлов объясняется присутствием в них свободных электронов, которые перемещаются в потенциальном поле решетки. С повышением температуры усиливаются колебания ионов (атомов), нарушается правильная периодичность потенциального поля, что затрудняет движение электронов и электросопротивление возрастает. При низких температурах колебательное движение ионов (атомов) сильно уменьшается и электросопротивление понижается. У некоторых металлов в результате образования пар электронов, движущихся упорядоченно при очень низких температурах (около 20 К), электропроводность обращается в бесконечность — явление *сверхпроводимости*. Высокая теплопроводность металлов обуславливается большой подвижностью свободных электронов и в меньшей степени колебательным движением ионов.

Высокая пластичность металлов объясняется периодичностью их атомной структуры (наличие кристаллической решетки) и отсутствием направленности металлической связи. В процессе пластической

деформации металла (ковка, прокатка и т. д.), при смещении отдельных его объемов относительно других, связь между ионами (атомами) не нарушается. Кристаллы с ковалентной или ионной направленной связью хрупки, так как при деформации эта связь нарушается.

Металлическое состояние характеризуется высокой энергией связи между атомами. Мерой ее служит теплота сублимации — энергия, необходимая для перехода от конденсированной системы (твердого состояния) к парообразному состоянию, когда атомы электрически нейтральны и не связаны между собой энергией ионизации. Теплота сублимации для металлов изменяется от 100 до 1100 кДж/кг.

В металлах 4—6-го периодов (от Sc до U) заполнение электронами уровней происходит с определенными нарушениями и они называются металлами *переходных групп*. Недостроенные внутренние электронные уровни определяют свойства переходных металлов: переменную валентность, парамагнетизм, ферромагнетизм некоторых элементов (например, Fe, Ni, Co), большую теплоту сублимации, а следовательно, высокие температуры плавления. Остальные металлы называются *простыми*.

Чистые металлы (заводским способом получают металл с содержанием примесей 99,5—99,9 %) обладают низкой прочностью и во многих случаях не обеспечивают требуемых свойств, поэтому они применяются сравнительно редко. Наиболее широко используются сплавы, получаемые сплавлением или спеканием порошков двух или более металлов или металлов с неметаллами. Они обладают характерными свойствами, присущими металлическому состоянию. Химические элементы, образующие сплав, называют *компонентами*. Сплав может состоять из двух или большего числа компонентов.

2.5. Кристаллическая структура металлов

Под атомно-кристаллической структурой понимают взаимное расположение атомов в кристалле, которое периодически повторяется в трех измерениях. Для ее описания пользуются понятием решетки, которая представляет собой воображаемую пространственную сетку, в узлах которой располагаются атомы (ионы), образующие металл (твердое кристаллическое тело). Пример такой кристаллической решетки приведен на рис. 2.17. Жирными линиями выделен наименьший параллелепипед (элементарная ячейка), последовательным параллельным переносом в пространстве которого вдоль трех осей могут быть построены вся решетка или макрокристалл.

Пространственные решетки подразделяются на семь систем (*сингоний*) по признаку симметрии их элементарных ячеек, которые характеризуются соотношениями между осями a , b , c и углами α , β , γ ячейки:

- кубическая ($a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$);
- тетрагональная ($a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$);

- гексагональная ($a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$);
- тригональная ($a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$);
- ромбическая ($a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$);
- моноклинная ($a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$);
- триклинная ($a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$).

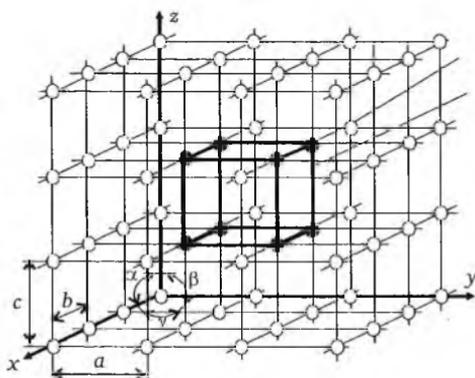


Рис. 2.17. Кристаллическая решетка

Вид (геометрия) атомно-кристаллического строения определяется минимальным значением энергии связи, которая зависит от типа атомных связей в кристаллах. Силы, которые стремятся удержать атомы в положениях равновесия около узлов кристаллической решетки, пропорциональны их относительным смещениям так, как если бы они были связаны друг с другом пружинками. Смещения атомов в процессе колебаний тем больше, чем выше температура, но они гораздо меньше постоянной решетки вплоть до температуры плавления, когда твердое тело превращается в жидкость.

Модель твердого тела должна объяснять проявление сил *притяжения* между атомами (действуют на расстоянии не более одного атомного диаметра), когда они находятся далеко друг от друга, и возникновение сил *отталкивания* при сильном сближении атомов (см. рис. 2.13). В некоторых отношениях такая модель соответствует взаимодействию шаров, покрытых слоем клейкой пасты. Любое количество шаров, располагаясь вокруг центрального седьмого шара, повторяет бесконечное число раз симметрию исходной группы (рис. 2.18, б, в). Трехмерные кристаллы состоят из множества атомных плоскостей, наложенных друг на друга в определенном порядке, подобно стопке бумажных листов. В них атомы расположены правильными рядами, сетками (пространственными решетками) и правильное (симметричное) чередование атомов на одних и тех же расстояниях друг относительно друга повторяется для сколь угодно отдаленных атомов, т. е. существует *дальний порядок*.

Кристаллическое строение металлов и сплавов описывается элементарной ячейкой с линейными параметрами (периодами) a, b, c около

$1-7 \cdot 10^{-8}$ см и углами между ними — α , β и γ (см. рис. 2.17). Геометрия расположения атомов определяет тип кристаллической решетки, свободные пространства между атомами в ячейке называются порами (рис. 2.18, а), которые классифицируются по геометрической форме окружающих их атомов (рис. 2.19).

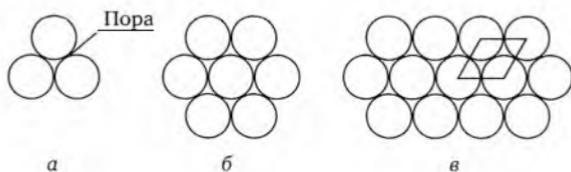


Рис. 2.18. Плотная упаковка круглых шаров на плоскости

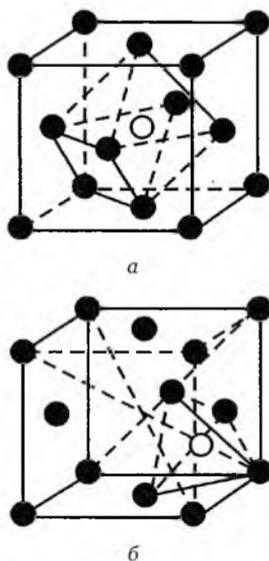


Рис. 2.19. Типы пор в кристаллической решетке:

а — тетраэдрическая; б — октаэдрическая (атомы в пространстве образуют тетраэдр и октаэдр соответственно)

Идеальный кристалл имеет однородное, закономерное и симметричное расположение атомов в пространстве. Число ближайших равноудаленных к данному («базисному») атому или иону соседних одинаковых атомов или ионов в кристалле называется координационным числом (K).

Плотность упаковки (плотность кристаллической решетки) — число целых атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку, которая в пространстве окружена ей подобными (рис. 2.20). Атом в вершине куба принадлежит одновременно восьми ячейкам (на одну ячейку приходится $1/8$ атома), на грани — двум ячейкам ($1/2$ атома), в центре — полностью ячейке (один атом).

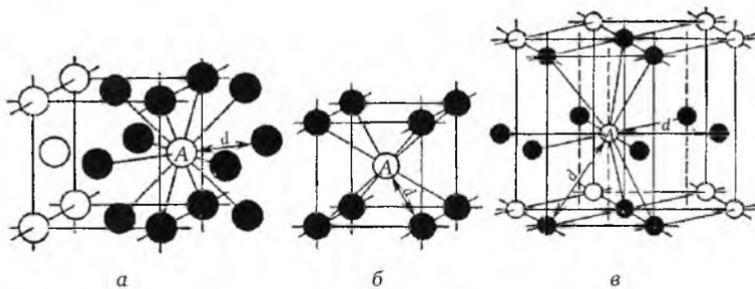


Рис. 2.20. Схема, показывающая число атомов, находящихся на равном и наименьшем расстоянии от данного атома для различных решеток:

а — кубическая гранецентрированная; б — кубическая объемно-центрированная; в — гексагональная плотноупакованная

Коэффициент компактности решетки — отношение объема всех атомов решетки к ее геометрическому объему:

$$\eta = (V_a / V_{я}) \cdot 100 \% ; \quad V_{я} = V_a + V_{п},$$

где V_a — объем атомов; $V_{я}$ — объем элементарной ячейки; $V_{п}$ — объем пор.

Кристаллические решетки, в которых на долю одной элементарной решетки приходится один атом, называются *простыми*; если несколько атомов — *сложными*. Металлы образуют одну из следующих высокосимметричных сложных решеток с плотной упаковкой атомов: кубическую объемно-центрированную, кубическую гранецентрированную (кубическая сингония); гексагональную (гексагональная сингония) и тетрагональную (тетрагональная сингония).

Гексагональная плотноупакованная структура (ГПУ) образуется при складывании плотноупакованных плоскостей в простой последовательности: две плотноупакованные плоскости соприкасаются друг с другом таким образом, что каждый атом одной плоскости помещается в углублении между тремя атомами соседних (верхней и нижней) плоскостей. Геометрия двух таких плоскостей показана на рис. 2.21, а (светлые кружки изображают атомы плотноупакованной плоскости А, прилегающая к ней плоскость В помечена темными кружками). Укладка атомных плоскостей в последовательности АВ АВ... (см. рис. 2.21) имеет характеристики $a = b = c$; $\alpha = \beta = 90^\circ$; $\gamma = 120^\circ$, $c/a = 1,633$; $n = 6$, $\eta = 74 \%$, $K = 12$.

Гранецентрированная кубическая структура (ГЦК) складывается несколько по-другому — третья плоскость смещена по отношению к обеим нижним плоскостям АВ в положение С, четвертая плоскость занимает положение А и атомы занимают вершины куба и центр каждой грани. В итоге устанавливается последовательность АВСАВС... (рис. 2.22, а, б) с характеристиками: $a = b = c$; $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$; $n = 4$, $\eta = 74 \%$, $K = 12$.

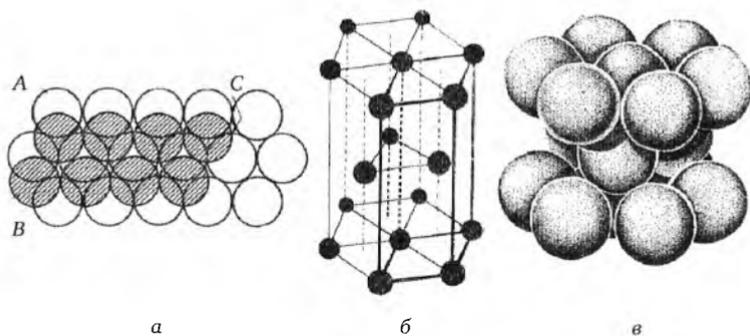


Рис. 2.21. Схема образования ГПУ-структуры:

a — укладка плотноупакованных плоскостей для получения структуры типа ГПУ; *б* — элементарный гексагональный кристалл; *в* — схема решетки ГПУ с соблюдением масштаба в размерах атомов и ребер куба

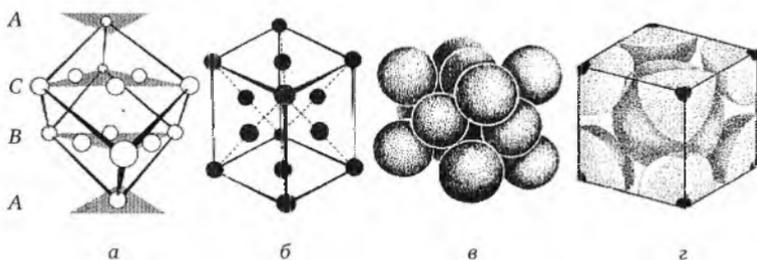


Рис. 2.22. Укладка плотноупакованных плоскостей для получения структуры типа ГЦК (*a*); элементарный куб решетки ГЦК (*б*); схема решетки ГЦК с соблюдением масштаба в размерах атомов и ребер куба (*в*) и элементарная ячейка ОЦК-структуры (*г*)

Методы укладки плотноупакованных плоскостей, приводящие к построению ГЦК- и ГПУ-структур, исчерпывают все простейшие способы укладки. Возможны промежуточные последовательности (например, АВАСА...), но ни один из элементов не кристаллизуется в столь сложную структуру за исключением отдельных металлов в особых температурных областях.

Объяснение существования плотных кубической и гексагональной структур металлов не требует привлечения теории валентных связей и может быть получено из рассмотрения взаимодействия сферически симметричных ионов с электронным газом. Действительно, если на внешнем *s*-уровне металлического иона сохраняются электроны, то его внешняя *s*-оболочка будет сферически симметрична, и взаимодействие таких ионов с коллективизированными электронами должно привести к плотной упаковке.

Плотная упаковка будет иметь место и в том случае, когда ионы имеют внешнюю p^6 -оболочку, но из-за недостаточности межатомных сил не сближаются до перекрытия. Неперекрывающиеся p^6 -, d^6 - и d^{4+6} -оболочки ведут себя как псевдосферические. По этой причине ГЦК-упаковки имеют благородные газы и многие полиморфные металлы при низких температурах.

Электронная конфигурация свободного атома кобальта — d^7s^2 . В металлическом состоянии кобальт двухвалентен (Co^{2+}) с электронной конфигурацией d^6s^1 с внешней сферически симметричной s -оболочкой, соответствующей его ГПУ α - и ГЦК β -модификациям.

Атом никеля в свободном состоянии имеет внешнюю электронную оболочку d^8s^2 . Учитывая наиболее характерную валентность никеля 2^+ в соединениях, естественно предположить, что в металлическом состоянии образуются ионы Ni^{2+} с электронной конфигурацией d^6s^2 . Коллективизация двух d -электронов и наличие двух электронов на $4s$ -уровне объясняет существование ГЦК-структуры никеля вследствие плотной упаковки сферически симметричных ионов. Соответствующий ближний порядок должен сохраняться и в жидком никеле.

У меди, серебра и золота устойчивость конфигурации d^{10} приводит к отделению лишь одного внешнего s -электрона. Заполненные d^{10} -оболочки ионов имеют малый радиус и не перекрываются вследствие низкой концентрации электронного газа (1 эл/ат.), т. е. эти ионы ведут себя как сферические и упаковываются в плотные кубические структуры.

Объемно-центрированная кубическая структура (ОЦК) не имеет плотной упаковки (рис. 2.22, z), так как каждый атом окружен только восемью соседями ($n = 2$, $\eta = 68\%$, $K = 8$). Такую решетку имеют, например, Pb, Na, Ti, Fe, W, V.

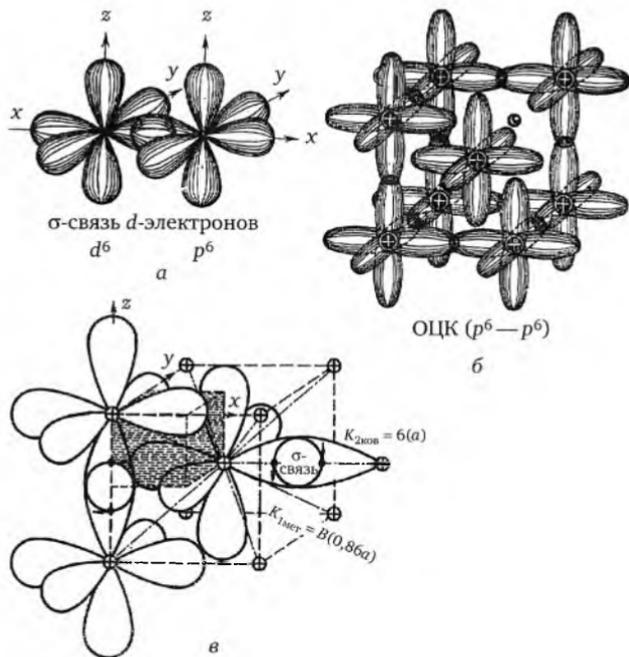


Рис. 2.23. Обменные σ -связи металлических ионов с внешними p^6 (или d^6)-оболочками (а); образование ОЦК-решетки (б) и металлическое взаимодействие ионов первой

координационной сферы с электронным газом по направлениям $\langle 111 \rangle$ и валентные связи по направлениям $\langle 100 \rangle$ в ОЦК-решетке (в)

Возникновение ОЦК-структуры находится в непосредственном соответствии с образованием ионов, имеющих одинаковую ортогональную внешнюю конфигурацию p^6 , свойственную как простым, так и переходным металлам. В ОЦК-металлах имеется две компоненты межатомной связи: 1) металлическое взаимодействие коллективизированных электронов с периодическим полем решетки и 2) образование валентных связей в результате спинового расщепления, перекрывания и обменного взаимодействия p^6 - или d^6 -орбиталей внешних оболочек ионов (рис. 2.23).

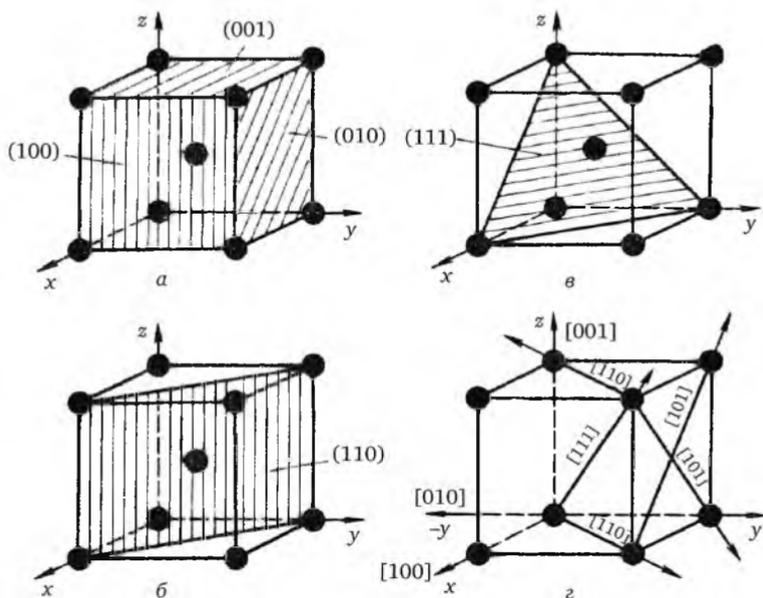


Рис. 2.24. Индексы кристаллографических плоскостей и направлений в кубической решетке ОЦК

Общая энергия ОЦК-решетки при переходе от щелочных металлов к хрому, молибдену и вольфраму возрастает вследствие повышения концентрации коллективизированных электронов с 1 до 6 эл/ат (металлическая связь) и в результате усиления перекрывания p -орбиталей (обменная связь).

Это приводит к усилению ковалентности от ОЦК щелочных металлов к ОЦК-решеткам ванадия, хрома, молибдена и вольфрама. В первых при всех температурах основную долю энергии решетки составляет компонента металлического взаимодействия, тогда как низкая пластичность и склонность к хрупкому разрушению многовалентных ОЦК металлов обусловлена усилившимися ковалентными, направленными вдоль ребер ячейки, жесткими связями.

Ванадий, ниобий и тантал (V группа) имеют валентность 5+. Их внешняя конфигурация — $p^6d^2s^2$ или $p^6d^4s^1$; под пятью внешними электронами находится заполненная p^6 -оболочка. Отделению валентных электронов отвечают низкие ионизационные потенциалы, а коллективизация электронов p^6 -оболочки требует затраты гораздо более высоких энергий. У металлов V группы коллективизированы все пять внешних валентных d - и s -электронов и, следовательно, ионы имеют внешнюю p^6 -оболочку. Расщепление, перекрытие и обменное взаимодействие p -орбиталей обуславливает образование ОЦК-структуры. Ванадий, ниобий и тантал вплоть до температуры плавления имеют ОЦК-структуры.

Хром, молибден и вольфрам (VI группа) в химических соединениях показывают устойчивую валентность 6+ из-за внешних незаполненных электронных оболочек d^5s^1 или d^4s^2 , под которыми располагаются стабильные s^2p^6 -оболочки. Энергетический барьер между потенциалами ионизации валентных и p -электронов очень высок, и хром, молибден и вольфрам от низких температур до температур плавления обладают ОЦК-структурами, возникновение которых обусловлено спиновым расщеплением, перекрытием и обменным взаимодействием их внешних p^6 -оболочек.

У металлов (VIII—X групп) заполняется вторая половина d -оболочек при наличии одного-двух внешних s -электронов. Свободный атом железа имеет внешнюю электронную конфигурацию d^6s^2 . Известно, что в металлической решетке и расплавах железа два его s -электрона коллективизированы. Следовательно, образующиеся ионы Fe имеют внешнюю оболочку d^6 из шести вытянутых по трем осям координат d -орбиталей, сходную с ортогональной p^6 -оболочкой. Взаимодействие ионов с электронным газом приводит к перекрытию d -орбиталей и появлению валентных направленных связей, которые обуславливают ОЦК-структуру α - и δ -железа, а отсутствие перекрытия d -орбиталей в γ -области отвечает ГЦК-упаковке таких ионов.

Кристаллографические обозначения. Существуют различные способы описания симметрии кристаллов, используемые для систематизации сведений о различных элементах и соединениях. Большая часть этих методов создана еще до появления современной техники изучения строения атомов, тем не менее они не утратили своей практической ценности.

Метод определения направления отдельных атомных рядов основан на применении векторных обозначений. Поскольку далее представлены в основном только кубические решетки, рассмотрим этот метод применительно к кубу (рис. 2.24).

Пусть проекции вектора на оси x , y и z элементарного куба представляют собой некоторые числа x_0 , y_0 и z_0 . Эти проекции удобно измерять в единицах длины ребра куба a . Тогда найдется такое число (например, r), для которого отношения x_0/r , y_0/r и z_0/r составят ряд наименьших целых чисел, пропорциональных этим проекциям. Эти величины называются *индексами направления* и обозначаются как u , v и w соот-

ветственно. Например, если вектор, проекции которого на оси координат равны $x_0 = 3a$, $y_0 = 4a$, $z_0 = 2,5a$, разделить на $0,5a$ (т. е. $r = 0,5a$), получим три числа: 6, 8 и 5. Они относятся друг к другу так же, как исходные размеры проекций, и в то же время представляют собой последовательность из наименьших целых чисел, обладающих этим свойством. Поэтому полученные числа — это индексы исходного вектора, которые заключаются в квадратные скобки — $[uvw]$. Отрицательные значения проекций на любую координатную ось имеют отрицательный индекс и отмечаются чертой над соответствующим индексом.

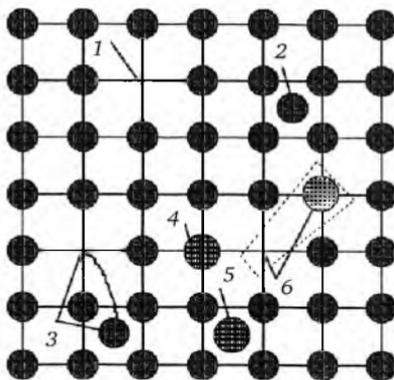


Рис. 2.25. Типы точечных дефектов:

- 1 — вакансия; 2 — междуузельный атом; 3 — дефект по Френкелю;
4 — примесный атом замещения; 5 — примесный атом внедрения;
6 — атом замещения большей валентности

Например (рис. 2.24, z), ось $+x$ имеет индексы $[100]$, ось $-x$ — индексы $[\bar{1}00]$; индексы оси $+y$ — $[010]$, $-y$ — $[0\bar{1}0]$; диагональ грани xy обозначается индексами $[110]$, а грани xz — $[101]$; диагональ куба в положительном квадранте имеет индексы $[111]$, а в противоположном направлении — $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$.

Набор параллельных атомных плоскостей можно охарактеризовать с помощью трех чисел — индексов Миллера для плоскости. Эти числа связаны с длиной отрезков, отсекаемых плоскостью на осях координат. Допустим, что соседняя плоскость отсекает на осях отрезки x_1 , y_1 и z_1 , измеренные в единицах длины ребра куба (рис. 2.24, a — $в$). Тогда существует такое число s , которое при умножении на обратные значения этих отрезков дает ряд наименьших целых чисел, относящихся друг к другу как $1/x_1$, $1/y_1$ и $1/z_1$. Введем обозначения: $h = s/x_1$, $k = s/y_1$ и $l = s/z_1$. Числа h , k , l называются *индексами Миллера* для плоскости; они записываются в круглых скобках — (hkl) .

Если индексы характеризуют группу параллельных плоскостей, тогда их приводят в фигурных скобках. В кубической решетке (см. рис. 2.24, a) кроме плоскостей куба $\{100\}$ различают плоскости октаэдра $\{111\}$ (см. рис. 2.24, $б$) и плоскости ромбического додекаэдра $\{110\}$ (см. рис. 2.24, $в$).

Характерные особенности кубических систем:

- 1) у параллельных одинаково ориентированных плоскостей и параллельных атомных рядов индексы (hkl) и $[uvw]$ одинаковы;
- 2) плоскость, параллельная одной из координатных осей, имеет индекс «0» для этого направления;
- 3) плоскость, проходящая через начало координат, записывается с помощью индексов параллельной плоскости, которая отсекает на осях отрезки конечной длины.

Из-за неодинаковой плотности атомов в различных плоскостях и направлениях решетки (см. рис. 2.24, б, в) химические, физические и механические свойства монокристалла зависят от кристаллографического направления решетки. Такая неодинаковость свойств в разных направлениях называется *анизотропией*.

Технические металлы являются поликристаллами, т. е. состоят из большого количества анизотропных кристаллов, которые статистически неупорядочены относительно друг друга. Поэтому во всех направлениях свойства металлов более или менее одинаковы и они являются изотропными. Но если создать преимущественную ориентировку кристаллов (текстуру), например, холодной деформацией, то поликристалл приобретает анизотропию свойств.

2.6. Особенности строения реальных кристаллов

Рассмотрение идеальных кристаллов позволяет объяснить многие свойства кристаллической решетки — плотность, диэлектрическую проницаемость, удельную теплоемкость, упругие свойства. Все эти свойства так мало зависят от структуры, что считаются *структурно-нечувствительными* и называются *объемными*.

Однако в реальных кристаллических телах всегда в огромном количестве существуют нарушения периодичности кристаллической структуры, называемые несовершенствами (или *дефектами*), которые оказывают значительное влияние на многие другие свойства кристалла — пластичность, прочность, электропроводность, гистерезисные потери в ферромагнитных металлах. Свойства, которые зависят от степени совершенства кристалла, называются *структурно-чувствительными*.

Большое значение имеют и несовершенства другого типа — нарушения электронной структуры, которые определяют важнейшие электрические и магнитные свойства. Природа электронных дефектов достаточно сложна, и в данном учебнике особенности их влияния на свойства кристаллов не рассматриваются.

Кристаллографические дефекты по геометрическому признаку подразделяются на группы: точечные, линейные, поверхностные.

Точечные дефекты (рис. 2.25) по порядку величины сопоставимы с размерами атома в трех измерениях. Они существуют в кристалле в термодинамическом равновесии, их количество возрастает с повыше-

нием температуры. Точечные дефекты вызывают местное искажение кристаллической решетки на доли межатомного расстояния и оказывают влияние на физические свойства металлов. К ним относятся:

- вакансии;
- межузельные атомы;
- примесные атомы внедрения или замещения — присутствие имеющего отличающийся размер чужеродного (примесного) атома, замещающего основные атомы, или внедренного между ними.

Вакансии (дефекты Шоттки) — это узлы решетки (1 на рис. 2.25), в которых атомы отсутствуют на местах, соответствующих идеальной схеме решетки. Они образуются при нагреве, деформации, облучении поверхности электронами. В кристалле есть атомы, кинетическая энергия которых значительно выше среднего значения. Такие атомы, если они расположены вблизи поверхности, выходят на поверхность, а их место занимают атомы из глубины кристалла. Принадлежащие им узлы решетки остаются свободными, т. е. возникает вакансия.

Межузельные атомы образуются, когда атом, вышедший из узла решетки, занимает место в межузлии (2 на рис. 2.25), а на его месте появляется вакансия (создается парный дефект Френкеля). Положение межузельного атома (в том числе и примесного атома замещения (4—6)) в решетке может быть различным, но чаще всего он занимает поры.

Межузельные атомы и вакансии являются в кристалле центрами локального упругого расширения или сжатия кристаллической решетки.

Линейные дефекты соизмеримы с величиной атома в двух измерениях и имеют большую протяженность в третьем измерении. К этому виду дефектов относятся дислокации *краевые* и *винтовые*.

Краевая дислокация — это локальное искажение кристаллической решетки, вызванное наличием в ней «лишней» атомной полуплоскости — экстраплоскости (перпендикулярной плоскости чертежа). Она образуется, если частично сдвинуть верхнюю часть кристалла под действием напряжения относительно нижней его части, приостановив сдвиг в тот момент, когда он охватит лишь часть плоскости скольжения (рис. 2.26). Для ОЦК-решетки (см. рис. 2.24) плоскостями скольжения являются $\{110\}$, $\{112\}$ и $\{123\}$, а для ГЦК-решетки — $\{111\}$.

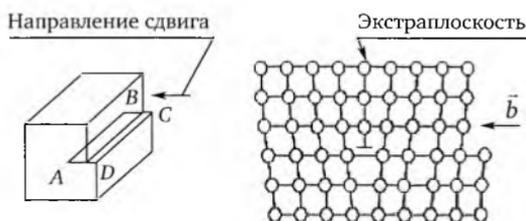


Рис. 2.26. Схема расположения атомов у краевой дислокации:
 $ABCD$ — плоскость сдвига; \vec{b} — вектор Бюргерса

Для случая простой кубической решетки краевая дислокация представляет собой особое расположение атомов — «лишнюю половинку»

плоскости (экстраплоскость), помещенную между двумя другими целыми соседними плоскостями типа [100]. Атомы этих целых плоскостей восстановили связи друг с другом, при этом вблизи края вставленной полуплоскости возникли очень сильные деформации. Линию, проходящую через места с наиболее сильными искажениями кристаллической решетки (2—3 периода) около границы экстраплоскости, называют краевой дислокацией. На больших расстояниях искажения малы.

Наиболее наглядно образование дислокации в кристалле иллюстрирует сдвиг на одно межатомное расстояние одной части кристалла относительно другой (рис. 2.27). Если на кристалл воздействовать силой \vec{F} (а), то плоскости (100) в месте, отмеченном пунктиром, могут «разорваться» (б), после чего верхняя половина плоскости 1 присоединится к нижней половине плоскости 2 (в), а верхняя половина плоскости 2 станет «лишней». Если продолжать воздействие на кристалл, то следующая плоскость разорвется, после чего верхняя половина плоскости 2 присоединится к нижней половине плоскости 3 (г) и т. д. Таким образом, в кристалле появится лишняя полуплоскость (100), которая под воздействием силы \vec{F} сможет перемещаться вдоль плоскости скольжения за счет разрыва-соединения соседних половинок плоскостей. Заметим, что разрыв новой плоскости происходит как раз на линии дислокации, поскольку именно на ней искажения кристаллической решетки наибольшие.

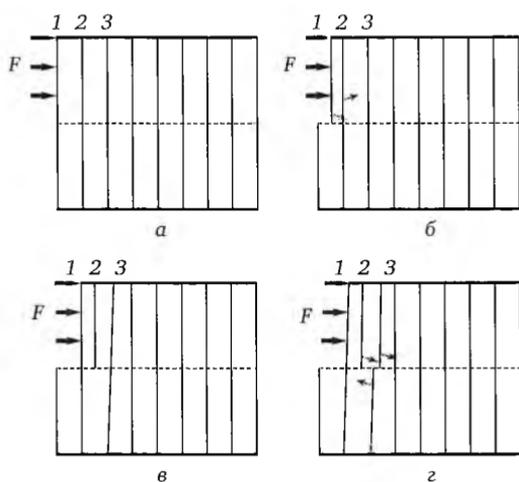


Рис. 2.27. Схема зарождения и перемещения краевой дислокации при сдвиговой деформации кристалла:

а — кристалл до деформации; б — появление дислокации;
в, г — перемещение дислокации в кристалле

Дислокация в верхней части кристалла — положительная (\uparrow), в нижней — отрицательная (\downarrow).

Винтовая дислокация так же, как и краевая, образуется при неполном сдвиге кристалла по плоскости, параллельной вектору сдвига

(плоскость сдвига проходит по линии AB). Если винтовая дислокация образована движением по часовой стрелке, ее называют *правой*, если против — *левой*.

Вокруг дислокаций возникает искажение кристаллической решетки (рис. 2.28). Энергия искажения определяется вектором Бюргера \vec{b} , который указывает величину смещения и его направление. Важной характеристикой дислокации является плотность дислокаций ρ , под которой понимается суммарная длина дислокаций l , приходящаяся на единицу объема V кристалла (м^{-2}): $\rho = \Sigma l/V$. Размерность плотности дислокаций характеризует количество точек выхода линий дислокаций в элементарной площадке (рис. 2.29). В отожженном металле $\rho \approx 10^6 \text{ см}^{-2}$, т. е. каждый квадратный сантиметр поверхности пересекает миллион дислокаций суммарной длиной 10 км. Плотность дислокаций оказывает большое влияние на свойства металлов и сплавов и в первую очередь на механические свойства. Определяется экспериментально подсчетом числа выходов дислокаций, пересекающих площадь металлографического шлифа, или методами электронной микроскопии.

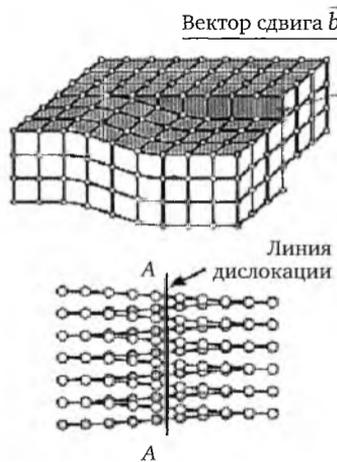
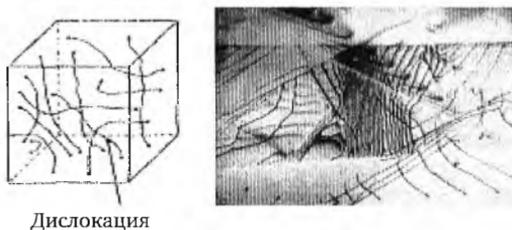


Рис. 2.28. Винтовая дислокация — линия, вокруг которой атомные плоскости изогнуты по спирали



Дислокация

Рис. 2.29. Схема расположения дислокаций в элементарном объеме и электронная микрофотография кристалла аустенита с большим количеством дислокаций на различных плоскостях скольжения, $\times 28\,000$

Дислокации образуются в процессе кристаллизации металла, при образовании границ зерен и блоков, а также пластической деформации и фазовых превращений. Низкая реальная прочность кристаллов (теоретическая прочность, рассчитанная с использованием межатомных взаимодействий, на несколько порядков выше) объясняется именно перемещением дислокаций в кристалле.

Поверхностные дефекты малы только в одном измерении, а в двух имеют значительную протяженность. К ним можно отнести границы кристаллов одной и той же фазы, отличающиеся взаимной ориентацией, границы блоков, а также межфазные границы (между кристаллами разных фаз).

Правильное расположение атомов (ионов) в узлах кристаллической решетки энергетически более выгодно и отвечает минимуму потенциальной энергии, обладающей соответствующей периодичностью в пространстве, и, напротив, отклонение его от этого положения должно сопровождаться возрастанием потенциальной энергии.

Атомы на границе двух зерен в поликристаллическом металле распределены в пространстве в значительной мере менее правильно, чем атомы внутри каждого зерна, потому что атомы пограничного слоя находятся под влиянием силового поля, образуемого атомами одного зерна (I) и другого зерна (II) (рис. 2.30). И окончательное их расположение всегда является некоторым компромиссом между стремлением пристроиться к решетке зерна I и зерна II.

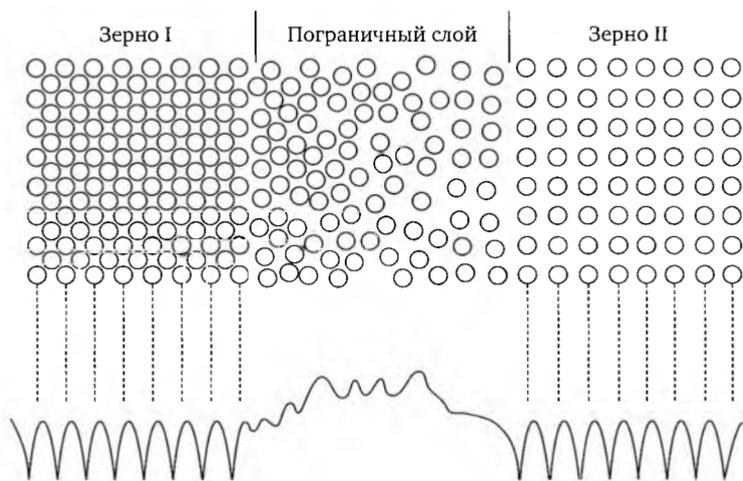


Рис. 2.30. Модель размещения атомов в пограничном слое между двумя кристаллами. График внизу характеризует изменение потенциальной энергии атомов в кристаллической решетке

Зерна металла разориентированы относительно друг друга (рис. 2.31, а) на величину от долей градуса (субграницы, малоугловые границы) до десятков градусов (высокоугловые границы). Каждое зерно металла состоит из отдельных блоков, или субзерен, образующих так называемую мозаичную структуру, или субструктуру. В пределах каж-

дого блока структура почти идеальная (рис. 2.31, б), если не учитывать точечных несовершенств, и ориентированы они друг относительно друга на угол от нескольких секунд до нескольких минут. Малоугловые границы представляют собой вертикальную стенку из одинаковых и параллельных краевых дислокаций, расположенных друг от друга на определенном расстоянии D (рис. 2.31, в).

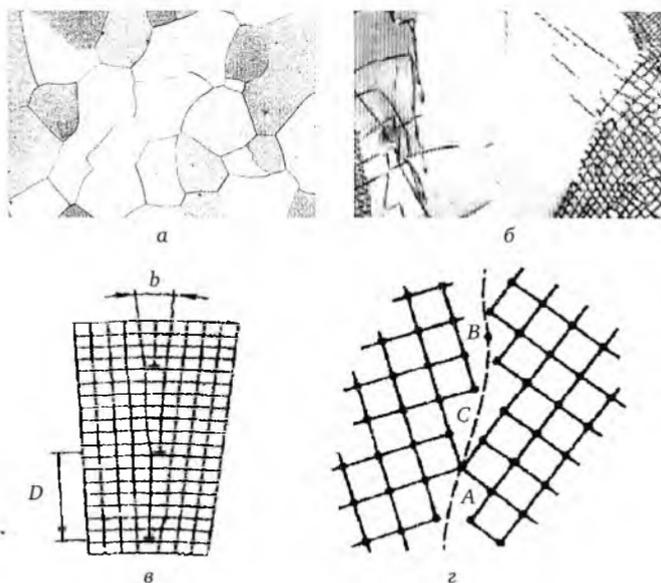


Рис. 2.31. Виды поверхностных дефектов:

а — оттенок ферритных зерен связан с разной ориентировкой их кристаллических решеток относительно плоскости шлифа ($\times 100$); б — субграницы в железе, образованные сетками дислокаций и дислокации внутри субзерна ($\times 30\,000$); в, г — схема образование границы блоков дислокациями

2.7. Диффузия

Дефектность кристаллической структуры свидетельствует о возможности перехода атомов из одного узла решетки в другой и не может быть объяснена только тепловыми колебаниями атомов относительно центров равновесия на 5—10 % межатомных расстояний.

Процесс переноса материи (или энергии) из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией на расстояния, превышающие средние межатомные расстояния для данного материала, называется *диффузией* (от лат. *diffusio* — распространение, растекание). Многие процессы, протекающие в металлах и сплавах (кристаллизация, фазовые превращения, рекристаллизация, насыщение поверхности другими элементами), носят диффузионный характер.

Для металлов процесс диффузии в первую очередь зависит от температуры — чем выше температура, тем он интенсивнее. Существует

несколько схем атомных перемещений (рис. 2.32). Кристаллографические особенности диффузии:

- всегда осуществляется постепенно, длина элементарных «шагов» порядка одного атомного диаметра;
- атомы движутся отдельными прыжками из одного положения в решетке в другое;
- в сумме элементарные прыжки обеспечивают перемещение атомов на большие расстояния.

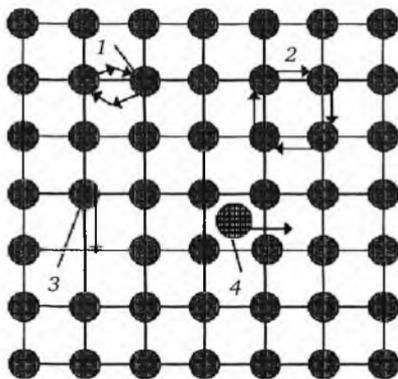


Рис. 2.32. Схема различных механизмов диффузии в металлах:

1 — обмен местами двух соседних атомов; 2 — обмен местами нескольких соседних атомов; 3 — перескок атома в вакансию; 4 — перескоки межузельных атомов в соседние межузлия

Самодиффузия — частный случай диффузии, при котором диффундируют собственные частицы и не происходит изменения концентрации в отдельных объемах (диффузия в чистом веществе или растворе постоянного состава). Диффузионные перемещения атомов твердого тела могут приводить к изменению его формы и к другим явлениям: сращиванию двух пришлифованных образцов одного и того же вещества, спеканию порошков, растягиванию тел под действием подвешенного к ним груза (диффузионная ползучесть материалов) и т. д.

Гетеродиффузия — диффузия инородных (растворенных) атомов в основной кристаллической решетке многокомпонентного сплава (фазы). Происходит от мест с высокой концентрацией растворенного атома к местам с низкой концентрацией. Она протекает самопроизвольно, так как при неравномерной концентрации свободная энергия растворенных атомов больше, чем при их равномерном распределении. Известны случаи *восходящей* гетеродиффузии — от мест с низкой концентрацией к местам с высокой концентрацией. Это происходит из-за неравномерного распределения третьего, медленно диффундирующего элемента или внутренних напряжений.

Характеристики диффузии. Все виды диффузии подчиняются одинаковым законам. Скорость диффузии пропорциональна площади по-

перечного сечения образца, а также разности концентраций, температур или зарядов (в случае относительно небольших величин этих параметров). Так, тепло будет в четыре раза быстрее распространяться через стержень диаметром в два сантиметра, чем через стержень с диаметром в один сантиметр. Это тепло будет распространяться в два раза быстрее, если перепад температур на одном сантиметре будет $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ вместо $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Скорость диффузии пропорциональна также параметру, характеризующему конкретный материал. В случае тепловой диффузии этот параметр называется теплопроводностью, в случае потока электрических зарядов — электропроводностью. Количество вещества, которое диффундирует в течение определенного времени, и расстояние, проходимое диффундирующим веществом, пропорциональны квадрату времени.

Для большинства научных и практических задач существенно не диффузионное движение отдельных частиц, а происходящее от него выравнивание концентрации вещества в первоначально неоднородной среде. Из мест с высокой концентрацией уходит больше частиц, чем из мест с низкой концентрацией. Через единичную площадку в неоднородной среде проходит за единицу времени безвозвратный поток вещества в сторону меньшей концентрации — диффузионный поток. Эта зависимость выражается первым законом Фика:

$$j = -D \frac{dC}{dx} = D \frac{C_1 - C_2}{x},$$

где j — диффузионный поток, $\text{м}^2/\text{с}$; D — коэффициент диффузии; C — концентрация вещества.

Второй закон Фика представляет пространственное изменение концентрации во времени:

$$\frac{dC}{d\tau} = D \frac{(d^2C)}{(dx^2)},$$

где D — коэффициент диффузии; dC — концентрация; $d\tau$ — время; dx — расстояние в выбранном направлении.

В широком интервале температур эта зависимость представляет собой уравнение Аррениуса.

Наиболее легко процесс диффузии протекает по границам зерен, где сосредоточены дефекты кристаллического строения (вакансии, дислокации).

Коэффициент диффузии D — количество вещества, диффундирующего через единицу площади за единицу времени, — определяется по формуле

$$D = D_0 e^{Q/RT},$$

где D_0 — предэкспоненциальный множитель, величина которого зависит от типа кристаллической решетки; Q — энергия активации, ккал/моль ; R — газовая постоянная, равная $8,31\text{ Дж}\cdot\text{моль}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$.

Энергия активации Q характеризует энергию связи атомов в кристаллической решетке. Чем выше ее значение, тем больше энергии необходимо для перехода атома из одного равновесного положения в решетке в другое, тоже равновесное.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие существуют типы связей между атомами?
2. Назовите основные типы кристаллических решеток.
3. Что такое координационное число, каково его максимальное значение?
4. Как определить параметры и кристаллографические плоскости в кристаллической решетке?
5. Дайте классификацию дефектов кристаллического строения по геометрическим признакам.
6. Что такое диффузия, самодиффузия, гетеродиффузия?
7. Расскажите о механизмах диффузии.
8. Рассчитайте число атомов, приходящихся на одну элементарную ячейку в решетке ОЦК, ГЦК, ГПУ, тетрагональной кубической.
9. Рассчитайте и сравните коэффициенты самодиффузии для Fe_α и Fe_γ при 911°C , если для Fe_α — $D_0 = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $Q = 239 \text{ ккал/моль}$; для Fe_γ — $D_0 = 0,6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$; $Q = 294 \text{ ккал/моль}$.

Глава 3

ДЕФОРМАЦИЯ И РАЗРУШЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

3.1. Упругая и пластическая деформации металлов

Деформацией называется изменение размеров и формы тела под действием приложенных сил (*нагрузки*) — внешних или возникающих при различных физико-механических процессах, проходящих в самом теле. Наиболее простые виды деформации тела: растяжение-сжатие, сдвиг, изгиб, кручение (рис. 3.1).

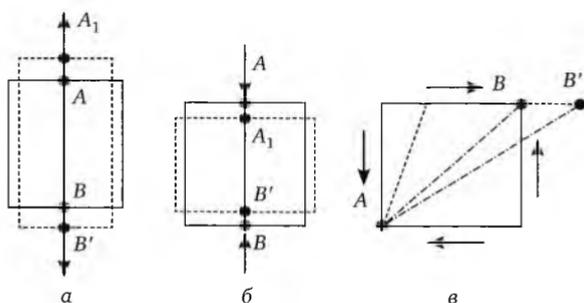


Рис. 3.1. Изменение расстояния между точками *A* и *B* при различных видах деформации:

a — растяжение; *б* — сжатие;

в — сдвиг узелных атомов в соседние междоузлия

Деформация может быть обратимой, т. е. исчезать после снятия нагрузки, вызвавшей ее, и необратимой — оставаться после удаления сил, под действием которых она возникла. Обратимая деформация называется *упругой*, а необратимая — *пластической* (остаточной) деформацией.

Наиболее наглядное представление о различных стадиях процесса деформации можно получить из диаграммы деформации тела под воздействием возрастающей нагрузки, которая строится по результатам опыта в координатах «деформация — сила» (рис. 3.2). Для металлов и их сплавов диаграмма деформации имеет два характерных участка: в начальной стадии нагружения до определенной нагрузки макроскопическая деформация возрастает по линейному закону (закон Гука), а затем зависимость между силой и деформацией становится криволинейной. Кривая деформации практически обрывается в тот момент,

когда происходит лавинное разрушение тела и вследствие этого нагрузка очень быстро падает.



Рис. 3.2. Схема процесса деформации

Если на первой стадии нагружения приостановить рост силы, а затем снять ее, то деформация в макромасштабе практически полностью исчезает. При снятии же нагрузки на второй стадии исчезает только упругая часть деформации. В соответствии с этим весь процесс деформации разделяют на три последовательно проходящие одна за другой стадии (см. рис. 3.2):

1) стадия упругих деформаций — зависимость между силой и деформацией определяется законом Гука (линейная зависимость между напряжением и деформацией δ в соответствии с законом пропорциональности — $\sigma = E\delta$) и зависит от упругих свойств материала, так как E — модуль нормальной упругости, который характеризует скорость нарастания напряжения с увеличением упругой деформации;

2) стадия упруго-пластических деформаций — зависимость между силой и деформацией определяется кривой, характер которой зависит от свойств материала, условий нагружения и выбора координат диаграммы деформации;

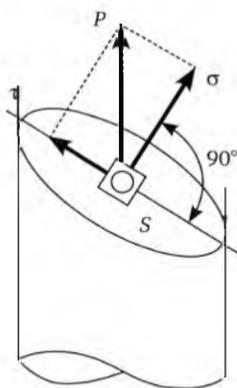
3) стадия разрушения.

Такое разделение процесса деформации условно, поскольку указанные стадии невозможно четко разграничить. Так, в макроскопически упругой области обнаруживается пластическая деформация отдельных зерен поликристаллического металла. Эта неоднородность деформации сохраняется и в пластической области. Поэтому задолго до полного разрушения даже довольно грубыми методами (например, наблюдая поверхность излома) можно обнаружить на отдельных его участках трещины разрушения (см. рис. 2.5).

Нагрузки по характеру изменений во времени подразделяют на статические и динамические. *Статические* нагрузки характеризуются малой скоростью изменения направления и места приложения, поэтому их принимают не зависящими от времени; *динамические* нагрузки ха-

рактируются большой скоростью изменения направления или точки приложения.

Для проведения расчетов на прочность конструкций или их элементов введено понятие *напряжений*, характеризующее внутренние силы, приходящиеся на единицу площади поперечного сечения тела. Так как сила P , приложенная к некоторой площадке S , обычно не перпендикулярна к ней, а направлена под некоторым углом, возникают нормальные (σ) и касательные (τ) напряжения (рис. 3.3). Опытное изучение напряженного состояния проводится методом тензометрии, а также с помощью оптических методов (например, поляризационно-оптического).



**Рис. 3.3. Образование напряжений при приложении силы P к площади S :
 σ — нормальные напряжения растягивающие (положительные) и сжимающие (отрицательные); τ — касательные напряжения**

Напряжения вызываются разными причинами, поэтому различают:

- *временные напряжения* — обусловлены действием внешней нагрузки, исчезают после ее снятия;
- *остаточные внутренние напряжения* — возникают и уравниваются внутри тела без внешней нагрузки, вызывают деформацию материала;
- *тепловые (термические) напряжения* — возникают при нагреве или охлаждении тела из-за неоднородного расширения (сжатия) поверхностных и внутренних слоев и наличия неравномерности температурного поля;
- *структурные (фазовые) напряжения* — возникают при кристаллизации, деформации или неоднородном протекании фазовых превращений по объему тела.

Упругая деформация (устраняется после снятия нагрузки) *влияет* на свойства, форму, структуру, размер тела. Пластическая деформация (не устраняется после снятия нагрузки) *изменяет* форму, размер, структуру, свойства тела и в моно- и поликристаллах осуществляется за счет *скольжения* и *двойникования*.

Скольжение (рис. 3.4) — сдвиг одной части кристалла относительно другой по плоскостям и направлениям с наиболее *плотным* располо-

жением атомов. Механизм скольжения — *дислокационный*, т. е. связан с движением дислокаций.

Плоскость скольжения вместе с направлением скольжения, принадлежащим этой плоскости, образуют *систему скольжения*. Число систем скольжения зависит от типа решетки — у металлов с ГЦК-решеткой (γ -Fe, Cu, Al и др.) 12 эквивалентных систем скольжения; с ОЦК-решеткой — 48; с ГПУ решеткой (Mg, Zn и др.) — 3. Поэтому эти металлы менее пластичны, чем металлы с ГЦК и ОЦК-решетками.

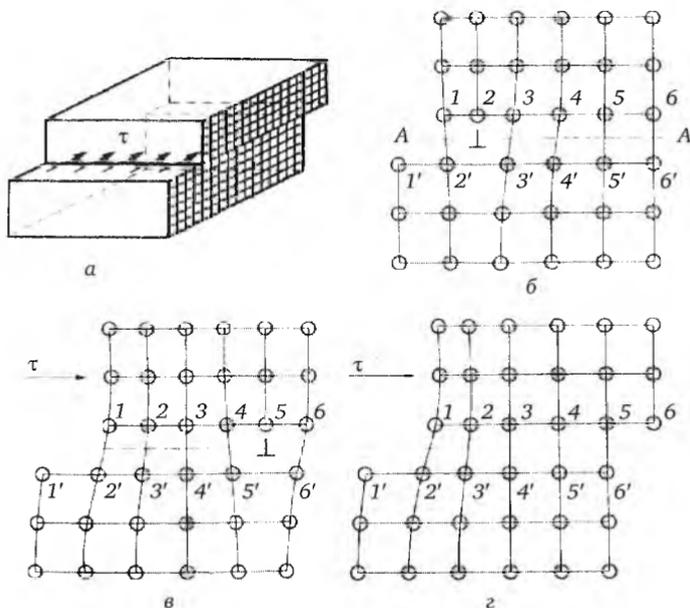


Рис. 3.4. Схемы пластической деформации скольжением (а) и дислокационного пластического сдвига:

б — положение дислокации до скольжения; в — изменение положения дислокации при деформации; з — выход дислокации на поверхность кристалла; А—А — плоскость скольжения; напряжение сдвига; 1—6, 1'—6' — расположение атомов по обе стороны от плоскости скольжения

В идеальном кристалле, без дефектов структуры, в скольжении одновременно участвуют все атомы, находящиеся в плоскости сдвига. Требуемое критическое касательное напряжение называется *теоретической прочностью кристалла*. В реальном кристалле пластическая деформация происходит последовательным перемещением дислокаций на одно межатомное расстояние (см. рис. 3.4), что требует напряжения значительно меньше теоретического значения. При выходе дислокаций на поверхность кристалла одна его часть сдвигается относительно другой на одно межатомное расстояние. Пробег многих дислокаций приводит к макросдвигу, т. е. *пластической деформации*.

Скольжение дислокаций не связано с диффузией (не происходит массопереноса), поэтому и при отрицательных температурах, когда скорость диффузии мала, дислокации перемещаются сравнительно легко.

Двойникование (рис. 3.5) — переориентация части кристалла в положение, симметричное по отношению к первой части (зеркальное отражение). Наблюдается в кристаллических решетках ОЦК, ГЦК и ГПУ при больших степенях деформации.

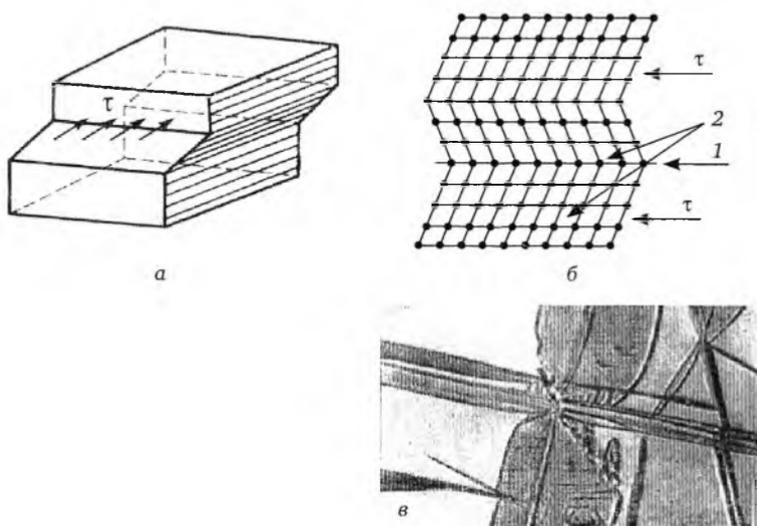


Рис. 3.5. Схемы пластической деформации двойникованием (а, б) и полностью двойникованные мартенситные кристаллы (в), $\times 600$:

1 — плоскость двойникования; 2 — двойники; τ — напряжение сдвига

В поликристалле процессы скольжения и двойникования идут в каждом зерне. Передача деформации от зерна к зерну происходит эстафетным путем. Переход дислокаций из одного зерна в другое невозможен.

Пластическое деформирование изменяет форму кристаллов — зерна вытягиваются в направлении приложения силы, образуя волокнистую структуру (рис. 3.6), и происходит образование предпочтительной кристаллографической ориентировки, которая называется *текстурой деформации*. Характер текстуры зависит от природы металла и вида деформации (прокатка, волочение и т. д.).

Пластическая деформация вызывает изменение структуры и свойств поликристаллического металла. Повышение плотности дислокаций (от $\rho = 10^8 \text{ см}^{-2}$ до $\rho = 10^{12} \text{ см}^{-2}$) и других дефектов кристаллического строения затрудняет движение дислокаций — увеличивается сопротивление деформации, т. е. уменьшается пластичность и повышается прочность. Напряжение сдвига растет пропорционально плотности дислокаций. Упрочнение (повышение прочности) металла под действием пластической деформации называется *наклепом* или *нагартовкой*. Пластическая деформация изменяет не только механические, но и другие свойства материала (рис. 3.7, а). С увеличением степени деформации возрастают электросопротивление, коэрцитивная сила, коррозия. Однако ударная вязкость, теплопроводность, магнитная проницаемость резко падают.

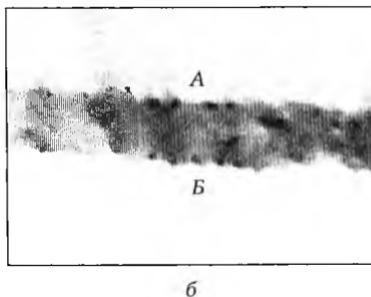


Рис. 3.6. Схема микроструктуры до и после деформации (а); б — микроструктура монокристалла кремнистого железа ($\epsilon \approx 1\%$): А и Б — плоские ряды винтовых дислокаций разного знака, $\times 20\ 000$

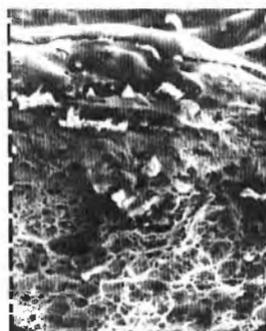
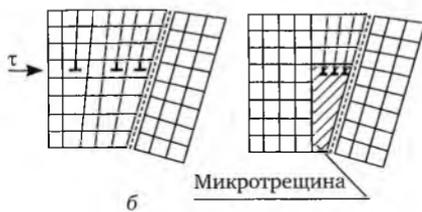
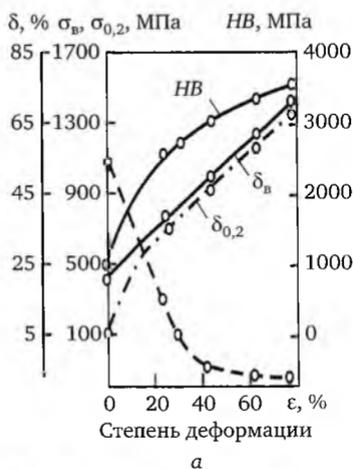


Рис. 3.7. Зависимость механических свойств металла (предела прочности σ_v , условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и относительного удлинения δ) от степени деформации ϵ (а) и схемы образования трещины при слиянии дислокаций у препятствия (б) и пересечении двух плоскостей скольжения (в); разрушение образца стали 5ХНМ после электроэрозионной обработки при растяжении (з): в верхней части хрупкое разрушение, в нижней — вязкое

3.2. Разрушение металлов

Разрушение — это процесс разделения на части в результате зарождения и развития в металле микротрещин в местах скопления перед препятствием (границы зерен, микропоры, неметаллические включения и т. д.) движущихся дислокаций (рис. 3.7, б, в). С точки зрения микроструктуры различают *транскристаллитное* разрушение (по телу зерна) и *интеркристаллитное* разрушение (по границам зерен).

Распространение (развитие) трещин происходит по-разному при хрупком и вязком разрушении металла (рис. 3.7, г). При хрупком разрушении трещина нестабильна, ее длина растет самопроизвольно, а вершина сохраняет остроту, определяемую размерами атомов. Разрушение внезапное, интеркристаллитное. Величина пластической деформации в устье трещины мала. Скорость распространения трещины ~ 2500 м/с, излом — светлый, кристаллический, с блестящими плоскими участками. При вязком разрушении трещина с тупой вершиной стабильна, величина пластической деформации в ее устье велика. Скорость распространения трещины мала, разрушение постепенное, излом — матовый, волокнистый, транскристаллитный.

Одни и те же сплавы в зависимости от условий обработки могут иметь вязкое и хрупкое разрушение. У металлов с ОЦК- и ГПУ-решетками с понижением температуры резко понижается ударная вязкость и наблюдается явление *хладноломкости*. Температура перехода металла от вязкого разрушения к хрупкому (в изломе 50 % вязкой и 50 % хрупкой составляющей) называется *температурным порогом* хладноломкости.

3.3. Механические свойства металлов

Материалы в конструкциях могут подвергаться самым различным по характеру нагрузкам: работать на растяжение, сжатие, изгиб, кручение, срез и т. д. или подвергаться совместному действию нескольких видов нагрузки, например растяжению и изгибу. Также разнообразны условия эксплуатации материалов и по температуре, окружающей среде, скорости приложения нагрузки и закону ее изменения во времени.

Механические свойства материалов — совокупность показателей, характеризующих сопротивление материала воздействию на него нагрузке, его способность деформироваться при этом, а также особенности его поведения в процессе разрушения. Они определяются при механических испытаниях образцов различной формы по специально разработанным методикам. Для металлов и конструкционных пластмасс наиболее распространены испытания на растяжение, твердость, ударный изгиб; хрупкие конструкционные материалы (например, керамику, металлокерамику) часто испытывают на сжатие и статический изгиб; механические свойства композиционных материалов важно оценивать, кроме того, при испытаниях на сдвиг.

Испытания на растяжение (ГОСТ 1497—84) — наиболее распространенный вид испытаний, позволяющий определить характеристики прочности и пластичности по кривой растяжения образцов с рабочей поверхностью в виде цилиндра или стержня прямоугольного сечения (рис. 3.8, а), где l_0 и d_0 — начальные расчетные длина и диаметр; l_p и d_p — расчетные длина и диаметр образца в области равномерной деформации; l_k и d_k — конечная расчетная длина и диаметр в месте разрыва.

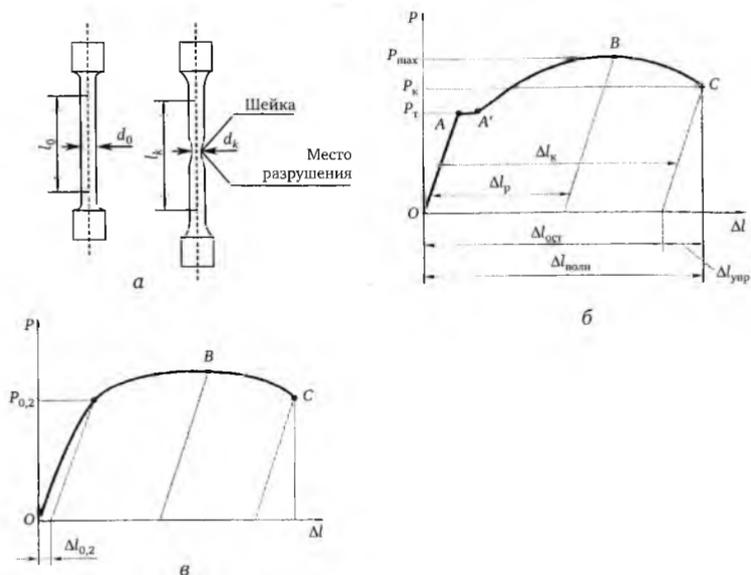


Рис. 3.8. Схема цилиндрического образца на различных стадиях растяжения (а); диаграммы растяжения материалов с площадкой (б) и без площадки текучести (в)

К показателям прочности относят:

- предел текучести σ_T , МПа, — наименьшее напряжение, при котором материал деформируется без заметного изменения нагрузки (рис. 3.8, б, где P — растягивающая нагрузка; P_T — нагрузка текучести; P_K — нагрузка разрушения; P_{max} — максимальная нагрузка; l — деформация образца (удлинение); l_k — остаточное удлинение при разрушении образца; $l_{упр}$ — упругое удлинение; $l_{полн}$ — полное удлинение):

$$\sigma_T = P_T / F_0,$$

где P_T — нагрузка текучести; F_0 — площадь поперечного сечения образца;

- условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, — напряжение, при котором остаточное удлинение равно 0,2 % от начальной расчетной длины образца (рис. 3.8, в, где $P_{0,2}$ — нагрузка, вызывающая удлинение, равное 0,2 % от l_0 ; $\Delta l_{0,2}$ — остаточное удлинение, равное 0,2 % от l_0):

$$\sigma_{0,2} = P_{0,2}/F_0,$$

где $P_{0,2}$ — нагрузка текучести; F_0 — площадь поперечного сечения образца;

- временное сопротивление (предел прочности) $\sigma_{\text{в}}$, МПа, — напряжение, соответствующее максимальной нагрузке (начало образования шейки на образце при растяжении) (см. рис. 3.8, б):

$$\sigma_{\text{в}} = P_{\text{max}}/F_0,$$

где P_{max} — максимальная нагрузка; F_0 — площадь поперечного сечения образца;

- истинное сопротивление разрыву $S_{\text{к}}$, МПа, — напряжение, соответствующее нагрузке в момент разрыва (см. рис. 3.8, б):

$$S_{\text{к}} = P_{\text{к}}/F_{\text{к}},$$

где $P_{\text{к}}$ — нагрузка разрушения; $F_{\text{к}}$ — площадь поперечного сечения образца в месте разрыва.

Показатели пластичности определяются по размерам образца до и после испытаний:

- относительное предельное равномерное удлинение* $\delta_{\text{р}}$, %, — отношение абсолютного приращения расчетной длины образца до нагрузки P_{max} к ее первоначальной длине (см. рис. 3.8, а):

$$\delta_{\text{р}} = (\Delta l/l_0)100;$$

- относительное удлинение после разрыва* δ , %, — отношение приращения расчетной длины образца после разрыва к первоначальной длине (см. рис. 3.8, а):

$$\delta = (\Delta l_{\text{к}}/l_0)100;$$

- относительное сужение* Ψ , %, — отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва к начальной площади поперечного сечения (см. рис. 3.8, а):

$$\Psi = (F_0 - F_{\text{к}}/F_0)100.$$

Испытания на твердость. Твердость — сопротивление металлов вдавливанию, не является физической постоянной, зависит как от прочности и пластичности, так и от метода измерения, и весьма чувствительна к изменению структуры металла. Величина твердости металлов и сплавов меняется в том же направлении, что и предел текучести, поэтому при контроле изменения механических свойств после различных обработок металл часто характеризуют твердостью, которую измерять проще и быстрее.

Выбор метода определения твердости зависит от исследуемого материала, размеров и формы образца; измерениями *микротвердости* пользуются при изучении механических свойств отдельных зерен, а также сложных сплавов.

Определение твердости по Бринеллю вдавливанием шарика (Ю. А. Бринелль, шведский инженер, разработавший в 1900 г. статический метод определения твердости металлов). За меру твердости *HB* (ГОСТ 9012—59) принято сжимающее напряжение, вычисляемое на единицу поверхности отпечатка диаметром d и глубиной t , который получается при вдавливании силой P стального шарика диаметром D :

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}.$$

Испытывают материалы невысокой твердости, размер отпечатка измеряют лупой. Числа твердости указываются в единицах, размерность не проставляют.

• *Определение твердости при вдавливании пирамиды* (по Виккерсу, ГОСТ 2999—75). Испытание твердости производится вдавливанием алмазной четырехгранной пирамиды с углом при вершине $\alpha = 136^\circ$:

$$HV = 1,854 P/d^2,$$

где P — нагрузка; d — среднее арифметическое диагоналей отпечатка.

Величина *HV* не изменяется при изменении нагрузки вследствие подобия отпечатков. Благодаря большому углу в вершине пирамиды диагональ отпечатка достаточно велика даже при малой глубине вдавливания (например, при испытаниях листа металла толщиной до 0,3 мм). До 350—400 величины *HV* и *HB* равны. При большей твердости *HB* ниже, чем *HV*.

• *Определение твердость при вдавливании шарика или конуса с предварительным нагружением* (по Роквеллу, ГОСТ 9013—59).

В зависимости от твердости материала применяют:

- шарик из закаленной стали диаметром 1,588 мм для испытаний металлов малой и средней твердости;
- алмазный конус с углом при вершине 120° для испытаний твердых металлов.

За меру твердости *HR* принимаются условные единицы, соответствующие глубине отпечатка при осевом перемещении индентора на 0,002 мм. При использовании алмазного конуса твердость обозначается как *HRC*, а шарика — *HRB*, где буквы *C* и *B* обозначают черную или красную шкалу соответственно.

Преимущество метода Роквелла по сравнению с методами Бринелля и Виккерса заключается в том, что нет оптического измерения размеров отпечатка. В табл. 3.1 сопоставлены отдельные значения твердости *HB*, *HV* и *HR* (стандартные шкалы *A*, *B* и *C*).

**Таблица ориентировочного перевода отдельных значений
твердости, определяемых различными методами**

| Твердость, <i>HV</i> | Твердость | | <i>HR</i> | | |
|-------------------------|------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| | <i>D</i> отпечатка, мм | <i>HB</i> | <i>C</i> | <i>A</i> | <i>B</i> |
| 1234 | 2,20 | 780 | 72 | 84 | — |
| 1022 | 2,3 | 712 | 68 | 82 | — |
| 650 | 2,6 | 555 | 56 | 77 | — |
| 502 | 2,85 | 461 | 48 | 73 | — |
| 401 | 3,10 | 388 | 41 | 71 | — |
| 303 | 3,5 | 302 | 31 | 66 | — |
| 240 | 3,9 | 241 | 23 | 62 | 102 |
| 201 | 4,25 | 201 | 13 | 58 | 94 |
| 155 | 4,80 | 156 | — | — | 84 |
| 123 | 5,35 | 123 | — | — | 73 |
| 108 | 5,75 | 107 | — | — | 64 |

Испытания на ударную вязкость. Для оценки склонности материалов к хрупкому разрушению применяют испытания на ударный изгиб специальных образцов с надрезом (рис. 3.9, *a*), являющимся концентратором напряжений, в результате которых определяют ударную вязкость (ГОСТ 9454—78).

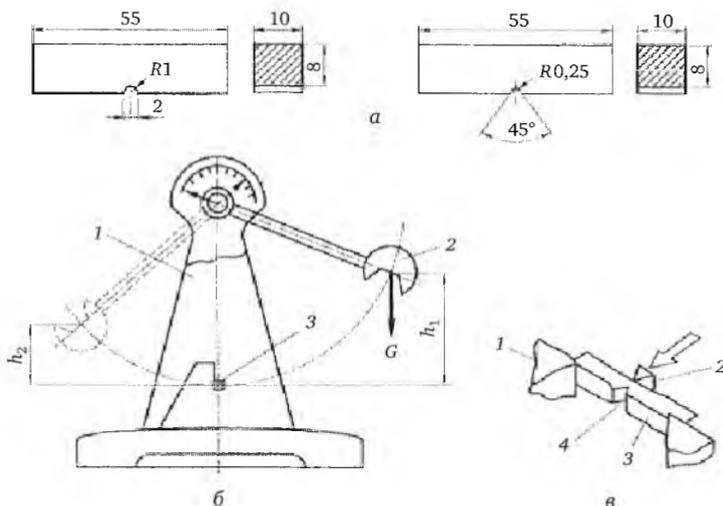


Рис. 3.9. Схема испытаний на ударную вязкость:

a — образцы с U- и V-образными надрезами; *б* — схема маятникового копра; *в* — расположение образца на копре, стрелкой показано направление удара; 1 — корпус; 2 — маятник; 3 — образец; 4 — надрез

Работа A , Дж, затрачиваемая на деформацию и разрушение образца:

$$A = G(h_1 - h_2),$$

где h_1 — высота подъема маятника весом G ; h_2 — высота подъема маятника весом G после удара (рис. 3.9, б, в).

Образцы для испытаний (см. рис. 3.9, а) — стержни $55 \times 10 \times 8$ мм с *надрезом*, который специально нанесен для определения склонности материала к виду концентратора напряжений (три типа надреза — U , V с радиусами концентратора $1 \pm 0,007$ мм, $0,25 \pm 0,025$ мм соответственно и T — трещина). Ударная вязкость KC , Дж/см², равна отношению работы A к площади поперечного сечения образца в надрезе. В зависимости от вида надреза определяют KCU , KCV , KCT .

Испытания на усталость. Большинство разрушений деталей и конструкций при эксплуатации происходит в результате циклического (многократно прикладываемого, изменяющегося по величине и направлению) нагружения. Разрушение материала в условиях циклически повторяющихся напряжений называют *усталостью*, а свойство материалов противостоять усталости — *выносливостью*. Испытания на усталость (ГОСТ 25.502—79) проводят на специальных машинах, позволяющих получить повторно-переменные напряжения — изгиб при вращении и при консольном нагружении (рис. 3.10, а).

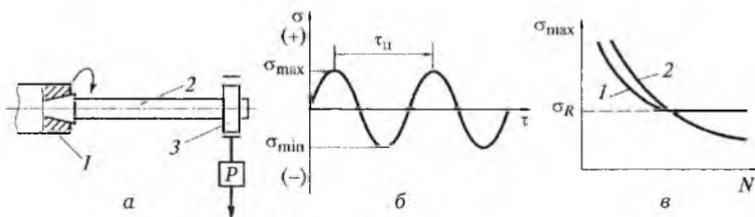


Рис. 3.10. Схема испытаний на усталость:

а — схема нагружения образца: 1 — вращающийся шпиндель (стрелка показывает направление вращения); 2 — образец; 3 — нагружающий подшипник; P — сила тяжести груза; б — циклическое изменение напряжения в образце: σ — напряжение; τ — время; σ_{\max} и σ_{\min} — максимальное и минимальное напряжение цикла соответственно; $\tau_{\text{ц}}$ — время цикла; в — диаграмма усталости для материалов, имеющих (1) и не имеющих (2) физического предела выносливости σ_R

Сопротивление усталости характеризуется *пределом выносливости* σ_R , т. е. максимальным напряжением, которое не разрушает металл при любом или при заданном числе N однократных смен напряжений (циклов) с учетом различных коэффициентов асимметрии цикла $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Предел выносливости при симметричном цикле ($\sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$) обозначают σ_{-1} (рис. 3.10, в).

По результатам испытаний не менее 15 образцов строят кривую усталости в координатах σ — N . Горизонтальный участок кривой, когда

напряжения не меняются при бесконечно большом числе циклов, соответствует пределу выносливости σ_{-1} (рис. 3.10, в).

Между пределом выносливости и пределом прочности существует экспериментально установленная связь: для сталей — $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \approx 0,5$; медных сплавов — $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \approx 0,3 \div 0,5$; алюминиевых сплавов — $\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \approx 0,25 \div 0,4$.

Необходимы и другие виды испытаний: на жаропрочность, коррозионную и кавитационную стойкость, изнашивание, технологические испытания на *изгиб, осадку, перегиб, выдавливание* (для определения способности металла к пластическому деформированию).

3.4. Влияние нагрева на структуру и свойства металлов

Деформированный металл из-за повышенной плотности несовершенств в кристаллической решетке является термодинамически неустойчивым, и переход его в более стабильное состояние с меньшей свободной энергией не связан строго с какой-либо определенной температурой. Устранение дефектов при нагреве происходит под влиянием различных элементарных процессов с разными энергиями активации в разных температурных интервалах и с разной скоростью. В этом принципиальное отличие такого перехода от фазовых превращений.

В порядке повышения энергии активации диффузионных процессов, а следовательно, температуры их реализации, различают основные стадии структурных изменений при нагреве деформированного металла: 1) возврат; 2) полигонизация; 3) рекристаллизация, включающая *первичную и собирательную*.

Возврат не связан с видимым изменением микроструктуры металла, так как представляет собой процесс повышения структурного совершенства наклепанного металла путем перераспределения и уменьшения концентрации точечных дефектов.

Полигонизация — низкотемпературный процесс ($0,25 — 0,3T_{пл}$), заметно изменяющий (под влияние нагрева) структуру деформированного металла. Перераспределение дислокаций приводит к образованию в монокристаллах или в зернах поликристалла субзерен (полигонов), свободных от дислокаций и отделенных друг от друга малоугловыми дислокационными границами (рис. 3.11). В процессах возврата и полигонизации обычный комплекс механических свойств изменяется незначительно (рис. 3.12).

Рекристаллизация представляет собой процесс полной или частичной замены одних зерен данной фазы другими зернами той же фазы с меньшей энергией, совершающийся путем возникновения и движения (*первичная рекристаллизация*) или только движения (*собирательная рекристаллизация*) границ с большими углами разориентировки (рис. 3.13).

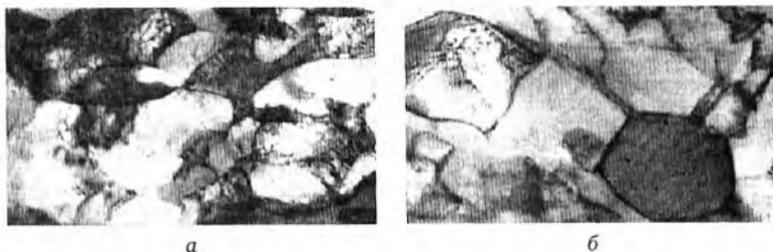


Рис. 3.11. Изменение характера дислокационной ячеистой структуры холоднокатанного алюминия (а) после полигонизационного нагрева (б). Деформация на 70 %, нагрев при 270 °С

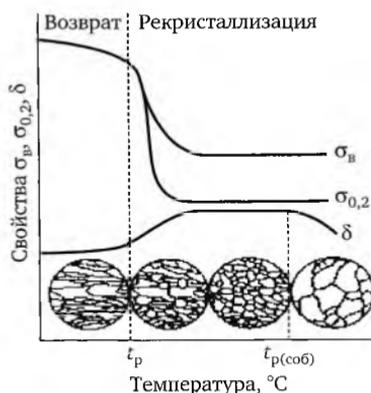


Рис. 3.12. Схема влияния нагрева на механические свойства (предел прочности σ_v , предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ) и изменение структуры деформационно-упрочненного металла:

t_p — температура рекристаллизации; $t_{p(\text{соб})}$ — температура собирательной рекристаллизации

Первичная рекристаллизация (рекристаллизация обработки) — полная замена волокнистой структуры деформированного металла на новые равноосные зерна. Резко снижается плотность дислокаций (с 10^{10} — 10^{12} до 10^6 — 10^8 см²), наклеп снимается полностью, растет пластичность, снижается прочность.

Рекристаллизация начинается при нагреве выше температуры начала рекристаллизации: $T_{\text{нр}} = (0,1 \div 0,2)T_{\text{пл}}$ — чистые металлы; $T_{\text{нр}} = 0,4T_{\text{пл}}$ — технически чистые металлы; $T_{\text{нр}} = (0,5 \div 0,6)T_{\text{пл}}$ — сплавы.

Для полного снятия наклепа металл нагревают до более высоких температур, чтобы обеспечить высокую скорость рекристаллизации и полноту ее протекания. Такая термическая обработка называется рекристаллизационным отжигом.

Собирательная рекристаллизация — рост одних рекристаллизованных зерен за счет других. Основная причина роста — снижение протяженности границ и уменьшение поверхностной энергии. Размер рекристаллизованного зерна зависит от температуры нагрева и степени

деформации. Чем выше температура отжига, тем крупнее зерно. Степень деформации оказывает более сложное влияние на величину зерна. Малые степени деформации ($\epsilon \approx 2 + 10\%$) приводят к резкому укрупнению зерен, и их называют *критическими* (для железа 5 %, для алюминия 3 %). При малых деформациях неоднородное распределение дислокаций и напряжений вызывает миграцию границ зерен и рост недеформированных зерен за счет соседних деформированных (энергетически менее выгодных).

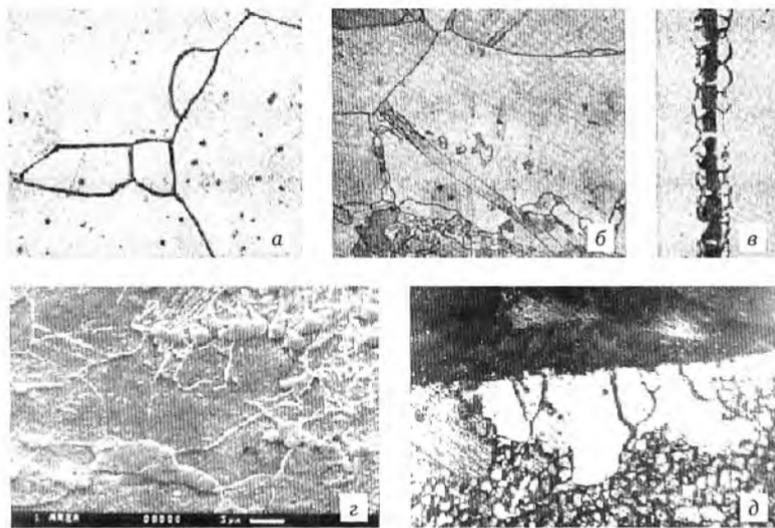


Рис. 3.13. Места предпочтительного формирования центров первичной рекристаллизации:

а — у тройных стыков исходных зерен ($\times 500$); *б* — у границ зерен и двойников ($\times 500$); *в* — у частиц других фаз ($\times 500$); *г* — низкоуглеродистая сталь, первичная рекристаллизация; *д* — низкоуглеродистая сталь, собирательная рекристаллизация ($\times 300$)

Рекристаллизация изменяет все структурно-чувствительные свойства деформированного материала и, как правило, восстанавливает исходные структуру, текстуру и свойства (до деформации). Чем меньше зерно, тем выше прочность и вязкость металла после процесса рекристаллизации.

Размер зерна после рекристаллизации. Размер зерна оказывает большое влияние на эксплуатационные свойства материала. Так, металлы при структуре с малым зерном обладают повышенной прочностью и вязкостью. Но техническое железо наиболее высокие магнитные свойства имеет при крупном зерне.

Величина рекристаллизованного зерна зависит от химического состава сплава, размера исходного зерна, степени предварительной деформации, температуры рекристаллизационного отжига, его продолжительности и наличия нерастворенных примесей.

При очень малых степенях деформации нагрев не вызывает рекристаллизации. При 3—15 % деформации величина зерна резко возрастает

и может во много раз превысить размер исходного зерна. Такую степень деформации называют *критической*. Но критическая деформация тем меньше, чем выше температура отжига.

Зависимость величины зерна от температуры и степени деформации показывают в виде диаграмм рекристаллизации (рис. 3.14), которые дают возможность выбрать режим рекристаллизационного отжига. Но диаграммы не учитывают влияния величины исходного зерна, скорости нагрева и присутствия примесей: размер рекристаллизованного зерна тем меньше, чем мельче исходное зерно (повышается критическая степень деформации) и чем выше скорость нагрева.

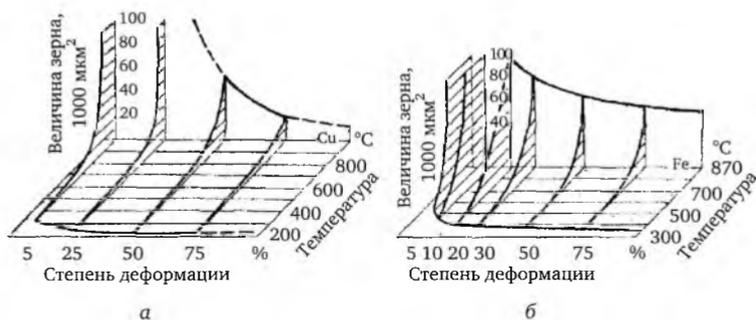


Рис. 3.14. Диаграмма рекристаллизации:
а — для меди; б — для железа

Текстура рекристаллизации. Возникающая при высоких степенях деформации текстура является причиной образования при последующем нагреве текстуры рекристаллизации, характер которой определяется условиями проведения отжига, видом предшествующей обработки давлением (прокатка, волочение и т. д.), количеством и природой примесей.

При образовании текстуры рекристаллизации отожженный поликристаллический металл характеризуется анизотропией свойств.

3.5. Холодная и горячая деформации

В зависимости от соотношения температуры деформации и температуры рекристаллизации различают холодную и горячую деформацию. *Холодной* называют такую деформацию, которая проводится ниже температуры рекристаллизации, поэтому она сопровождается упрочнением (наклепом) металла.

Деформацию называют *горячей*, если она проводится при температурах выше температуры рекристаллизации для получения полностью рекристаллизованной структуры. При этих температурах деформация также вызывает упрочнение (горячий наклеп), которое полностью или частично снимается рекристаллизацией, протекающей при температурах обработки и при последующем охлаждении.

При горячей обработке давлением (прокатке, прессовании, ковке, штамповке и т. д.) упрочнение в результате наклепа (повышения плотности дислокаций) непосредственно в ходе деформации непрерывно чередуется с процессом разупрочнения (уменьшения плотности дислокаций) во время деформации и охлаждения.

Горячую деформацию в зависимости от состава сплава и скорости деформации обычно проводят при температурах $(0,7—0,75)T_{пл}$. При этих температурах процессы полигонизации и рекристаллизации успевают проходить в процессе деформации, что значительно снижает сопротивление металла пластической деформации и повышает пластичность.

Следует подчеркнуть, что границы между холодным и горячим деформированием условны и зависят от схемы, скорости и температуры обработки, условий охлаждения, а также скорости рекристаллизации металла или сплава.

Когда металл после деформации имеет *частично рекристаллизованную структуру* обработку называют *теплой деформацией*. В этом случае процесс деформации металла с большими обжатиями и больших сечений затрудняется.

Если после деформации при температурах выше температуры рекристаллизации металл все же находится в наклепанном состоянии — обработку относят к *холодной*.

При нагреве металла, имеющего нерекристаллизованную или частично рекристаллизованную структуру, протекает рекристаллизация по описанным выше механизмам.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие свойства можно определить при статических испытаниях? В чем разница в понятиях σ_m и $\sigma_{0,2}$?
2. Что такое ударная вязкость, как определить эту характеристику?
3. Какие свойства металла можно определить при усталостных испытаниях?
4. Что такое *HRA*, *HRB* и *HRC*?
5. При испытании на выносливость были изучены два образца — шлифованный и полированный. Какой из образцов имел более высокий предел выносливости и почему?
6. Для вновь созданного металлического сплава необходимо определить характеристики прочности и пластичности. Какой метод испытаний можно рекомендовать и как проводится определение этих свойств?
7. Что происходит при нагреве деформированного металла?
8. Как влияет размер рекристаллизованного зерна на свойства сплава?
9. При изготовлении волочением стальной проволоки ее пластичность оказалась очень низкой. Как можно увеличить ее пластичность?

Глава 4

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

4.1. Кристаллизация металлов

Любая система самопроизвольно стремится к достижению наиболее устойчивого (равновесного) состояния. В механической системе «поверхность — шар» (рис. 4.1) шар при перемещении стремится занять положение с минимальной потенциальной энергией, соответствующей самому низкому положению центра тяжести (позиция Iв), а система будет отвечать состоянию стабильного равновесия, когда ее параметры сохраняют постоянные значения и протекающие в ней процессы обратимы. Свойство системы минимизироваться в условиях равновесия называют *термодинамическим потенциалом* (в данном примере термодинамическим потенциалом является потенциальная энергия).



Рис. 4.1. Механическая модель системы, находящейся в лабильном состоянии (Iа), метастабильном (Iб) и стабильном (Iв) равновесиях, а также в нестабильном состоянии движения II

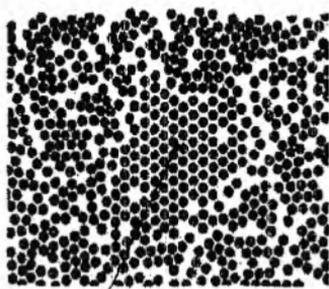
При нахождении шара в позиции Iб система обладает относительной устойчивостью, характерной для *метастабильного* (от греч. *metá* — между, после, через лат. *stabilis* — устойчивый) равновесия. Величина Δh_a представляет собой энергетический барьер, который система должна преодолеть для перехода из метастабильного состояния в стабильное. Позиция Iа соответствует *лабильному* состоянию системы, не имеющей области относительной устойчивости.

Возникновение метастабильного состояния объясняется теорией термодинамического равновесия. Состоянию равновесия замкнутой

системы соответствует максимум энтропии S . При постоянном объеме V и температуре T равновесию отвечает минимум свободной энергии F , а при постоянном давлении p и температуре T — минимум изобарного термодинамического потенциала G . Однако определенным значениям внешних параметров (p , V , T и др.) может соответствовать несколько экстремумов (максимумов или минимумов функций F или G).

Каждому из относительных минимумов функций соответствует устойчивое по отношению к малым воздействиям или флуктуациям (от лат. *fluctuatio* — колебание) метастабильное состояние. При небольшом отклонении от метастабильного состояния система возвращается в это же состояние, однако по отношению к большим отклонениям от равновесия она неустойчива и переходит в состояние с абсолютным минимумом термодинамического потенциала, которое устойчиво по отношению к конечным отклонениям значений физических параметров от равновесных. Таким образом, хотя метастабильное состояние в известных пределах устойчиво, рано или поздно система все же переходит в абсолютно устойчивое, стабильное состояние.

В жидкой фазе атомы расположены не хаотично, как в газообразном состоянии, а имеют так называемый *ближний порядок* — упорядоченность во взаимном расположении атомов, которая (в отличие от дальнего порядка в кристаллической решетке) повторяется лишь на расстояниях, соизмеримых с расстояниями между соседними атомами (рис. 4.2). Ближний порядок неустойчив и быстро распадается вследствие теплового движения атомов, чтобы *возникнуть* в другом месте (этот процесс называется *фазовой флуктуацией*).



Ближний порядок

Рис. 4.2. Модель жидкой фазы металла

Зная характер изменения свободной энергии фаз F (термодинамический потенциал, убыль которого в изотермическом процессе равна работе, совершенной системой над внешними телами) с изменением температуры, можно указать температурные области их стабильного существования.

На рис. 4.3 показано изменение свободной энергии жидкой и твердой фаз с изменением температуры. В точке пересечения кривых, при температуре фазового равновесия t_n свободные энергии жидкой фазы

$F_{\text{ж}}$ и закристаллизовавшейся $F_{\text{т}}$ равны и, следовательно, обе фазы могут сосуществовать в равновесных условиях.

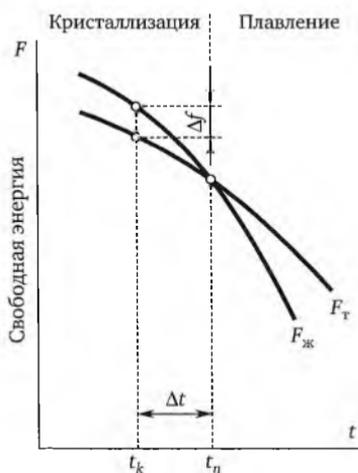


Рис. 4.3. Влияние температуры на уровень свободной энергии жидкой $F_{\text{ж}}$ и кристаллизующейся твердой $F_{\text{т}}$ фаз; Δf — разность свободных энергий жидкой и твердой фаз при температуре кристаллизации; Δt — степень переохлаждения

При температурах выше t_n термодинамически устойчива жидкая фаза, обладающая в этих условиях меньшим уровнем свободной энергии, а при температурах ниже t_n устойчива твердая фаза. При переохлаждении жидкой фазы $\Delta t = t_n - t_k$ ниже t_n она стремится перейти в твердую фазу, и наоборот: при нагреве твердой фазы выше t_n она стремится перейти в жидкую фазу. Переход металла из жидкого состояния в твердое (кристаллическое) называется процессом *кристаллизации*. Температура фазового равновесия t_n в точке пересечения кривых на рис. 4.3 — это температура плавления $T_{\text{пл}}$.

Вместе с тем не следует отождествлять процессы кристаллизации и затвердевания, так как затвердевание может быть и без кристаллизации (переход в твердое аморфное состояние), а кристаллизация не всегда связана с затвердеванием в связи с возможностью образования *жидких кристаллов*.

Каждое фазовое превращение протекает путем возникновения в материнской фазе небольших объемов новой фазы, называемых зародышевыми центрами, и последующего их роста. При температурах, близких к температуре плавления, в жидком металле область с ближним порядком имеет такую же атомную упаковку, как твердый кристалл, и может стать зародышем твердой фазы, рост которой приводит к снижению свободной энергии F . Для дальнейшего роста размер зародыша должен быть не менее некоторого критического $R_{\text{кр}}$, который зависит от скорости охлаждения или степени переохлаждения t — чем больше Δt , тем меньше $R_{\text{кр}}$.

Переохлажденная среда может долго сохранять, не кристаллизуясь, неустойчивое метастабильное состояние (например, капли хорошо очищенных металлов диаметром менее 0,1 мм можно переохладить до температуры $\sim 0,8T_{пл}$). Однако при достижении некоторого предельного для данных условий критического переохлаждения в жидкости почти мгновенно возникает множество мелких кристалликов (зародышей) и происходит спонтанная кристаллизация. Критическое переохлаждение зависит от температуры, концентрации, состава среды, ее объема, присутствия посторонних частиц (например, неметаллических включений, на которых образуются зародыши), интенсивности перемешивания, действия ультразвука и т. д.

Характеристиками процесса кристаллизации являются число центров кристаллизации $n_{ц.к.}$, возникающих в единицу времени в единице объема, и скорость роста $U_{р.к.}$ — увеличение линейных размеров центра кристаллизации в единицу времени (рис. 4.4, а). С понижением температуры и ростом переохлаждения падает вязкость жидкости; при низких температурах подвижность частиц жидкости может быть столь мала, что расплав твердеет, оставаясь *аморфным*, — возникает стекло (см. далее).

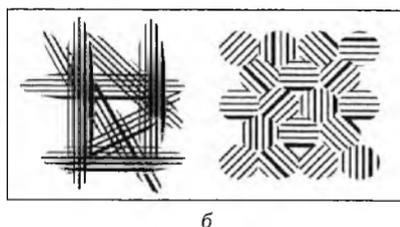
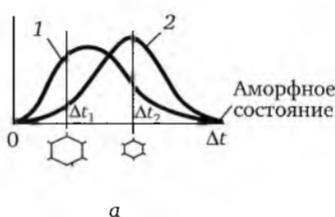


Рис. 4.4. Характеристики процесса кристаллизации:

а — зависимости скорости роста $U_{р.к.}$ (1) и числа центров кристаллизации $n_{ц.к.}$ (2) от степени переохлаждения Δt ; б — схема структуры литого металла до и после модифицирования

После образования двумерного зародыша одноатомной толщины размером $R > R_{кр}$ послойный рост кристалла происходит присоединением атомов из жидкости (рис. 4.5). Чем мельче размер критического зародыша $R_{кр}$, тем меньше размер кристалла. При этом кристаллики «декорируют» дефекты и неоднородности поверхности. Например, если кристалл содержит винтовую дислокацию, то его надстройка происходит присоединением атомов к торцу последней ступени (рис. 4.6, а). В результате кристаллический слой растет, непрерывно накручиваясь сам на себя, надстраивая дислокацию, а ступень в процессе роста принимает форму спирали (рис. 4.6, б, в). Наличие дислокации обеспечивает, уже при малых отклонениях от равновесия, квадратичную зависимость скорости роста грани от переохлаждения (пересыщения).

Различают гомогенное и гетерогенное зарождение новой фазы. Гомогенное образование зародышей — самопроизвольное образование

центров в однородной (гомогенной) среде происходит за счет энергетических и фазовых флуктуаций только в высокочистой жидкой фазе и при очень глубоких переохлаждениях.

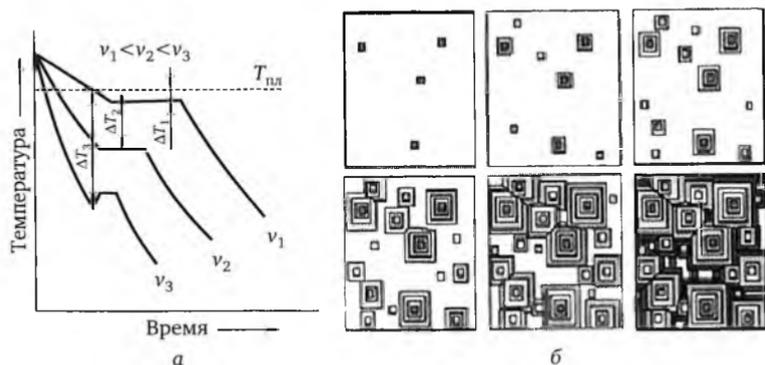


Рис. 4.5. Кривые охлаждения из жидкого состояния с различными скоростями (а) и схема процесса кристаллизации (б)

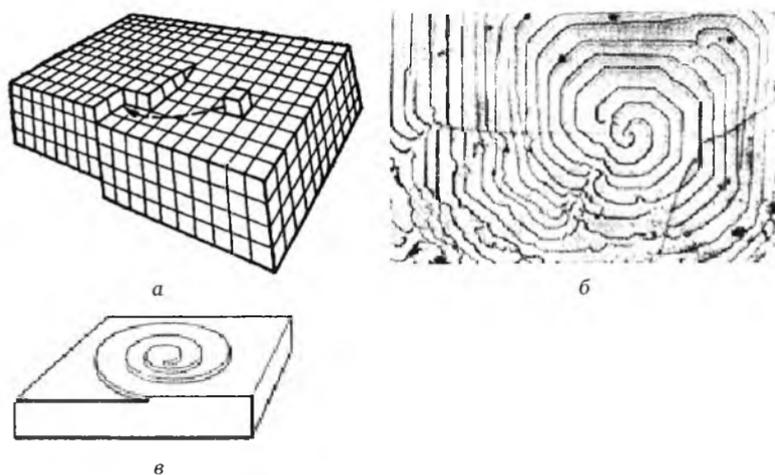


Рис. 4.6. Схема роста кристалла на винтовой дислокации (а); спиральный рост на грани (100) синтетического алмаза (б); форма ступени при спиральном росте (в)

В технических металлах всегда есть большое количество примесей, которые облегчают кристаллизацию, являясь подложкой для образования зародыша. Такой механизм называется гетерогенным. Примесь должна обладать температурой плавления выше, чем у жидкого металла, и поверхностное натяжение на границе *примесь — зародыш* должно быть меньше, чем на границе *жидкий металл — зародыш*. Это возможно, если кристаллические решетки примеси и зародыша одинаковые (изоморфные примеси). При гетерогенной кристаллизации требуется меньшая степень переохлаждения Δt .

Модифицирование — использование специально вводимых в жидкий металл примесей (модификаторов) для получения мелкого зерна по всему объему закристаллизовавшегося металла. Например, модифицирование сталей алюминием, бором, титаном и другими элементами, а алюминиевых сплавов титаном или солями натрия NaCl и NaF. Модификаторы *не изменяют* химический состав материала, но *измельчают* кристаллы (зерна) при кристаллизации, что приводит к улучшению механических свойств (рис. 4.4, б).

Кристаллы из-за неравномерной диффузии атомов из жидкости к разным их частям имеют, как правило, разветвленную форму. Такие кристаллы получили название «дендриты» (от греч. *déndron* — дерево). Первоначально образуются длинные ветви — так называемые оси первого порядка (I — главные оси дендрита). Одновременно с удлинением осей первого порядка на их ребрах зарождаются и растут перпендикулярные к ним ветви второго порядка (II). В свою очередь на них зарождаются и растут оси третьего порядка (III) и т. д. (рис. 4.7).

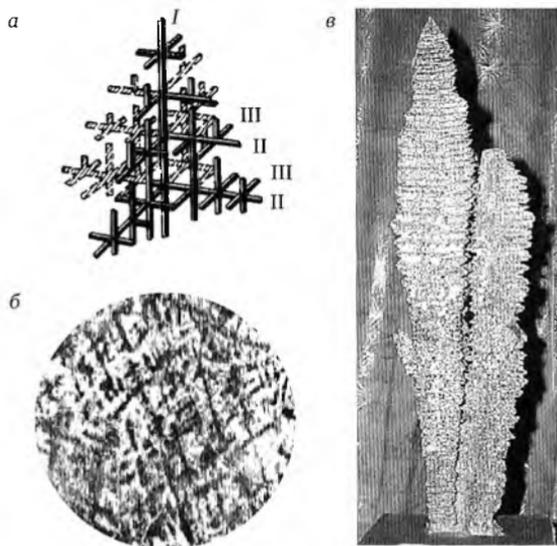


Рис. 4.7. Схема дендрита по Д. К. Чернову (а); макроструктура литой стали, $\times 5$ (б); стальной кристалл из усадочной раковины 100-тонного слитка (длина — 39 см, масса — 3,45 кг), получивший название «Кристалл Чернова» (в)

4.2. Строение металлического слитка

Кристаллизация жидкого металла начинается в тонком слое у поверхности более холодной изложницы (см. рис. 1.10). Величина и форма кристаллов слитка после процесса кристаллизации зависит от степени переохлаждения, направления отвода тепла, существующих готовых центров кристаллизации.

Слиток состоит из зон мелких равноосных кристаллов 1, столбчатых кристаллов 2, равноосных кристаллов 3 и усадочной раковины 4 (рис. 4.8). Зона мелких кристаллов 1 образуется за счет сильного переохлаждения жидкого металла при соприкосновении с холодной стенкой изложницы. Зона столбчатых (удлиненных) дендритов 2 (зона транскристаллизации) образуется из-за направленного отвода тепла через закристаллизовавшийся ранее металл.

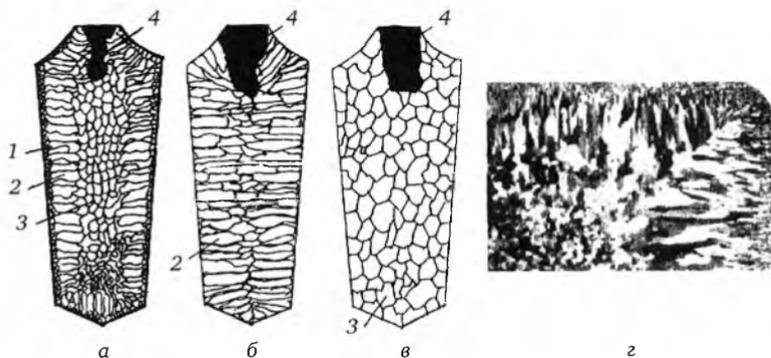


Рис. 4.8. Формирование структуры слитка:

а — нормальное охлаждение (небольшая Δt); б — сильный перегрев и быстрое охлаждение (большая Δt); в — очень медленное охлаждение (малая Δt); г — заготовка кремнистой стали, полученной непрерывной разливкой, где в углу имеются три зоны затвердевания ($\times 2$)

В средней части слитка из-за медленного охлаждения (малая степень перегрева жидкого металла) формируется зона 3, состоящая из равноосных различно ориентированных дендритов. Жидкий металл имеет больший объем, чем твердый, поэтому в верхней части слитка, которая застывает последней, образуется пустота — усадочная раковина. Структура литого металла зависит от степени переохлаждения Δt . Чем больше скорость охлаждения, тем больше степень переохлаждения и ниже температура конца кристаллизации.

При очень больших скоростях охлаждения (например, при распылении струи жидкого металла в потоке газа она превышает 10^6 °C/с) диффузия атомов подавлена, они не успевают образовать кристаллическую решетку и хаотически располагаются в пространстве, образуя как бы застывшую жидкость — аморфное (а — отрицательная частица и греч. *morphē* — форма) или стеклообразное строение металла. Такие материалы отличаются высокими механическими и физико-химическими свойствами, коррозионной стойкостью, сверхпроводимостью, магнитными характеристиками и т. д., которые в естественных условиях не зависят от направления в веществе (изотропия).

При нагреве вещество с аморфной структурой, размягчаясь, переходит в жидкое состояние постепенно, т. е. в аморфном состоянии отсутствует определенная точка плавления. Это обусловлено ближним

порядком атомов у вещества в аморфном состоянии, так как с увеличением расстояния между атомами при повышении температуры упорядоченность исчезает через 1—3 нм.

Сверхбыстрая кристаллизация позволяет получать сложные композиции сплавов, которые невозможно получить выплавкой.

4.3. Фазы в металлических сплавах

В металловедении широко используются понятия — *фаза, система фаз, структура, структурная составляющая*.

Сплавы получают путем сплавления, спекания или одновременного осаждения из газовой фазы отдельных компонентов, которые, вступая во взаимодействие друг с другом, образуют фазы — новые однородные части системы, имеющие свой тип кристаллической решетки, состав, свойства и отдельную от других частей системы поверхность раздела.

Переход вещества из одной фазы в другую — фазовый переход — связан с качественным изменением свойств вещества. Например, газовое, жидкое и кристаллическое состояния (фазы) вещества существенно различаются характером движения частиц (молекул), при высоких температурах и давлениях вещество переходит в состояние плазмы. Кристаллические фазы могут отличаться друг от друга электропроводностью, наличием электрического или магнитного момента, типом кристаллической структуры и т. д.

Жидкие фазы отличаются друг от друга концентрацией компонент, наличием или отсутствием свойства сверхтекучести (у жидких ^3He и ^4He), анизотропией упругих и электрических свойств (у жидких кристаллов) и т. д.

Система фаз — образование из двух или большего числа фаз, находящихся в состоянии равновесия.

Структура (лат. *structura* — строение, расположение) — определенная взаимосвязь, взаиморасположение составных частей; строение, устройство соответствующих фаз в металлах или сплавах.

Структурная составляющая — часть сплава, возникающая при каком-либо фазовом превращении, характеризуется одинаковым средним химическим составом, однообразным расположением и формой зерен образующих ее фаз. Микроструктура может состоять из одной фазы (например, в чистом железе, в закаленной стали) или нескольких структурных составляющих (например, перлит и вторичный цементит в заэвтектоидной стали).

В зависимости от характера физико-химического взаимодействия компонентов могут образовываться следующие фазы: *жидкие растворы, твердые растворы, химические соединения*. При отсутствии в системе взаимодействия компонентов фазами будут *чистые компоненты* (например, система Fe—Pb).

Жидкие растворы — макроскопически однородные двух- или многокомпонентные фазы переменного состава, в которых при данных внеш-

них условиях соотношение компонентов (атомов или ионов) может непрерывно меняться в некоторых пределах. Упорядоченность во взаимном расположении атомов или молекул соответствует *ближнему порядку* (см. рис. 4.2), характерному для температуры жидкости.

Твердые растворы (обозначаются малыми буквами греческого алфавита α , γ , δ , ϵ , ...) — *твердые фазы переменного состава*, в которых атомы различных элементов смешаны в известных пределах в *общей* кристаллической решетке (рис. 4.9) с упорядоченностью, повторяющейся на неограниченно больших расстояниях (*дальний порядок*). Примесные атомы или атомы легирующих элементов могут образовывать в кристаллической решетке растворителя *твердые растворы замещения*, или *твердые растворы внедрения*.

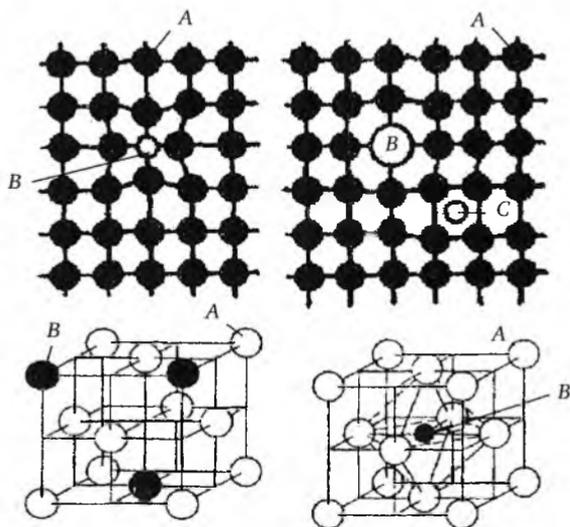


Рис. 4.9. Расположение атомов компонентов *B* и *C* в кристаллической решетке компонента-растворителя *A*

В твердых растворах замещения (с неограниченной или ограниченной взаимной растворимостью) атомы растворенного компонента *B* замещают атомы основного компонента-растворителя *A* в узлах кристаллической решетки. Микроструктура не отличается от микроструктуры чистого компонента (например, ферритные зерна на рис. 2.9).

В соответствии с полуэмпирическими правилами Юм — Розери твердые растворы замещения образуются лишь теми атомами, которые:

- имеют близкие по размерам радиусы (отличающиеся не более чем на 15 %, а для твердых растворов на основе Fe — не более чем на 8 %);
- электрохимически подобны, т. е. обладают одинаковым (изоморфным) типом кристаллической решетки компонентов.

Твердые растворы внедрения (только с ограниченной взаимной растворимостью) образуются в тех случаях, когда размеры атомов компонентов существенно отличаются друг от друга и возможно внедрение

атомов одного сорта (B) в поры (междоузлия) кристаллической решетки, образованной атомами другого сорта (A). Чаще всего твердые растворы внедрения образуют переходные металлы — Mn, Co, Ti, Mo, W, V, Zr и др. с металлоидами — C, N, O, H. Промышленное значение имеют, например, твердые растворы внедрения углерода в железе — Fe_α и Fe_γ .

Твердые растворы как замещения, так и внедрения могут быть либо неупорядоченными — со *статистическим* распределением атомов в решетке, либо частично или полностью упорядоченными — с *определенным* расположением атомов разного сорта относительно друг друга.

Химические соединения (промежуточные фазы) образуются между компонентами, имеющими большое различие в электронном и кристаллическом строении, а также в размерах атомов; тип кристаллической решетки отличается от типов кристаллических решеток чистых компонентов. В соединении A_mB_n (m и n — простые целые числа, A и B — компоненты), как правило, сохраняется простое кратное соотношение компонентов. Температура плавления химического соединения постоянна, свойства резко отличаются от свойств образующих его веществ.

В химических соединениях металлов между собой (интерметаллидах) преобладает металлическая связь, поэтому состав таких промежуточных фаз обычно не отвечает формальной валентности их компонентов и может изменяться в значительных пределах. Рассмотрим наиболее важные разновидности интерметаллидов.

- Фазы внедрения образуют переходные металлы и неметаллы с малым атомным радиусом — C, N, B, H — карбиды, нитриды, бориды; формула — Me_4X (Fe_4N , Mn_4N), Me_2X (W_2C , Fe_2N и др.). В образовании простой кубической или гексагональной решетки (отличная от решетки компонентов) решающую роль играет передача валентных электронов атомами металла атомам неметаллических элементов, в результате чего образуются ионы с внешними перекрывающимися p^6 -оболочками. На базе решеток фаз внедрения образуются *твердые растворы вычитания*.

- Фазы Лавеса с формулой AB_2 образуются между компонентами A и B при соотношении атомных диаметров $D_A/D_B \sim 1,1 \div 1,6$; кристаллическая решетка ГПУ ($MnZn_2$, $MgNi_2$) или ГЦК ($TiBe_2$, $TiCr_2$, FeW_2 , $FeMo_2$).

- Электронные соединения (фазы Юм — Розери) имеют определенное соотношение числа валентных электронов и числа атомов в кристаллической ячейке (определенную электронную концентрацию). Они образуются между одновалентными (Cu, Ag, Au, Li, Na), переходными (Fe, Mn, Co и др.) и простыми металлами с валентностью от 2 до 5 (Be, Mg, Zn, Al и др.) в результате обменного взаимодействия орбиталей внешних p^6 -, d^6 - и d^{4+6} -оболочек их металлических катионов, расщепляющихся и перекрывающихся вследствие взаимодействия с электронным газом, образующимся из коллективизированных валентных электронов. Существуют соединения с электронными концентрациями $3/2$ — CuBe,

Cu_5Si , Cu_3Ga ; 21/13 — Cu_5Zn_8 и 7/4 — CuZn_3 . Каждому соотношению соответствует определенный тип кристаллической решетки.

Полиморфизм (от греч. *polymorphos* — многообразный) — существование вещества в состояниях с различной атомной кристаллической структурой — открыт в 1798 г., когда было обнаружено, что CaCO_3 может существовать в виде двух минералов — *кальцита* и *аргонита* (рис. 4.10).

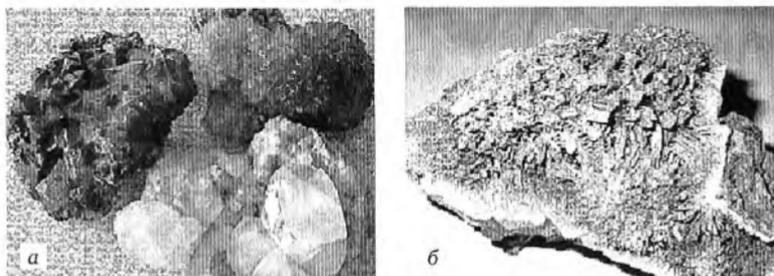


Рис. 4.10. Друзы кальцита (а) с кристаллами различной формы и окраски и аргонит (б) с игольчатой формой кристаллов и более высокой степенью растворимости в воде

Полиморфизмом обладают простые вещества, а также неорганические и органические соединения. Так, углерод имеет две модификации, *кубическую* (алмаз) и *гексагональную* (графит), резко различающиеся по физическим свойствам. *Белое олово*, имеющее тетрагональную объемно-центрированную решетку — пластичный металл, а *серое олово* (низкотемпературная модификация с алмазоподобной тетрагональной решеткой) — хрупкий полупроводник. Некоторые соединения, например SiO_2 , имеют более двух полиморфных модификаций.

Кристаллические структуры в одном и том же металле, но при разных температурах называют *полиморфными модификациями* и обозначают малыми буквами греческого алфавита: устойчивую при более низкой температуре — буквой α (Fe_α), при более высокой — β , далее — γ (Fe_γ) и т. д. Различие в структуре обуславливает и различие в свойствах.

Переход чистого металла из одной полиморфной модификации в другую в условиях равновесия может происходить как по диффузионному, так и бездиффузионному механизму, протекает при *постоянной* температуре и сопровождается выделением (при охлаждении) или поглощением (при нагреве) тепла.

При диффузионном превращении зародыш новой модификации чаще всего возникает на границах кристаллов старой модификации, а последующий его рост связан с переходом атомов через границу фаз. Например, при небольших переохлаждениях (и перегревах) перестройка решеток железа $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ осуществляется в результате неупорядоченных индивидуальных переходов атомов от исходной фазы к образующейся (рис. 4.11, а).

При больших скоростях охлаждения или нагревания, когда диффузия компонентов подавлена, полиморфные превращения твердых растворов происходят бездиффузионным путем — новая модификация кристаллической решетки образуется за счет сдвига по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям на расстояния меньше межатомного. Образуется «игольчатая» структура (рис. 4.11, б, в) мартенситного типа, по имени немецкого металловеда А. Мартенса (A. Martens; 1850—1914), или видманштеттного типа, впервые обнаруженная австрийским ученым А. Видманштеттенем (A. Widmannstätten) в начале XIX в. при изучении железо-никелевых метеоритов.

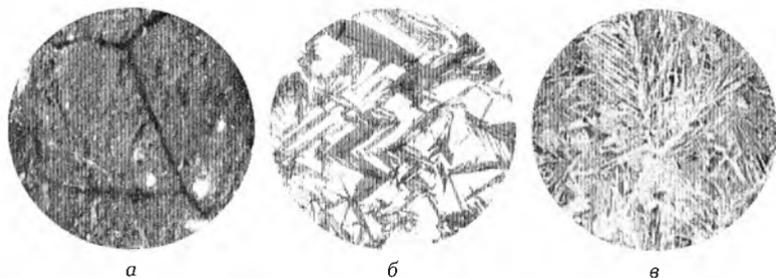


Рис. 4.11. Примеры микроструктур с полиморфным превращением:

а — полиморфное превращение в чистом железе — видны бывшие границы Fe_γ ($\times 150$); *б* — мартенситная структура в высокоуглеродистой стали ($\times 500$);
в — видманштеттова структура в углеродистой стали ($\times 100$)

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните особенности строения жидкой фазы.
2. Что такое фазовое равновесие, его условия?
3. Что такое степень переохлаждения Δt ?
4. Что такое критический зародыш, от чего зависит его размер?
5. Объясните гомогенное и гетерогенное образование зародыша.
6. Что такое модификаторы и для чего их применяют?
7. Что такое дендрит? Как и почему образуются дендриты?
8. Что такое аморфные материалы и как их получают?
9. Теоретическая температура плавления свинца 327°C . К началу кристаллизации жидкий металл переохладили до 200°C . Чему равна степень переохлаждения Δt ?
10. Температура кристаллизации меди — 1090°C . Один слиток меди затвердевал с переохлаждением 100°C , другой — 500°C . Зарисуйте и объясните схему образовавшейся структуры слитка.
11. Приведите примеры известных вам сплавов, определите число компонентов в них.
12. Что называется фазой в металлических системах?
13. Что такое полиморфные модификации, полиморфное превращение?

Глава 5

ДИАГРАММЫ СОСТОЯНИЯ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Основные понятия. Материальная система, состоящая из одной или нескольких частей, — это часть пространства, выделенная для какого-либо исследования из внешней среды. Если эти части обмениваются энергией, такую систему называют *термодинамической*, если возможен обмен не только энергией, но и веществом — *физико-химической*.

В зависимости от характера связи системы с внешней средой различают *изолированные*, *закрытые* и *открытые* системы. Изолированные системы не обмениваются с окружающей средой ни энергией, ни веществом; закрытые системы обмениваются с окружающей средой только энергией; открытые системы — энергией и веществом.

Физико-химические системы, которые можно получить при сплавлении двух или большего числа металлов и неметаллов (например, системы Fe—C, Al—Cu—Mg, Mg—Al—Zn—Mn и др.), обычно относятся к закрытым или открытым. Пример закрытой системы — металл или сплав в запаянной ампуле, изготовленной из материала, который не взаимодействует с ее содержимым, заполненной инертным газом или с вакуумом; пример открытой системы — металл или сплав, взаимодействующий с окружающей средой (например, печной атмосферой).

Металлические системы могут состоять из одной фазы (гомогенные системы) или нескольких фаз (гетерогенные системы). Любая гомогенная система всегда однофазна, и ее химический состав идентичен составу фазы. Гетерогенная система, напротив, всегда многофазна и ее фазы могут находиться в различных агрегатных состояниях (твердом, жидком или газообразном), иметь как одинаковый, так и разные составы. Например, расплав и кристаллы чистого металла — это две разные фазы одного химического состава, а кристаллы твердого раствора на основе металла и химического соединения — это две фазы разного состава.

Химический состав каждой фазы в металлическом сплаве определяется концентрациями компонентов, которые являются чистыми металлами, неметаллами или химическими соединениями. Число компонентов не обязательно равно общему числу отдельных веществ, способных образовывать систему. Например, сплав Al + 5 % Mg₂Si при комнатной температуре состоит из двух фаз — твердого раствора магния и кремния в алюминии и соединения Mg₂Si, но он не четырехкомпонентный

(Al, Mg, Si и Mg_2Si), так как для образования его фаз достаточно алюминия и соединения Mg_2Si , т. е. всего двух компонентов.

В зависимости от различных факторов равновесия (температура, давление и концентрация компонентов) в разных фазах физико-химическая система может находиться в различных состояниях. В стабильной системе все факторы равновесия во всех фазах имеют одинаковые значения, не изменяющиеся во времени. В метастабильной системе факторы равновесия также могут иметь одинаковые значения во всех фазах, но они могут изменяться во времени, в результате чего энергия Гиббса G (изобарный потенциал, одна из характеристических функций термодинамической системы) будет уменьшаться, и система приближается к стабильному состоянию с более низкой энергией. При переходе системы из одного состояния в другое в результате фазовых превращений появляются новые или исчезают исходные фазы.

Существование метастабильных состояний связано с особенностями кинетики фазовых превращений. Для образования новой стабильной фазы обычно требуется возникновение ее зародышей и их последующий рост, а это в ряде случаев может оказаться невозможным, поэтому фазовое превращение задерживается во времени, и система оказывается в метастабильном состоянии.

Правило фаз. Возможность изменения состояния системы (т. е. химического состава фаз и их числа) определяется ее *вариантностью* или *числом степеней свободы* — числом независимых один от другого факторов равновесия, которые в определенных пределах можно изменять произвольно, но при этом фазовое состояние системы не нарушается — в ней не появляются новые или не исчезают исходные фазы.

Связь между числами компонентов k , равновесных фаз f , температурой T , давлением P и вариантностью (или числом степеней свободы) C любой равновесной системы устанавливает правило фаз Гиббса (1876):

$$C = k - f + 2(T + P). \quad (1)$$

При исследовании металлических систем, находящихся в конденсированном (жидком или твердом) состоянии, постоянным считают внешнее давление P , так как изменение давления в пределах даже нескольких мегапаскалей не оказывает существенного влияния на изменение состояния жидких и твердых сплавов. Поэтому для анализа фазовых равновесий в таких системах правило фаз записывают как:

$$C = k - f + 1. \quad (2)$$

Влиянием давления нельзя пренебрегать в тех случаях, когда один из компонентов обладает повышенной упругостью пара или в обычных условиях находится в газообразном состоянии, т. е. при анализе фазовых равновесий в системах *металл — летучий компонент* или *металл — газ*. Примерами таких систем могут служить Ni—S, Ti—H, Fe—N и др.

Из правила фаз следует, что вариантность любой системы всегда положительна или равна нулю, т. е. $C \geq 0$. При $C = 0$ система называется *нонвариантной*. Это значит, что все независимые переменные, определяющие ее состояние, имеют строго фиксированные (единственные) значения, которые нельзя изменять, чтобы не нарушить фазовое равновесие в системе, т. е. не изменить число равновесных фаз. При $C = 1$ систему называют *моновариантной*, при $C = 2$ — *бивариантной* и т. д. Наличие одной, двух или большего числа степеней свободы позволяет независимо изменять соответственно одну, две или большее число переменных без изменения числа фаз в системе, т. е. не нарушая того или иного фазового равновесия.

5.1. Классификация двойных систем

Правило фаз является определяющим при анализе диаграмм состояния металлических (и других) систем. *Диаграмма состояния* — это графическое изображение на плоскости или в пространстве фазовых равновесий в различных сплавах в координатах *состав* — *температура* при постоянном давлении. Синонимами термина «диаграмма состояния» являются термины «диаграмма фазовых равновесий» и «фазовая диаграмма».

Диаграммы состояния металлических систем показывают фазовые равновесия в сплавах при разных температурах. Правило фаз позволяет определить максимально возможное число равновесных фаз в сплавах (или максимальное число степеней свободы сплава с заданным числом равновесных фаз), т. е. оценить возможность того или иного равновесия в заданных условиях. Например, двухкомпонентный (или двойной) сплав при постоянном давлении может состоять максимум из трех равновесных фаз ($f = 3$ при $k = 2$ и $C = 0$), но находиться в равновесии эти фазы могут только при единственной температуре. Если при исследовании фазового состава такого сплава окажется, что он состоит из трех фаз при разных температурах, то одна из фаз является неравновесной.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов различают разные типы двойных систем и их диаграмм состояния. В металлургии обычно используются сплавы, находящиеся в твердом состоянии, поэтому двойные (и более сложные) системы можно разделить, прежде всего, на две группы в зависимости от того, какие фазы образуются в этих системах: твердые растворы на основе компонентов и промежуточные фазы (рис. 5.1).

Твердые растворы на основе компонентов могут быть *непрерывными* (от *A* до *B*) или *граничными*. К промежуточным фазам относятся химические соединения (фазы постоянного состава) и твердые растворы на их основе (фазы переменного состава). Разделение систем первой группы (см. рис. 5.1) связано с учетом вариантности преобладающего фазового равновесия, в котором участвуют твердые растворы на основе

компонентов, а деление систем второй группы — с учетом протяженности области гомогенности промежуточных фаз на диаграмме состояния при заданной (например, комнатной) температуре.



Рис. 5.1. Классификация двойных систем по фазам

Деление промежуточных фаз на фазы постоянного и переменного состава в значительной степени условно, так как в природе вообще, а в металлических системах в частности не встречаются фазы постоянного состава (определенные химические соединения), а есть только фазы переменного состава. Однако области гомогенности отдельных фаз настолько узки (как и области граничных растворов на основе компонентов), что ими можно пренебречь.

При моновариантном равновесии в двойных системах, в зависимости от агрегатного состояния и кристаллической структуры фаз, можно представить следующие двухфазные равновесия:

- $Ж \rightleftharpoons \alpha$ — равновесие жидкого и твердого раствора на основе одного из компонентов;
- $\alpha_1 \rightleftharpoons \alpha_2$ — равновесие двух твердых растворов на основе одного или разных компонентов (оба раствора имеют одинаковую кристаллическую структуру и отличаются только химическим составом);
- $\alpha \rightleftharpoons \beta$ — равновесие двух твердых растворов на основе одного или разных компонентов (оба раствора имеют разную кристаллическую структуру и отличаются химическим составом) и $\alpha \rightleftharpoons \alpha^A$ — равновесие неупорядоченного и упорядоченного твердых растворов (оба раствора имеют разную кристаллическую структуру и могут отличаться химическим составом);
- $Ж_1 \rightleftharpoons Ж_2$ — равновесие двух жидких растворов на основе одного или разных компонентов, наблюдаемое при ограниченной растворимости компонентов в жидком состоянии (расслоении); в металлических системах не встречается.

Любое неинвариантное равновесие ($C = 0$), в том числе и трехфазное, характеризуется тем, что реализуется при постоянной температуре и при неизменных составах всех равновесных фаз. В двойных металлических системах встречаются следующие неинвариантные равновесия с участием одной или двух жидких фаз:

- монотектическое — $Ж_1 \rightleftharpoons Ж_2 + \beta$;
- эвтектическое — $Ж \rightleftharpoons \alpha + \beta$;

- перитектическое — $Ж + \beta \rightleftharpoons \alpha$;
- синтектическое — $Ж_1 + Ж_2 \rightleftharpoons \alpha$;
- метатектическое — $\beta \rightleftharpoons Ж + \alpha$, где α и β — граничные растворы на основе компонентов (или промежуточные фазы).

Синтектическое и метатектическое равновесия в металлических системах встречаются редко.

В твердом состоянии возможны следующие неинвариантные ($C = 0$) равновесия:

- эвтектоидное — $\beta \rightleftharpoons \alpha + \gamma$;
- перитектоидное — $\gamma \rightleftharpoons \alpha + \beta$;
- монотектоидное — $\beta_1 \rightleftharpoons \alpha + \beta_2$.

Экспериментальное построение диаграмм состояния возможно потому, что любое фазовое превращение сплава отмечается изменением физико-механических свойств либо тепловым эффектом. Переход сплава из жидкого состояния в твердое сопровождается значительным выделением теплоты, поэтому, измеряя температуру при нагреве или охлаждении в функции времени, можно определить температуры, при которых происходят фазовые превращения.

Для того чтобы зафиксировать превращения в твердом состоянии, сопровождаемые малыми тепловыми эффектами, обычно наблюдают за какой-либо физической величиной, значительно изменяющейся при фазовых превращениях (электрические, магнитные и другие свойства). На рис. 5.2 приведена температурная зависимость относительной длины железного образца Δl . При температуре 911 °С наблюдается уменьшение длины образца, что указывает на переход железа из одного фазового состояния в другое, а при температуре 1392 °С отмечается новое превращение. Эти физические эффекты свидетельствуют о фазовых превращениях, не раскрывая атомного строения этих фаз.

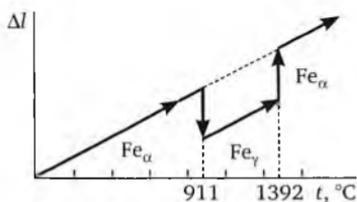


Рис. 5.2. Схема изменения относительной длины железного образца в зависимости от температуры нагрева

Для экспериментального построения диаграммы состояния сплавов, образованных компонентами A и B , необходимо изготовить серию сплавов с различным содержанием этих компонентов. Для каждого сплава экспериментально, по кривым охлаждения, определяют критические точки, т. е. температуры фазовых превращений. Полученные значения температуры откладывают на вертикальных линиях в соответствии с химическим составом сплавов. Соединяя критические точки, получают линии диаграммы состояния (рис. 5.3). Левая крайняя

точка на горизонтальной оси соответствует 100 % содержания одного из компонентов (А). Процентное содержание второго компонента (В) откладывается по этой оси слева направо. Правая крайняя точка соответствует 100 % второго компонента.

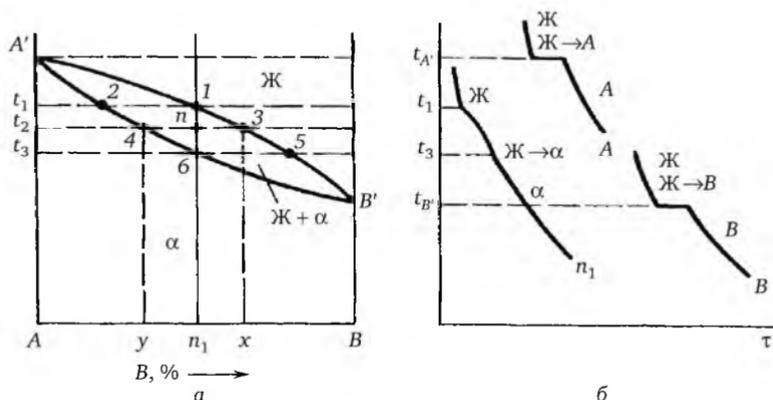


Рис. 5.3. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях

Диаграммы состояния двойных систем с перечисленными моно- и невариантными равновесиями можно построить и теоретическим путем, используя методы геометрической термодинамики¹ — науки, привлекающей закономерности геометрии (в том числе начертательной и аналитической) для описания и наглядного представления термодинамических величин и их функций. В данном издании это не рассматривается.

5.2. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях

Диаграмма состояния такой системы А—В, построенная в координатах *состав — температура*, показана на рис. 5.3, а. Горизонтальная ось служит для отсчета концентраций компонентов не только в сплавах, но и в различных фазах, из которых могут состоять эти сплавы. Длина отрезка АВ приравнивается суммарному содержанию компонентов — единице или 100 %. В первом случае концентрации компонентов измеряют в долях от единицы (обычно атомных), во втором — в процентах (атомных или по массе). Переход от одних единиц к другим приведен в конце главы.

Верхнюю кривую А'135В' начала кристаллизации жидких растворов называют *кривой ликвидуса* (лат. *liquidus* — жидкий). При температурах выше этой кривой все сплавы однофазны и находятся в жидком

¹ Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М. : Наука, 1982; Жуков А. А. Геометрическая термодинамика сплавов железа. 2-е изд., перераб. М. : Металлургия, 1979.

состоянии. Нижнюю кривую $A'246B'$ конца кристаллизации твердых α -растворов называют *кривой солидуса* (лат. *solidus* — твердый). При температурах ниже этой кривой все сплавы также однофазны, но находятся в твердом состоянии. *Кривизна кривых ликвидуса и солидуса определяется термодинамическими свойствами компонентов и природой межатоминого взаимодействия в их растворах.*

Кривые ликвидуса и солидуса показывают, как зависят температуры начала и конца кристаллизации (или плавления) сплавов от их состава, а также составы жидкости и кристаллов, находящихся в равновесии в разных сплавах в интервале кристаллизации (или плавления) — между кривыми ликвидуса и солидуса сплавы переходят из жидкого в твердое состояние (или наоборот), и в процессе этого перехода состоят из жидкости и α -кристаллов, т. е. $Ж + \alpha$. Так как жидкая и твердая фазы насыщены одна относительно другой, кривые ликвидуса и солидуса изображают составы насыщенных один относительно другого жидкого и твердого α -растворов. В однофазных областях $Ж$ и α (выше и ниже кривых ликвидуса и солидуса) жидкие и твердые α -растворы являются ненасыщенными.

На диаграмме состояния (см. рис. 5.3, *a*) видно, что кривые ликвидуса и солидуса сходятся на ординатах компонентов в точках A' и B' , отвечающих их температурам плавления (или кристаллизации). Следовательно, интервал кристаллизации компонентов A и B равен нулю ($C = 0$ при $k = 1$ и $f = 2$). Сплавы-растворы имеют различный интервал кристаллизации ($C = 1$ при $k = 2$ и $f = 2$). Обычно он максимален у сплавов, расположенных в средней части системы $A—B$.

Кристаллизация сплавов и их структура. Рассмотрим кристаллизацию одного из сплавов, например n_i (см. рис. 5.3, *a*). При температурах выше t_1 сплав представляет собой ненасыщенный жидкий раствор, для которого в первом приближении характерно беспорядочное распределение и движение атомов компонентов. По мере понижения температуры до t_1 (переохлаждения сплава) энергия этого движения постепенно уменьшается, и вблизи от температуры t_1 жидкость становится насыщенной относительно α -кристаллов и создаются условия, благоприятные для зарождения первых центров кристаллизации.

Состав первых α -кристаллов должен быть таким, чтобы при обратном повышении температуры (выше t_1) они начали плавиться. На диаграмме состояния видно, что при t_1 начинают оплавляться обогащенные компонентом A α -кристаллы состава точки 2, расположенной на кривой солидуса, что можно записать как $Ж_1 \rightleftharpoons \alpha_2$ (жидкость состава точки 1 кристаллизуется в α -кристаллы состава точки 2, обогащенных компонентом A). Следовательно, началу кристаллизации предшествует перераспределение атомов компонентов на фронте кристаллизации, и эта разница в составах жидкости и α -кристаллов существует во всем интервале кристаллизации.

Поскольку из жидкости выделяются кристаллы, обогащенные компонентом A , то жидкость при охлаждении должна обогащаться вторым

компонентом B . По мере понижения температуры в интервале кристаллизации состав жидкости будет все больше отличаться от состава исходного сплава, а состав α -кристаллов, существенно отличаясь от состава исходной жидкости в первые моменты кристаллизации, наоборот, будет все больше приближаться к составу исходного сплава. Составы жидкости и выпадающих из нее α -кристаллов при понижении температуры от t_1 до t_3 будут изменяться по кривым ликвидуса и солидуса: жидкости — от точки 1 к точке 3 и далее к точке 5, а α -кристаллов — от точки 2 к точке 4 и далее к точке 6. Такое изменение составов жидкости и α -кристаллов (одновременное обогащение компонентом B) в интервале кристаллизации возможно только за счет уменьшения доли жидкости и, наоборот, увеличения доли α -кристаллов, что подчиняется правилу рычага (см. ниже).

При промежуточной температуре t_2 жидкость состава точки 3 оказывается в равновесии с α -кристаллами состава точки 4 ($J_3 \rightleftharpoons \alpha_4$). При температуре t_3 , отвечающей температуре конца кристаллизации, все α -кристаллы примут состав точки 6 (или исходного сплава n_1), последние следы жидкости состава точки 5 исчезнут и кристаллизация сплава закончится. При охлаждении от температуры t_3 до комнатной в сплаве n_1 не происходит фазовых превращений (наблюдается простое физическое охлаждение α -кристаллов).

В интервале кристаллизации в обеих фазах протекает *выравнивающая диффузия*. Такая диффузия в жидкой фазе обеспечивает выравнивание состава исходной жидкости и ее слоев, прилегающих к α -кристаллам, так что состав жидкости в любой момент кристаллизации отвечает кривой ликвидуса, а диффузия в твердой фазе — выравнивание состава внутренних и внешних слоев α -кристаллов, образовавшихся при разных температурах, так что их состав отвечает кривой солидуса.

Необходимо ясно себе представлять, что в условиях равновесия кристаллизация сплава n_1 не начнется при температуре t_1 и не закончится при t_3 (см. рис. 5.3, а). Для протекания процесса кристаллизации рассматриваемую систему (сплав n_1) необходимо все время выводить из состояния равновесия, т. е. переохлаждать жидкую фазу ниже кривой ликвидуса, обеспечивая тем самым термодинамический стимул превращения $J \rightarrow \alpha$ (разность в энергиях Гиббса жидкости и кристаллов). Только в этих условиях процесс кристаллизации будет реакцией системы на нарушение равновесия.

На кривой охлаждения сплава n_1 (в координатах *температура — время*) есть две критические точки (перегибы), отвечающие температурам начала и конца кристаллизации (рис. 5.3, б). На кривых охлаждения компонентов A и B выявляется по одной критической точке в виде горизонтальной площадки (остановки) при температурах их плавления (кристаллизации). Различия в кривых охлаждения сплава n_1 и компонентов A и B объясняются с помощью правила фаз: равновесие $J \rightleftharpoons A$ (или B) при температуре плавления (или кристаллизации) компонента A (или B) *инвариантно* ($C = k - f + 1 = 1 - 2 + 1 = 0$). Следовательно,

такое равновесие возможно только при постоянной температуре, поэтому на кривых охлаждения компонентов A и B температурам их плавления (кристаллизации) отвечают остановки. Аналогичное равновесие $Ж \rightleftharpoons \alpha$ в сплаве n_1 *моновариантно* ($C = k - f + 1 = 2 - 2 + 1 = 1$), реализуется в интервале кристаллизации и на кривой охлаждения сплава n_1 не остановки, а два перегиба.

Различный наклон участков кривых охлаждения определяется различной скоростью охлаждения, пропорциональной разности температур сплава и среды охлаждения (например, комнатная температура или температура изложницы) — чем меньше эта разность температур, тем меньше скорость охлаждения и наклон кривой охлаждения к оси времени. Средний (выпуклый) участок кривой охлаждения, относящийся к превращению $Ж \rightarrow \alpha$ в интервале кристаллизации, определен выделением скрытой теплоты кристаллизации.

После медленного охлаждения (при условии протекания выравнивающей диффузии в кристаллах) в структуре сплава n_1 под микроскопом будут видны кристаллы твердого α -раствора более или менее равновесной формы (рис. 5.4). Аналогичную структуру будут иметь компоненты A и B , поэтому по равновесной структуре сплава — растворы нельзя отличить от чистых металлов.

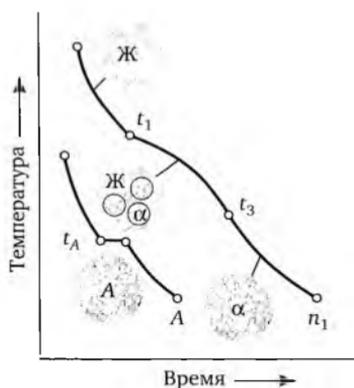


Рис. 5.4. Схема формирования структуры сплавов A и n_1

Для определения химических составов равновесных фаз сплава n_1 при заданной температуре в интервале кристаллизации необходимо через *фигуративную* точку сплава (любая точка диаграммы состояния, изображающая состояние системы при температуре и давлении, отвечающих этой точке) провести горизонтальную прямую до пересечения с кривыми ликвидуса и солидуса. Точки пересечения укажут соответственно составы жидкости и α -кристаллов. Например, при температуре t_2 (см. рис. 5.3, а) жидкость состава точки 3 находится в равновесии с α -кристаллами состава точки 4 и т. д.

Правило рычага. Для определения долей жидкости и кристаллов при любой температуре в интервале кристаллизации используется пра-

вило рычага (отрезков). Вывод этого правила, основанный на составлении материального баланса по одному из компонентов, не приводится.

Если коноду 34 (горизонтальные отрезки, соединяющие при разных температурах точки составов равновесных фаз) принять за рычаг, то доля α_4 -кристаллов при температуре t_2 в сплаве n_1 определится отношением отрезков $n3/34$, т. е. отношением плеча рычага, прилегающего к кривой ликвидуса, ко всему рычагу, а доля жидкости J_3 — соответственно отношением отрезков $n4/34$, т. е. отношением плеча рычага, прилегающего к кривой солидуса, ко всему рычагу.

По существу, эти отношения отрезков представляют собой запись условия механического равновесия рычага первого рода. Если отношения отрезков $n3/34$ и $n4/34$ умножить на 100 %, то вместо долей равновесных фаз мы получим их относительные количества, выраженные в процентах от массы сплава.

Из правила рычага следует, что для каждого сплава при любой температуре в интервале кристаллизации существует своя, вполне определенная степень полноты кристаллизации. Этим объясняется, например, почему при понижении температуры на одинаковую долю от интервала кристаллизации в разных сплавах выпадают различные количества кристаллов.

Правило рычага применимо к любым двухфазным сплавам, независимо от их химического и фазового составов и природы равновесных фаз. Необходимое условие применения этого правила — знание составов равновесных фаз (состав сплава предполагается известным), т. е. положения всех трех точек на коноде (рычаге).

5.3. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику

Сравнительно часто в системах с неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состоянии наблюдается разрыв этой растворимости при низких температурах с образованием (по типу замещения или внедрения) граничных растворов на их основе. От непрерывных твердых растворов они отличаются ограниченной протяженностью по химическому составу, потому что образующие их компоненты заметно разнятся строением и размерами атомов, кристаллической структурой и физико-химическими свойствами.

Если для растворов замещения характерно постоянное число атомов разного сорта в элементарной ячейке, то для растворов внедрения оно переменное и зависит от состава. В силу своей природы растворы внедрения на основе металлов не могут быть непрерывными (от A до B), а всегда имеют ограниченную протяженность.

Граничные растворы разных типов образуются и при полной, и при ограниченной растворимости компонентов в жидком состоянии. При

полной взаимной растворимости компонентов в жидком состоянии граничные растворы могут иметь различную протяженность (от десятых, сотых или более мелких долей процента до нескольких целых или десятков процентов), а при ограниченной растворимости протяженность областей граничных растворов обычно невелика (доли процента или целые проценты). Часто отсутствие областей граничных растворов на диаграммах состояния связано не с тем, что их действительно нет, а с невозможностью изображения незначительной растворимости в твердом состоянии в избранном масштабе или с тем, что эта растворимость просто не изучена.

В зависимости от характера изменения растворимости одного компонента в другом с понижением температуры кривые ограниченной растворимости в твердом состоянии, называемые также *сольвусом* (от англ. *solve* — растворять и латинского суффикса *us*), имеют различный вид (рис. 5.5).

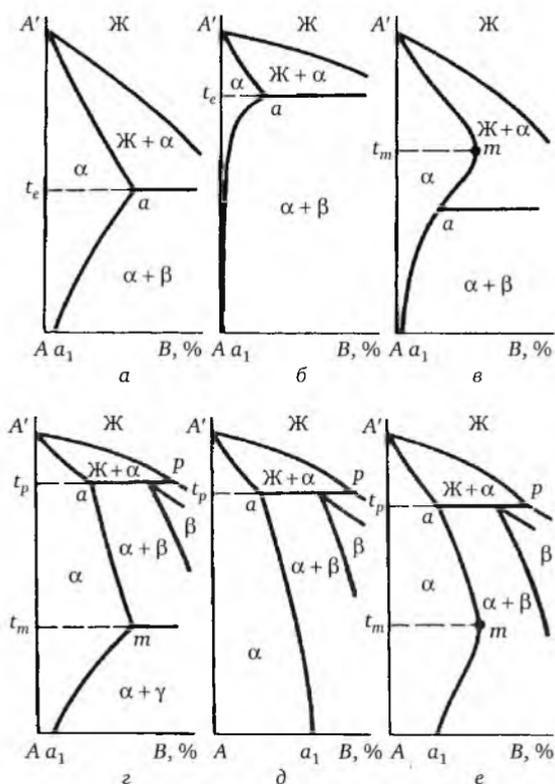


Рис. 5.5. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых полностью растворимы в жидком и твердом состояниях

Особенность рассматриваемой диаграммы состояния (рис. 5.6, а) — снижение температур начала и конца кристаллизации граничных α- и β-растворов при добавлении компонентов А и В одного к друго-

му, в результате чего при температуре t_e жидкая фаза $Ж_e$ оказывается в эвтектическом равновесии с α - и β -растворами, т. е. $Ж_e \rightleftharpoons \alpha_a + \beta_b$. Эвтектическое равновесие наблюдается во всех сплавах, расположенных между точками максимальной растворимости a и b . В соответствии с этим горизонталь ab и точку e на этой горизонтали также называют *эвтектическими*, а жидкую фазу $Ж_e$ и структурную составляющую $\alpha_a + \beta_b$, которая выделяется из этой жидкости по реакции $Ж_e \rightleftharpoons \alpha_a + \beta_b$ — *эвтектикой*.

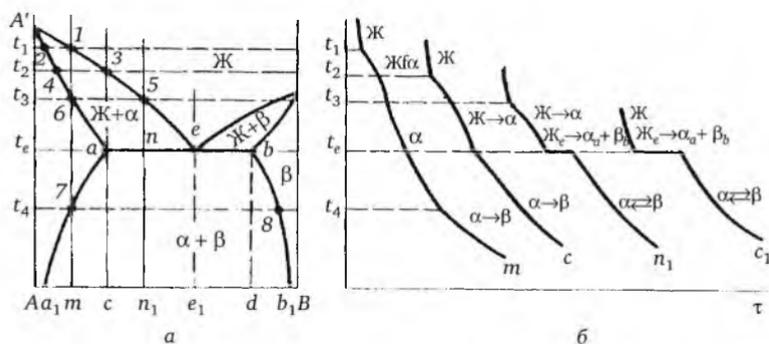


Рис. 5.6. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют эвтектику

Термин «эвтектический» (греч. *eutektos*) означает «хорошо, легко плавящийся», поэтому эвтектический сплав или эвтектика — это легкоплавкий сплав с самой низкой температурой кристаллизации (плавления) в рассматриваемой системе.

Температуры начала кристаллизации граничных α - и β -растворов изображаются кривыми ликвидуса $A'e$ и $B'e$, а температуры конца кристаллизации — соответственно кривыми солидуса $A'a$ и $B'b$. Сплавы участка $a—b$ заканчивают кристаллизацию при температуре t_e по эвтектической реакции $Ж_e \rightleftharpoons \alpha_a + \beta_b$. Эвтектическая горизонталь ab является линией солидуса этих сплавов.

Кривые aa_1 , bb_1 — это кривые сольвуса, изображающие равновесие двух граничных растворов $\alpha \rightleftharpoons \beta$ при разных температурах, которые показывают, как изменяется растворимость компонента B в компоненте A и, наоборот, компонента A в компоненте B при понижении температуры от эвтектической до комнатной. Сплавы, расположенные в α -области (левее и выше кривой aa_1), представляют собой ненасыщенные твердые растворы компонента B в компоненте A , а сплавы, расположенные в β -области (правее и выше кривой bb_1), — соответственно ненасыщенные растворы компонента A в компоненте B . Если фигуративные точки сплавов попадают на кривые aa_1 и bb_1 , то α - и β -растворы становятся насыщенными, и при понижении температуры из них выделяются соответственно вторичные β - или α -кристаллы. Наконец, сплавы двухфазной области $\alpha + \beta$ (расположенные между кривыми

aa_1 и bb_1) всегда состоят из насыщенных один относительно другого α - и β -растворов.

Максимальная взаимная растворимость компонентов A и B в твердом состоянии наблюдается при эвтектической температуре и изображается точками a и b . С понижением температуры растворимость уменьшается и при комнатной температуре изображается соответственно точками a_1 и b_1 .

Кривые ликвидуса $A'e$ и $B'e$, помимо температур начала кристаллизации граничных α - и β -растворов, характеризуют также составы жидкости, насыщенной относительно кристаллов этих растворов. При эвтектической температуре жидкость $Ж_e$ одновременно насыщена относительно α - и β -кристаллов составов точек a и b , так как эвтектическая точка e принадлежит обеим кривым ликвидуса $A'e$ и $B'e$.

Особенность эвтектического равновесия $Ж_e \rightleftharpoons \alpha_a + \beta_b$ при температуре t_e заключается в том, что состав жидкой фазы изображается точкой e , расположенной на горизонтали ab между точками максимальной растворимости a и b . Точки a и b в свою очередь изображают составы выделяющихся из жидкости α - и β -кристаллов при смещении равновесия $Ж_e \rightarrow \alpha_a + \beta_b$ вправо. Эвтектическая реакция всегда протекает только как $Ж_e \rightarrow \alpha_a + \beta_b$, в противном случае нарушается материальный баланс по компонентам (например, из жидкости $Ж_e$ и α_a -кристаллов, содержащих соответственно около 50 и 10 % компонента B , нельзя получить β_b -кристаллы, содержащие около 90 % компонента B , и т. д.).

Сплавы участка a — e называют *доэвтектическими*, сплавы участка e — b — *заэвтектическими*, а сплав, отвечающий по составу точке e , — соответственно *эвтектическим* или просто *эвтектикой*.

Кристаллизация сплавов и их структура. Сплавы участков A — a_1 и b_1 — B кристаллизуются так же, как и сплавы системы с непрерывными рядами жидких и твердых растворов. На кривых охлаждения эти сплавы имеют по две критические точки (перегибы), отвечающие соответственно температурам начала и конца кристаллизации (см. рис. 5.3, б). Более сложные превращения протекают в сплавах участка a_1 — b_1 , например сплавах m , c , n_1 и e_1 (см. рис. 5.6, а).

В интервале температур t_1 — t_3 сплав m кристаллизуется как граничный α -раствор ($Ж_{1-5} \rightarrow \alpha_{2-66}$) и при охлаждении до температуры t_4 в нем не протекают фазовые превращения. При температуре t_4 α -кристаллы состава точки 7 становятся насыщенными относительно β -кристаллов состава точки 8. Поэтому при дальнейшем понижении температуры из первичных α -кристаллов, изменяющих состав по кривой сольвуса aa_1 в направлении от точки 7 к точке a_1 , выделяются вторичные β -кристаллы, состав которых будет изменяться по второй кривой сольвуса bb_1 в направлении от точки 8 к точке b_1 . При комнатной температуре α_{a_1} -кристаллы окажутся в равновесии с β_{b_1} -кристаллами, и доли этих фаз можно измерить отношениями отрезков mb_1/a_1b_1 и ma_1/a_1b_1 .

На кривой охлаждения сплава t существуют три критические точки (рис. 5.6, б): две верхние точки отвечают температурам нача-

ла и конца первичной кристаллизации α -раствора, а третья (нижняя) точка — соответственно температуре начала выделения вторичных β - из первичных α -кристаллов. Под микроскопом в структуре этого сплава (рис. 5.7) при средних увеличениях можно увидеть две однофазные структурные составляющие — первичные α - и вторичные β -кристаллы.

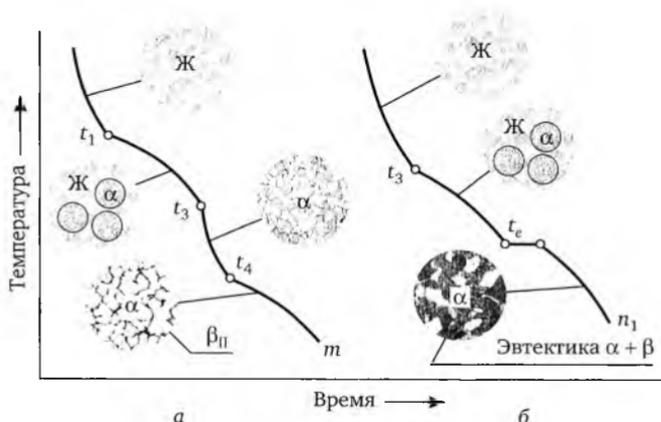


Рис. 5.7. Схема формирования структуры сплавов m и n_1 (из рис. 5.6)

При очень медленном охлаждении вторичные β -кристаллы выделяются по границам первичных β -кристаллов в виде сравнительно компактных частиц (рис. 5.7, а). При ускоренном охлаждении вторичные β -кристаллы могут выделяться не только по границам, но и внутри первичных α -кристаллов. Обычно вторичные выделения имеют пластинчатую (или игольчатую) форму и в пределах каждого зерна α -фазы кристаллографически ориентированы.

Аналогичные превращения протекают в сплавах участка b_1-d (см. рис. 5.6, а) с той только разницей, что в них из жидкости выделяются первичные β -кристаллы, из которых ниже кривой сольвуса bb_1 — вторичные α -кристаллы.

В отличие от сплава m кристаллизация сплава c заканчивается при эвтектической температуре, когда все первичные α -кристаллы принимают состав точки a , а исчезающая жидкость — соответственно точки e (см. рис. 5.6, б). Поэтому эвтектическая реакция — $Ж_e \rightarrow \alpha_a + \beta_b$ — в этом сплаве не протекает.

В момент окончания кристаллизации первичные α_a -кристаллы оказываются насыщенными относительно β_b -кристаллов, богатых компонентом B . Поэтому при понижении температуры ниже t_e в сплаве c сразу начинается вторичная кристаллизация: из первичных α -кристаллов, изменяющих свой состав по кривой сольвуса aa_1 в направлении от точки a к точке a_1 , выделяются вторичные β -кристаллы, состав которых изменяется по второй кривой сольвуса bb_1 в направлении от точки b к точке b_1 . При комнатной температуре в этом сплаве в равновесии

оказываются α_{a1} - и β_{b1} -кристаллы, доли которых измеряются соответственно отношениями отрезков b_1c/a_1b_1 и a_1c/a_1b_1 .

На кривой охлаждения сплава с видны две критические точки (см. рис. 5.6, б): верхняя точка отвечает температуре начала, а нижняя (при t_e) — одновременно температурам конца кристаллизации и начала распада α -раствора с выделением из него вторичных кристаллов β -раствора. По структуре этот сплав от предыдущего сплава m будет отличаться только тем, что в нем будет несколько больше вторичных β - и меньше первичных α -кристаллов (в соответствии с правилом отрезков).

В до- и заэвтектических сплавах помимо первичных α -или β -кристаллов выделяется эвтектика $\alpha + \beta$, а при охлаждении в твердом состоянии — соответственно вторичные β - и α -кристаллы из α - и β -кристаллов разного происхождения.

В процессе первичной кристаллизации доэвтектического сплава n_1 при температуре t_e доли первичных α -кристаллов и оставшейся жидкости J_e определяются отношениями отрезков ne/ae и an/ae . Кристаллизация этого сплава закончится при температуре t_e по эвтектической реакции $J_e \rightarrow \alpha_a + \beta_b$. В момент окончания кристаллизации эвтектики доля всех α_a -кристаллов (первичных и эвтектических) определяется отношением отрезков nb/ab , а эвтектических β_b -кристаллов — соответственно отношением an/ab .

По окончании кристаллизации эвтектики сплав n_1 оказывается состоящим из первичных α_a -кристаллов и эвтектики $\alpha_a + \beta_b$. Доли этих структурных составляющих измеряются теми же отношениями, с помощью которых оцениваются доли первичных α_a -кристаллов и жидкости J_e до начала ее кристаллизации (ne/ae и an/ae).

Из-за уменьшения взаимной растворимости компонентов в твердом состоянии при понижении температуры из α_a - и β_b -кристаллов, насыщенных друг относительно друга, начиная с эвтектической температуры t_e , будут выделяться вторичные β - и α -кристаллы. При комнатной температуре все α -кристаллы (первичные, эвтектические и вторичные) примут состав точки a_1 , а β -кристаллы (эвтектические и вторичные) — соответственно состав точки b_1 .

На кривой охлаждения сплава n_1 видны две критические точки (см. рис. 5.6, б; 5.7): верхняя точка (перегиб) отвечает температуре начала кристаллизации α -раствора, а нижняя (горизонтальная площадка при t_e) — соответственно температуре кристаллизации эвтектики $\alpha_a + \beta_b$ и начала выделения вторичных β - и α -кристаллов из α - и β -кристаллов разного происхождения.

Под микроскопом в структуре этого сплава можно увидеть главным образом три структурные составляющие: первичные α -кристаллы, эвтектику $\alpha_a + \beta_b$ и выделения вторичных β - внутри первичных α -кристаллов. Вторичные α - и β -кристаллы на фоне дисперсной эвтектики $\alpha_a + \beta_b$ заметны не будут, потому что они «солятся» с эвтектическими α - и β -кристаллами, выделяясь на них, как на подложке. Возможные варианты микроструктуры сплава показаны на рис. 5.8.

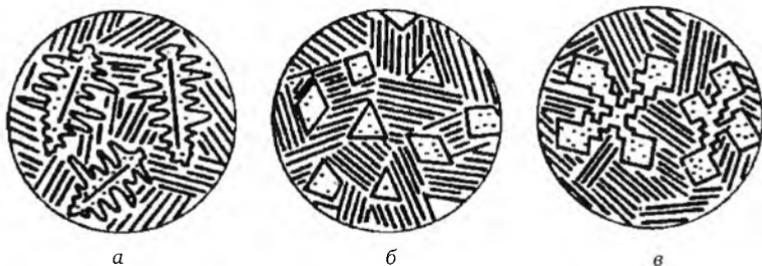


Рис. 5.8. Схемы структур характерных сплавов

Первичные кристаллы могут выглядеть по-разному. Типичные металлы и граничные растворы на их основе обычно кристаллизуются в виде разветвленных кристаллов (дендритов) с округлыми ветвями (рис. 5.8, а), полупроводники и полуметаллы, а также многие промежуточные фазы — в виде огранных кристаллов, имеющих форму компактных многогранников (рис. 5.8, б) или дендритов с огранными ответвлениями (рис. 5.8, в). С увеличением скорости охлаждения в интервале кристаллизации разветвленность дендритов возрастает. Вокруг первичных α -кристаллов видна вторая структурная составляющая — эвтектика $\alpha + \beta$, имеющая пластинчатое или другое строение (см. ниже). Наконец, внутри первичных α -кристаллов в небольшом количестве видна третья структурная составляющая — вторичные β -кристаллы.

Аналогично сплаву n_1 кристаллизуются другие доэвтектические, а также заэвтектические сплавы. Заэвтектические сплавы от сплава n_1 отличаются только первичными и видимыми под микроскопом вторичными кристаллами, все же фазовые превращения, протекающие в этих сплавах, повторяют превращения в сплаве n_1 .

На кривой охлаждения сплав e_1 имеет одну критическую точку — горизонтальную площадку при температуре t_e (см. рис. 5.6, б), а в структуре, главным образом, одну структурную составляющую — эвтектику $\alpha + \beta$. Выделения вторичных β - и α -кристаллов в структуре эвтектических сплавов обычно не видны, так как их сравнительно немного и они сливаются с эвтектическими β - и α -кристаллами, выделяясь на них, как на подложке.

Механизм эвтектической кристаллизации и строение эвтектик.

В зависимости от строения на плоскости металлографического шлифа различают несколько видов эвтектик: пластинчатую (рис. 5.9, а), зернистую (рис. 5.9, б), скелетную (рис. 5.9, в), игольчатую (рис. 5.9, г) и др.

Исследования показали, что в пределах одной эвтектической колонии каждая из фаз является непрерывной. Следовательно, эвтектическая колония — это взаимно проросшие, сильно разветвленные кристаллы разных фаз. Кристалл каждой из фаз, входящих в эвтектику, имеет множество ответвлений, которые, чередуясь в пространстве, дают на металлографическом шлифе (т. е. в произвольном плоском се-

чении) картину «смеси» этих фаз. По существу, каждая эвтектическая колония представляет собой двухфазный сросток двух сильно разветвленных кристаллов разных фаз (бикристалл).

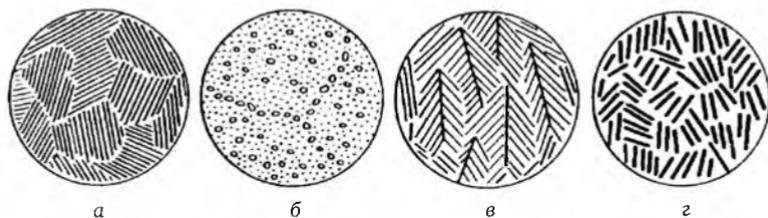


Рис. 5.9. Виды эвтектик в зависимости от строения на плоскости металлографического шлифа: пластинчатая (а), зернистая (б), скелетная (в), игольчатая (г)

Каждая эвтектическая колония растет из одного своего центра, и ее зарождение инициирует одна из фаз эвтектики (базовая), вторая фаза зарождается на ней, как на подкладке. Это и есть начало кристаллизации эвтектики. Вторая фаза растет в виде плоского дендрита на базовом кристалле. Базовая фаза является ведущей в этом росте: ее ответвления растут быстрее, а между ними формируются ответвления второй, ведомой фазы. Весь облик эвтектической колонии определяется ведущей фазой.

Форма и размеры ветвей ведущей фазы зависят от ее кристаллохимической природы и условий кристаллизации. С увеличением скорости охлаждения усиливается разветвление ведущей и ведомой фаз, уменьшается толщина ветвей и расстояние между ними, и внутреннее строение эвтектических колоний становится более дисперсным.

Эвтектику называют нормальной, если она состоит из хорошо различимых под микроскопом эвтектических колоний и характеризуется регулярным расположением ответвлений второй фазы. Колониальное строение наиболее четко проявляется у пластинчатых (см. рис. 5.9, в) и скелетных (см. рис. 5.9, а) эвтектик. Колониальное строение зернистой эвтектики (см. рис. 5.9, б) выявить труднее, но и оно заметно при соответствующем увеличении: зернышки в центральной части колонии обычно мельче, а на периферии — крупнее.

Эвтектику называют аномальной, если ее колонии не выявляются и вторая фаза располагается нерегулярно, хаотично (см. рис. 5.9, г). Аномальные эвтектики также состоят из бикристалльных колоний, но форма и геометрия ответвлений у кристаллов обеих фаз настолько сложны и нерегулярны, что на металлографическом шлифе такая эвтектика выглядит как беспорядочные «изолированные» включения одной фазы внутри другой, преобладающей по объему. К аномальным эвтектикам относятся эвтектики в самых распространенных промышленных литейных сплавах — чугунах (системе Fe—C) и силуминах (системе Al—Si).

В тех случаях, когда при кристаллизации мало эвтектической жидкости или когда в эвтектике преобладает одна из фаз, колониальное стро-

ение эвтектики также не проявляется. Одна из фаз эвтектики может кристаллизоваться на поверхности первичных кристаллов той же фазы, сливаясь с ними, а вторая фаза образует прослойки между первичными кристаллами (рис. 5.10). Прослойки второй фазы эвтектического происхождения вокруг первичных кристаллов называют *вырожденной эвтектикой*.



Рис. 5.10. Вырожденная эвтектика — прослойки второй фазы эвтектического происхождения вокруг первичных кристаллов

Вырожденная эвтектика часто образуется в до- и заэвтектических сплавах, близких по составу к точкам максимальной растворимости компонентов в твердом состоянии (см. рис. 5.6, а; точки *a* и *b*), или может присутствовать в структуре сплавов типа *m* (см. рис. 5.6, а), образуясь в результате неравновесной кристаллизации.

Количественное соотношение фаз в эвтектике не зависит от состава сплава, в котором она кристаллизуется. Во всех до- и заэвтектических сплавах (см. рис. 5.6, а) соотношение между α_a - и β_b -кристаллами в эвтектике при температуре t_e определяется одним и тем же отношением отрезков be/ae , которое характерно и для сплава e_1 эвтектического состава.

Диаграмма состояния системы *A—B* с так называемой простой эвтектикой, состоящей из чистых компонентов *A* и *B* (рис. 5.11), принципиально невозможна, так как отсутствие на диаграмме областей граничных α - и β -растворов связано с малой взаимной растворимостью компонентов в твердом состоянии, которую нельзя изобразить в принятом масштабе или которой часто можно пренебречь.

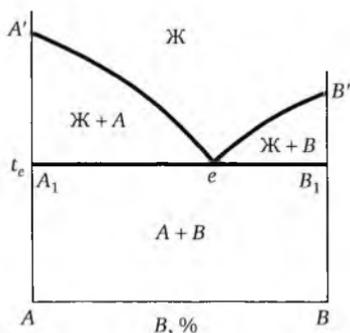


Рис. 5.11. Диаграмма состояния системы с эвтектикой, состоящей из чистых компонентов

5.4. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют перитектику

В сплавах (рис. 5.12) с содержанием компонента B меньше x_C либо больше x_F кристаллизация приводит к образованию однофазных сплавов α и β соответственно.

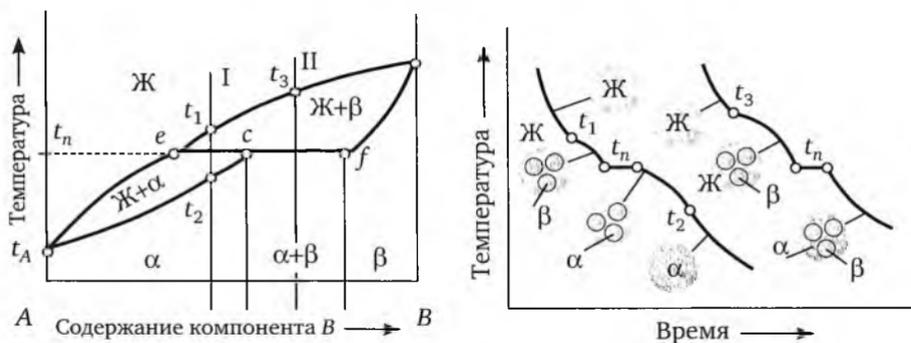
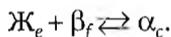


Рис. 5.12. Диаграмма состояния сплавов, компоненты которых ограниченно растворимы в твердом состоянии и образуют перитектику

Сплав II называют *перитектическим* (от греч. *peritēko* — плавлю, расплавляю, разжижаю), потому что жидкость, находящаяся (при постоянном давлении) в равновесии с кристаллическими фазами (химическими соединениями или твердыми растворами), число которых равно числу компонентов системы и при изменении ее температуры уменьшается на единицу.

После предварительного выделения β -кристаллов из жидкой фазы сплав при температуре t_n испытывает перитектическое превращение, в результате которого жидкая фаза $Ж_e$ и твердая фаза β_f , взаимодействуя между собой, образуют новую твердую фазу α_c :



Количество фаз $Ж_e$ и β_f , необходимое для образования фазы α_c , определяется соотношением отрезков $Ж_e/\beta_f = fc/ce$.

Подсчет числа степеней свободы при температуре t_1 и температуре перитектической реакции t_n дает следующие значения:

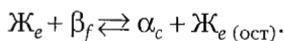
$$C = k + 1 - f = 2 + 1 - 2 = 1 \text{ при } t_1;$$

$$C = k + 1 - f = 2 + 1 - 3 = 0 \text{ при } t_n.$$

Следовательно, кристаллизация в двухфазной области протекает в интервале температур, и каждой температуре соответствует определенная концентрация фаз. При перитектическом превращении в результате взаимодействия жидкого раствора с твердой фазой образуется новая твердая фаза.

В сплавах до- и заперитектических при температуре перитектической реакции имеет место избыток жидкой фазы или β -фазы соответственно. В связи с этим в заперитектических сплавах (сплав II) перитектическая реакция заканчивается также образованием новой ϵ -фазы, но остается избыток α -фазы. В результате сплав приобретает структуру смеси, состоящей из кристаллов двух типов — α_ϵ и β_f (см. рис. 5.12). Получающиеся смеси при перитектическом превращении характеризуются тем, что выделившаяся ранее β -фаза окружена фазой, выделившейся позднее. Кроме этого, количественное соотношение фаз в такой смеси переменное: чем ближе состав сплава к перитектическому, тем в нем больше фазы α_ϵ .

Для доперитектических сплавов (сплав I) перитектическая реакция не приводит к полному затвердеванию сплава, так как наряду с вновь образовавшейся фазой α_ϵ сохраняется жидкая фаза:



В интервале температур $t_n - t_2$ из оставшейся жидкой фазы выделяются кристаллы α -фазы. Полное затвердевание сплава произойдет в точке 3, причем структура сплава будет однофазная, где трудно отличить кристаллы α_ϵ , образовавшиеся при перитектической реакции, от кристаллов α , образовавшихся непосредственным выделением из жидкого раствора.

5.5. Диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением одного из компонентов

Большой практический интерес представляют сплавы, у которых один из компонентов или оба способны совершать полиморфные превращения. В этих сплавах в результате термической обработки можно получать метастабильные состояния структуры с новыми свойствами.

Диаграмма состояния сплавов с полиморфным превращением одного из компонентов представлена на рис. 5.13, а. Сплав I после полного затвердевания при температуре точки 2 в твердом состоянии в интервале температур точек 3 и 4 изменяет кристаллическую структуру. Это вызвано полиморфизмом компонента А, который до температуры точки а имеет тип кристаллической решетки A_α , а при температуре более высокой — A_γ . Причем кристаллическая решетка A_β , такая же, как у компонента В, в результате чего между ними образуется непрерывный ряд твердых растворов.

В сплавах, составы которых лежат между точками b и c, превращение при охлаждении не заканчивается и сплав остается двухфазным ($\gamma + \alpha$). Сплавы, составы которых лежат правее точки c, в твердом состоянии превращений не имеют, структура у них однофазная — γ .

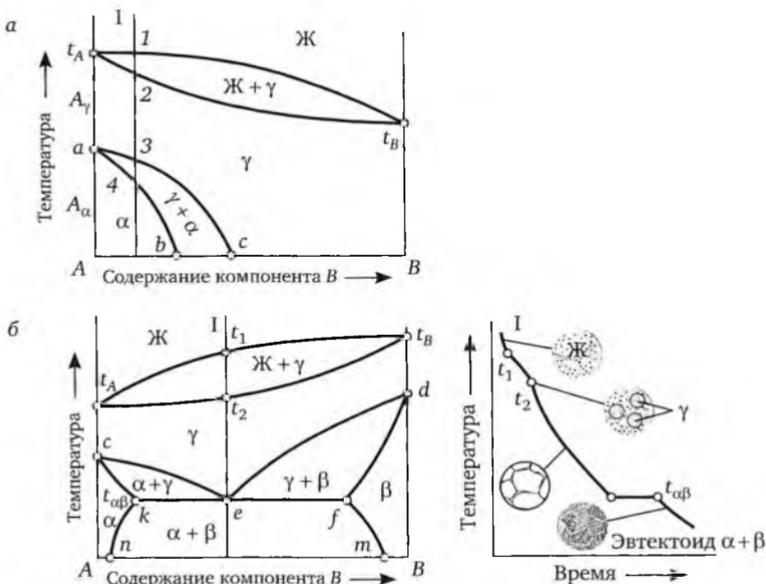


Рис. 5.13. Диаграммы состояния сплавов с полиморфным превращением одного из компонентов (а) и с эвтектидным превращением (б)

5.6. Диаграмма состояния сплавов с полиморфными превращениями компонентов и эвтектидным превращением

Из анализа диаграммы, представленной на рис. 5.13, б, следует, что при кристаллизации всех сплавов данной системы в определенном интервале температур образуется твердый раствор γ , который при понижении температуры ниже $t_{\alpha\beta}$ испытывает эвтектидное превращение: $\gamma_c \rightarrow \alpha_e + \beta_f$.

Образовавшаяся смесь двух твердых фаз называется эвтектоидом. В связи с переменной растворимостью компонентов в твердых растворах α и β при дальнейшем охлаждении следуют вторичные выделения твердых растворов.

5.7. Диаграммы состояния систем с промежуточными фазами

Если промежуточная фаза имеет постоянный состав, т. е. представляет собой определенное соединение A_mB_n , а граничные растворы на основе компонентов A и B — узкие области гомогенности, которыми можно пренебречь (рис. 5.14, а), то ликвидус диаграммы состояния изображают тремя кривыми $A'e_1$, $B'e_2$ и $e_1m'e_2$ начала кристаллизации практически чистых компонентов A , B и соединения A_mB_n , а солидус — двумя эвтектическими горизонталями ab и cd при температурах t_{e1}

и t_{e2} . Соединение A_mB_n кристаллизуется (или плавится) при постоянной температуре t_m , отвечающей точке максимума m' на кривой ликвидуса $e_1m'e_2$.

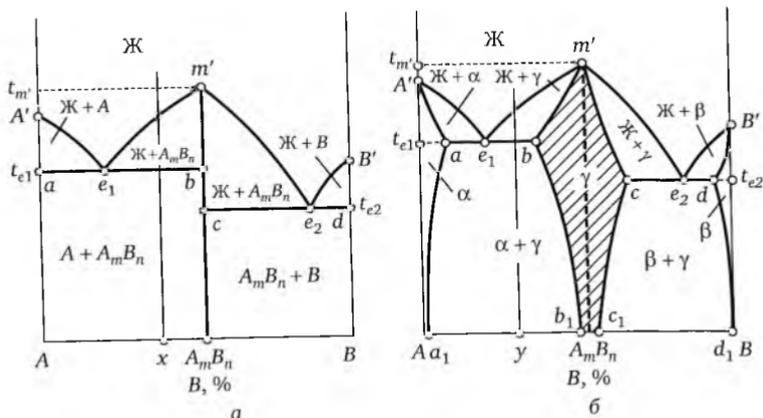


Рис. 5.14. Диаграммы состояния систем с промежуточными фазами постоянного состава (а) и с конгруэнтно плавящейся промежуточной γ -фазой переменного состава (б)

Промежуточные фазы, при плавлении которых составы жидкой и твердой фаз совпадают, называют *конгруэнтно плавящимися* (от лат. *congruens* — совпадающий, соответствующий). Обычно такие диаграммы состояния характерны для систем, образованных металлами с полуметаллами, когда промежуточная фаза представляет собой *соединение с нормальной валентностью* или полупроводниковую фазу.

Для диаграммы состояния с конгруэнтно плавящейся промежуточной γ -фазой переменного состава (рис. 5.14, б) характерны сравнительно широкие области граничных α - и β -растворов и заметная растворимость компонентов A и B в соединении A_mB_n , лежащем в основе γ -фазы. В результате промежуточная γ -фаза имеет свою область гомогенности $b_1bm'cc_1$ (на рис. 5.14, б эта область заштрихована).

Образование α - и β -растворов принципиально не изменяет кривой ликвидуса, которая состоит из трех участков $A'e_1$, $B'e_2$ и $e_1m'e_2$ (вместо компонентов A , B и соединения A_mB_n из жидкости выделяются твердые растворы на их основе). Несколько усложняется только солидус, который изображают кривыми $A'a$ и $B'd$ конца кристаллизации граничных α - и β -растворов, кривыми bm' и $m'c$ конца кристаллизации промежуточной γ -фазы и двумя эвтектическими горизонталями ab и cd при температурах t_{e1} и t_{e2} . Кроме того, на диаграмме состояния появляются кривые сольвуса aa_1 и dd_1 , характеризующие взаимную растворимость компонентов A и B в твердом состоянии, а кривые bb_1 и cc_1 — соответственно растворимость этих компонентов в соединении A_mB_n .

Пунктиром в области гомогенности промежуточной γ -фазы показана ордината соединения A_mB_n , отвечающая его стехиометрическому составу. Сплавы, расположенные в γ -области левее этой ординаты,

представляют собой твердые растворы компонента A , а правее ординаты — соответственно растворы компонента B в соединении A_mB_n .

Твердые растворы компонентов A и B в соединении A_mB_n могут быть разных типов. При образовании растворов замещения атомы компонента A замещают атомы компонента B в его подрешетке (растворы левее ординаты соединения) и, наоборот, атомы компонента B замещают атомы компонента A в его подрешетке (растворы правее ординаты соединения). Таким образом, в пределах γ -области твердые растворы на основе соединения A_mB_n содержат избыток одного из компонентов относительно стехиометрического состава или оба компонента в количествах, отвечающих стехиометрическому составу соединения.

При большой разнице в размерах атомов компонентов, образующих соединение A_mB_n , атомы меньшего размера могут внедряться в междоузлия подрешетки, образованной атомами большего размера. В этом случае на основе соединения образуются твердые *растворы внедрения*.

Все твердые растворы в области гомогенности $b_1bm'cc_1$ промежуточной γ -фазы являются ненасыщенными. Насыщенными относительно кристаллов граничных α - и β -растворов при охлаждении становятся только те γ -растворы, фигуративные точки которых, попадая на кривые сольвуса bb_1 , cc_1 , оказываются затем в двухфазных областях $\alpha + \gamma$ и $\beta + \gamma$. Тогда из кристаллов промежуточной γ -фазы выделяются вторичные α - и β -кристаллы.

Промежуточную γ -фазу переменного состава, область гомогенности которой располагается по обе стороны от ординаты соединения A_mB_n , можно назвать стехиометрической фазой.

В рассмотренных системах конгруэнтно плавящееся соединение A_mB_n независимо от того, образуются на его основе твердые растворы компонентов A и B или нет, выступает как самостоятельный *химический индивид*, для которого правило фаз записывают в виде $C = 2 - f$, т. е. как для однокомпонентной системы. Поэтому системы с конгруэнтно плавящимися промежуточными фазами постоянного и переменного составов можно рассматривать как комбинированные, т. е. состоящие из двух (если образуется одна фаза) или большего числа (если образуется несколько фаз) систем эвтектического и других типов.

Если промежуточная фаза постоянного или переменного состава выделяется в виде первичных кристаллов, как, например, в сплавах x (см. рис. 5.14, а) или y (см. рис. 5.14, б), то под микроскопом при средних увеличениях эти кристаллы выглядят по-разному. Многие промежуточные фазы (Cu_2O , Cu_3P , Pb_3Ca и др.) кристаллизуются в виде сильно разветвленных дендритов, ветви которых на плоскости металлографического шлифа видны как округлые или овальные включения (рис. 5.15, а). Часто первичные кристаллы промежуточных фаз ($SnSb$, Fe_3P , WC и др.) имеют резко очерченные ограненные формы и видны как различные многоугольники (рис. 5.15, б). Наконец, ряд промежуточных фаз ($FeAl_3$, $MnAl_6$ и др.) кристаллизуются в пластинчатой или игольчатой форме (рис. 5.15, в). Ограненные и пластинчатые (игольчатые) выделения промежуточных фаз свидетельствуют об их небольшом поверхностном натяжении.

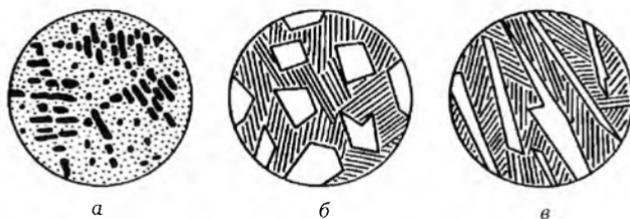


Рис. 5.15. Характерные формы кристаллов промежуточной фазы, кристаллизующейся в форме округлых или овальных включений (а), различных многоугольников (б), в пластинчатой или игольчатой форме (в)

5.8. Физические и механические свойства сплавов в равновесном состоянии

Свойства сплава в значительной степени определяются фазовым составом, о котором можно судить по диаграмме состояния. Впервые на связь между видом диаграммы и свойствами сплава указал Н. С. Курнаков.

Для систем, образующих непрерывные твердые растворы, зависимость свойств от состава фаз изображается кривыми линиями, а для двухфазных смесей — прямыми линиями (рис. 5.16). Эти закономерности указывают на то, что у твердых растворов такие свойства, как твердость $HВ$, удельное электрическое сопротивление ρ , коэрцитивная сила H_c и др., всегда превосходят аналогичные свойства исходных компонентов.

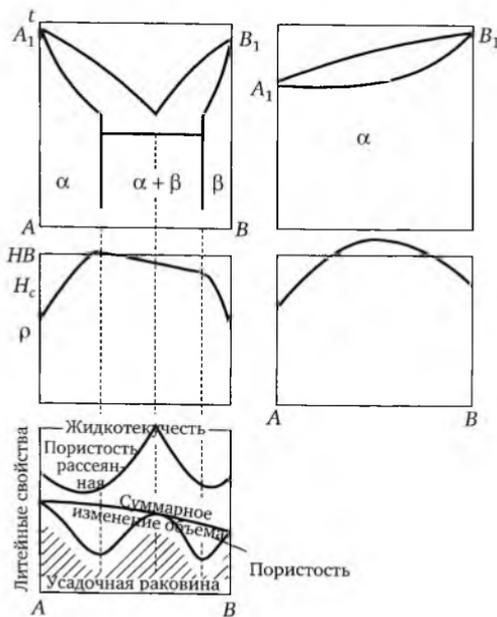


Рис. 5.16. Закономерности Н. С. Курнакова

Упрочнение твердых растворов при сохранении пластичности используют на практике. Так, при растворении в железе кремния или марганца (в количестве 2 %) прочность увеличивается в два раза, а пластичность снижается всего на 10 %. Растворение алюминия (в количестве 5 %) в меди повышает прочность сплава в два раза, а пластичность остается на уровне пластичности меди. Твердые растворы обладают и другими уникальными физическими и химическими свойствами. При растворении Ni (в количестве 30 %) в железе теряются ферромагнитные свойства при температурах 20—25 °С; раствор, содержащий более 13 % Cr, делает железо коррозионно-стойким. В связи с этим твердые растворы получили широкое применение не только как конструкционные материалы, но и как материалы с особыми физическими свойствами.

Большой практический интерес представляют технологические свойства твердых растворов. Сплавы в состоянии твердых растворов хорошо обрабатываются давлением и трудно — резанием. Литейные свойства твердых растворов, как правило, неудовлетворительные. Наилучшей жидкотекучестью обладают эвтектические сплавы (см. рис. 5.16). Промежуточные фазы в большинстве случаев обладают высокими твердостью, температурой плавления и хрупкостью (карбиды, нитриды, бориды, оксиды и др.).

Закономерности, отмеченные Н. С. Курнаковым, являются основой при разработке составов сплавов с заданными свойствами.

Приложение

Химический состав металлических сплавов обычно выражают в процентах по массе (или атомных) или атомных (мольных) долях. Суммарное содержание всех компонентов в сплаве принимается равным 100 % или единице.

Для перехода от процентов по массе к атомным процентам в двойных сплавах пользуются соотношением

$$a = \frac{A}{M_A} \cdot \frac{100}{\frac{A}{M_A} + \frac{100 - A}{M_B}},$$

где A и a — концентрации компонента A , % (по массе) и % (ат.) соответственно; M_A и M_B — атомные массы компонентов A и B .

Для обратного перехода служит соотношение

$$A = a \cdot M_A \cdot \frac{100}{a + M_B \cdot (100 - a)}.$$

Концентрацию второго компонента B можно найти по разности $(100 - a)$ или $(100 - A)$.

Атомные проценты с атомными (мольными) долями компонентов связаны соотношениями

$$x_A = \frac{a}{100} \text{ и } x_B = \frac{100 - a}{100},$$

где x_A и x_B — атомные (мольные) доли компонентов A и B .

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните особенности строения материальных систем.
2. Что называется фазой в металлических системах?
3. Что такое фазовое равновесие, его условия?
4. Объясните правило фаз Гиббса.
5. Почему диаграммы состояния называют равновесными?
6. Что такое компонент сплава, кривая охлаждения, критическая точка сплава?
7. Как экспериментально построить диаграммы состояния сплавов, образованных компонентами A и B ?
8. Какие линии диаграммы носят название ликвидуса и солидуса, предельной растворимости?
9. При каких условиях образуются эвтектика и эвтектоид?
10. Зависит ли изменение свойств сплавов от типа диаграммы состояния?
11. Как изменяется химический состав фаз в процессе кристаллизации сплавов? Диаграмму состояния выберите самостоятельно.

Глава 6

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МЕТАЛЛОВ

Установление закономерностей, связывающих структуру металлов и сплавов, определенных составом и видом обработки, с их свойствами составляет одну из главных задач материаловедения. К настоящему времени накоплен огромный фактический материал, который можно найти в специализированных справочниках и технической литературе.

На протяжении десятилетий материаловедение решало возникавшие технические задачи чисто эмпирическим путем, практически вслепую варьируя состав и условия обработки сплавов. Например, быстрорежущей, нержавеющей, трансформаторной стали, легких и прочных сплавов типа дюралюминия, сплавов для постоянных магнитов, многих жаропрочных и жаростойких сплавов и т. д., имеющих большое значение в современной технике, найдены путем чисто эмпирических исследований. Вместе с тем на современном этапе развития физического материаловедения, по мере углубления знаний о физической природе металлов и происходящих в них превращений, четко проявляется значение теоретических обобщений как основы для решения технических задач.

Известно, что общие свойства металла складываются из свойств структурных элементов, их формы, размеров и взаимного расположения.

Чистые металлы, как правило, обладают большой пластичностью и относительно низким пределом упругости. Твердые растворы имеют более высокую прочность, более высокую твердость и больший предел упругости, чем металлы, входящие в их состав; но в то же время они обладают высокой степенью вязкости и пластичности. Встречающиеся в сплавах химические соединения, как правило, обладают высокой твердостью и большой хрупкостью.

Однородная структура в сплавах может быть образована кристаллитами (зернами) твердых растворов или одним химическим соединением.

Гетерогенная, неоднородная, структура может образовываться:

- а) из зерен нескольких чистых металлов;
- б) из зерен твердых растворов нескольких металлов;
- в) из зерен чистых металлов или твердых растворов, с одной стороны, и химических соединений — с другой.

Смешивая в структурный агрегат зерна мягких металлов или их твердых растворов с зернами химических соединений, можно по-

лучить целый ряд градаций их хрупкости, твердости, пластичности и вязкости. По мере увеличения количества химического соединения увеличиваются твердость и хрупкость сплава, который становится непригодным для технического употребления.

Примером такой системы являются сплавы железа с углеродом (сталь, белый чугун). Аустенит превращается при охлаждении в смесь кристаллов мягкого и пластичного α -железа (феррита) и твердого и хрупкого цементита, количество которого возрастает от нуля (для чистого железа) до 30 % в сплаве с 2 % С (см. рис. 5.1). Соответственно возрастанию количества твердых и хрупких частиц цементита в структуре повышаются твердость и предел прочности сплавов, а пластические свойства понижаются (см. рис. 5.6).

Уже при содержании углерода выше 0,8 %, когда количество цементита в структуре достигает 12 %, сталь, как правило, не может применяться в качестве конструкционного материала (из-за повышенной хрупкости) и такие стали используются, главным образом, для изготовления режущих инструментов. Тем более хрупкими и непригодными для использования в качестве конструкционного материала являются белые чугуны, содержание цементита в структуре которых превышает 30 %.

Варьируя содержание углерода в стали, можно получать таким образом довольно широкую градацию свойств от мягких и пластичных строительных сталей с содержанием 1—3 % цементита до твердой и износостойкой рельсовой стали с содержанием около 8—10 % цементита.

В тех случаях, когда сплав имеет однофазную структуру чистого металла или твердого раствора, существенное влияние на его механические и отдельные физические (например, магнитные) свойства может оказывать величина зерен, а для твердых растворов — также и однородность распределения компонентов раствора. В тех случаях, когда сплав представляет собой гетерогенную смесь двух или нескольких фаз, огромное влияние на свойства оказывают дисперсность и взаимное распределение структурных элементов.

Возможность воздействия на свойства стали путем изменения дисперсности структуры, состоящей из феррита и цементита, широко используется в технике. В одной и той же стали можно осуществить распад аустенита на феррито-цементитную смесь при различном переохлаждении (см. гл. 8, рис. 8.3): чем ниже температура, при которой происходит это превращение, тем более дисперсной получается феррито-цементитная структура. Соответственно, увеличивается твердость, предел прочности и предел текучести, а пластические свойства понижаются.

6.1. Влияние атомной структуры

Механические свойства металла зависят от сил сцепления, связи между атомами в кристаллической решетке (см. рис. 2.14). Силы связи

в решетке определяют упругие свойства металла, поскольку при упругой деформации атомы или сближаются, действуя против сил отталкивания (при сжатии), или удаляются друг от друга, действуя против сил притяжения (при растяжении). Силы связи должны также определять и предельное усилие, которое вызывает разрушение металла — разрыв или излом.

Сопrotивление металла пластической деформации, количественно обнаруживающееся в пределе текучести σ_T , также связано с силами сцепления, поскольку пластическая деформация — это необратимые смещения атомов из их исходных положений равновесия в новые положения в решетке (см. рис. 3.4).

Величина сил связи, конечно, неодинакова в различных металлах, но с очень грубым приближением можно считать, что силы связи больше в тугоплавких металлах и меньше — в легкоплавких. Более точное сравнение может быть сделано по величине теплоты сублимации.

Атомы, входящие в кристаллическую решетку металлов при образовании твердых растворов, могут изменять величину сил связи: например, хром увеличивает силы связи в решетке железа, а углерод уменьшает. Величина и характер сил связи также могут существенно изменяться при образовании соединений металлов с металлоидами или при образовании интерметаллических соединений и промежуточных фаз.

Существенно, что в различных механических свойствах металлов силы связи проявляются по-разному. Непосредственно связаны с ними свойства упругости металлов, выражающиеся модулем упругости. Упругие свойства характерны для данной пространственной решетки (данного конкретного металла) и мало могут быть изменены легированием или термической обработкой. Даже пластическая деформация сравнительно мало отражается на упругих свойствах металлов — в этом и выражается непосредственная связь этих свойств с силами междоатомного взаимодействия. Напротив, сопротивление пластической деформации (предел текучести) может изменяться при сохранении той же пространственной решетки в очень широких пределах при легировании и термической обработке.

Сопrotивление пластической деформации в значительной мере определяет характер разрушения металла под действием внешней силы: низкий предел текучести обуславливает более быстрое наступление пластической деформации и тогда разрушению предшествует значительное пластическое течение металла, разрушение получается вязкое. Напротив, высокий предел текучести означает, что пластическая деформация затруднена и при росте напряжений в материале (под действием внешней силы) могут быть превышены силы сцепления и наступит хрупкое разрушение.

Известно также, что пониженная прочность реальных кристаллов (по сравнению с вычисляемой теоретически исходя из оценки величины сил междоатомного взаимодействия) связана с наличием дефектов,

нарушений правильности их кристаллического строения. Следовательно, повышение прочности может быть достигнуто путем приближения к структуре идеально правильного кристалла. Кристалл с совершенной структурой должен обладать теоретической прочностью.

Однако есть и другой путь упрочнения металлов, давно уже используемый в технике: создание в кристаллах большого числа равномерно распределенных и примерно одинаковых по своему действию неоднородностей строения.

Низкая прочность реальных кристаллов объясняется тем, что перенапряжения около всегда присутствующих дефектов строения приводят к местному преодолению атомных связей, вследствие чего здесь начинается разрушение или пластическая деформация (см. рис. 3.7). Для разрушения или пластической деформации требуется небольшое напряжение, так как здесь имеет значение наличие пиков перенапряжений около дефектов, и в сопротивлении нагрузке участвует лишь очень небольшая часть атомов. Другое дело, если имеется много примерно одинаковых и равномерно распределенных дефектов строения — чем больше в кристалле очагов перенапряжений, тем выше среднее напряжение, при котором начинается заметная пластическая деформация, следовательно, выше предел текучести.

Практика подтверждает этот вывод: наибольшей прочностью обладают не чистые металлы и не твердые растворы металлов, а сплавы с гетерофазной мелкодисперсной структурой, а также металлы со структурой, искаженной пластической деформацией (наклепанные металлы).

Этим объясняется широко используемая в технике возможность повышать прочность сплава за счет другого металла с более высоким уровнем сил межатомной связи (вместо сплавов на основе алюминия использовать сплавы на основе меди, медные сплавы заменить сплавами на основе железа и т. д.) или легировать элементами, увеличивающими силы связи (например, добавки хрома в железе и стали). Этот путь повышения прочности особенно важен для сплавов, предназначенных для работы при высоких температурах (жаропрочных сплавов), где, по ряду причин, оказывается малоэффективным упрочнение за счет тонкой субмикроскопической неоднородности строения кристаллов.

6.2. Влияние деформации пространственной решетки

Все изменения в металлах или их сплавах, вызывающие деформацию кристаллической решетки, вызывают также значительные изменения их механических и физических свойств. Больше всего они повышают сопротивление течению пластической деформации и, следовательно, величину предела текучести.

Прежде всего, это относится к процессу холодной деформации металлов.

Под влиянием внешних механических сил, превышающих предел упругости при температурах ниже температуры начала рекристаллизации $T_{н.р}$, металл начинает течь, что сопровождается увеличением прочности и твердости, снижением пластичности материала. Это явление — наклеп — объясняется накапливанием в металле части энергии деформации, которая расходуется на искажение кристаллической решетки, образование преимущественно ориентированных кристаллов (текстур), изменение дислокационных структур, а также на увеличение удельного объема металла в слое.

В технике наклеп используется для поверхностного упрочнения деталей. Кроме того, наклеп приводит к возникновению в поверхностном слое детали благоприятной системы остаточных напряжений, влияние которых главным образом и определяет высокий упрочняющий эффект поверхностной пластической деформации, выражающийся в повышении усталостной прочности, а иногда и износостойкости. Наклеп осуществляют специальными способами и на специальном оборудовании, например, производят обкатку цилиндрических поверхностей роликами, зубьев зубчатых колес роликами или зубчатыми накатниками, дробеструйную обработку фасонных поверхностей, обработку ударными инструментами и др.

Другими структурными факторами, весьма значительно влияющими на механические свойства металлов, являются закономерности движения дислокаций в кристаллической решетке.

Перемещению дислокаций должны мешать всякого рода неправильности в строении кристаллической решетки: границы зерен, блоков, посторонние включения, частицы других фаз (при определенной степени их дисперсности), наконец, сами дислокации. Очень большое влияние на движение дислокаций в решетке оказывают кристаллическое строение твердого раствора и температура.

6.3. Влияние размеров и ориентации зерен

Для техники наиболее важными являются механические свойства металлов, главным образом, сопротивление пластической деформации (σ_T и σ_B).

Характерная особенность всякого кристалла заключается в анизотропии его свойств — они неодинаковы по различным кристаллографическим направлениям. Например, для металлов, кристаллизующихся в кубической системе, плоскостями, по которым сопротивление пластической деформации меньше, являются преимущественно плоскости октаэдра, куба или ромбического додекаэдра (см. рис. 2.25).

Если подвергать растяжению отдельный кристалл металла, например цилиндрическую нить или цилиндрический столбик, то на поверхности кристалла, как только он начнет пластически деформироваться, появляются параллельные линии или сдвиги, находящиеся под некоторым оп-

ределенным углом к оси цилиндра. Вместе с тем кристалл изменяет свою форму и при дальнейшем растягивании может превратиться в ленту.

Металлический цилиндр, состоящий из нескольких крупных кристаллов, видимых простым глазом, при растяжении будет удлиняться не по всей длине равномерно — пластические деформации преимущественно произойдут в середине отдельных кристаллов. Места стыков двух соседних кристаллов меньше поддались пластической деформации (рис. 6.1), потому что на границе между двумя соседними кристаллическими зернами с различной ориентировкой атомные силы не соответствуют равновесной системе пространственной кристаллической решетки.

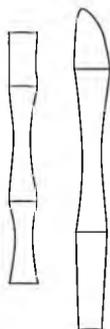


Рис. 6.1. Схема деформации при растяжении крупнокристаллического образца

Следовательно, крупнозернистые металлы должны иметь меньший предел текучести, чем мелкозернистые; но в то же время крупнозернистые металлы менее пластичны. При течении металла каждое зерно имеет тенденцию деформироваться как отдельный кристалл, т. е. в определенном кристаллографическом направлении, и при этом оно меняет свою форму. Поэтому между двумя соседними кристаллами с различной ориентировкой во время их пластической деформации должны образоваться натяжения и трещины.

В мелких кристаллах неравномерность изменения формы зерна настолько ничтожна, что не превышает сил сцепления. В крупнозернистых металлах деформация отдельного зерна настолько неравномерна, а силы, вызванные этой неравномерностью деформации, настолько велики, что могут привести к разрывам между отдельными зернами. Поэтому в тех металлах, которые должны выдерживать в холодном виде значительную пластическую деформацию, нужно стремиться получить мелкозернистую структуру, несмотря на то, что она будет иметь более высокий предел упругости, чем крупнозернистая.

Крупнозернистые металлы, кроме того, хрупки. Хрупкость металла обратно пропорциональна работе пластической деформации, которая имеет место с начала удара до начала излома (разрушения) образца. Работа же пропорциональна, главным образом, объему пластически деформированного участка.

Объем пластически деформированного участка, при одинаковых свойствах металла, пропорционален равномерности распространения упругой и пластической деформации: чем она равномернее распространяется, чем больше объем пластической деформации, тем больше обнаруживается вязкость металла, и наоборот.

Поэтому все обстоятельства, способствующие неравномерности распространения упругой и пластической деформации, способствуют хрупкости металла. Одним из таких обстоятельств является надрез на поверхности, около которого сосредоточиваются упругая деформация и упругие силы. Крупнокристалличность является таким же фактором.

Так как всякое кристаллическое зерно деформируется неравномерно по различным кристаллографическим направлениям (см. рис. 2.25), то в некоторых точках зерна возникают упругие силы, значительно превосходящие свою среднюю величину, которые и вызывают разрыв металла в этой точке.

Начавшийся разрыв играет роль надреза, т. е. еще в большей степени способствует сосредоточению в данном месте упругих сил и деформаций; распространяясь, он приводит к излому (см. рис. 3.7). Поэтому крупнозернистый металл, обнаруживая при статической нагрузке очень низкий предел упругости и большую степень пластичности, оказывается ненадежным материалом в отношении хрупкости при динамической нагрузке. Влияние величины зерна на свойства чистого железа представлено в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Влияние величины зерна на механические свойства железа

| Величина зерна (число зерен на 1 мм ²) | Предел прочности, Мн/м ² | Предел пропорцио- нальности, Мн/м ² | Удлинение, % |
|--|---|--|-----------------|
| Монокристалл | 140—150 | 30—40 | 30—50 |
| 6,3 | 237 | 46 | 35,3 |
| 15,3 | 258 | 44 | 47,0 |
| 48,8 | 270 | 66 | 50,7 |
| 51,0 | 274 | 70 | 44,8 |
| 75,5 | 293 | 142 | 48,3 |
| 91,6 | 282 | 117 | 50,3 |
| 92,0 | 284 | 118 | 42,5 |
| 120 | 290 | 118 | 42,5 |
| 194 | 294 | 108 | 47,5 |

Исключительный практический интерес представляет вопрос о зависимости свойств от текстуры, т. е. от ориентации кристаллической решетки зерен.

В отсутствии текстуры, т. е. когда отдельные зерна ориентированы статистически беспорядочно, материал оказывается квазиизотропным — его физические и механические свойства не зависят от направления, несмотря на то, что каждое зерно в отдельности обладает анизотропией свойств.

Но, как уже указывалось в гл. 3, при достаточно сильной пластической деформации (прокатке, волочении и т. п.) образование текстуры приводит к макроскопической анизотропии свойств, т. е. механические и физические свойства материала, например вдоль и поперек направления прокатки, оказываются уже неодинаковыми.

Важно отметить, что изделия (прутки, лента, лист), получившие текстурованность в процессе пластической деформации, часто оказываются текстурированными и после рекристаллизованного отжига, а тип текстуры, получающейся после отжига, часто отличается от текстуры деформации. Возможность управлять степенью и характером текстуры представляет в некоторых случаях большой практический интерес. Примером этого является текстурованная трансформаторная сталь.

Введение кремнистой трансформаторной стали в технику означало в свое время крупнейший шаг в электротехнике, так как значительно увеличило экономичность трансформаторов.

Трансформаторная сталь представляет собою железо с содержанием углерода ниже 0,02 % и легированное 3—4 % Si, находящимся в твердом растворе в α -железе, что понижает электропроводность и существенно уменьшает потери, связанные с вихревыми токами, возникающими в сердечниках трансформаторов. В то же время намагничиваемость этого сплава оказывается достаточно высокой, а коэрцитивная сила — низкой, что снижает потери, связанные с перемагничиванием сердечников (потери на гистерезис) при изменении направления тока.

Лист трансформаторной стали из-за усреднения магнитных свойств составляющих его зерен обладает некоторой средней намагничиваемостью, не зависящей от направления (вдоль и поперек прокатки).

Из данных по измерениям магнитных свойств монокристаллов α -железа (и монокристаллов трансформаторной стали) известно, что они обладают магнитной анизотропией. Наибольшая намагничиваемость, т. е. наибольшее возрастание магнитной индукции B по мере возрастания напряженности магнитного поля H наблюдается вдоль ребра куба, т. е. вдоль направления $[100]$. Несколько ниже намагничиваемость вдоль направления диагонали грани куба $[110]$, и наиболее низкая намагничиваемость — вдоль направления пространственной диагонали куба $[111]$.

Поэтому существенно улучшить магнитные свойства стали можно за счет создания кристаллографической текстуры — направление $[100]$ должно совпадать с направлением прокатки, а плоскость (110) должна лежать в плоскости прокатки.

Технология изготовления стали с текстурой, указанной на рис. 6.2, a и известной под названием «текстура Госса», была разработана и ос-

воена в промышленном масштабе. В настоящее время путем холодной прокатки с последующим рекристаллизационным отжигом при повышенных температурах выпускается значительное количество текстурованной трансформаторной стали, и введение такой стали в практику привело к значительному улучшению качества трансформаторов и других электрических машин.

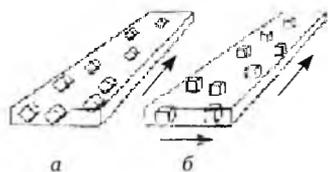


Рис. 6.2. Схема текстуры Госса (а) и кубической текстуры (б) в трансформаторной стали

6.4. Гетерогенная структура

Если к мягким и пластичным зернам основного металла механически прибавлены зерна другого металла или его химического соединения, то свойства агрегата представляют собой некоторую среднюю из свойств составных элементов. Если добавленный структурный элемент имеет большую твердость и хрупкость, чем основной металл, то сплав будет иметь более высокую твердость и хрупкость, и тем в большей степени, чем в большей пропорции добавлен твердый и хрупкий структурный элемент.

Однако эти свойства не представляют собой простую арифметическую среднюю величину из свойств структурных элементов — на свойства агрегата в очень большой степени влияют форма и способ распределения добавочного элемента.

Например, добавочный структурный элемент, имеющий, в противоположность основному металлу, высокую твердость и хрупкость, располагается в форме прослоек между зернами металла, например в форме сплошных оболочек вокруг зерен (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Сталь У12. Пограничные выделения вторичного цементита в виде сплошной тонкой светлой сетки (матрица) по границам зерен бывшего аустенита, превратившегося при медленном охлаждении в крупнопластинчатый перлит

В этом случае связь между зернами должна ослабнуть, и способность металла к пластической деформации уменьшится в еще большей степени, чем увеличится его твердость. Твердые и хрупкие пластины между мягкими и пластичными зернами являются препятствием при течении металла: они нарушают равномерность и правильность движения частиц металла, увеличивают неоднородность в распределении пластической деформации и, следовательно, способствуют увеличению упругих натяжений между зернами и внутри них и легко ведут к образованию рванин и трещин.

Совершенно другой эффект получится в случае распределения твердого и хрупкого добавочного элемента в форме мельчайших частиц, равномерно распыленных по всей массе металла (рис. 6.4).

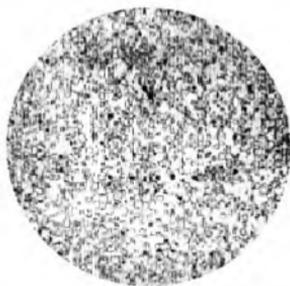


Рис. 6.4. Структура зернистого цементита. Состоит из ферритной матрицы с включениями цементита. Предпочтительная структура для отожженных углеродистых сталей

В этом случае пластическая деформация будет равномерно распределяться по всей массе металла, не вызывая местной концентрации наклепа, и металл сохранит свою пластичность. В то же время присутствие твердых частиц внутри мягкой пластичной массы металла повысит величину внутреннего трения, которая тем больше, чем больше поверхность соприкосновения между основным металлом и распределенными в нем твердыми частицами, т. е. чем больше дисперсность твердых частиц и их относительная масса.

Но способность материала к пластической деформации не всегда определяется низким пределом текучести, особенно металла с гетерогенной структурой.

Сплав с крупными, обособленными зернами основного мягкого металла, между которыми расположены крупные пластины твердого и хрупкого структурного элемента, имеет в первый момент более высокую степень пластичности, более низкий предел упругости, чем тот же сплав, в котором твердый структурный элемент расположен в форме мельчайших шарообразных частиц, равномерно распределенных во всем объеме. Но степень пластичности в первом случае меньше, чем во втором, вследствие неоднородного распределения внутренних пластических деформаций, и в результате этого — местное скопление пластической деформации, наклеп и разрыв.

Рассмотрим волочение стальной проволоки со структурой из мягких зерен чистого железа (феррита) и твердых и хрупких зерен цементита (карбида железа). Цементит может находиться в стали, в зависимости от предварительной термообработки, в форме мельчайших пластин или равноосных зерен, степень дисперсности которых может колебаться в очень значительных пределах.

Проволока, в которой цементит находится в форме крупных пластин или зерен, а феррит — в форме крупных зерен, имеет очень низкий предел текучести, но при волочении она скоро приобретает жесткость и хрупкость, рвется и ломается. Наоборот, та же проволока после термической обработки, которая превращает цементит в мельчайшие, ультрамикроскопические зерна, имеет высокий предел текучести; на ощупь она жестка, пружинит, но при волочении металл дает возможность дать обжатие в 70—90 %.

Основное в этом случае заключается в равномерности распределения внутри металла упругих и пластических деформаций и степени наклепа, вследствие очень большой дисперсности и равномерного распределения цементита в мягком феррите.

Другим примером может служить распределение сернистых включений внутри металла. Никель долгое время не могли получить в пластичном виде вследствие того, что он всегда имеет небольшую примесь серы в виде сульфида никеля (NiS), расположенного тонкими, хрупкими прослойками на границах металла. Добавление к расплавленному никелю небольшого количества магния переводит серу в форму соединения с магнием, которое выделяется в виде зерен, не нарушая пластичности металла.

Аналогичное явление наблюдается в железе и стали: сернистое железо (FeS) в форме тонких прослоек по границам зерен железа даже при небольшом проценте представляет собой одну из наиболее опасных примесей в стали — оно вызывает разрушение металла при температуре красного каления. Та же сера в форме сернистого марганца является относительно безвредной примесью, потому что он выделяется в форме круглых капель.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему установление закономерностей, связывающих структуру металлов с их свойствами, важно для практики?
2. Приведите примеры зависимости между структурой и свойствами металлов.
3. Приведите примеры влияния атомной структуры на практические свойства металла.
4. Расскажите о применении в технике изменений в металлах, вызванных деформацией кристаллической решетки.
5. Разберите особенности влияния размеров и ориентации микроструктуры на эксплуатационные свойства металла.
6. Разберите особенности пластической деформации металлов с гетерогенной структурой.

Глава 7

ЖЕЛЕЗО

И ЕГО СПЛАВЫ

Историческая справка. Железоуглеродистые сплавы — сплавы железа с углеродом на основе железа (стали и чугуны) — важнейшие металлические сплавы современной техники. По оценкам Международного института чугуна и стали (*IISI*), мировой объем производства стали в 2009 г. составил более 110 млн т.

Изучение структурообразования железоуглеродистых сплавов (диаграммы состояния железо — углерод) начал основоположник современного металловедения, основатель научной школы русских металлургов и металловедов Д. К. Чернов, впервые указав (1868) на существование в сталях критических точек и на зависимость их положения от содержания углерода. Найденная по цветам каления графическая зависимость температуры аллотропических превращений в твердой стали и плавления стали от содержания в ней углерода явилась прототипом диаграммы фазового равновесия Fe—C. Только в 1909 г. Ф. Осмонд (Франция) измерил эти температуры при помощи термоэлектрического термометра, изобретенного его соотечественником Ле Шателье (1888), описал характер микроструктурных изменений при переходе через критические точки и дал названия некоторым структурам железоуглеродистых сплавов.

Количественные изменения, связанные с положением линий равновесия, происходят непрерывно. Кратко история изучения диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов разобрана в параграфе 7.4.

7.1. Диаграмма состояния сплавов железо — цементит (метастабильное равновесие)

Фазовые состояния железоуглеродистых сплавов при разных составах и температурах описываются диаграммами метастабильного равновесия (система Fe—Fe₃C, рис. 7.1) и стабильного равновесия (система Fe—C, рис. 7.8).

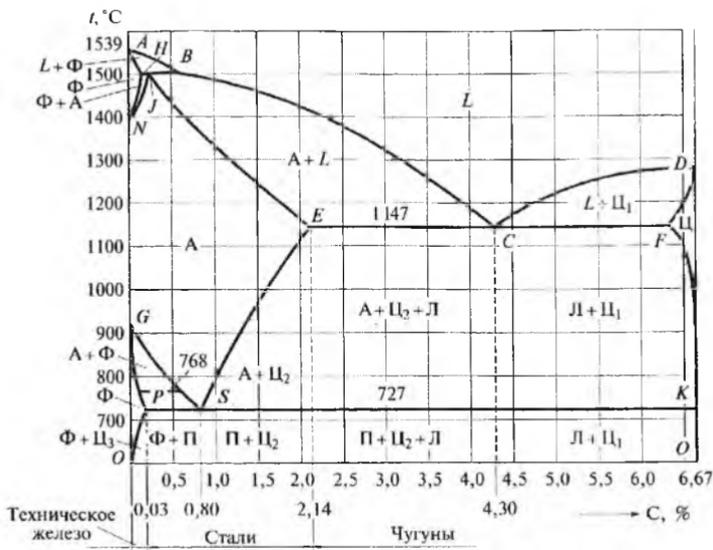


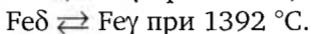
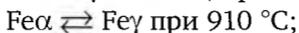
Рис. 7.1. Диаграмма состояния Fe—Fe₃C со шкалой количества цементита:

A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, N, P, S — узловые точки диаграммы (табл. 5.1); фазы и структурные составляющие: *L* — жидкая фаза; *A* — аустенит; *F* — феррит; *Ц* — цементит (первичный *Ц*₁, вторичный *Ц*₂ и третичный *Ц*₃); *П* — перлит; *Л* — ледеburит; линии диаграммы: *ABCD* — линия ликвидуса (начало кристаллизации); *AB* — выделение δ-феррита из жидкости *L*; *BC* — выделение аустенита γ из *L*; *CD* — выделение из жидкости *L* цементита первичного *Ц*₁; *AHJEF* — линия солидуса (конец кристаллизации); *HJB* — перитектическое равновесие; *ECF* — эвтектическое равновесие; *PSK* — эвтектоидное равновесие; *HN* — равновесие $\Phi \rightleftharpoons A$; *JN* — равновесие $A \rightleftharpoons (\Phi + A)$; *GS* — равновесие $A \rightleftharpoons (A + \Phi)$; *GP* — равновесие $\Phi \rightleftharpoons (\Phi + A)$; *ES* — линия изменения растворимости углерода в γ-железе и выделения *Ц*₂; *KFD* — область гомогенности цементита; *PQ* — линия изменения растворимости углерода в α-железе и выделения *Ц*₃

Компоненты и фазы в системе железо — углерод

Железо — переходный металл серого цвета, находится в VIII группе периодической системы; атомный номер 26; атомная масса 55,85; атомный радиус 0,127 нм; температура плавления 1540 °С. Чистое железо (99,9917 % Fe) имеет твердость *НВ* 490 МПа, плотность 7,874 г/см³, оно пластично ($\delta = 40 \div 45 \%$). Техническое железо содержит 99,9 % Fe.

Полиморфные превращения в железе связаны с перестройками ГЦК-решетки γ-Fe и ОЦК-решетки α- и δ-Fe:



Углерод — неметаллический элемент 2-го периода IV группы периодической системы; атомный номер 6; атомная масса 12; плотность 2,5 г/см³; атомный радиус 0,077 нм; температура плавления 3500 °С. Элементарная природа углерода установлена А. Лавуазье (Франция) в конце 1780-х гг. Углерод существует в нескольких аллотропных моди-

фикации с очень разнообразными физическими свойствами (рис. 7.2). Разнообразие модификаций обусловлено способностью углерода образовывать химические связи разного типа.

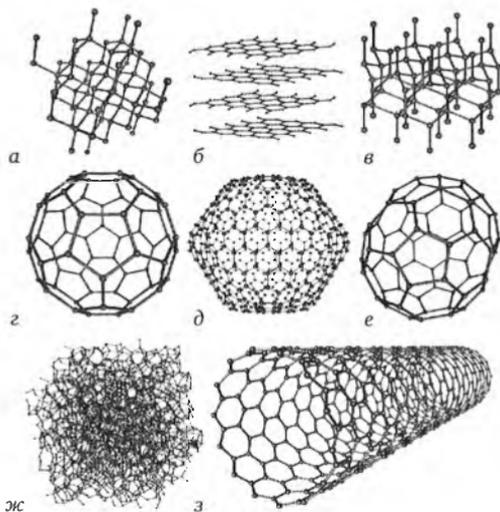


Рис. 7.2. Структура углерода:

а — алмаз; *б* — графит; *в* — лонсдейлит; *г* — фуллерен — букибол C_{60} ;
д — фуллерен C_{540} ; *е* — фуллерен C_{70} ; *ж* — аморфный углерод;
з — углеродная нанотрубка

Алмаз (рис. 7.2, *а*) — главные отличительные черты алмаза — высочайшая среди минералов твердость, наиболее высокая среди всех твердых тел, является диэлектриком. У алмаза очень низкий коэффициент трения по металлу на воздухе (0,1), что связано с образованием на поверхности кристалла тонких пленок адсорбированного газа, играющих роль своеобразной смазки.

Температура плавления алмаза составляет 3700—4000 °С. На воздухе алмаз сгорает при 850—1000 °С, а в струе чистого кислорода горит слабо-голубым пламенем при 720—800 °С, полностью превращаясь в конечном счете в углекислый газ. Одним из важных свойств алмаза является люминесценция. Под действием солнечного света и особенно катодных, ультрафиолетовых и рентгеновских лучей алмазы начинают люминесцировать — светиться различными цветами. Большой показатель преломления, наряду с высокой прозрачностью и достаточной дисперсией показателя преломления (игра цвета), делает алмаз одним из самых дорогих драгоценных камней.

Графит (от греч. γράφειν — пишу) — из класса самородных элементов, структура слоистая, имеет низкую прочность, является устойчивой аллотропической формой в обычных условиях (рис. 7.2, *б*).

Лонсдейлит (рис. 7.2, *в*), или алмаз гексагональный, — одна из аллотропных модификаций углерода. Элементарная ячейка алмаза содер-

жит восемь атомов углерода, а лонсдейлита — четыре. Решетки алмаза и лонсдейлита отличаются способом упаковки.

Карбин представляет собой мелкокристаллический порошок черного цвета (плотность 1,9—2 г/см³), обладает полупроводниковыми свойствами. Получен в искусственных условиях из длинных цепочек атомов углерода, уложенных параллельно друг другу.

Фуллерены (рис. 7.2, г — е) — молекулярные соединения, представляющие собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из четного числа трехкоординированных атомов углерода. Своим названием эти соединения обязаны инженеру и изобретателю Р. Б. Фуллеру (США), разработавшему куполообразные конструкции из прямых стальных стержней.

Аморфный углерод (рис. 7.2, ж) — в основе строения аморфного углерода лежит разупорядоченная структура монокристаллического графита (всегда содержит примеси). Это кокс, бурые и каменные угли, технический углерод, сажа, активный уголь.

Углеродные нанотрубки (рис. 7.2, з) — протяженные структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров состоят из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов)¹ и заканчиваются обычно полусферической головкой.

Взаимодействуя с железом, углерод образует следующие фазы:

| Название | Природа фазы | Структура |
|----------|--|--|
| Жидкая | Ненасыщенный жидкий раствор железа и углерода | При перегреве до 1600—1700 °С расплавы с ближним порядком ОЦК- или ГЦК-структуры |
| α-Феррит | Твердый раствор внедрения углерода в α-Fe с максимальной растворимостью 0,02 % при 727 °С, минимальной — 0,006 % при температуре ниже 100 °С | Объемно-центрированная кубическая |
| Аустенит | Твердый раствор внедрения углерода в γ-Fe с максимальной растворимостью 2,14 % при 1147 °С, минимальной — 0,8 % при 727 °С | Гранецентрированная кубическая |
| δ-Феррит | Твердый раствор внедрения углерода в δ-Fe с максимальной растворимостью 0,1 % при 1149 °С | Объемно-центрированная кубическая |
| Цементит | Карбид железа Fe ₃ C с узкой зоной гомогенности в интервале температур 580—1260 °С, содержание углерода — 6,67 % | Ромбическая |

¹ Лауреатами Нобелевской премии по физике за 2010 г. были объявлены российские ученые А. Гейм и К. Новоселов, сейчас работающие в университете Манчестера (Великобритания), «за основополагающие эксперименты с двумерным материалом графеном».

Феррит мягок и пластичен. Цементит имеет очень высокую твердость, хрупок; диссоциирует на железо и графит: $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}(\text{Г})$.

Строение затвердевших железоуглеродистых сплавов обусловлено полиморфными превращениями железа, уменьшением растворимости в нем углерода, графитизацией цементита (см. рис. 7.1). Значения координатных точек диаграммы Fe—Fe₃C приведены в табл. 7.1. Точка А (1539 °С) отвечает температуре плавления α(δ)-железа. Точки N и G соответствуют равновесию α ⇌ γ. Три горизонтальные линии (HJB, ECF и PSK) характеризуют соответственно три температуры невариантных равновесий:

1499 °С — перитектического равновесия $L + \Phi \rightleftharpoons A$;

1147 °С — эвтектического равновесия $L + A \rightleftharpoons \text{Ц}$;

727 °С — эвтектоидного равновесия $A \rightleftharpoons \Phi + \text{Ц}$.

Таблица 7.1

Координаты точек диаграммы железо — цементит

| Точка | T, °С | % С, масс. |
|-------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|
| A | 1539 | 0 | E | 1147 | 2,14 | P | 727 | 0,3 |
| B | 1499 | 0,5 | C | 1147 | 4,3 | S | 727 | 0,8 |
| H | 1499 | 0,1 | F | 1147 | 6,3 | K | 727 | 6,67 |
| J | 1499 | 0,16 | D | 1260 | 6,67 | Q | 600 | 0,01 |
| N | 1392 | 0 | G | 911 | 0 | O | 600 | 6,67 |

Перитектическое равновесие наблюдается только у сплавов, содержащих 0,1—0,5 % С. По эвтектической реакции у всех сплавов, содержащих более 2,14 % С, образуется эвтектическая смесь аустенита и цементита, называемая *ледебуритом*. Эвтектоидное превращение у всех сплавов, содержащих более 0,03 % С, протекает с образованием эвтектоидной смеси феррита и цементита, которую называют *перлитом*.

При 768 °С — магнитное превращение (*точка Кюри*) — переход из ферромагнитного состояния в парамагнитное. Это превращение не связано с изменением типа кристаллической решетки и имеет электронную природу.

Температуры, соответствующие определенным линиям диаграммы состояния Fe — Fe₃C (*критические точки*), имеют международное обозначение — A_r (при охлаждении) и A_c (при нагреве): A — преобразованное Φ. Осмондом в заглавную букву обозначение Д. К. Чернова «а» при пояснении им критических точек стали, r — *refroidissement* (охлаждение), c — *chauffage* (нагрев). Для чистого железа критические точки: A₂ — 768 °С; A₃ — 911 °С; A₄ — 1392 °С (рис. 7.3).

Критические точки железоуглеродистых сплавов соответствуют линиям диаграммы Fe — Fe₃C (см. рис. 7.1):

- S (727 °С) — эвтектоидная точка — аустенит с содержанием 0,8 % углерода распадается с образованием перлита — эвтектоидной смеси феррита и цементита — (α + Fe₃C);

- $A_1 (A_{r1}, a_{c1})$ — линия PSK (727°C) — перлитное превращение;
- $A_2 (A_{r2}, a_{c2})$ — линия MO (768°C) — магнитное превращение, точка Кюри;

- $A_3 (A_{r3}, a_{c3})$ — линия GS , полиморфное $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ превращение;
- $A_4 (A_{r4}, a_{c4})$ — линия NH , полиморфное $\delta \rightleftharpoons \gamma$ превращение;
- $A_m (A_{rm}, A_{cm})$ — линия SE , выделение цементита вторичного.

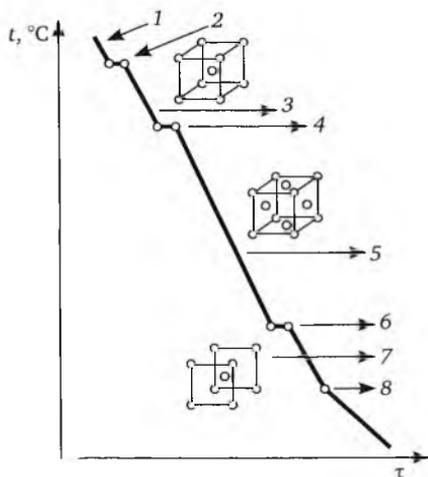


Рис. 7.3. Кривая охлаждения чистого железа:

1 — жидкий расплав; 2 — $t_{пл} = 1539^\circ\text{C}$; 3 — $\delta(\alpha)\text{-Fe}$; решетка ОЦК; 4 — $A_4 = 1392^\circ\text{C}$; $\text{Fe}_\delta \rightleftharpoons \text{Fe}_\gamma$; 5 — $\gamma\text{-Fe}$; решетка ГЦК; 6 — $A_3 = 911^\circ\text{C}$; $\text{Fe}_\gamma \rightleftharpoons \text{Fe}_\alpha$; 7 — $\alpha\text{-Fe}$; решетка ОЦК; 8 — $A_2 = 768^\circ\text{C}$ (точка Кюри)

В зависимости от содержания углерода железоуглеродистые сплавы подразделяются на три группы — техническое железо, стали и чугуны (см. рис. 7.1). С увеличением содержания углерода в сплавах температура критической точки A_3 снижается, а A_4 повышается. Значение точек A_1 и A_2 не меняется.

Техническое железо содержит меньше 0,03 % углерода, структура состоит из феррита или феррита и Ц_3 по границам зерен (рис. 7.4, а).

Стали — сплавы железа с содержанием углерода 0,03—2,14 %, который находится в виде Fe_3C . Структура сталей формируется с прохождением эвтектоидного превращения при 727°C — распад аустенита $\gamma_{0,8\%}\text{C} \rightarrow \alpha_{0,02\%}\text{C} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\%}\text{C}$ с образованием ферритно-цементитной структуры перлита (рис. 7.5).

По содержанию углерода стали подразделяются:

- на доэвтектоидные (0,03—0,8 % C) со структурой феррит + перлит (рис. 7.4, б);
- эвтектоидные (0,8 % C), структура перлит (П) (рис. 7.4, в);
- заэвтектоидные (0,8—2,14 % C), структура перлит + цементит вторичный (Ц_2) (рис. 7.4, г).

При повышении содержания углерода в сталях в соответствии с правилом отрезков количество феррита уменьшается, а перлита, наоборот,

увеличивается; возрастает и количество входящего в перлит цементита. Твердые хрупкие частицы Fe_3C повышают сопротивление пластическому деформированию и порог хладноломкости, растут электрическое сопротивление и коэрцитивная сила, снижается теплопроводность (рис. 7.6).

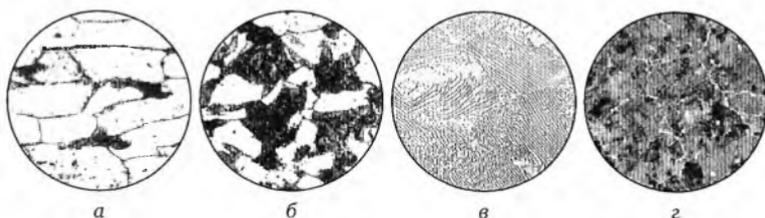


Рис. 7.4. Микроструктура сталей в отожженном состоянии:

а — сталь 08 (структура — феррит и третичный Fe_3C по границам; фазы — α и Fe_3C ; $\times 250$); б — сталь 45 (структура — феррит и перлит; фазы α и Fe_3C ; $\times 250$); в — сталь 80 (структура — перлит; фазы — α и Fe_3C ; $\times 500$); г — сталь У10 (перлит окружен сеткой вторичного Fe_3C ; фазы — α и Fe_3C ; $\times 500$)

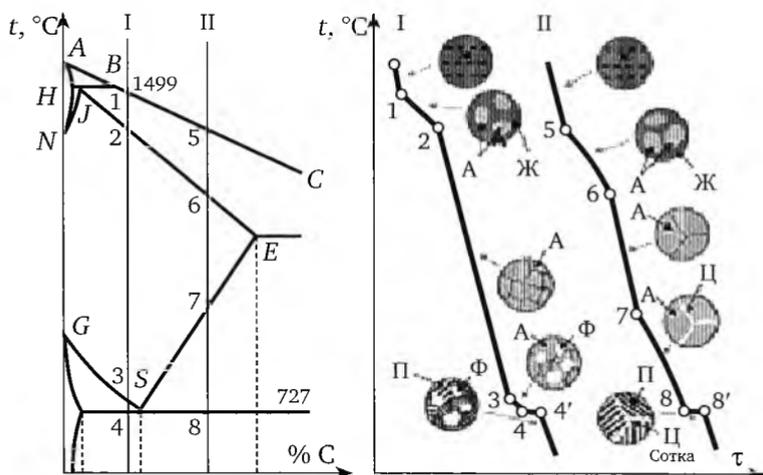


Рис. 7.5. Формирование микроструктуры сталей при охлаждении доэвтектидной стали (I) и заэвтектидной стали (II)

Сталь является многокомпонентным сплавом, содержащим кроме углерода ряд постоянных и технологических примесей, влияющих на ее свойства. Примеси попадают в сталь при выплавке, раскислении или из шихты.

- Полезные примеси — Mn до 0,8 %, Si до 0,3 % попадают в сталь при раскислении, растворяются в феррите и упрочняют его. Si снижает пластичность и способность стали к вытяжке, Mn резко уменьшает красноломкость стали, вызванную влиянием серы.

- Вредные примеси S ($< 0,04$ %) и P ($> 0,03$ %) попадают в сталь из шихты. Сера вызывает красноломкость — межзеренное разрушение при горячей пластической деформации, сульфиды снижают вязкость

и пластичность, а также предел выносливости σ_{-1} . Фосфор вызывает хладноломкость и образует сегрегации по границам зерна.

• Газовые примеси (H_2 , N_2 , O_2) в количестве более 0,008 % образуют неметаллические включения — оксиды FeO , Fe_2O_3 , SiO_2 , нитриды AlN , TiN и др., — газовые пузыри, что ухудшает свойства стали. Водород сильно охрупчивает сталь.

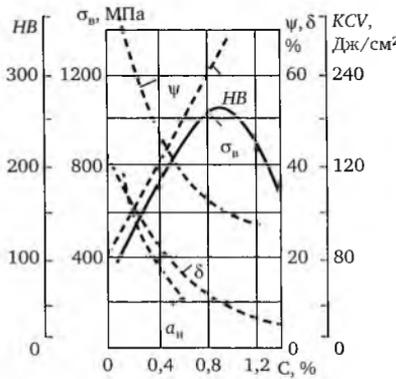


Рис. 7.6. Влияние углерода на механические свойства стали

К чугунам относятся железоуглеродистые сплавы, содержащие углерода более 2,14 %, поэтому в их структуре содержится легкоплавкая эвтектика (*ледебурит*) и они обладают хорошими литейными свойствами. В системе $Fe - Fe_3C$ основу эвтектики составляет хрупкий цементит, поэтому такие чугуны разрушаются хрупко, имея в изломе светлый блестящий цвет. По виду излома их называют *белыми чугунами*.

По содержанию углерода белые чугуны подразделяются:

- на доэвтектические (2,14—4,3 % C), структура — перлит + ледебурит (рис. 7.7, а);
- эвтектический (4,3 % C), структура — 100 % ледебурита (рис. 7.7, б);
- заэвтектические (4,3—6,67 % C), структура — ледебурит + цементит первичный (C_1) (рис. 7.7, в).

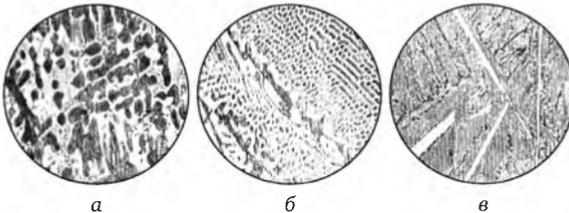


Рис. 7.7. Микроструктура белых чугунов:

- а — доэвтектический белый чугун, $\times 100$; б — эвтектический белый чугун, $\times 100$;
в — заэвтектический белый чугун, $\times 100$

Фазовый состав всех железоуглеродистых сплавов при температурах ниже $727^\circ C$ одинаков — α -феррит и цементит Fe_3C . С увеличением ко-

личества углерода α -фазы становится меньше, а количество цементита возрастает (согласно правилу отрезков). Цементиты *вторичный* и *третичный*, выделяющиеся при охлаждении за счет уменьшения растворимости углерода в аустените и феррите (линии диаграммы *ES* и *PQ* соответственно), на микроструктуре практически не выявляются.

7.2. Диаграмма состояния сплавов железо — углерод (стабильное равновесие)

В железоуглеродистых сплавах существуют две содержащие углерод фазы — цементит, образующийся как метастабильная фаза, и графит, являющийся стабильной фазой. Поэтому на диаграмме состояния системы Fe — графит (штриховые линии на рис. 7.8) и показано, что при *стабильном* равновесии графит образуется непосредственно из жидкой фазы или вследствие распада цементита $\text{Fe}_3\text{C} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{C}(\text{Г})$. Образование графита в железоуглеродистых сплавах при распаде карбидов при переохлаждении ниже 1153°C (рис. 7.8) называется *графитизацией*. Графит как натуральный, так и выделенный химическим путем из разных чугунов (рис. 7.9, а) штриховые представляет собой одну и ту же аллотропическую модификацию углерода.

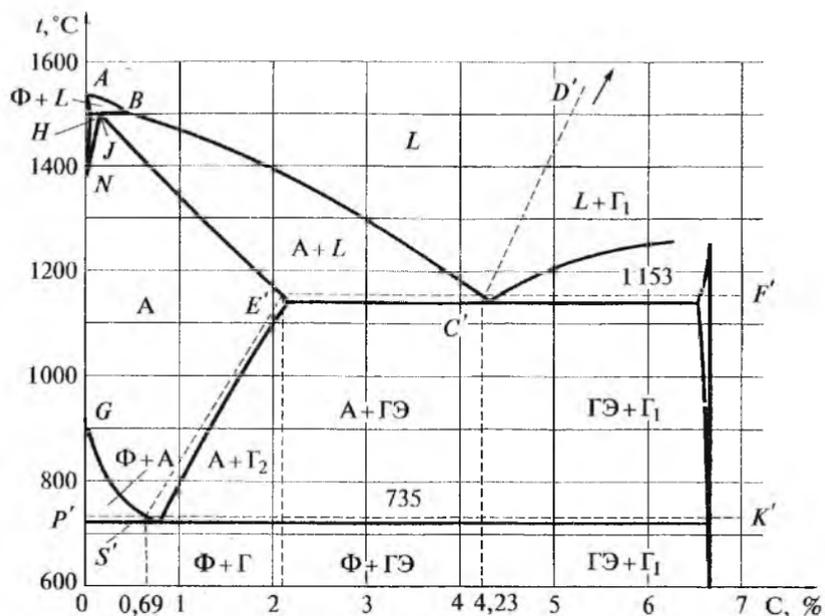


Рис. 7.8. Диаграмма железо — углерод с двойными линиями (сплошными — метастабильная железо — цементит, штриховыми — стабильная железо — графит):

E', C', D', F', P', S', K' — узловые точки; фазы и структурные составляющие:
 Γ — графит (первичный Γ_1 , вторичный Γ_2); $\Gamma\Theta$ — графитная эвтектика; линии:
C'D' — графитного ликвидуса; *E'CF'* — эвтектического равновесия;
E'S' — растворимости графита в аустените; *P'S'K'* — эвтектоидного равновесия

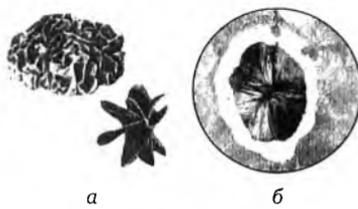


Рис. 7.9. Структура графита:

а — включения графита, выделенные из чугуна, $\times 100$;
б — включения шаровидного графита состоят из кристаллов, растущих наружу из общего центра, $\times 100$

По стабильной диаграмме Fe—C кристаллизуются (при добавлении графитизатора — Si и содержании постоянных примесей — Mn, P, S) серые чугуны¹ (при испытании в изломе — серый цвет), структура которых в отливках зависит в первую очередь от химического состава и скорости охлаждения.

Графит, образующийся из жидкой фазы, растет из одного центра и, разветвляясь в разные стороны, приобретает дендритную форму с сильно искривленными лепестками (см. рис. 7.9) и в плоскости шлифа представляет собой их сечения. По форме графитовых включений подразделяют: серый, высокопрочный и ковкий чугуны.

Серый технический чугун (СЧ) имеет графитовые включения пластинчатой формы (рис. 7.10, *а*) без предпочтительной ориентации (наиболее часто встречаемая форма графита) и розеточный графит (при кристаллизации с большими скоростями охлаждения). Чем меньше пластины и более изолированы, тем большую прочность и износостойкость имеют серые чугуны. Расплав серых чугунов обладает хорошей жидкотекучестью, малой склонностью к образованию усадочных дефектов.

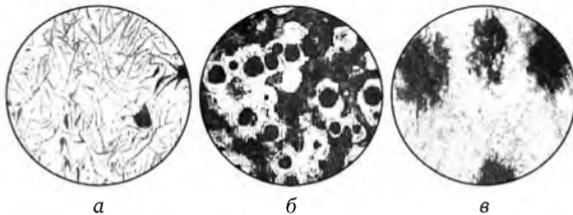


Рис. 7.10. Микроструктура серых чугунов:

а — серый технический чугун, $\times 100$; *б* — высокопрочный чугун (глобулярные включения графита окружены слоем феррита (светлый) в темной перлитной матрице, $\times 100$); *в* — ковкий чугун (очертания графитовых выделений может быть совершенно неправильные, $\times 100$)

Высокопрочный чугун с графитовыми включениями шаровидной формы (рис. 7.10, *б*) или вермикулярной (промежуточной между шаро-

¹ Более подробно серые чугуны рассмотрены в гл. 9.

видной и пластинчатой) получают модифицированием расплава магния (0,03—0,07 %).

Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ВЧШГ) характеризуются наивысшей среди чугунов пластичностью и вязкостью, обеспечивают литым деталям высокие хлад- и ударостойкость, хорошую свариваемость и обрабатываемость резанием; прочность чугунов сопоставима с прочностью литой углеродистой стали. Высокопрочные чугуны с вермикулярным графитом (ЧВГ) особенно эффективны для изготовления отливок массой до 100 т с толщиной стенок до 500 мм, деталей сложной конфигурации, разностенных деталей. Обрабатываемость ЧВГ резанием лучше, чем ВЧШГ или стали.

Ковкий чугун с графитовыми включениями хлопьевидной формы получают графитизирующим отжигом отливок из белого чугуна (рис. 7.10, в). Благодаря компактному графиту ковкий чугун имеет повышенные значения прочности и пластичности, но по сочетанию механических свойств и износостойкости уступает ВЧШГ. Из ковкого чугуна изготавливают тонкостенные детали и детали, работающие при ударных и вибрационных нагрузках.

В зависимости от степени графитизации, т. е. от того, какое количество углерода, входящего в состав чугуна, находится в химически связанном состоянии в виде Fe_3C , серые, высокопрочные и ковкие чугуны могут быть *перлитными* (структура П + Г), *ферритно-перлитными* (структура Ф + П + Г) и *ферритными* (структура Ф + Г).

7.3. Легирующие элементы в железоуглеродистых сплавах

Легирующие элементы (от нем. *legieren* — сплавлять) — это специально вводимые в сплавы металлы или неметаллы с целью изменения их структуры и свойств. Стали и чугуны, имеющие в своем химическом составе такие элементы, называются *легированными*.

При растворении в железе легирующие элементы, образуя твердые растворы, легированный цементит и интерметаллиды, или самостоятельные специальные карбиды, интенсивно смещают точку A_1 , изменяя температуру $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ превращения, а также количество углерода в эвтектиде смещением точек P , S , E на диаграмме, и влияют на фазовые превращения при нагреве и охлаждении.

По изменению на диаграмме Fe— Fe_3C положения критических точек легирующие элементы подразделяются на две группы.

- Первая группа легирующих элементов — *аустенитообразующие* — Ni, Mn, Co, Pt, C, N, Cu и др. — *повышает* точку A_4 и *понижает* точку A_3 , что расширяет область γ -твердого раствора (рис. 7.11, а). Но сплавы, имеющие концентрацию легирующего элемента (C, N, Cu) больше определенного значения, вследствие их ограниченной растворимости, сужают однофазную γ -область и затем ее полностью выключают, хотя двухфазные области с ее присутствием сохраняются (рис. 7.11, б).

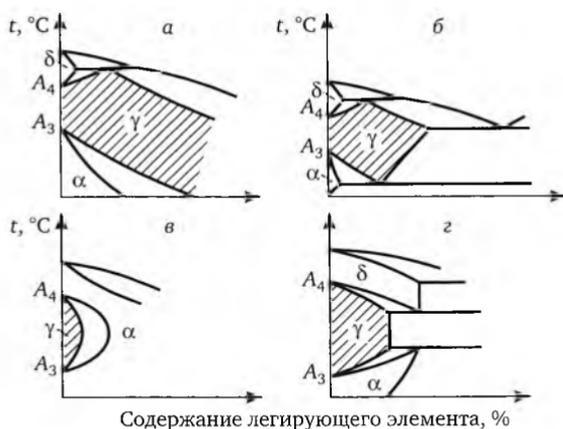


Рис. 7.11. Схема влияния легирующих элементов на полиморфизм железа:

a — элементы, неограниченно растворимые в α -железе; *б* — элементы, образующие с железом сплавы, в которых гомогенная область ограничивается гетерогенной областью; *в* — элементы, полностью замыкающие γ -область и образующие гомогенную α -область; *г* — элементы, образующие с железом сплавы, в которых γ -область ограничивается гетерогенной областью

• Вторая группа легирующих элементов — *ферритообразующие* — Cr, Si, Al, W, V, Mo, Ti, Sn, Sb, Be и др. — *понижают* точку A_4 и *повышают* точку A_3 , что сужает γ - и расширяет α -область. При определенной концентрации значения точек A_3 — A_4 сливаются, и в сплавах с большей концентрацией при любой температуре сохраняется структура легированного α -раствора (рис. 7.11, *в*). Но элементы V, Zr, Nb из-за их малой растворимости в железе образуют двухфазные сплавы (рис. 7.11, *г*).

Карбидообразующие элементы (Cr, V, Ti, Nb, Ta, W и др.) повышают температуру $\alpha \rightleftharpoons \gamma$ перехода. Содержание Cr до 12—13 % слабо влияет на точку A_1 , а при более 14 % резко повышает температуру точки A_1 . Наибольшее влияние оказывают сильные карбидообразователи (Ti, Nb, V, Ta), резко снижающие содержание углерода в эвтектоиде. Некарбидообразующие элементы (Ni, Co, Si, Mo, W) уменьшают содержание углерода в эвтектоиде, смещая линию *ES* *вправо*. Влияние углерода и легирующих элементов на отдельные характеристики сталей приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Влияние углерода и легирующих элементов на свойства сталей

| Характеристика сталей | Элементы | | | | | | | | |
|-----------------------|----------|----|----|----|-------|----------------|--------------|------------|---|
| | Mn | Si | Cr | Ni | W, Mo | Ti, V до 0,2 % | V, до 0,01 % | V, > 0,2 % | C |
| Прочность | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑↑ | ↑ | ↑ | ↑↑ | ↑ |
| Хладостойкость | — | ↓ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↓↓ | ↑↓ | ↓ |
| Прокаливаемость | ↑ | ↑ | ↑ | ↑ | ↑↑ | ↓ | ↑↑↑ | ↑ | ↑ |

| Характеристика сталей | Элементы | | | | | | | | |
|--------------------------------|----------|----|----|----|-------|----------------|--------------|------------|----|
| | Mn | Si | Cr | Ni | W, Mo | Ti, V до 0,2 % | B, до 0,01 % | V, > 0,2 % | C |
| Склонность к перегреву | ↑ | ↓ | — | — | ↓ | ↓↓ | ↓ | ↓↓ | ↓ |
| Склонность к обезуглероживанию | ↓ | ↑↑ | ↓↓ | ↑ | ↓ | ↓ | — | ↓↓ | ↑ |
| Склонность к графитизации | ↓ | ↑↑ | ↓↓ | ↑ | ↓ | — | ↓ | ↓↓ | ↑↑ |
| Стоимость | ↑ | ↑ | ↑ | ↑↑ | ↑↑↑ | ↑ | ↑ | ↑↑ | — |

Обозначения: ↑ — повышает; ↑↑ — сильно повышает; ↑↑↑ — очень сильно повышает; ↓ — понижает; ↓↓ — сильно понижает; ↑↓ — двойственный характер влияния; — не влияет.

7.4. Из истории диаграммы железо — углерод¹

Среди всех диаграмм равновесия металлических сплавов² самое большое практическое значение имела и имеет диаграмма железо — углерод, так как наиболее широко используемыми в технике металлическими материалами являются сплавы железа с углеродом.

Диаграмма железо — углерод — результат практического использования стали и чугуна в промышленности. На этой основе появились важнейшие металловедческие понятия о связи состава, строения и свойств металлов и сплавов, возникла наука «металловедение», исследующая макро- и микроструктуру «металла», и изменения физических свойств металла (механических, электрических, магнитных, тепловых и др.) в зависимости от изменения его структуры, создана теория термической обработки.

Первые исследования диаграммы того периода времени (Р. Реомюр, 1722), когда не существовали еще представления современной химии, шли в направлении установления роли углерода в сплавах на основе железа. Было известно (1600), что при температуре «красного каления» сталь утрачивает магнитные свойства.

Соответствие температуры нагрева цвету постепенно нагреваемой стали (может изменяться в зависимости от освещения):

- буро-красный — 500 °С;
- темно-красный — 600 °С;
- красный — 700 °С;

¹ Тьркель Е. История развития диаграммы железо—углерод : пер. с пол. / под ред. д-ра техн. наук И. И. Сидорина. М. : Машиностроение, 1968.

² Диаграммы состояния двойных металлических систем : справочник : в 3 т. / под общ. ред. Н. П. Лякишева. М. : Машиностроение, 1992—2001.

- темно-вишневый — 800 °С;
- вишневый — 900 °С;
- светло-вишневый — 1000 °С;
- оранжевый — 1100 °С;
- светло-оранжевый — 1200 °С;
- ярко-оранжевый — 1300 °С;
- желтый — 1400 °С;
- белый — 1500 °С.

После установления одного из основных законов химии — закона постоянства состава химических соединений («закон постоянных отношений», Дж. Дальтон, 1803) и введения системы химических символов (Й. Берцелиус, 1814) экспериментально было установлено (1824), что углерод в сплавах с железом может находиться в трех видах: 1) в свободном виде как графит; 2) в связанном виде как химическое соединение железа с углеродом; 3) в связанном со всей массой железа, что соответствует современному понятию твердого раствора. При этом в стали и белом чугуна углерод находится только в связанном состоянии, а в сером чугуна главным образом в свободном.

В 1888 г. было определено, что химическое соединение железа с углеродом (карбид) соответствует формуле Fe_3C с содержанием 6,66 % С.

Настоящий век железа и стали начался во второй половине XIX в., когда в промышленных масштабах начали использовать бессемеровский процесс передела жидкого чугуна в сталь без затраты топлива (1855) и мартеновский способ производства стали *заданного химического состава* (1865). Стремительный прогресс металлургии железа определил развитие исследований сплавов железа с углеродом одновременно в двух направлениях — исследования открытые Д. К. Черновым критических точек, при которых в стали происходят внутренние превращения, и определения аллотропической¹ природы железа.

Критические точки стали

Предположение, что железо в процессе термической обработки обладает двумя кристаллическими разновидностями, было опубликовано в 1852 г., когда наряду с использованием химических методов в исследовании системы *железо — углерод* стали использоваться физические методы исследования.

В середине XIX в. на вооружение русской армии поступили тяжелые артиллерийские орудия с нарезными стволами, собранными из нескольких стальных труб, насаженных одна на другую, способных выдерживать очень высокие давления пороховых газов и обладавших поэтому повышенной дальностью, меткостью и мощностью огня.

¹ Термин «аллотропия» (от греч. *allos* — другой и *trupos* — поворот, свойство) введен Й. Берцелиусом (1841) для существования химического элемента в различных кристаллических формах (например, графит и алмаз), как частный случай (греч. *polys* — многий + *morfe* — форма).

В 1866—1868 гг., изучая причины брака при изготовлении орудийных поковок (разрывались при первых испытательных выстрелах) на Обуховском сталелитейном заводе в Петербурге, Д. К. Чернов определил, что при одинаковом химическом составе сталь в месте разрывов у бракованных поковок имеет крупнозернистое строение, а у стволов, показавших продолжительный срок службы, структура металла мелкозернистая. Из этого следовало, что «...можно и нужно подобрать такие условия, при которых все пушки будут хорошими».

Д. К. Чернов изучил процесс производства стального ствола: сталелитейный цех выпускает тяжелые слитки заданного химического состава; в кузнице слитки, нагретые в печи до ярко-желтого цвета, при обработке мощными молотами принимают форму заготовок; на остывших заготовках в механическом цеху на металлорежущих станках производится окончательная обработка артиллерийского ствола, и установил температурный режим ковки, при котором достигаются лучшие механические свойства поковок.

Наблюдая «на глаз» изменения цветов калия стали при нагревании и охлаждении, он пришел к выводу, что сталь в некоторых определенных критических для нее температурах изменяет внутреннюю структуру и механические свойства (откованные образцы стали, нагретой до различного цвета калия, испытывались на разрывной машине).

«Пусть точка 0 (рис. 7.12, а) означает нулевую точку термометрической шкалы, точка *a* означает темно-вишневое калие, точка *b* — красное неблестящее калие и пусть точка *c* соответствует температуре плавления данной стали. Точки *a*, *b* и *c* не имеют постоянного места на шкале и перемещаются сообразно со свойствами стали (для чистой стали это перемещение прямо зависит от процентного содержания углерода); чем тверже сталь, тем более эти точки придвигаются к нулю, а чем мягче сталь, тем более они от него удаляются... Не имея возможности измерить эти температуры при помощи физических приборов, я по необходимости ограничился обозначением их по цвету калия, все оттенки которого может различить только опытный глаз... Сталь, как бы тверда она ни была, будучи нагрета ниже точки *a*, не принимает закалки, как бы скоро ее не охлаждали; напротив того, она становится значительно мягче и легче обрабатывается пилой... Как только температура стали возвысилась до точки *b*, масса стали быстро переходит из зернистого (или, вообще говоря, кристаллического) в аморфное (воскообразное) состояние, которое удерживается при дальнейшем нагревании до самой точки плавления, т. е. до точки *c*. Чем меньше мы поднимаемся при нагревании над точкой *b* и чем быстрее охлаждаем, тем излом более мелкозернистый, а чем выше нагреваем над точкой *b* и медленнее охлаждаем, тем излом более грубозернистый¹».

¹ Чернов Д. К. Критический обзор статей Лаврова и Калакуцкого о стали и стальных орудиях и собственные Д. К. Чернова исследования по этому же предмету. Записки Русского технического общества, 1868. С. 399.

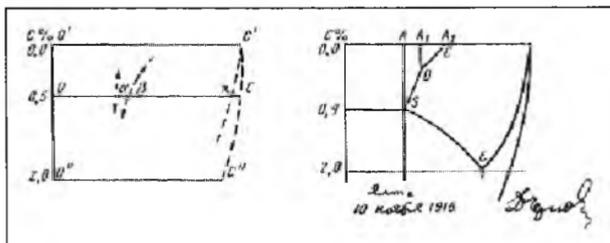
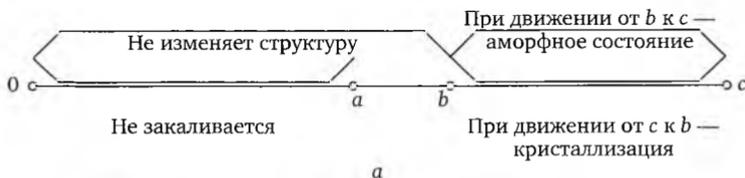


Рис. 7.12. Схема Д. К. Чернова, представляющая положение точек a , b и c на оси температур, стала началом диаграммы железо—углерод (а); диаграмма железо—углерод по Чернову (б)

Открытия Д. К. Черновым критических точек стали, которым соответствуют определенные внутренние превращения в твердом состоянии, и изменения структуры от температуры сформировали научные положения термической обработки стали и легли в основу науки о структуре и свойствах металлов — металлографии. С 1920-х гг., когда был введен термин «металловедение», термин «металлография» характеризует только учения о макро- и микроструктуре металлов и сплавов.

Сделанное Черновым открытие было по заслугам оценено в России и за ее пределами. Автор первого в мире учебника по металловедению¹ Г. Хоу (США) посвятил его Д. К. Чернову, сделав следующую надпись: «Моему другу профессору Дмитрию Константиновичу Чернову, отцу металлографии железа, в знак глубокого уважения эту работу посвящаю».

Аллотропия железа

Поскольку внутренним превращениям, происходящим в сплавах железа с углеродом, сопутствуют тепловые эффекты, Ф. Осмонд (1887) применил в своих исследованиях термический анализ с измерением термоэлектрическим пирометром, созданным А. Ле Шателье в 1886 г.

Термический анализ — совокупность методов определения температур, при которых происходят процессы, сопровождающиеся выделением тепла (например, кристаллизация из жидкости) или его поглощением (например, плавление). Появился в 1930-х гг., когда выдвинутое (1819) П. Дюлонгом и А. Пти (Франция) эмпирическое правило, что теплоемкость для всех простых твердых тел при постоянном объеме не зависит от температуры и составляет 6 ккал/моль-град, и открытие (1821) Т. И. Зеебеком (Германия) термоэлектрического эффекта привели к созданию термопары.

¹ Howe H. M. Iron, Steel and Other Alloys. Boston, 1903.

Результаты измерений изображают графически, откладывая время по оси абсцисс, а температуру — по оси ординат. При отсутствии превращений кривая нагревания (охлаждения) идет плавно; превращения отражаются появлением на кривой изломов или горизонтальных участков («остановок»). Термический анализ — один из основных методов исследований диаграмм состояний.

Исследовались сплавы с разным содержанием углерода: 0,08 % — электролитическое железо, 0,16 % — очень мягкая сталь, 0,29 % — мягкая сталь, 0,57 % — полутвердая сталь, 1,25 % — твердая сталь и 4,10 % — белый чугун. Содержание остальных элементов (Si, Mn, P, S) во всех сплавах составляло вместе от 0,17 % (для электролитического железа) до 0,38 % (для чугуна).

Для критической точки, связанной с закалкой стали, Осмонд сохранил введенное Черновым обозначение — точка a . Так как опыты показали, что наряду с этой точкой могут быть еще две критические точки, он различал их с помощью числовых показателей: a_1 , a_2 и a_3 , причем a_1 — критическая точка, соответствующая самой низкой температуре, а a_3 — самой высокой температуре. Так как соответствующие остановки во время нагревания наблюдаются при несколько иных температурах, чем во время охлаждения (тепловой гистерезис, греч. *hysteresis* — отставание, запаздывание), были введены дополнительные буквенные показатели: c — для нагревания (*chauffage*), r — для охлаждения (*refroidissement*), например a_{r1} , a_{c3} . В позднейших трудах Осмонда и других исследователей пришло в обиход обозначение большой буквой A .

Из проведенных опытов Осмонд сделал следующие очень важные выводы.

1. Критическая точка a_1 существует при постоянной температуре (660—695 °C), не наблюдается в электролитическом железе, но становится отчетливой (все длиннее остановка) по мере возрастания содержания углерода в железе до определенной границы, следовательно, отражает изменения, связанные с присутствием углерода.

2. Точка a_2 не меняет положения вплоть до слияния с точкой a_3 .

3. Критическая точка a_3 понижается по мере возрастания содержания углерода в железе, сливается с a_2 , после чего в качестве a_{3-2} понижается дальше вплоть до слияния с точкой a_1 .

4. Критические точки a_2 и a_3 отчетливо проявляются в электролитическом железе, практически не содержащем углерода, и, следовательно, соответствуют превращениям, происходящим в самом железе.

По мнению Осмонда, в критической точке a_{r3} , которая проявляется тем яснее, чем чище железо, т. е. представляет собой изменение, свойственное самому железу, происходит аллотропическое превращение железа. Критическую точку a_{r2} Осмонд также приписывал аллотропическому превращению. Но так как она наблюдалась в интервале температур, предполагалось, что это конец превращения a_{r3} , замедленный из-за присутствия углерода, а не независимое аллотропическое превращение.

Таким образом, по Осмонду, ниже a_{r2} железо выступает как аллотропическая модификация α , выше a_{r3} — как аллотропическая модификация β ; в интервале между a_{r3} и a_{r2} существует смешение этих двух модификаций. Точку b Чернова Осмонд не отождествлял с точкой a_{r2} .

Исследование влияния скорости охлаждения на положение критических точек показало, что при очень быстром охлаждении (в воде) точка a_{r1} не наблюдается совсем. Следовательно, согласно аллотропической теории закалки стали Осмонда, закалка основывается на сохранении при комнатной температуре железа в аллотропической модификации β и углерода, растворенного во всей массе железа в виде «углерода закалки», т. е. на сохранении при комнатной температуре железа и углерода в таком виде, в каком они обычно находятся при повышенных температурах.

Когда было доказано (1888), что точка a_{r2} отвечает магнитному превращению железа и, следовательно, она независима от a_{r3} , Осмонд предположил (1892) существование трех аллотропических модификаций железа: α , β и устойчивой выше a_{r3} модификации γ (вместо старого β). При температуре a_{r3} железо превращается в β -железо, а при температуре a_{r2} β -железо превращается в α -железо, которое уже остается устойчивым до комнатной температуры. После открытия (1891) критической точки при температуре около 1300 °С четвертую аллотропическую модификацию железа называли δ .

Таким образом, здесь должны были участвовать три, или, по крайней мере, две кристаллографические системы, или разновидности одной и той же системы. В результате анализа особенностей кристаллографии железа (в строении кристаллов, свободно образованных в усадочных раковинах слитков или отливок; в структурах закаленных и легированных сталей; в структурах железа и стали в период стабильности отдельных составляющих травлением при высоких температурах) Осмонд предположил¹, что железо во всех трех разновидностях (α , β и γ) кристаллизуется в кубической системе, причем γ -железо преимущественно в виде комбинации кубов и октаэдров², а α -железо и β -железо только в виде кубов; α - и β -железо являются полностью изоморфными и могут взаимно растворяться (создавать «изоморфные смеси»); γ -железо не образует раствора с β -железом.

Каких-либо кристаллографических различий между β -железом и γ -железом и доказательства в подтверждение гипотезы о том, что превращение A_2 является аллотропическим (полиморфным), Осмонд не привел, но отметил принципиальную разницу между превращениями A_3 и A_2 : превращение A_3 проходило непрерывно в определенном интервале температур, а превращение A_2 — при постоянной темпера-

¹ Osmond F., Cartaud G. Die Kristallographie des Eisens // Metallurgie. 1906. Bd. 3. S. 522.

² Октаэдр (греч. *oktáedron*, от *okty* — восемь и *héra* — грань) — правильный многогранник, имеет восемь граней (треугольных), двенадцать ребер, шесть вершин (в каждой вершине сходятся четыре ребра).

туре. Превращению A_2 сопутствовало, кроме того, исчезновение (или появление) ферромагнетизма.

Проведенные в 1914 г. тщательные дилатометрические исследования¹ электролитического железа на специально сконструированном для этой цели дифференциальном дилатометре показали, что в точке A_2 происходит изменение магнитных свойств, поэтому A_2 не является аллотропическим превращением.

Дилатометрия (от лат. *dilato* — расширяю и ...метрия) — раздел физики, изучающий зависимость изменения размеров тел от воздействия внешних условий: температуры, давления, электрического и магнитного полей, ионизирующих излучений и т. д. В основном изучается тепловое расширение тел и его различные аномалии (при фазовых переходах и др.). Применяемые для целей дилатометрии приборы называются *дилатометрами*.

Исследование особенностей аллотропических превращений и определение принципиальной разницы между превращениями A_3 и A_2 стало возможным только после появления (1912) рентгеновских методов исследований, благодаря экспериментам В. Фридриха, П. Книппинга и М. Лауе² (Германия). В последующие годы В. Х. Брэгг и В. Л. Брэгг (Англия) разработали рентгеновский дифракционный аппарат для исследования кристаллов и предложили простой метод трактовки полученных рентгенографических результатов. Этим методом было исследовано множество кристаллов: определен вид решетки, ее действительные размеры и даже характер атомов, составляющих решетку. Порошковый метод, разработанный в 1916 г. П. Дебаем (Голландия) и П. Шеррером³ (Германия), сделал возможным исследование структуры мелко измельченного кристаллического тела. Благодаря этому дифракционные рентгеновские исследования стали широко применяться в металловедении.

Первыми дифракционными рентгеновскими исследованиями железа и сталей методом Дебая — Шеррера А. Вестгрена и А. Линд (Швеция) показали (1921), что α -железо кристаллизуется в кубической системе и имеет пространственно-центрированную решетку (ОЦК).

Для определения кристаллографического строения γ -железа сначала исследовали при комнатной температуре аустенитные стали, закаленные в воде. Из полученных рентгенограмм следовало, что аустенитные стали имеют кубическую гранцентрированную решетку (ГЦК). Исследование железной проволоки при температуре около 1000 °С показало, что железо в интервале стабильности модификаций γ имеет, как и аус-

¹ *Benedicks C. Experimente on Allotropy of Iron; Behaviour of Ferro-Magnetic Mixtures; Dilatation of Pure Iron // J. Ir. St. Inst. 1914. Vol. 89. P. 407.*

² *Friedrich W., Knipping P., Laue M. Interferenzerschmugen bei Röntgenstrahlen // Sitzungsberichte der math — phys. Klasse der K. Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München. 1912. Bd. 42. S. 303.*

³ *Debye P. Die Atomanordnung von Wolfram // Phys. Zeitschr. 1917. Bd. 18. S. 483.*

тени в легированных сталях, ГЦК-решетку. Эту же железную проволоку исследовали при температурном интервале стабильности β -железа. Из полученной рентгенограммы следовало, что β -железо, как и α -железо, имеет ОЦК-решетку.

Обнаружилось также, что параметр пространственной решетки γ -железа увеличивается с возрастанием содержания углерода, следовательно, аустенит является твердым раствором, образующимся в результате размещения атомов углерода между атомами железа.

Таким образом, рентгеноструктурный анализ окончательно доказал, что γ -железо кристаллографически принципиально отличается от α -железа, а β -железо идентично α -железу. Поскольку аллотропия кристаллических тел отождествляется с полиморфизмом, β -железо нельзя считать отдельной аллотропической модификацией.

Существование тесной связи между α - и β -железом следовало и из диаграммы магнитной восприимчивости χ в зависимости от температуры (рис. 7.13), построенной¹ для железа в 1911 г. — соответствующая кривая в интервале температур существования δ -железа была продолжением этой же кривой в интервале существования α -железа.

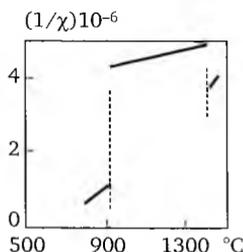


Рис. 7.13. Изменение парамагнитной восприимчивости железа

Рентгенографическими исследованиями показано также, что графит как натуральный, так и полученный химическим путем из разных чугунов (также и углерод отжига из ковких чугунов) представляет собой одну и ту же аллотропическую модификацию углерода.

Первые диаграммы в координатах «температура — химический состав»

Исследование диаграмм состояний начинается в конце XIX в. с появлением термического анализа и использования в лабораторных опытах электрических печей. Диаграмма железо — углерод, хотя и является важнейшей диаграммой в металловедении, не была первой исследованной диаграммой состояний металлических сплавов. Первой диаграммой металлических сплавов в координатах температура — химический состав была диаграмма Ag — Cu, опубликованная в 1875 г. У. Робертсом-Аустеном (Англия).

¹ Weiss P., Foex G. Etude de l'aimantation des corps ferromagnétiques au dessus du point de Curie // Arch. phys. nat. 1911. Vol. 31. P. 89.

Это связано как с взаимодействиями между железом и углеродом, так и экспериментальными трудностями, связанными с высокими температурами плавления железа и его сплавов, особенно низкоуглеродных (трудности расплавления этих сплавов и проведения в этих условиях не только измерений, но и наблюдений; сильное химическое воздействие Fe и C на огнеупорные материалы при высоких температурах).

Первая диаграмма железо — углерод (рис. 7.14), будучи второй по порядку диаграммой металлических сплавов в координатах температура — химический состав, опубликована (1879) Р. Маннесманом (Германия) в связи с исследованиями процесса науглероживания стали. Она состояла из кривых, показывающих максимальное содержания углерода, который при науглероживании поглощает железо при соответствующей температуре плавления сплава, так как не существовали еще понятия «период затвердевания» или «период плавления».

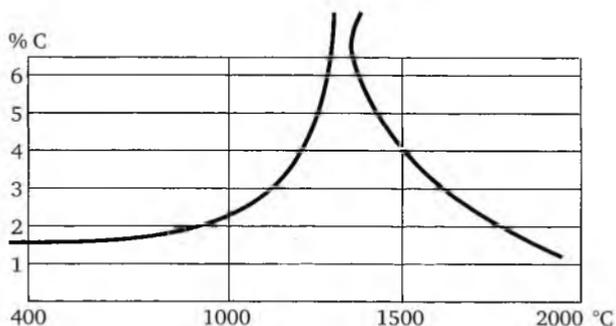


Рис. 7.14. Первая диаграмма железо — углерод в координатах температура — химический состав (Р. Маннесман, 1879 г.)

Второй опубликованной (1896) диаграммой железо — углерод в координатах температура — химический состав была диаграмма А. Совера (США), которая показывала области температур критических точек, обнаруженных Осмондом при охлаждении стали с разным содержанием углерода. Но только полная диаграмма железо — углерод Робертса-Аустена (1897) общепризнана первой диаграммой железо — углерод.

Использование микроскопа для исследования системы Fe—C и определение структурных составляющих

Быстрое развитие металловедения в конце XIX в., особенно во Франции и в Англии, обязано главным образом двум факторам: организованной форме изучения металлов и введению микроскопического анализа. Так, в Англии в 1889 г. Общество инженеров-механиков (*Institution of Mechanical Engineers*) образовало Комитет изучения сплавов (*Alloys Research Committee*); вскоре подобный исследовательский центр (*Commission des Alliages*) был организован во Франции Обществом поощрения отечественной промышленности (*Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale*). Эти центры, имевшие, особенно во Франции, зна-

чительные материальные средства, начали широкое изучение металлов и сплавов, в первую очередь изучение влияния легирующих элементов на свойства металлов.

Другим направлением деятельности этих центров было широкое исследование сплавов методами термического и микроскопического анализа, благодаря чему в последнем десятилетии XIX в. появились многочисленные диаграммы состояния в координатах *температура — химический состав* двойных и даже тройных сплавов.

Уже в XVII в. под микроскопом рассматривали (Р. Гук, А. Левенгук и др.) отдельные металлические предметы или их фрагменты (провод, острие бритвы, острие иглы и т. п.), не интересуясь структурой металла. Первой микрографией излома стали можно считать схематический рисунок Р. Реомюра (1722), изучавшего процессы, происходящие в стали при термической обработке¹.

Для исследования полированной и травленной поверхности стали микроскоп впервые использовал П. П. Аносов в 1930-х гг. в связи с возрождением на Златоустовском заводе (на Урале) способа получения булатной стали. В своих исследованиях Аносов старался главным образом определить зависимость структуры стали от химического состава, термической обработки и пластической деформации (ковки). Введенный Аносовым микроскопический метод анализа структуры металлов не нашел продолжателей.

Булат (от перс. *пулад* — сталь) — булатная сталь, углеродистая литая сталь, которая благодаря особому способу изготовления отличается своеобразной структурой и видом («узором») поверхности, высокой твердостью и упругостью. Узорчатость булатной стали связана с особенностями выплавки и кристаллизации. С древнейших времен (упоминается Аристотелем) идет на изготовление холодного оружия исключительной стойкости и остроты — клинков, мечей, сабель, кинжалов и др.

Булат производили в Индии (под названием *вуц*), в странах Средней Азии и в Иране (*табан, хорасан*), в Сирии (*дамаск, или дамасская сталь*). Впервые в Европе литой булат, аналогичный лучшим старинным восточным образцам, получен на Златоустовском заводе П. П. Аносовым.

Только в 1864 г. Г. Сорби (Англия) были опубликованы результаты исследований структурных составляющих технических сплавов железа с углеродом под микроскопом.

Систематическое изучение изломов, трещин, газовых пузырей, процессов кристаллизации в чугунах и стальных слитков под микроскопом начал проводить в 1870-х гг. А. Мартенс в специально организованной в Шарлоттенбурге (Германия) лаборатории металлографических исследований. В России первая металлографическая лаборатория была организована в 1895 г. А. А. Ржевотарским на Обуховском заводе в Петербурге.

¹ Reaumur R. A. F. L'art de convertir le fer forge en acier et L'art d'adoucir le fer fondu. Paris, 1722.

Таким образом, микроскопическую металлографию основали независимо трое ученых: П. П. Аносов, Г. Сорби и А. Мартенс. При этом Сорби и Мартенс уже в первых своих работах описывали технику приготовления шлифов (шлифование, полирование, травление) и фиксировали изображения структур не только с помощью рисунка, но и на фотографиях.

Металлография, которая наряду с термическим методом стала вторым основным методом металлургических исследований, показала, что свободноохлажденные сплавы железа с углеродом никогда не представляют собой однородной массы, а состоят из определенных структурных составляющих.

Еще в 1823 г. при исследовании (без микроскопа) дамасской стали высказывалось предположение, что узор, получающийся при травлении дамасской стали, является результатом того, что при затвердевании стали образуются две различные структурные составляющие с разным количеством углерода и с разной твердостью¹.

В 1880—1882 гг. Мартенс определил три основные структурные составляющие чугунов: графит, свободное железо (*freis Eisen*) и связанное железо (*gebundenes Eisen*) и показал, что эти составляющие (сегодня они называются ферритом и вторичным цементитом) легко распознавать при травлении химическими реактивами.

Металлографические исследования Г. Сорби (1886—1887) легли в основу современных представлений о структуре медленно охлажденных сплавов железа с углеродом.

- При увеличении в 650 раз была выявлена структурная составляющая, являющаяся смесью, состоящей попеременно из двух видов тонких пластинок разной твердости: твердые пластинки (более тонкие, чем мягкие) являются углеродом, химически связанным с железом, а мягкие пластинки являются чистым железом. И этих пластинок с увеличением содержания связанного углерода появлялось все больше. Поскольку эта составляющая вследствие своего строения давала световые рефлексы, напоминающие жемчужную массу, Сорби назвал ее «жемчужной составляющей» (*pearly constituent*).

Правильность строения «жемчужной составляющей» свидетельствовала о том, что это не случайная смесь двух различных веществ, а возникает она из определенного химического соединения, которое кристаллизуется при затвердевании сплава, а затем при охлаждении распадается на чистое железо и другое, очень твердое соединение железа с углеродом.

- Установлены четыре основные структурные составляющие медленно охлажденных сплавов железа с углеродом, которые вошли затем в диаграмму железо — углерод как составные части: 1) чистое железо (*free iron*), наблюдаемое в виде разноосных зерен в железе и стали; 2) чистый углерод (графит) в виде хлопьев в сером чугуне; 3) со-

¹ Bréant J. R. Description d'un procédé a l'aide duquel on obtient une espèce d'acier fondu, semblable a celui des lames damassées orientales // Ann. Chim. Phys. 1823. Vol. 24. P. 388.

единение железа с углеродом (карбид железа с химической формулой Fe_3C) — очень твердое вещество, встречающееся главным образом в белых чугунах и в цементированной стали; 4) «жемчужная составляющая», являющаяся смесью чистого железа и очень твердого соединения железа с углеродом, наблюдаемая в основном в сталях.

• Основным структурным составляющим сплавов Fe—C дал названия минералогического типа: кристаллы чистого железа назвал *ферритом*, «жемчужную составляющую» — *перлитом*, а твердое соединение железа с углеродом (карбид Fe_3C) — *цементитом* (название «цементит» обосновывалось тем, что этот элемент характерен для цементированной стали).

В 1895 г. Осмонд¹ отмечает еще одну структурную составляющую, встречающуюся в закаленных сталях с большим содержанием углерода. Открыта она была следующим образом. Стальной цементированный пруток, в котором содержание углерода изменялось непрерывно вдоль его длины от 0,35 до 1,7 %, подвергали закалке очень высокой температуры, отполировывали и вдоль полированной поверхности делали иголкой черту. Оказалось, что игла прочертила пруток до содержания около 0,70 % C; при этом содержании углерода черта на прутке исчезает, а затем появляется вновь при содержании 1,30 % C, т. е. твердость падает, несмотря на возрастание содержания углерода. Это свидетельствует о неоднородности структуры, формирующейся, по крайней мере, из двух частей: твердой, как оказалось, — магнитной, и мягкой — немагнитной.

Мягкая, немагнитная часть была *аустенитом* (названа в честь Робертс-Аустена), в котором железо находится в виде аллотропической модификации γ , устойчивой при высоких температурах (выше критического интервала), а твердая, магнитная часть — *мартенситом* (пересыщенный раствор Fe—C, получающийся при закалке из аустенита; назван по имени А. Мартенса²). Это предположение нашло подтверждение через 20 лет, когда для исследования системы Fe—C были использованы дифракционные рентгеновские методы.

Помимо феррита, перлита и цементита Осмонд указывает еще на две структурные составляющие стали (но не имеющие значения для диаграммы состояний железо — углерод): *троостит* (образуется в результате распада при температурах ниже 600 °C и представляет собой высокодисперсную разновидность перлита; назван в честь французского ученого Л. Ж. Трооста); *сорбит* (образуется в результате распада при температурах около 650 °C и представляет собой дисперсную разновидность перлита; назван в честь Г. Сорби).

Первая диаграмма железо — углерод Робертс-Аустена

Исследования Ле Шателье (1894), как и исследования Робертс-Аустена и Осмонда (1901), указывали, что в определенных случаях два

¹ Osmond F. Sur la trempe des aciers extradurs // CR. 1895. Vol. 121. P. 684.

² Mylius F., Forester F., Schoene G. Das Karbid des geglühten Stahls // Z. anorg. Chem. 1897. Bd. 13. S. 38.

металла могут быть соединены между собой в застывшем сплаве так же, как и жидком растворе, т. е. могут образовывать как бы «твердый раствор».

Понятие «твердый раствор» — твердая фаза переменного состава, в которой атомы различных элементов смешаны в известных пределах или неограниченно в общей кристаллической решетке — введено Я. Вант Гоффом (1890).

В результате микроскопических исследований (1901) Г. Шарпи (Франция) установил, что перлит имеет строение, соответствующее строению эвтектических сплавов.

Эвтектика (от греч. *eutektos* — легко плавящийся) — жидкая система (раствор или расплав), находящаяся при данном давлении в равновесии с твердыми фазами. Кристаллизация такой системы, согласно правилу фаз Гиббса, происходит при постоянной температуре с образованием механической смеси твердых фаз того же состава (твердая эвтектика).

Ле Шателье, на основании данных Шарпи, экспериментально доказал, что при высоких температурах сталь представляет собой твердый раствор железа и карбида железа; перлит образуется в результате распада твердого раствора железа с углеродом, содержащего 0,89 % С; в сталях при содержании углерода больше или менее 0,9 % при медленном охлаждении выделяется сначала цементит или феррит соответственно. Быстрое охлаждение (закалка) предотвращает распад твердого раствора от.

По результатам собственных и опубликованных термических исследований Робертс-Аустен¹ построил диаграмму железо — углерод (рис. 7.15), еще очень неполную, но похожую по своему виду на современную диаграмму. Прямые линии соответствуют эвтектикам: *ac* — жидкая эвтектика (*liquid eutectic*) и *PP'* (точка a_{r1}) — твердая эвтектика (*solid eutectic*). Линия *AB* отвечает выделению железа, линия *BD* — выделению графита. Кривая *GOS* указывает выделение из твердого раствора феррита, а кривая *SE* — выделение цементита, линия *MO* — точка a_{r2} .

С современной точки зрения, диаграмма Робертс-Аустена имела много недостатков (она не учитывала возможности образования белых чугунов, не показывала солидуса со стороны твердого раствора, не указывала связи эвтектоидной и эвтектической частей, эвтектические и эвтектоидные линии не были изотермами, температуры превращений в твердом состоянии занижены и т. п.), которые со временем были устранены. Тем не менее ее принципиальная схема, толкование явлений, соответствующих большинству линий, а также большинство буквенных обозначений продержались до наших дней. Занижение тем-

¹ Roberts-Austen W. C. Fourth Report to the Alloys Research Committee // Proc. Inst. Mech. Eng. 1897. P. 31.

ператур превращений в твердом состоянии объясняется тем, что результаты термических анализов получены при охлаждении.



Рис. 7.15. Общеизвестная первая диаграмма железо — углерод (У. Робертс-Аустен, 1897 г.)

Системы железо — графит и железо — цементит

Двойной вид углерода в сплавах Fe—C (свободный углерод — графит и связанный углерод — карбид Fe_3C) значительно затруднял установление диаграммы состояний и стал поводом для многолетних дискуссий, споров и исследования условий образования графита в сплавах Fe—C и границ стабильности и метастабильности карбида.

Термин «метастабильный» был предложен В. Оствальдом (1897) для случая, если соединение не изменяется спонтанно. Однако для того, чтобы изменение произошло, необходимы зародыши стабильного тела.

Экспериментальные доказательства дополнительной, кроме aBc , эвтектической линии (1899), по которой выделяются цементит и эвтектика, и отсутствия эвтектического превращения в сплавах с содержанием углерода менее 1,2 % свидетельствовали о существовании двух систем: *железо — графит* и *железо — цементит*. С учетом большей стабильности углерода, чем карбида, линия карбидной эвтектики должна лежать выше цементитной эвтектики¹.

В 1908 г. автор первого в мире учебника металловедения американский металлург Н. Хоу подробно разобрал проблему стабильности графита и цементита: 1) переход цементита в графит является процессом экзотермическим, протекающим в направлении увеличения стабильности; 2) это изменение происходит несмотря на сопротивление, возникающее в результате увеличения объема; 3) цементит является той разновидностью углерода, которая обычно легко образуется либо при выделении углерода из жидкого сплава, либо в процессе науглероживания, согласно правилу, установленному Оствальдом, что образующаяся

¹ Roberts-Auslen W. C. Fifth Report to the Alloys Research Committee // Proc. Inst. Mech. Eng. 1899. P. 35.

фаза не является в данных условиях устойчивой, а наоборот, менее устойчива и близка по своему характеру к исходной фазе; 4) исследования под микроскопом показывают, что цементит может перейти непосредственно в графит, однако обратный процесс — непосредственный переход графита в цементит — никогда не наблюдался; 5) при производстве ковкого чугуна всегда происходит переход углерода из его первичной разновидности — цементита — в графит.

Экзотермическая реакция (от экзо... и греч. *thérmó* — тепло, жар) — химическая реакция, сопровождающаяся выделением теплоты.

В 1876—1878 гг. Гиббс¹ (США), исходя из общих положений термодинамики, установил основные законы, которым подчиняются условия равновесия в неоднородных системах, созданных одним или несколькими химическими веществами, ввел понятия «фаза» и «компонент» и соотношение, определяющее равновесное состояние системы («правило фаз»).

Термодинамика — наука о наиболее общих свойствах макроскопических систем, находящихся в состоянии равновесия, и о процессах перехода между этими состояниями.

Х. Розебом (Голландия), рассмотрев гетерогенные равновесия в многокомпонентных системах с точки зрения правила фаз, установил (1899), что при равновесии твердый раствор по сравнению с жидкостью богаче тем компонентом, температура плавления которого в чистом состоянии выше, а в точках экстремумов кривых температур плавления твердая и жидкая фазы имеют одинаковый состав. Для линии начала затвердевания он ввел название *ликвидус* (лат. *liquidus* — жидкий), а для линии конца затвердевания — название *солидус* (лат. *solidus* — плотный, твердый). Опираясь на правило Гиббса, что состояние равновесия системы характеризуется минимальным для данных условий значением функции (термодинамического потенциала), он также определил и классифицировал основные типы диаграммы состояний двухкомпонентных систем и возможные их различные комбинации, учитывая также при этом изменения в твердом состоянии.

В 1900 г. Х. Розебом обобщил экспериментальные данные о железоуглеродистых сплавах в диаграмме состояния системы Fe—C (рис. 7.16, а) в соответствии с правилом фаз Гиббса (диаграмма Розебома). Она отличается от диаграммы Робертс-Аустена (см. рис. 7.15) прежде всего тем, что вся ее поверхность разделена на замкнутые поля, которым соответствуют определенные фазы или комплексы фаз; все пограничные линии создают непрерывную сетку; температура затвердевания эвтектики *ABC* и линия твердой эвтектики *PSK* (эвтектоидная)

¹ *Gibbs J. W. Equilibrium of Heterogeneous Substances // Transactions of the Connecticut Academy. 1876. Vol. 3. Ch. 1; 1878. Ch. 2.*

не зависят от содержания углерода и представляют собой горизонтальную линию; представлена линия солидуса, показывающая содержание углерода в аустените.

В связи с тем, что графит — более стабильная разновидность углерода, чем карбид, и его растворимость в железе, меньше, чем в виде карбида, должно быть различие двух систем Fe—C: стабильной (железо — графит) и нестабильной (железо — карбид железа). На измененной диаграмме Fe—C слева от линии растворимости карбида в железе ES расположена гипотетическая линия aS' , представляющая растворимость графита в железе.

На второй диаграмме Розебома (рис. 7.16, б) метастабильную систему представляют: эвтектическая линия $E'B'C$ (в результате недостатка определенных экспериментальных данных она проведена приблизительно при температуре 1100 °C), принадлежащие к ней линии AB' , AE' и $B'D'$, а также линия SE' . Затвердевание сплавов с большим содержанием углерода (более 2 %) в соответствии с данной диаграммой происходит при медленном охлаждении по линии стабильной системы, а при быстром — по линии метастабильной системы.

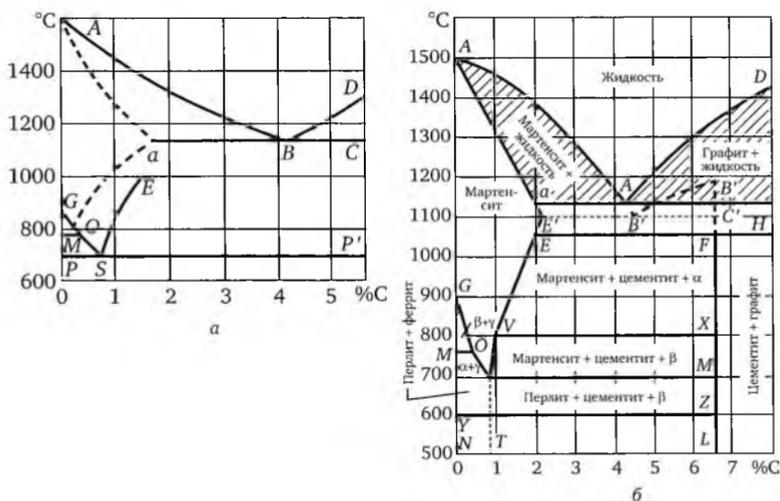


Рис. 7.16. Диаграммы состояния системы Fe—C, составленные Х. Розебомом в соответствии с правилом фаз Гиббса:
а — 1900 г.; б — 1904 г.

При обсуждении диаграммы¹ Осмонд предложил название «мартенсит» оставить только для структуры закаленной стали, т. е. для структуры, существующей при комнатной температуре, а соответствующий твердый раствор, из которого образуется мартенсит, нужно при всех количествах углерода называть аустенитом.

Самые серьезные возражения во второй диаграмме Розебома вызвало то, что линия SE' принадлежит одновременно к обеим системам —

¹ Osmond F. Remarques sur le Mémoire de Enc. 1900. Vol. 6. P. 652.

стабильной и метастабильной, т. е. она должна была представлять растворимость в железе как графита, так и цементита. Эта точка зрения была учтена при составлении последующих вариантов диаграмм железо — углерод. В двойной диаграмме Гейна — Шарпи (1905) учитывалось, что графит растворяется в железе в твердом состоянии, образуя твердый раствор, и при температуре 1150 °С происходит затвердевание цементитной, а не графитной эвтектики.

С. Бенедикс (Швеция) на основе критического анализа всех проведенных в этой области экспериментальных исследований и изучения микроструктуры первичного и вторичного графита предложил (1906) различать две системы состояний Fe—C: стабильную (графитную) и метастабильную (цементитную).

Проведенные Бенедиксом микроскопические исследования показали, что структуры образцов, принадлежащих к метастабильной системе, полностью соответствуют требованиям диаграммы (рис. 7.17), поэтому цементитную эвтектику Бенедикс передвинул влево до 4,2 % С. Структуры образцов, принадлежащих к стабильной системе, обнаружить с помощью микроскопических наблюдений не удалось. Только в очень медленно затвердевавших, очень богатых углеродом сплавах он открыл кристаллы графита, соответствующие кривой *BD*, а также графитной эвтектике. Точно определить путем наблюдений под микроскопом эвтектическую точку *B* исследователям не удалось, поэтому ее расчетным путем поместили влево от точки *B'* (при содержании 4 % С), указывая, что на положение этой точки влияет в значительной степени содержание кремния.



Рис. 7.17. Две системы состояний Fe—C: стабильная (графитная) и метастабильная (цементитная) С. Бенедикса, 1906 г.

Пунктирные линии — стабильные равновесия в системе Fe—C; сплошные — метастабильные равновесия в системе Fe₃C

Такой вид, близкий к современным взглядам на превращения в системе Fe—C, диаграмма состояний сплавов железо — углерод приня-

ла через 9 лет после появления первой диаграммы Робертс-Аустена в 1897 г. В последующие годы развитие диаграммы происходило в основном в направлении более тщательного определения положения отдельных линий (перитектическая часть, растворимость углерода в железе, графитный эвтектоид).

Сплавы железа с большим содержанием углерода (до 24 % C) изучал русский ученый Н. Ф. Витторф (1911). Поскольку такие сплавы могли образовываться только при очень высоких температурах (температура электрической дуги), исследования явлений, происходящих при соприкосновении железа с углеродом при таких температурах, имело большое практическое значение в связи с началом производства стали в электропечах.

Витторф готовил сплавы из железа и графита в графитном тигле, являющемся одним из электродов электрической дуги. После получения сплава он выключал ток и наблюдал процесс охлаждения; заметив изменение поверхности, свидетельствующее о начале кристаллизации, он брал угольной ложкой маленькие пробы жидкости и быстро охлаждал их в воде со снегом. Затвердевшие таким способом пробы он подвергал химическому анализу и изучал под микроскопом. В результате своих опытов он построил диаграмму железо — углерод, но способы определения температуры и начала затвердевания, а следовательно, и ход кривой ликвидуса можно считать только грубо приближительными.

Шестым Международным конгрессом общества исследований металлов, который состоялся в 1912 г. в Нью-Йорке, была утверждена терминология для диаграммы состояний сплавов железо — углерод, предложенная Н. Хоу:

- название «аустенит» обозначает твердый раствор углерода в γ -железе, устойчивого выше линии $A_1 - A_3$, вместо бывшего ранее в диаграммах названия «мартенсит»;
- твердый раствор углерода в γ -железе как в метастабильной, так и в стабильной системах называется без всякого различия «аустенит»;
- в качестве границы между сталями и чугунами принята точка, соответствующая максимальной растворимости углерода в аустените;
- в зависимости от условий (температуры) образования различают «первичный аустенит» (*primary auslenite*), выделяющийся во время затвердевания по линии AB и AB' , и «эвтектический аустенит», выделяющийся при эвтектической температуре и составляющий часть эвтектики;
- в метастабильной системе — «первичный цементит» и «эвтектический цементит», а в стабильной системе — «первичный графит» и «эвтектический графит»;
- название «эвтектоид» — обозначение твердой эвтектики, соответствующей перлиту;
- феррит и цементит, входящие в состав перлита, — «эвтектоидный феррит» и «эвтектоидный цементит»;

- названия чугунов: доэвтектический (*hypo-eutectic*) и заэвтектический (*hyper-eutectic*);
- названия для стали: доэвтектоидная (*hypo-eutectoid*) и заэвтектоидная (*hyper-eutectoid*);
- название феррита, выделяющегося во время охлаждения из доэвтектоидных сталей: «доэвтектоидный феррит» (*pro-eutectoid ferrite*);
- название цементита, выделяющегося из аустенита во время охлаждения заэвтектоидных сталей: «доэвтектоидный цементит» (*pro-eutctoid cementite*);
- цементитная эвтектика названа «ледебурит» в честь немецкого металлурга А. Ледебура.

В 1917 г. исследовали¹ плавление и затвердевание сплавов Fe—C для экспериментального подтверждения существования двух различных эвтектических температур: одной, соответствующей цементитной эвтектике, другой — графитной. Из очень чистого электролитического железа (0,0012 % C, 0,025 % P, без следов Si и Mn) и углерода из сахара приготовили в атмосфере азота сплав с содержанием 2,5 % C (белый чугун). Этот сплав подвергался многократному нагреванию и охлаждению в интервале температур от 1020 до 1160 °C. Из этих опытов следовало, что температура 1146 °C соответствует плавлению цементитной эвтектики. При дальнейших нагреваниях и охлаждениях цементитная эвтектика переходит постепенно в графитную эвтектику.

В процессе этих опытов длительность температурной остановки, соответствующей плавлению цементитной эвтектики, уменьшается вплоть до полного исчезновения; вместо этого появляется и возрастает в той же степени остановка при температуре 1153 °C, соответствующая плавлению графитной эвтектики.

Температуры 1146 и 1153 °C соответствовали верхним границам температур плавления цементитной и графитной эвтектики. Нижние границы этих температур составляли: для цементитной эвтектики 1144 °C, для графитной эвтектики 1151 °C. Температуру цементитной эвтектики определили как 1145 °C, а температуру графитной эвтектики — 1152 °C. *Следовательно, в сплаве железо — углерод, затвердевшем в качестве серого чугуна, с эвтектическим превращением при температуре выше 1146 °C, графит не мог образоваться путем распада выкристаллизовавшейся цементитной эвтектики, так как ее точка плавления не лежит выше 1146 °C.*

Это положение полностью разрушало теорию единой диаграммы, и уже в учебнике металлографии² 1922 г. диаграмма железо — углерод представлена как двойная с содержанием углерода в цементитной эвтектике (точка C) в 4,2 % и в графитной эвтектике (точка C'), равным

¹ Ruer R., Goerent F. *Über die Schmelz- und Kristallisationsvorgänge bei den Eisen-Kohlenstofflegierungen* // Ferrum. 1917. Bd. 14. S. 161.

² Goer P. *Einführung in die Metallographie*. Halle, 1922. S. 224.

4,15 %. Поскольку с возрастанием содержания углерода все труднее предотвращать графитизацию затвердевающих сплавов, расстояние между графитным ликвидусом ($C'D'$) и ликвидусом цементитным (CD) должно увеличиваться, и, следовательно, цементитный ликвидус поднимается менее круто, чем графитный.

Температура плавления цементита определена не была, так как, начиная с температуры 1100°C , он распадается с очень большой скоростью на железо и графит. Поэтому ход ликвидуса CD вычерчен схематично.

Диаграмма (рис. 7.18), опубликованная¹ в 1925 г., была обязательной в Союзе немецких металлургов (*Verein Deutschen Eisenhüttenleute*).

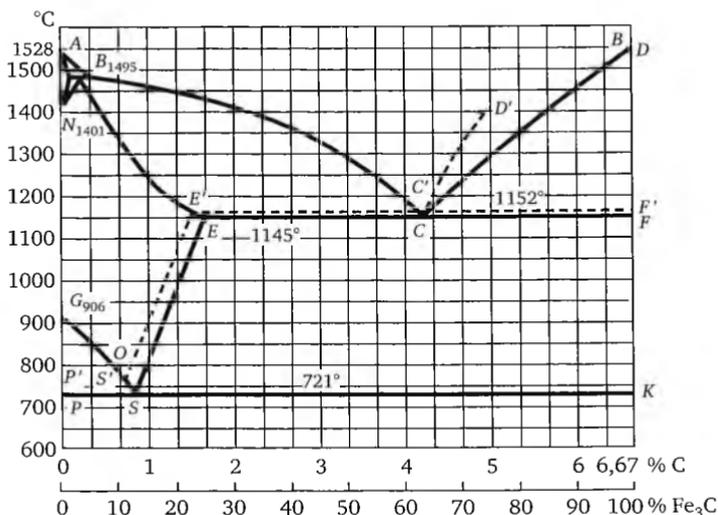


Рис. 7.18. Диаграмма Fe—C, обязательная в Союзе немецких металлургов (*Verein Deutschen Eisenhüttenleute*), 1925 г.

Перитектическая часть диаграммы железо — углерод

Все известные диаграммы не учитывали аллотропического превращения γ -железа, устойчивого при очень высоких температурах, близких к температуре плавления железа.

О существовании аллотропического превращения железа выше температуры 1200°C стало известно после того, как в 1890 г. обнаружили значительные различия в механических свойствах двух сортов стали, содержащих 0,12 и 0,13 % C в зависимости от того, были ли они охлаждены после температур выше или ниже 1300°C , и тепловой эффект при температуре между 1290 — 1300°C . Причем температура $\gamma \rightleftharpoons \delta$ превращения с возрастанием содержания углерода очень сильно повышается.

¹ Daeves K. Das Eisen-Kohlenstoffdiagramm und die wichtigsten Gefügebestandteile der Kohlenstoffstähle, Nach den Beratungen des Werkstoffausschusses zusammengestellt und gemeinverständlich erläutert // St. Eis. 1925. Bd. 45. S. 427.

В 1914 г. исследовали¹ превращения в сплавах железа с углеродом, проводя термический анализ очень чистых проб электролитического железа (0,009 % С, 0,03 % Сu, 0,001—0,002 % S), а также проб стали (до 0,5 % С), полученной из электролитического железа и углерода из сахара.

Из построенной в соответствии с правилом фазового равновесия двухкомпонентной диаграммы (рис. 7.19, а) следует, что наибольшая растворимость углерода в δ -железе наблюдается при температуре 1487 °С и составляет около 0,08 %; жидкий раствор, будучи при этой температуре в равновесии с кристаллами твердого раствора, содержит около 0,36 % С. Новый вид превращений был назван перитектическим.

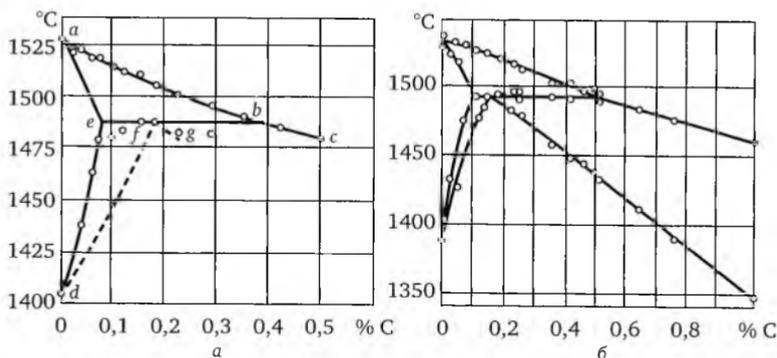


Рис. 7.19. Перитектическая часть диаграммы железо — углерод; температуры кристаллизации обозначены маленькими кружочками:
а — 1914 г.; б — 1937 г.

Перитектика (от греч. *peritéko* — плавлю, расплавляю, разжижаю) — жидкость, находящаяся (при постоянном давлении) в равновесии с кристаллическими фазами (химическими соединениями или твердыми растворами), число которых равно числу компонентов системы и при изменении ее температуры уменьшается на единицу. Это отличает перитектику от эвтектики — жидкости, находящейся в равновесии с кристаллическими фазами, число которых при понижении температуры не изменяется (при повышении температуры они полностью переходят в раствор или расплав).

Однако эти опыты не дали достаточных сведений для определенного обозначения перитектического состава (точка *f*), поэтому сходящиеся в этой точке кривые *df* и *fg* обозначены штриховыми линиями. Температура плавления железа — 1528 °С.

Новые экспериментальные исследования этой области диаграммы² были проведены только в 1937 г. в связи с разработкой теории термической обработки тройных сплавов, особенно сплавов системы Fe—C—Cr.

¹ Ruer R., Kiesper R. Die Umwandlung des reinen Eisens und ihre Beeinflussung durch Kohlenstoff, Silizium, Kobalt und Kupfer // Ferrum. 1914. Bd. II. S. 257.

² Adcock F. An Investigation of the Iron—Carbon Constitutional Diagram // J. Ir. St. Inst. 1937. Vol. 135. P. 281.

Для опытов, проведенных термическим методом, использовали 24 сплава, приготовленных со всеми мерами предосторожности, чтобы не допустить их загрязнения, из чистого железа, полученного химическим путем из хлорного железа и графита высокой степени чистоты, используемого в качестве электродов для спектроскопических исследований. Плавление происходило в вакууме, в высокочастотной индукционной печи в тигле из оксида тория.

Разница по сравнению с результатами прежних исследований проявилась отчетливо (рис. 7.19, б) главным образом только в отношении точки *B* (правый конец перитектической изотермы), при 0,51 % С, в то время как ранее она составляла при 0,71 % С (для промышленных сталей). Кроме того, отличаются температура плавления железа (1533 ± 5 °С против 1528 °С) и температура превращения A_4 (1388 ± 5 °С против $A_{r4} = 1400$ °С или $A_{c4} = 1410$ °С). Температура перитектического превращения оказалась равной 1494 ± 5 °С, между тем в более ранних опытах она составляла 1487 °С.

Растворимость углерода в α -железе

В течение двадцати с лишним лет с момента опубликования в 1897 г. первой довольно полной диаграммы железо — углерод Робертса-Аустена до 1925 г. на этой диаграмме вообще отсутствовали линии, отражающие растворимость углерода в α -железе. Хотя сам Робертс-Аустен обнаружил (1899) в микроструктуре стали, содержащей 0,04 % С, присутствие свободного цементита¹. Объясняется это прежде всего аналитическими трудностями, связанными с определением столь малых количеств углерода, отрицательным влиянием примесей, очень заметным при таких малых количествах углерода, и, кроме того, малой практической значимостью в то время этой части диаграммы.

С 1900 г. в электротехнике начали применять железокремнистые стали (0,3—6 % Si по массе), легко намагничивающиеся в слабых полях и получившие широкое распространение в технике связи. При температурах ниже температуры Кюри A_2 (у АРМКО-железа, например, до 768°С) эти стали спонтанно намагничены, но внешне не проявляют магнитных свойств, так как состоят из хаотически ориентированных намагниченных до насыщения областей (доменов). Способность таких сталей намагничиваться в слабых магнитных полях обусловлена низкими значениями энергии магнитной кристаллической анизотропии или низкими значениями магнитострикции.

АРМКО-железо (*ARMCO* — сокращенное название американской фирмы *American Rolling Mill Corporation*) — технически чистое железо, получаемое в мартеновских и электрических плавильных печах; общее содержание примесей около 0,16 %, в том числе не более 0,025 % С; 0,035 % Mn; 0,05 % Si; 0,015 % P; 0,025 % S; 0,05 % Cu.

¹ *Roberts-Austen W. C. Fourth Report to the Alloys Research Committee // Proc. Inst. Mech. Eng. 1897. P. 31.*

Один из магнитно-мягких материалов (магнитные свойства зависят от количества примесей, размеров кристаллических зерен (структуры), упругих и пластических напряжений). Из АРМКО-железа изготавливают электротехнические изделия, работающие в постоянных и медленно меняющихся магнитных полях (сердечники и полюсные наконечники электромагнитов, детали реле и т. п.).

Домены (области самопроизвольной намагниченности) — намагниченные до насыщения части объема ферромагнетика (обычно имеющие линейные размеры $\sim 10^{-3}$ — 10^{-2} см), на которые он разбивается ниже температуры Кюри. Векторы намагниченности домена в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы таким образом, что результирующая намагниченность ферромагнитного образца равна нулю. Домены доступны непосредственному наблюдению с помощью микроскопа: при покрытии поверхности ферромагнетика слоем суспензии, содержащей ферромагнитный порошок, частицы порошка оседают в основном на границах доменов и обрисовывают их контуры.

Магнитострикция (магнит + лат. *strictio* — сжатие, натягивание) — изменение формы и размеров тела при намагничивании, открыто Дж. Джоулем в 1842 г. В ферро- и ферримагнетиках (Fe, Ni, Co, Gd, Tb и др., ряде сплавов, ферритах) магнитострикция достигает значительной величины (относительное удлинение 10^{-6} — 10^{-2}). В антиферромагнетиках, парамагнетиках и диамагнетиках магнитострикция очень мала.

Практическим стимулом к изучению линии растворимости углерода в α -железе было также изменение механических свойств низкоуглеродистых сталей в результате термической обработки при температурах ниже A_1 : явления, происходящие здесь, аналогичны явлениям насыщения и старения алюминиевых сплавов.

Предположение о растворимости углерода в α -железе впервые опубликовано¹ в 1902 г. Результаты исследования электросопротивление углеродистых сталей показывали, что феррит может содержать в растворе до 0,27 % С. Экспериментальные доказательства существования растворимости углерода в α -железе начали появляться только в 1920-х гг., причем особое внимание обращалось на растворимость вблизи эвтектоидной температуры.

Из опубликованных с 1922 г. термических кривых (нагревания и охлаждения) следовало, что остановка A_1 не обнаруживается в сплаве железо — углерод, содержащем 0,041 % С. Поскольку перлит не обнаруживался в микроструктуре сплавов, содержащих до 0,030 % С, считалось, что растворимость углерода в α -железе при эвтектоидной температуре расположена между этими двумя величинами, и, следовательно, *это количество углерода представляет собой естественную границу между железом (ферритом) и сталью.*

¹ Benedicks C. Elektriska ledningsmotsståndet hos stål och rent jern // Jernkont. Ann. 1902. Bd. 86. S. 124.

В 1924 г. при исследовании зависимости между магнитными свойствами кремниевых сталей и их микроструктурой выяснилось¹, что низкоуглеродистые кремниевые стали при одинаковом химическом составе и при одинаковой величине зерна могут иметь разные магнитные свойства. Причина этого явления заключается в очень малой разнице в содержании углерода, растворенного в феррите. Особенно сильно влияние углерода на магнитные свойства кремниевых сталей проявлялось при количествах менее 0,01 % — изменение содержания углерода, растворенного в феррите, на 0,001 % оказывает на магнитные и электрические свойства такое же влияние, как изменение содержания серы на 0,01 % или марганца на 0,03 %. Во много раз меньшее влияние оказывал на магнитные и электрические свойства сталей углерод, находящийся в виде цементита или графита.

В ходе этих исследований было обнаружено также, что растворимость углерода в железе при комнатной температуре составляет 0,06—0,008 %. Это было первым в истории диаграммы железо — углерод определением точки Q. В 1925 г. при исследовании² под микроскопом расплавленного в вакууме и медленно охлажденного электролитического железа, содержащего 0,06 % C, не заметили в нем присутствия перлита и сделали вывод, что α -железо может содержать в твердом растворе это количество углерода.

Совершенно иной метод определения растворимости углерода в α -железе применил В. Кестер³ (Германия): при растворении стали в азотной кислоте углерод, находящийся в виде цементита, вызывал появление окраски, а углерод, содержащийся в твердом растворе, был нейтральным. Интенсивность окраски полученного раствора, таким образом, была пропорциональна содержанию углерода в виде цементита. Этому анализу подвергались образцы, насыщенные при разных температурах, и оказалось, что количество цементита уменьшается с возрастанием температуры насыщения. Сравнивая полученные растворы с соответствующими эталонами, Кестер определял количество углерода, которое при определенной температуре насыщения переходило в раствор. На основе этих показателей он построил кривую растворимости углерода в α -железе в присутствии цементита (рис. 7.20).

Диаграммы железо — углерод, принятые Союзом немецких металлургов в 1929 г., Американским обществом металлургов и Национальным бюро стандартов США в 1930 г., уже учитывали эту растворимость. Появление диаграммы⁴ М. Хансена и К. Андерко (рис. 7.21, а) в 1958 г.,

¹ *Yen sen T. D. Magnetic and Electrical Properties of the Ternary Alloys Fe—Si—C // J. Am. Inst. Electr. Eng. 1924. Vol. 43. P. 455.*

² *Sauveur A., Krivobok V. N. Dendritic Segregation in Iron—Carbon Alloys // J. Ir. SI Inst. 1925. Vol. 112. P. 313.*

³ *Köster W. Der Einfluss einer Wärmebehandlung unterhalb A_1 auf die Eigenschaften des technischen Eisens // Arch. Eisenhüt. 1929. Bd. 2. S. 503.*

⁴ *Hansen M. Der Aufbau der Zweistofflegierungen. Berlin. 1936. S. 367; Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов : пер. с англ., 2-е изд. М., 1962. Т. 1—2.*

которая была принята и в СССР с 1962 г., закончило период сосуществования двух разных диаграмм — европейской и американской.

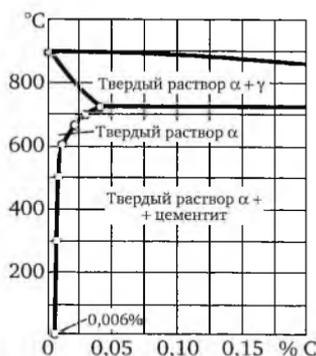


Рис. 7.20. Кривая растворимости углерода в α -железе в присутствии цементита (В. Кестер, 1929 г.)

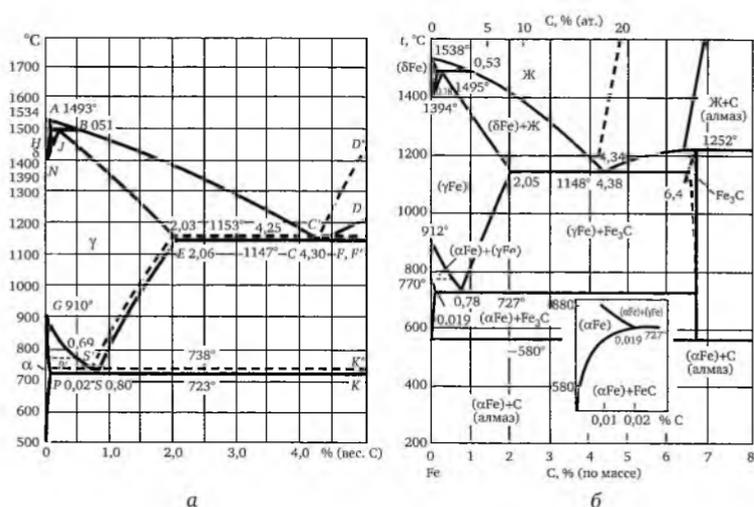


Рис. 7.21. Диаграммы состояния железо — углерод: М. Хансена и К. Андерко (а) и опубликованная РАН в 1996 г. (б)

В заключение отметим, что экспериментальные определения точного положения отдельных линий и точек диаграммы состояния железо — углерод продолжают и в настоящее время, поэтому диаграмма железо — углерод, несмотря на такой длительный срок существования, все еще не может считаться точно установленной.

Например, в связи с тем, что растворимость углерода в сплавах Fe—C—O должна быть выше, чем в бескислородных железобуглеродистых сплавах¹, диаграмма состояния Fe—C на самом деле должна относиться к системе Fe—C—[O*], где [O*] — равновесная концентрация кислоро-

¹ Жуков А. А. ЖФХ. 1967. Т. 41. № 1. С. 185—192.

да в растворе, изменяющаяся с изменением состава сплава и повышением температуры. А возможность спинодального распада в системе Fe—C может быть связана со строением жидкой фазы чугуна в интервале ликвидус — солидус — выдержка чугуна в этом интервале сначала приводит к «замутнению» жидкой фазы центрами выделения графита (графитизация), а затем, наоборот, к «осветлению» жидкости за счет коагуляции этих центров.

Спинодальный распад — при большой степени пересыщения твердый раствор оказывается полностью нестабильным и его расслоение идет во всей массе материала с образованием сначала неоднородного твердого раствора с непрерывно меняющимся составом, а затем периодически расположенных частиц с четкими границами раздела.

Поэтому принятая в настоящее время в России диаграмма состояния железо — углерод (рис. 7.21, б), опубликованная авторским коллективом под редакцией академика РАН Н. П. Лякишева¹, должна рассматриваться как временная, подлежащая дальнейшему уточнению.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие фазы образуются в метастабильной системе железо — Fe_3C ? Дайте их характеристику.
2. Напишите эвтектическую и эвтектоидную реакции системы Fe — Fe_3C . Какие структурные составляющие при этом образуются?
3. Что такое сталь? Как подразделяются стали в зависимости от содержания углерода?
4. Каковы критические точки у стали при охлаждении?
5. Как меняются структурный, фазовый состав и свойства сплавов в зависимости от содержания углерода?
6. Что такое цементит первичный и цементит вторичный?
7. Что такое эвтектоидная сталь? Какова ее структура?
8. Какие стали являются заэвтектоидными? Какова их структура?
9. Какие примеси могут присутствовать в составе стали и как они влияют на ее свойства?
10. Постройте кривую охлаждения для стали с 0,45 % C и объясните процессы образования структуры в этой стали.
11. Какую структуру будет иметь сталь с содержанием углерода 1,2 % при температуре 750 °C?
12. Что изменится в структуре стали с содержанием углерода 1,2 %, если ее нагреть до температуры 950 °C?
13. Что такое белый чугун и как подразделяются чугуны по содержанию углерода?
14. Что происходит в структуре сплава с 3,6 % C при охлаждении в интервале температур между линиями ECF и PSK диаграммы?
15. Какова структура белых чугунов: 3 % C, 3,8 % C, 4,3 % C, 5 % C?

¹ Диаграмма состояния двойных металлических систем : справочник : в 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Н. П. Лякишева. М. : Машиностроение, 1996.

16. Что такое графитизация? В чем состоит различие диаграмм железо — цементит и железо — графит?

17. В чем заключается основное различие структуры белых и серых чугунов?

18. Какие формы графита существуют в серых чугунах? Как форма графита влияет на механические свойства?

19. Какой может быть структура металлической основы серых чугунов?

20. Как получить высокопрочный чугун?

21. Как получить ковкий чугун?

22. Для отливки серого чугуна необходимо иметь сочетание твердости в пределах 250—260 *HВ* при сохранении достаточной пластичности. Какой чугун надо применить в данном случае, как получить его?

23. Что такое легированная сталь?

24. Что называют легирующим элементом?

25. Какие легирующие элементы сужают область γ и расширяют область α , как они называются?

26. Как влияют карбидообразующие элементы на положение точек *S* и *E* диаграммы Fe—Fe₃C?

27. Что такое аустенитообразующие элементы? Какие элементы относятся к ферритообразующим?

28. Как можно получить структуру аустенита в стали при комнатной температуре?

29. Какими элементами целесообразно легировать сталь для повышения ее прочности?

Глава 8

ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

Историческая справка. Человек использует термическую обработку металлов с древнейших времен: применяя холодную ковку самородных золота и меди, первобытный человек столкнулся с явлением наклепа, которое затрудняло изготовление изделий с тонкими лезвиями и острыми наконечниками, и для восстановления пластичности он должен был нагревать холоднокованую медь. По времени появления такой отжиг был первой операцией термической обработки металлов.

При изготовлении оружия и орудий труда из железа, полученного с использованием сыродутного процесса, нагревали железную заготовку для горячейковки в древесноугольном горне. При этом железо науглероживалось, т. е. происходила цементация — одна из разновидностей химико-термической обработки. Охлаждая кованое изделие из науглероженного железа в воде, обнаружили резкое повышение его твердости и улучшение других свойств. Закалка в воде науглероженного железа применялась с начала I тысячелетия до н. э. В V в. до н. э. этруски закалывали в воде зеркала из высокооловянной бронзы, скорее всего, для улучшения блеска при полировке.

До середины XIX в. сведения о термической обработке металлов представляли собой совокупность эмпирических знаний, выработанных на основе многовекового опыта. Открытие Д. К. Черновым критических точек структурных превращений в стали позволило научно обоснованно выбирать режим термической обработки для получения необходимых свойств стальных изделий. В 1906 г. А. Вильм (Германия) на изобретенном им дуралюмине (сплав на основе алюминия) открыл старение после закалки — основной способ упрочения цветных сплавов. В 1930-е гг. появилась термомеханическая обработка стареющих медных сплавов, а в 1950-е — термомеханическая обработка сталей, позволившая значительно повысить прочность изделий. К комбинированным видам термической обработки относится термомагнитная обработка, позволяющая в результате охлаждения изделий в магнитном поле улучшать их магнитные свойства.

Итогом многочисленных исследований изменений структуры и свойств металлов и сплавов при тепловом воздействии явилась стройная теория термической обработки металлов.

8.1. Фазовые превращения при нагреве стали (аустенизация)

Задача термической обработки — нагревом и охлаждением вызвать *необратимые* изменения свойств как результат *необратимого* изменения структуры. При этом наиболее сильное влияние оказывает режим охлаждения.

При многих видах термической обработки сталь нагревают до температур, соответствующих существованию аустенита (процесс *аустенизации*). Изотермическое превращение перлита (смеси феррита и цементита, см. рис. 7.5, в) в аустенит $\alpha_{0,02\% \text{ C}} + \text{Fe}_3\text{C}_{6,67\% \text{ C}} \rightarrow \gamma_{0,8\% \text{ C}}$ при нагреве эвтектоидной стали выше критической точки A_{C1} (727 °C) состоит из двух одновременно проходящих процессов (рис. 8.1, а, б):

- полиморфного превращения $\alpha \rightarrow \gamma$;
- растворения в аустените карбида Fe_3C .

При аустенизации доэвтектоидной (менее 0,8 % C) стали со структурой феррит + перлит:

- 1) выше точки A_1 образуется двухфазная структура — аустенит + феррит;
- 2) в интервале температур A_1 — A_3 феррит постепенно растворяется в аустените и содержание углерода в нем уменьшается в соответствии с линией GS ;
- 3) при температуре выше A_3 феррит исчезает и концентрация углерода в аустените соответствует его содержанию в стали (см. рис. 8.1, а).

Содержание углерода в аустените при аустенизации заэвтектоидной (более 0,8 % C) стали меняется по линии ES (см. рис. 8.1, а); максимальная растворимость углерода — 2,14 % при 1147 °C (точка E), минимальная — 0,8 % при 727 °C (точка S). Стадии аустенизации заэвтектоидной стали со структурой перлит + цементит (см. рис. 7.5, з):

- 1) при нагреве до температуры выше A_1 происходит *только* аустенизация перлита без растворения избыточного цементита, и аустенит содержит только 0,8 % C;
- 2) в интервале температур A_1 — A_{ct} происходит *полная* аустенизация структуры с растворением избыточного цементита;
- 3) выше температуры A_{ct} будет только аустенит, содержащий углерод в соответствии с его содержанием в стали.

Последовательность стадий превращения перлита в аустенит (см. рис. 8.1 б, в).

I. Начало превращения перлита в аустенит — зародыш аустенита возникает на границе раздела феррит — Fe_3C в результате полиморфного превращения и растет за счет диффузии атомов углерода в аустенит из цементита (содержание углерода в аустените — 0,8 %, в цементите — 6,67 %).

II. Конец превращения перлита в аустенит — рост участков аустенита в сторону феррита идет быстрее, чем растворение карбида Fe_3C — при полиморфном превращении зерна новой фазы растут в результате неупорядоченных, взаимно не связанных переходов атомов через гра-

ницу фаз. Поэтому после завершения полиморфного превращения сохраняется некоторое количество цементита Fe_3C и для его растворения необходимо дополнительное время.

III. Полное растворение карбида Fe_3C .

IV. Гомогенизация (от греч. *homogenes* — однородный) аустенита — устранение концентрационных неоднородностей за счет процессов диффузии углерода.

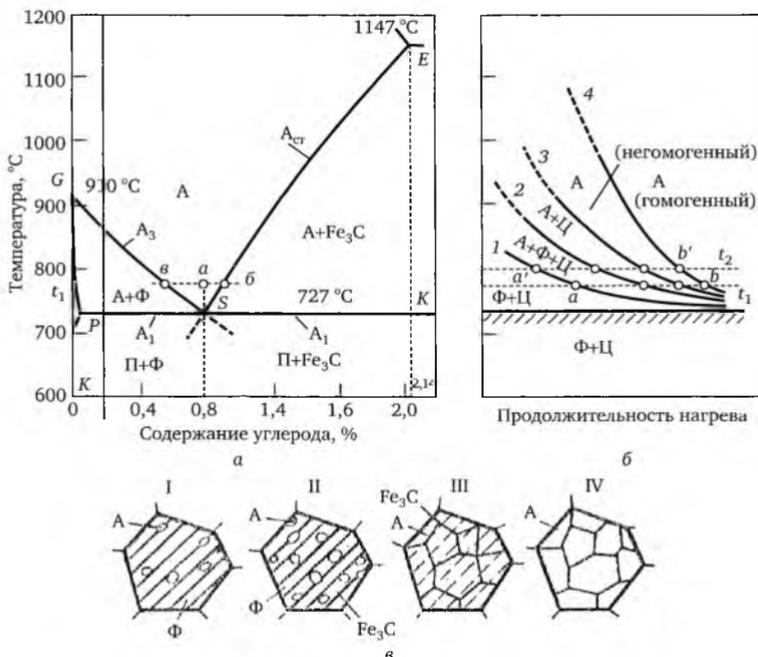


Рис. 8.1. Превращение стали с ферритно-перлитной структурой при нагреве:

- а — схема изменений фазового состава при нагреве (диаграмма Fe—C);
 б — схема изотермического образования аустенита: температуры ab ($a'b'$) — начала и конца процесса аустенитизации при нагреве образцов до t_1 , t_2 ; 1 — начало превращения перлита в аустенит; 2 — конец превращения перлита в аустенит; 3 — полное растворение карбидов; 4 — гомогенизация аустенита;
 в — последовательные стадии превращения перлита в аустенит

Из-за большого числа зародышей аустенита на границе раздела фаз феррит — цементит (см. рис. 8.1, в) образовавшееся (начальное) зерно аустенита мелкое. Дальнейший нагрев приводит к его росту из-за снижения энергии системы за счет уменьшения протяженности границ зерна (рис. 8.2). Чем выше скорость нагрева, тем выше температура начала образования аустенита и шире температурный интервал превращения. Введение в сталь карбидообразующих элементов (хрома, молибдена, вольфрама и др.) задерживает процесс аустенитизации из-за образования легированного цементита или карбидов легирующих элементов, более трудно растворимых в аустените.

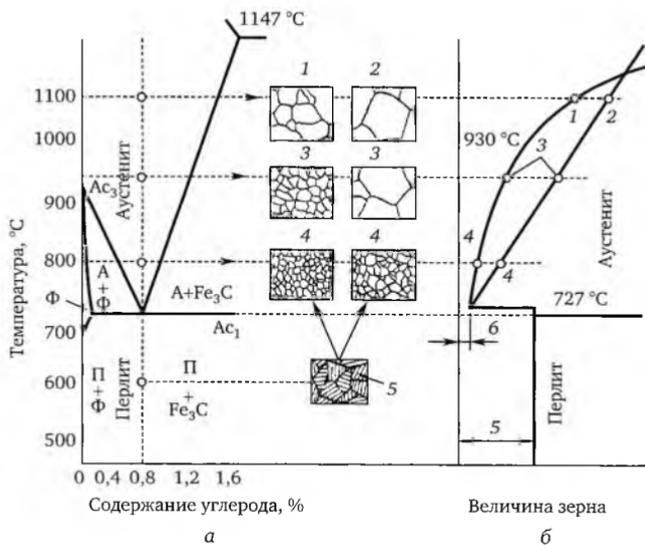


Рис. 8.2. Диаграмма состояния Fe—Fe₃C (а)

и схема роста зерна аустенита в стали, содержащей 0,8% С (б):

1 — наследственно мелкозернистая сталь; 2 — наследственно крупнозернистая сталь; 3 — наследственное зерно; 4 — зерно при нагреве под термическую обработку; 5 — исходное зерно; 6 — начальное зерно аустенита

Способность зерна аустенита к росту неодинакова даже у сталей одного марочного состава из-за влияния условий выплавки. По склонности к росту зерна аустенита стали различают на *наследственно крупнозернистые* и *наследственно мелкозернистые* стали.

У наследственно крупнозернистых сталей (раскислены только FeSi, FeMn) зерно при нагреве растет даже при незначительном перегреве выше A_1 (см. рис. 8.2). У наследственно мелкозернистых сталей (раскислены в основном алюминием в ковше) зерно значительно увеличивается только при нагреве выше 1000—1050 °С, потому что образовавшиеся устойчивые дисперсные частицы (в основном AlN) располагаются на границах зерна и, как барьер, препятствуют росту зерна при нагреве. Рост начинается только при температурах начала растворения частиц AlN.

Наследственно мелкозернистые стали при достаточно высоких температурах могут иметь даже более крупные зерна аустенита, чем наследственно крупнозернистая сталь, поэтому введено понятие о *действительном* зерне, т. е. зерне, существующем при данной температуре нагрева. Его размер обусловлен температурой нагрева, временем выдержки и склонностью стали к росту зерна при нагреве (наследственностью).

От размеров действительного зерна зависят размер продуктов распада аустенита при охлаждении и, следовательно, свойства стали. Величина действительного зерна мало влияет на свойства прочности (σ_B ,

$\sigma_{0,2}$) и пластичности (δ , ψ). Однако рост зерна резко снижает вязкость и повышает температурный порог хладноломкости. Очень крупное действительное зерно стали вызвано явлением перегрева (рис. 8.3, а), который можно исправить повторной термической обработкой. Нагрев до температур, вызывающих появления *сетки оксидов* на границах зерна, называется *пережог* (рис. 8.3, б). Этот дефект исправить нельзя, сталь переплавляется.

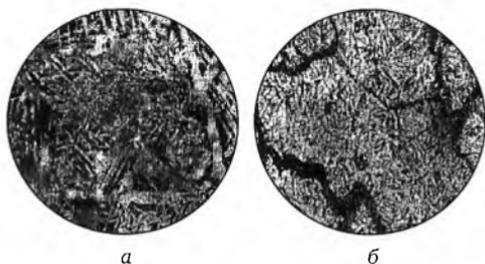


Рис. 8.3. Микроструктура перегретой (а) и пережженной (б) доэвтектоидной стали

8.2. Превращение переохлажденного аустенита (диаграмма изотермического распада переохлажденного аустенита)

Переохлаждение стали со структурой после аустенизации ниже точки A_1 приводит аустенит в метастабильное состояние. Кинетика диффузионного превращения такого аустенита в феррито-цементитную смесь описывается *диаграммой изотермического распада переохлажденного аустенита*, которая экспериментально строится в координатах *температура — время* следующим образом. Образцы стали со структурой стабильного аустенита (нагреты до температур выше критических точек) помещают в среду с температурой ниже A_1 (700° , 600° , 500° , 400° и т. д.) и фиксируют процесс полного распада аустенита по изменению, например, магнитных характеристик образца (аустенит парамагнитен, а продукты его превращения ферромагнитны).

По результатам строят кинетическую кривую распада при заданной температуре в координатах *количество превращенного аустенита (%) — время* (рис. 8.4, а). Время начала превращения (точки H_1 , H_2 , $H_3...$) и конца превращения (точки K_1 , K_2 , $K_3...$) отнесены к соответствующим температурам превращения (t_1 , t_2 , $t_3...$). Одноименные точки начала превращения (кривая 1) и конца превращения (кривая 2) соединены между собой. Область левее кривой 1 — область неустойчивого (переохлажденного аустенита), правее — продуктов его распада. Такие диаграммы называются еще *C-образными* (рис. 8.4, б).

При изотермическом превращении в до- и заэвтектоидных сталях в верхнем интервале температур сначала выделяются избыточные фазы — *феррит* (доэвтектоидная) и *цементит* (заэвтектоидная) стали и на диаграмме отмечается дополнительная кривая (рис. 8.5, а, в).

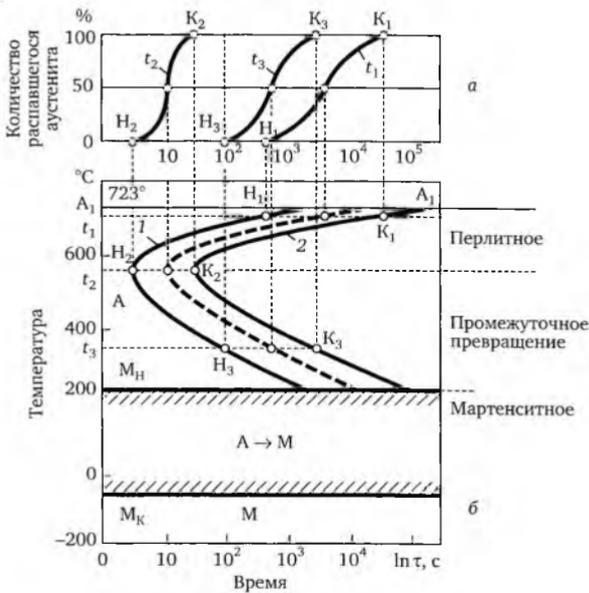


Рис. 8.4. Построение диаграммы изотермического превращения переохлажденного аустенита для стали с 0,8 % С:

а — кинетические кривые;

б — диаграммы изотермического превращения аустенита

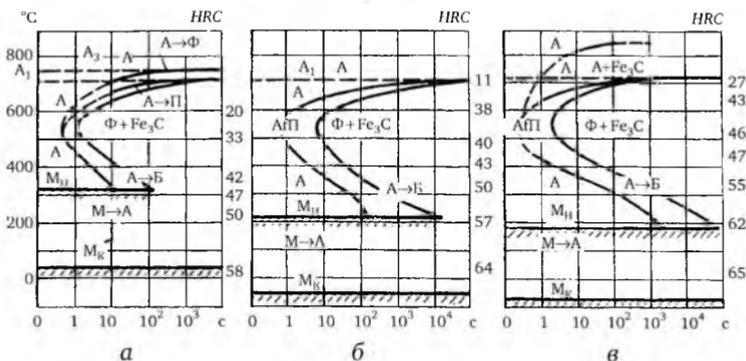


Рис. 8.5. Диаграммы изотермического превращения для доэвтектидной (а), эвтектидной (б) и заэвтектидной (1,2 % С) стали (в); HRC — твердость продуктов распада аустенита

В зависимости от степени переохлаждения Δt (скорости охлаждения) различают три температурные области превращения переохлажденного аустенита (рис. 8.5, б).

1. Перлитное превращение — распад аустенита с перераспределением углерода и полиморфное $\alpha \rightarrow \gamma$ происходят в интервале температур от точки A_1 до изгиба изотермической диаграммы ($\sim 550^\circ\text{C}$). Стадии процесса показаны на рис. 8.6.

• Ведущей фазой, возникающей первой, является карбид Fe_3C . Его образование связано со скоплениями атомов углерода, как правило, на границах зерна аустенита (рис. 8.6, а).

- Из-за роста частиц карбида Fe_3C , содержащего 6,67 % С, прилегающие участки аустенита обедняются углеродом, и в них в результате полиморфного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения образуются кристаллы феррита (полиморфные превращения твердых растворов происходят бездиффузионным (мартенситным) путем) (рис. 8.6, б, в).

- Рост ферритных пластинок, наоборот, обогащает прилегающие участки аустенита углеродом, затрудняется развитие полиморфного превращения, зарождаются и растут новые пластинки цементита (рис. 8.6, з).

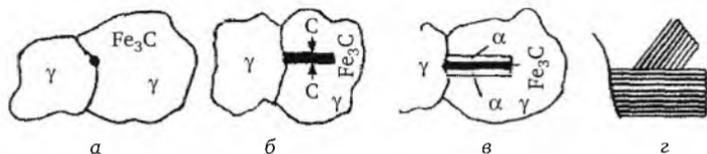


Рис. 8.6. Образование зародыша цементита на границе зерен цементита (а) и его рост (б); образование пластин феррита (в); рост и образование новых пластин цементита и феррита (перлита) (з)

Таким образом, происходит совместный рост кристаллов феррита и цементита, образующих *перлитную колонию пластинчатого строения*. Размер перлитной колонии Δ_0 , который равен усредненной сумме толщин пластинок феррита и цементита (рис. 8.7), уменьшается с увеличением скорости охлаждения аустенита, продукт превращения становится тоньше (дисперснее), соответственно, выше и твердость. Образующиеся структуры эвтектоидного типа (см. рис. 7.5, в) определяют как *перлит, сорбит, троостит* (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Характеристики пластинчатых ферритно-цементитных структур

| Структура | Δ_0 , мкм | НВ, МПа | T, °С |
|-----------|------------------|-----------|---------------|
| Перлит | 0,6—1,0 | 1800—2500 | A_{r1} —650 |
| Сорбит | 0,25—0,3 | 2500—3500 | 650—590 |
| Троостит | 0,1—0,15 | 3500—4500 | 580—550 |

Образующиеся при распаде переохлажденного аустенита феррито-цементитные структуры сорбит и троостит, в отличие от перлита, не являются равновесными структурами, поэтому стали не эвтектоидного состава содержат углерода больше или меньше 0,8 %.

2. Промежуточное (бейнитное) превращение с образованием структуры бейнита протекает при температурах от ~ 550 °С до точки M_H . Превращение имеет ряд особенностей, присущих как перлитному, так и мартенситному превращениям, которые в данном издании не рассматриваются.

3. Мартенситное превращение является бездиффузионным, происходит при больших степенях переохлаждения и при *непрерывном* ох-

лаждении в интервале температур M_H (температура начала) — M_K (температура конца). Большая часть аустенита превращается в *мартенсит*, а оставшийся, непревращенный, аустенит (рис. 8.8, а) называется *остаточным* ($A_{ост}$). Положение точек M_H и M_K не зависит от скорости охлаждения и обусловлено только химическим составом. Чем больше в аустените углерода, тем ниже температуры точек начала и конца превращения, поэтому в углеродистых сталях, содержащих более 0,4 % С, всегда присутствует остаточный аустенит (рис. 8.7, б).

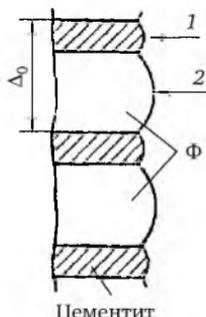


Рис. 8.7. Перераспределение углерода при образовании перлита:

1 — высокая концентрация углерода — цементит (6,67 % С); 2 — низкая концентрация углерода — феррит (0,02 % С); Δ_0 — межпластинчатое расстояние

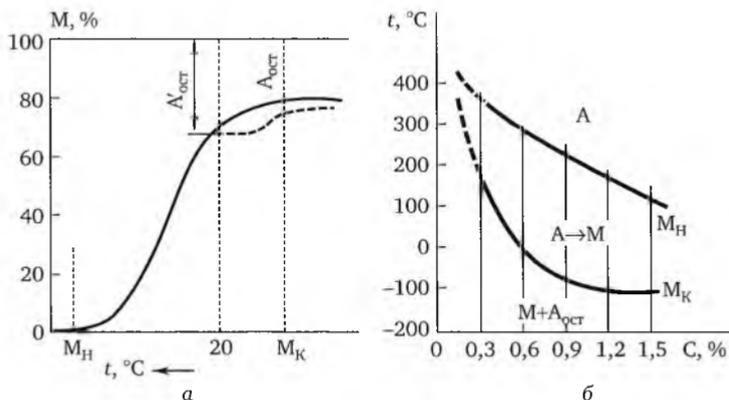


Рис. 8.8. Мартенситная кривая (а) и влияние углерода

на положение мартенситных точек начала M_H и конца M_K мартенситного превращения (б):

A — аустенит; M — мартенсит; $A_{ост}$ — количество остаточного аустенита при завершении процесса; $A'_{ост}$ — количество остаточного аустенита при 20 °C

Мартенситное превращение реализуется кооперативным, направленным смещением (сдвигом) атомов на расстояние, меньше межатомного, что приводит к перестройке кристаллической решетки аустенита Fe_γ (ГЦК) в решетку Fe_α (ОЦК). Отсутствие диффузии углерода (атомы углерода остаются в октаэдрических порах, см. рис. 2.19, б) приводит к искажению ОЦК-решетки Fe_α и образованию элементарной

ячейки с формой *тетрагональной призмы* (рис. 8.9, а, б), у которой период c больше периодов $a = b$ ($c/a \geq 1$ — степень тетрагональности).

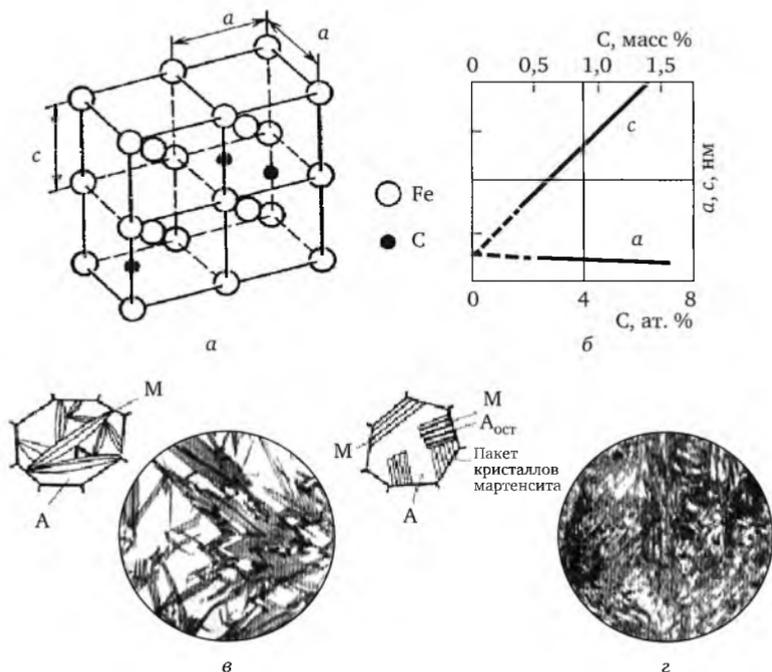


Рис. 8.9. Кристаллическая структура мартенсита (а, б) и схемы формирования и микроструктуры пластинчатого (в) и реечного (z) мартенсита: А — аустенит; М — мартенсит; А_{ост} — остаточный аустенит

Содержание углерода в мартенсите такое же, как в исходном аустените (растворимость углерода в Fe_α при $20^\circ \sim 0,008\%$), поэтому мартенсит представляет собой *пересыщенный* твердый раствор внедрения углерода в решетке α -железа. Типичная форма растущих кристаллов мартенсита, когерентно связанных с аустенитом, — пластина (в плоскости шлифа имеют вид игл) или тонкая (0,1—0,2 мкм) линза (в плоскости шлифа имеют вид рек), располагающиеся в виде пакета. *Пластинчатый* мартенсит образуется в высокоуглеродистых сталях, а в структуре сталей с содержанием углерода от 0,5 до 0,8 % присутствуют оба типа мартенсита (рис. 8.9, в, z).

Поскольку в структуре закаленной стали присутствуют неравновесные фазы (мартенсит и остаточный аустенит), переход в более устойчивое состояние (распад неравновесных фаз) происходит при температурах 200—650 °С. Нагрев закаленной стали до температур ниже A_{C1} называют *отпуском*.

Карбидообразующие легирующие элементы Cr, Mo, W, V, Si и др. затрудняют распад мартенсита, сдвигают температуру начала распада в область температур 450—500 °С, тормозят коагуляцию (укрупнение) карбидов. Стали приобретают повышенную сопротивляемость к отпуску.

ку — теплостойкость. Элементы, не образующие карбидов, слабо влияют на превращение при отпуске.

Превращение аустенита при непрерывном охлаждении. Особенность такого превращения состоит в том, что, протекая в определенном температурном интервале, оно приводит к образованию неоднородной структуры (рис. 8.10). Чем больше скорость охлаждения и ниже температурный интервал распада аустенита, тем дисперснее образующаяся структура: перлит, сорбит и троостит; бейнит при непрерывном охлаждении углеродистых сталей, как правило, образуется в смеси с другими продуктами распада.

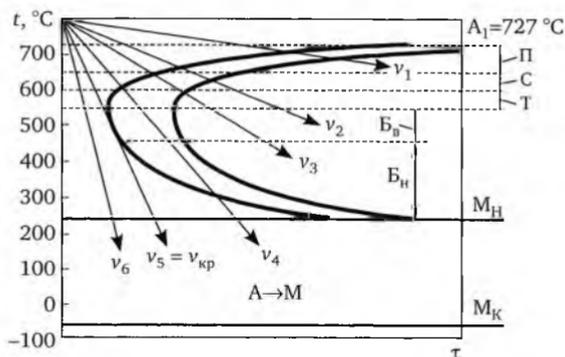


Рис. 8.10. Влияние скорости непрерывного охлаждения на распад аустенита в эвтектоидной стали

$v_1 < v_2 < v_3 < \dots, v_4 < v_{кр}, v_6 > v_{кр}$, где $v_{кр}$ — критическая скорость охлаждения;

A_1 — равновесная критическая точка; M_H и M_K — мартенситные точки;

П — пластинчатый перлит; С — пластинчатый сорбит; Т — пластинчатый троостит; Б_в — верхний бейнит; Б_н — нижний бейнит

При определенной высокой скорости охлаждения диффузионный распад аустенита становится невозможным и при дальнейшем охлаждении он превращается в мартенсит. Минимальная скорость, при которой весь аустенит может претерпевать только мартенситное превращение, называется *критической скоростью охлаждения* $v_{кр}$. Критическая скорость охлаждения зависит от химического состава и устойчивости аустенита (его размера зерна и однородности). Углеродистые стали имеют $v_{кр} = 800 \div 200$ °C/с.

По диаграмме изотермического распада (рис. 8.9) можно только приблизительно судить о превращениях, так как при непрерывном охлаждении время минимальной устойчивости аустенита в 1,5—2 раза больше, чем при изотермическом распаде. Поэтому для технологии термической обработки разработаны термокинетические диаграммы, которые приведены в соответствующей литературе.

8.3. Виды и разновидности термической обработки

Термическая обработка — это процесс нагрева, выдержки при повышенной температуре и охлаждения изделий из металлов и сплавов с це-

лю изменения их структуры и свойств. Любую термическую обработку можно выразить в виде графика в координатах *температура — время* (рис. 8.11, а):

- t_{\max} — температура нагрева при термической обработке;
- время обработки можно разделить на время *нагрева* (τ'), время *выдержки* (τ'') и время *охлаждения* (τ''');
- $v_{\text{ист}}$ — истинная скорость охлаждения, определяемая как $\text{tg}\alpha$ (α — угол наклона линии охлаждения к оси абсцисс).

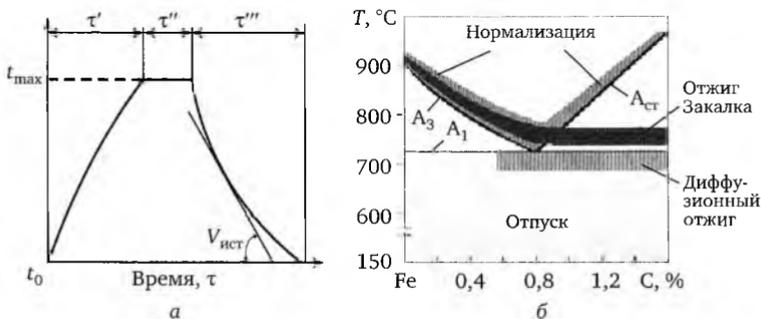


Рис. 8.11. Общая схема термической обработки (а) и диапазон температуры нагрева при различных видах термообработки сталей (б)

Классификация видов термической обработки основывается на том, какого типа структурные изменения в металле происходят при нагреве и охлаждении (рис. 8.11, б).

- Собственно *термическая обработка* (ТО) — только тепловое воздействие: отжиг (1-го и 2-го рода), нормализация, закалка и отпуск, старение.
- *Химико-термическая обработка* (ХТО) — тепловое и химическое воздействие: цементация, азотирование, нитроцементация, борирование, диффузионная металлизация.
- *Термомеханическая обработка* (ТМО) — тепловое и деформационное воздействие: высокотемпературная ТМО, низкотемпературная ТМО.

Отжиг 1-го рода. Эта термическая обработка не определяется фазовыми превращениями, протекающими при нагреве или охлаждении, и применяется для устранения химической и физической неоднородностей, созданных предшествующими технологическими обработками, нагревом выше или ниже температур фазовых превращений.

Гомогенизация (диффузионный отжиг). Обрабатывают слитки или отливки для уменьшения дендритной или внутрикристаллитной ликвации, улучшается вязкость и пластичность стали (рис. 8.11, б). Температура нагрева стали — 1000—1250 °С, сплавов на основе Al — 420—520 °С, длительность отжига — 15—40 ч.

Рекристаллизационный отжиг. Обрабатывают полуфабрикаты или изделия с целью снятия наклепа и восстановления пластичности мате-

риала, необходимой для дальнейшей технологической обработки. Температура нагрева выше температуры начала рекристаллизации ($T_{\text{нр}}$). Степень предварительной деформации и продолжительность нагрева обуславливают размер рекристаллизованного зерна.

Отжиг для снятия остаточных напряжений. Применяется для отливок, сварных соединений, деталей после обработки резанием,ковки и т. д. Температура отжига стали меньше $727\text{ }^{\circ}\text{C}$, латуни — $250\text{—}300\text{ }^{\circ}\text{C}$; длительность отжига — $2\text{—}3\text{ ч}$.

Отжиг 2-го рода (фазовая перекристаллизация) — нагрев до температур выше критических и очень медленное охлаждение, как правило, вместе с печью, проводится для получения более равновесной структуры и подготовки ее к дальнейшей обработке *только для металлов и сплавов, в которых при изменении температуры протекают фазовые превращения* (рис. 8.12). В результате отжига измельчается зерно, повышаются пластичность и вязкость, снижаются прочность и твердость, улучшается обрабатываемость резанием.

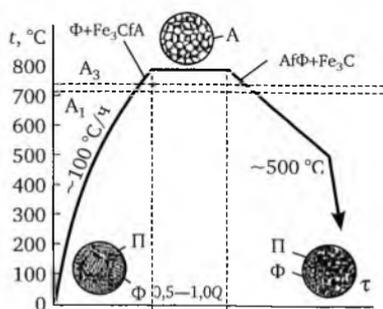


Рис. 8.12. Схема полного отжига доэвтектоидной стали

Отжиг нормализационный (нормализация) — нагрев стали выше верхней критической точки ($A_{\text{СЗ}}$ — для доэвтектоидных сталей; $A_{\text{СТ}}$ — для эвтектоидных сталей; выше $A_{\text{СТ}}$ на $30\text{—}50\text{ }^{\circ}\text{C}$ — для заэвтектоидных сталей), выдержка при этой температуре для завершения фазовых превращений и последующее охлаждение на воздухе (см. рис. 8.11, б). Цель обработки *полной фазовой перекристаллизацией* — придать металлу однородную мелкозернистую структуру (не достигнутую при предыдущих процессах — литье, ковке или прокатке) и как следствие — повышение его механических свойств (пластичности и ударной). Во многих случаях нормализация — окончательная термическая обработка детали.

Применяют:

- для *среднеуглеродистой* стали — вместо закалки и высокого отпуска с целью снижения деформации изделия при термообработке, повышения твердости и прочности; образуется структура сорбит (рис. 8.13);
- для *низкоуглеродистых* сталей — вместо отжига для образования ферритно-перлитной структуры;

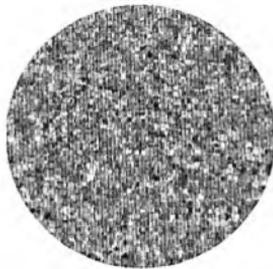


Рис. 8.13. Сталь У6. Сорбит отпуска (феррит и дисперсные округлые включения цементита). Традиционно рассматривается как единая структурная составляющая

• в *заэвтектоидных* сталях — для устранения цементитной сетки, исправления структуры после предварительных технологических операций (см. рис. 7.5, 2).

Закалка применима к любым металлам и сплавам, в которых при охлаждении *перестраивается* кристаллическая решетка. Нагрев под закалку производится на 30—50 °С выше критических точек A_{C3} и A_{C1} (рис. 8.14, а). Закалка — *не окончательная* термическая обработка.

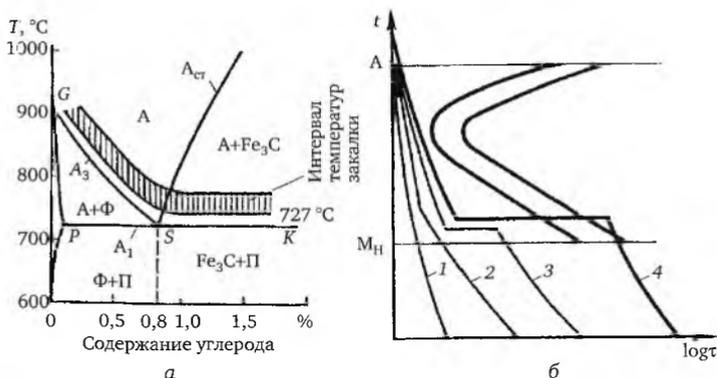


Рис. 8.14. Диаграмма состояния Fe—Fe₃C с нанесенными температурами закалки доэвтектоидной и заэвтектоидной стали (а) и кривые охлаждения для различных способов закалки (б):

- 1 — непрерывное охлаждение; 2 — закалка в двух средах; 3 — ступенчатое охлаждение; 4 — изотермическая закалка; M_H — мартенситная точка; А — равновесная критическая точка

Охлаждение должно идти с такой скоростью, чтобы перестройка решетки протекала по механизму бездиффузионного мартенситного превращения и не возникали высокие внутренние (закалочные) напряжения, которые могут привести к изменению формы изделия (коробление, поводка) и образованию трещин. Поэтому скорость охлаждения для углеродистых сталей 400—1400 °С/с; легированных сталей — 10—150 °С/с в охлаждающих средах: вода, технические масла, 10 %-ный водный раствор NaOH или NaCl, расплавы солей, водные растворы полимеров.

Углеродистые стали при закалке на мартенсит резко охрупчиваются. Основная причина этого — малая подвижность дислокаций в мартенсите. Безуглеродистые (например, мартенситостареющие стали) после закалки на мартенсит остаются пластичными.

Специальные способы закалки (рис. 8.14, б).

- *Непрерывная закалка в одном охладителе.* Применяется для закалки мелких (диаметром до 5 мм) деталей из углеродистой стали и большего сечения из легированной стали.

- *Прерывистая закалка в двух средах* — изделие быстро охлаждают в одной среде (например, в воде), а затем медленно в другой (например, в масле). Медленное охлаждение проходит в мартенситном интервале температур, что снижает закалочные напряжения. Применяют для закалки инструментальных сталей.

- *Ступенчатая закалка* — охлаждение в среде, нагретой несколько выше M_H , выдержка для выравнивания температуры по сечению изделия и охлаждение на воздухе. Мартенситное превращение протекает менее полно, в структуре сохраняется большое количество остаточного аустенита, снижаются все виды напряжений. Применяют для изделий, склонных к короблению, изменению формы.

- *Изотермическая закалка* проводится аналогично ступенчатой закалке, но длительность выдержки должна быть такой, чтобы закончился распад аустенита с образованием бейнита. Применяется для повышения конструктивной прочности только легированных сталей.

- *Закалка с самоотпуском* — охлаждение в закалочной среде прерывают с таким расчетом, чтобы запаса тепла в стали хватило для образования на поверхности мартенсита за счет выравнивания температуры по сечению от нагретой середины к поверхности, т. е. происходит самоотпуск. Контроль отпуска осуществляется по цветам побежалости, появляющимся на поверхности. Применяется для изделий, которые должны сочетать высокую твердость на поверхности и высокую вязкость в сердцевине (инструменты ударного действия: молотки, зубила).

- *Обработка холодом.* Содержание в структуре после закалки остаточного аустенита ($A_{ост}$) понижает твердость, износостойкость и может привести к изменению размеров деталей, работающих при низких температурах, в результате самопроизвольного превращения в мартенсит. Для уменьшения его количества применяют обработку холодом — охлаждение закаленной стали до температур ($-30...-70$) °С. Это повышает твердость сталей с 0,8—1,1 % С на HRC 1—3.

Закаливаемость и прокаливаемость стали. Свойства стали после закалки зависят от закаливаемости и прокаливаемости стали. *Закаливаемость* — способность стали повышать твердость при закалке (образовывать в структуре мартенсит), зависит от содержания углерода в стали. Сталь с содержанием углерода до ~ 0,30 % практически не закаливается. *Прокаливаемость* — глубина закаленной зоны со структурой мартенсита или троостомартенсита по сечению. Прокаливаемость стали зависит от критической скорости охлаждения и определяется

ее химическим составом (рис. 8.15). a и a' — глубина закаленного слоя; $V'_{кр}$, $V_{кр}$ и $V''_{кр}$ — критические скорости охлаждения углеродистой, низколегированной и высоколегированной сталей соответственно; б — 0,4 % С; в — 0,4 % С + 1,0 % Cr; г — 0,4 % С + 1,5 % Cr + 0,18 % Mo; I — твердость полумартенситной зоны.

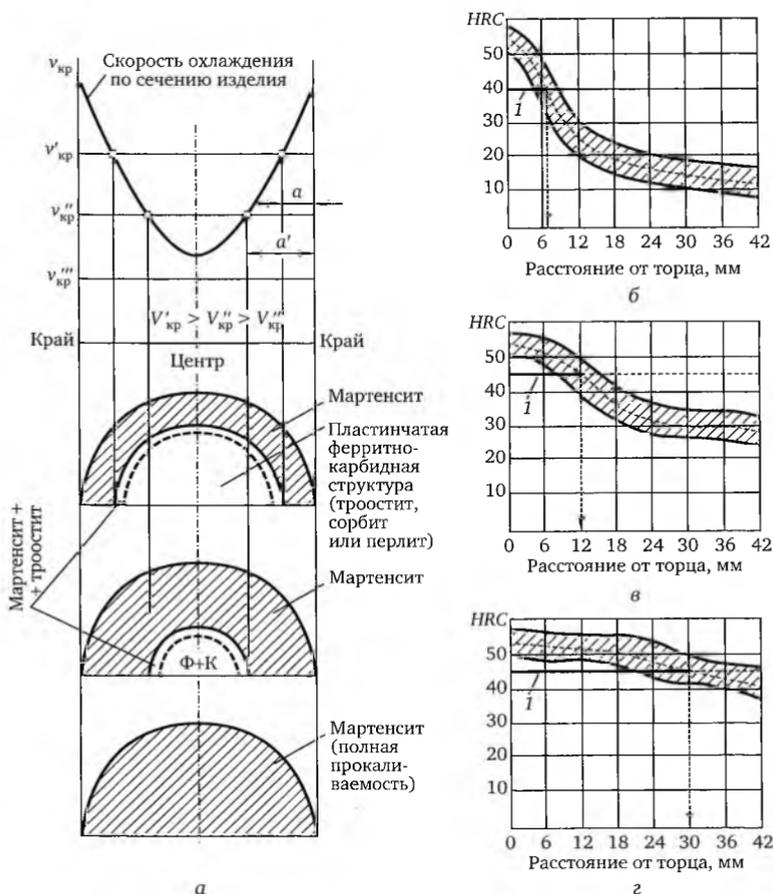


Рис. 8.15. Зависимость прокаливаемости от величины критической скорости закали $V_{кр}$ (а) и полосы прокаливаемости для стали различного состава (б — г)

Если в середине детали скорость охлаждения будет превышать критическую скорость закали $v_{кр}$ (на рис. 8.15, а — $v''_{кр}$), то сталь получит по всему сечению мартенситную структуру, что определяет сквозную прокаливаемость.

При действительной скорости охлаждения меньше $v_{кр}$ (на рис. 8.15, а — $v'_{кр}$, $v''_{кр}$) изделие прокалится на глубину a и a' , и прокаливаемость будет неполной. Состав стали одной и той же марки, размер зерна, форма изделия могут меняться в широких пределах, поэтому прокаливаемость каждой стали характеризуют *полосой* (а не кривой) *прокаливаемости* (рис. 8.15, б — г). Видно и влияние легирующих элементов.

Глубина прокаливаемости определяет свойства стали после термической обработки — «улучшение» — закалка и последующий высокий отпуск. За глубину закаленного слоя условно принимают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны (50 % мартенсита и 50 % троостита).

Прокаливаемость стали определяют методом торцевой закалки цилиндрического образца определенной формы и размеров (ГОСТ 5657—69). Наибольший размер цилиндра из испытываемой стали, который после закалки в данной охлаждающей среде имеет в сердцевине полумартенситную структуру, называют *критическим диаметром*.

Отпуск. Закалка не является окончательной обработкой стали, и для снятия закалочных напряжений и придания ей заданных свойств прочности, твердости и пластичности после нее проводится низкий, средний или высокий отпуск.

Низкий отпуск проводят при нагреве до 250 °С, выдержке до 2,5 ч и охлаждении на воздухе. При этом снимаются закалочные макронапряжения, повышается вязкость, твердость практически не снижается, так как мартенсит закалки превращается в *мартенсит отпуска* за счет снижения степени тетрагональности (см. рис. 8.9, б) и образования ϵ -карбида Fe_3C , который из-за малых размеров не идентифицируется методами оптической микроскопии (рис. 8.16). Применяется для режущего и измерительного инструмента из инструментальных сталей, после упрочнения поверхности стальных изделий (поверхностной закалки, цементации или нитроцементации). Но изделие без вязкой сердцевины не выдерживает динамических нагрузок.



Рис. 8.16. Сталь У12. Структура $M_{отп}$ и остаточный аустенит; первичные мартенситные иглы травятся неравномерно из-за выделения ϵ -карбида ($\times 1500$)

Средний отпуск выполняют при 350—500 °С (полностью завершается процесс выделения углерода из мартенсита и образование цементита Fe_3C), время выдержки зависит от размеров изделия. Полученная структура *троостит отпуска* (рис. 8.17, б) обеспечивает высокий предел упругости и выносливости, релаксационную стойкость, повышенную трещиностойкость. Охлаждение в воде создает сжимающие напряжения на поверхности изделия, что приводит к повышению предела выносливости σ_{-1} , что используется при изготовлении рессор и пружин, штампов.

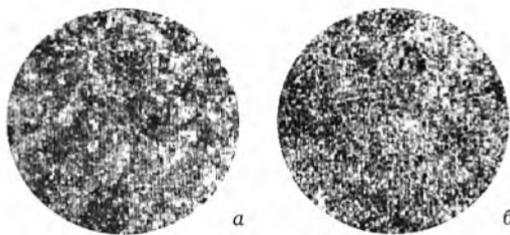


Рис. 8.17. Сталь 45. Полная закалка (а), структура — мартенсит ($\times 500$); отпуск при 300°C (б), структура — троостит отпуска (матрица) и небольшое количество избыточного феррита, существовавшего перед началом охлаждения при закалке ($\times 500$)

Высокий отпуск проводят при $500\text{--}680^\circ\text{C}$ (сфероидизация — укрупнение частиц карбида) при выдержке до 1—5 ч в зависимости от габаритов изделия. Получаемая структура *сорбит отпуска* отвечает наилучшему сочетанию свойств прочности, пластичности и вязкости (рис. 8.18, а), поэтому закалка с высоким отпуском называется «улучшение». Улучшению подвергают среднеуглеродистые (0,3—0,5 % С) конструкционные стали для повышения предела выносливости и ударной вязкости.

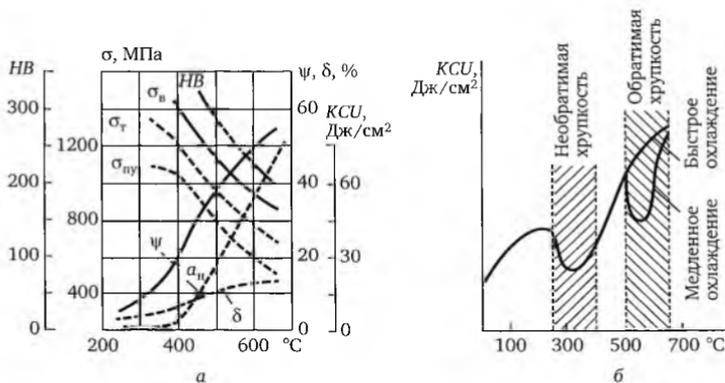


Рис. 8.18. Влияние температуры отпуска на механические свойства закаленной стали с 0,45 % С (а) и изменение ударной вязкости легированной стали в зависимости от температуры отпуска и последующей скорости охлаждения (б)

При отпуске легированных хромистых и хромоникелевых сталей снижается ударная вязкость и повышается температура перехода в хрупкое состояние — явление отпускной хрупкости. Отпускная хрупкость 1-го рода возникает при $\sim 400^\circ\text{C}$ и не исправляется; обратимую хрупкость 2-го рода при температурах $500\text{--}550^\circ\text{C}$ можно предотвратить быстрым охлаждением (верхняя кривая, рис. 8.18, б).

Закалка без полиморфного превращения применима к любым сплавам, в которых при нагревании избыточная фаза полностью или частично растворяется в основной фазе, поэтому при комнатной температуре сохраняется состояние сплава (состав фаз, структура), свойственное ему при более высокой температуре. В зависимости от фазового состава и особен-

ностей структуры в исходном и закаленном состояниях сплав может как упрочняться, так и разупрочняться. Температура нагрева ($T_{\text{зак}}$) должна обеспечивать растворение кристаллов второй фазы, а скорость охлаждения $v_{\text{охл}}$ — подавление процесса выделения вторичных кристаллов.

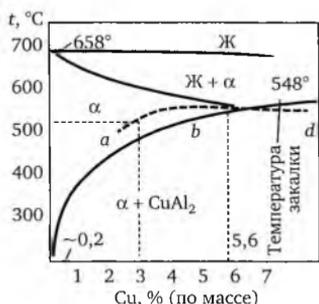


Рис. 8.19. Диаграмма состояния сплавов системы Al—Cu

Рассмотрим эту обработку на примере закалки сплавов системы Al—Cu (рис. 8.19). Температура нагрева под закалку — линия abd (ниже линии солидуса). После охлаждения (как правило, в воде) в структуре образуется пересыщенный вторым компонентом (Cu) α -твердый раствор за счет фиксирования высокотемпературного состояния сплава с максимальной растворимостью Cu в Al. Например, для сплава с 3 % Cu температура нагрева под закалку ~ 500 °C. При этой температуре закалки фаза содержит 3 % Cu. Быстрое охлаждение фиксирует это количество меди в α -растворе, хотя растворимость меди в Al при $T_{\text{ком}} \sim 0,2$ %.

Основная цель обработки закалки без полиморфного превращения — подготовка сплава к *обязательной* упрочняющей обработке — *старению*, которая рекомендуется аустенитным сталям и сплавам на основе алюминия, меди, цинка.

Старение — это термическая обработка, при которой в сплаве, подвергнутом закалке без полиморфного превращения, главным процессом является *распад пересыщенного твердого раствора*. Изменение свойств сплава происходит за счет уменьшения концентрации пересыщенного компонента в твердом растворе и выделении упрочняющих фаз. Процесс естественного старения проходит при комнатной температуре, искусственного — при нагреве до 150—250 °C. Нагрев увеличивает скорость диффузии, распад пересыщенного твердого раствора проходит быстрее и полнее.

Процесс старения протекает в две стадии.

- Образование зон *Гинье* — *Престона* (ГП) — в пересыщенном твердом растворе образуются участки, обогащенные вторым компонентом (рис. 8.20). Размеры этих зон субмикроскопические (диаметр 3—6 нм) при толщине в несколько атомных слоев (до 10 нм), сохраняется решетка растворителя.

- Выделение метастабильной (промежуточной) фазы — на зонах ГП выделяется фаза с кристаллической решеткой, отличной от α -раствора (вторая фаза).

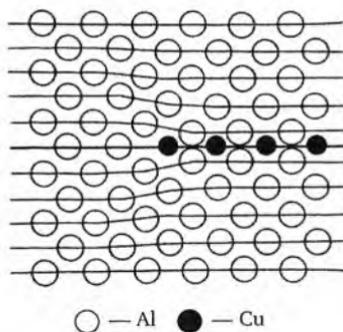


Рис. 8.20. Модель старения твердого раствора меди в алюминии с образованием зоны Гинье — Престона

Зоны ГП (по имени ученых Д. Гинье — Франция и А. Престона — Англия, независимо друг от друга открывших скопления меди в решетке состаренного алюминиевого сплава) и выделения второй фазы тормозят движение дислокации через кристалл, что приводит к упрочнению сплава. При нагреве или длительной выдержке при постоянной температуре происходит процесс коагуляции (растворение более мелких и рост более крупных частиц выделившейся фазы) или коалесценции частиц. При этом прочность падает.

Поверхностная закалка. Цель обработки — сочетание высокой твердости и прочности поверхностного слоя изделия с вязкой сердцевиной. В аустенитное состояние переводится только *поверхностный* слой заданной толщины, поэтому нагрев должен быть очень быстрым.

Наиболее часто применяют поверхностную закалку током с частотой 10^3 — 10^5 Гц (закалка ТВЧ) — переменное магнитное поле индуктора индуцирует ток, который разогревает поверхностный слой детали (рис. 8.21). Скорость нагрева — на 2—4 порядка выше, чем в печи. Охлаждение осуществляется через душевое устройство, помещенное в индуктор (*спрейер*), сразу после нагрева. Глубина закаленного слоя

$$h = 4,46 \cdot 10^5 \sqrt{\rho / \mu f},$$

где ρ — удельное электросопротивление стали; μ — магнитная проницаемость; f — частота тока.

Преимущества данной обработки: выше твердость, мельче зерно, сокращение длительности обработки, уменьшение коробления, использование при серийном автоматизированном производстве.

Применение: для деталей из среднеуглеродистых сталей пониженной и регламентированной прокаливаемости, работающих на износ.

Для поверхностной закалки крупногабаритных деталей — прокатные валки, крупные шестерни, червяки — применяют закалку с нагревом пламенем газовой горелки. Газокислородным пламенем с температурой 2000—3000 °С поверхностный слой в 2—4 мм разогревают

до температур выше A_{C3} . Охлаждение осуществляется водой из охлаждающей части горелки. Недостаток — невозможность контроля температуры, приводящий к снижению свойств.

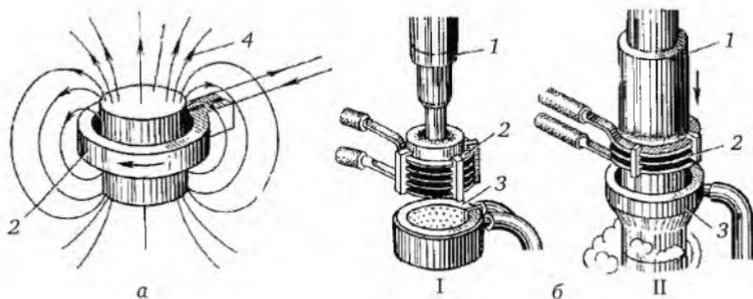


Рис. 8.21. Закалка ТВЧ:

a — схема индукционного метода нагрева детали; *б* — закалка;
 I — при одновременном нагреве всей поверхности; II — при непрерывно-последовательном нагреве; 1 — деталь; 2 — индуктор; 3 — спрейер; 4 — силовые линии магнитного поля

Закалка при нагреве лазером основана на трансформации световой энергии лазера в тепловую. Скорость нагрева очень высокая — 10^3 — 10^7 К/с, охлаждение — за счет теплоотвода вглубь металла (не требуется закалочная среда); формируется очень мелкое зерно, остаются нерастворенные дисперсные карбиды. В результате закалки лазером растет предел прочности σ_B , предел контактной выносливости возрастает на 60—70 %, нет окисления поверхности. Применяют для изделий сложной формы и обработки внутренней поверхности отверстий из сталей 35, 40, 40X, ШХ15, 40X12 и др., а также чугуна.

8.4. Термомеханическая обработка (ТМО)

ТМО заключается в сочетании пластической деформации стали и термической обработки (закалки и отпуска). Возможность применения ТМО определяется тем, что на процессы структурных превращений существенное влияние оказывают присутствующие в реальных сплавах несовершенства кристаллического строения (дислокации, дефекты упаковки, вакансии). Поэтому механизм и кинетика структурных изменений при ТМО зависят от характера и плотности элементов несовершенства строения и, в свою очередь, влияют на их количество и распределение. Различают два способа термомеханической обработки.

Высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО) — нагрев стали до температуры аустенитного состояния (выше A_{C3}), деформация при этой температуре (происходит наклеп аустенита) и закалка с последующим низким отпуском. Структура после обработки — мелкокристаллический мартенсит отпуска. ВТМО обеспечивает

рост прочности с одновременным повышением вязкости разрушения, понижения порога хладноломкости при хорошей пластичности. Высокие механические свойства объясняются большой плотностью дислокаций в мартенсите, дроблением его кристаллов на отдельные субзерна (рис. 8.22, а, в, г).

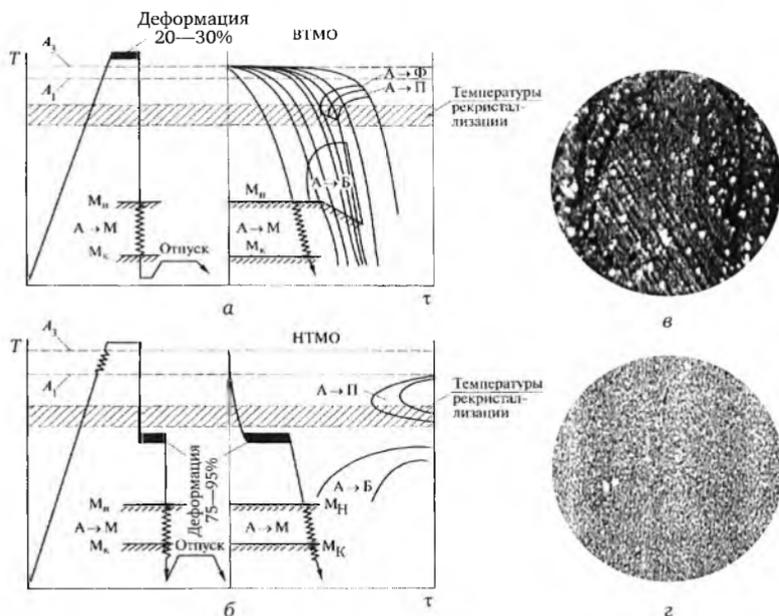


Рис. 8.22. Схема термомеханической обработки стали:

а — высокотемпературной (VTMO); б — низкотемпературной (NTMO) и микроструктура быстрорежущего сплава В14М7К25 с интерметаллидным упрочнением: в — обычная термообработка; г — VTMO ($T_{\text{деф}} = 1050^\circ\text{C}$, $\epsilon = 22\%$) $\times 500$; τ — время; A_1, A_2, A_3 — равноосные критические точки; M_H, M_K — мартенситные точки; А — аустенит; Ф — феррит; П — перлит; Б — бейнит; М — мартенсит

Низкотемпературная термомеханическая обработка (НТМО) — переохлажденный до температур $600\text{—}400^\circ\text{C}$ аустенит деформируется ($\epsilon = 75\text{—}90\%$), наклепывается и охлаждается со скоростью выше $V_{\text{кр}}$, после чего дается низкий отпуск (рис. 8.22, б). Структура после обработки — мартенсит отпуска с повышенной плотностью дислокаций. НТМО обеспечивает высокую прочность, но происходит снижение пластичности, так как деформация проводится при температурах ниже температуры рекристаллизации. Это ограничивает область применения НТМО.

8.5. Химико-термическая обработка (ХТО)

ХТО — совокупность технологических процессов, приводящих к изменению химического состава, структуры и металла без изменения состава, структуры и свойств его сердцевидных зон. Осуществляют ХТО

с помощью диффузионного насыщения поверхности различными элементами при повышенных температурах. Под общей толщиной диффузионного слоя понимают кратчайшее расстояние от поверхности насыщения до слоя со структурой сердцевины изделия. Выбор элемента (или комплекса элементов) определяется требуемыми свойствами поверхности детали.

При ХТО одновременно протекают несколько процессов:

- образование активных атомов насыщающего элемента за счет диссоциации насыщающей среды (твердой, жидкой, газообразной). Например, диссоциация аммиака: $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + 2\text{N}_{\text{атом}}$;
- адсорбция активных атомов с образованием связей между ионами насыщающего элемента и основного металла (хемосорбция);
- диффузия адсорбированных атомов вглубь металла с образованием диффузионного слоя.

Толщина образовавшегося диффузионного слоя x зависит от растворимости насыщающего элемента в материале, температуры нагрева и времени выдержки (рис. 8.23, а, б) при этой температуре, а также концентрации атомов насыщающего элемента на поверхности (рис. 8.23, в).

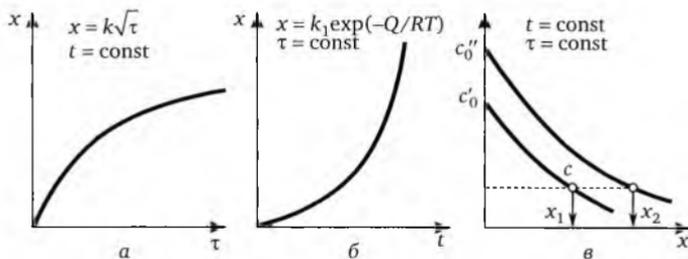


Рис. 8.23. Изменение толщины диффузионного слоя от продолжительности насыщения (а), температуры (б) и изменение концентрации по толщине диффузионного слоя (в): x — толщина слоя; τ — время; t — температура; c'_0, c''_0 — концентрация диффундирующего элемента на поверхности металла ($c'_0 < c''_0$)

Структура диффузионного слоя образуется в той же последовательности, что и расположение однофазных областей на двойной диаграмме металл — насыщающий элемент при данной температуре.

При температуре t_1 (рис. 8.24, а) существует только α -твердый раствор и концентрация легирующего компонента уменьшается по глубине. Насыщение при t_2 сопровождается фазовой перекристаллизацией $\gamma \rightarrow \alpha$ и зародыши α -фазы растут от поверхности по направлению диффузии, образуя столбчатые кристаллы. На границе раздела фаз γ и α устанавливается перепад концентрации и в микроструктуре появляется пограничная диффузионная линия Л (рис. 8.24, б).

Расстояние от поверхности до участка слоя с заданными параметрами (концентрация насыщающего элемента, твердость или другие характеристики) называется *эффективной толщиной диффузионного слоя*.

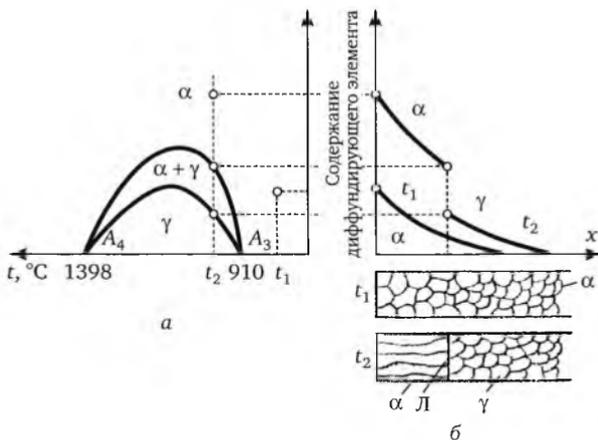


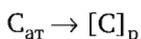
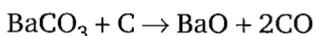
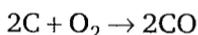
Рис. 8.24. Схема диаграммы состояния железо — диффундирующий элемент (а); изменение концентрации диффундирующего элемента по толщине диффузионного слоя и строение диффузионного слоя по толщине (б):

α — фаза; γ — фаза; A_3, A_4 — критические точки; t_1, t_2 — температуры насыщения; x — расстояние от поверхности; Л — пограничная линия

ХТО повышает твердость, износостойкость, предел выносливости, кавитационную и коррозионную стойкость, увеличивает надежность и долговечность изделия. К ХТО относятся в первую очередь цементация, нитроцементация, борирование.

Цементация — диффузионное насыщение поверхностных слоев низкоуглеродистых сталей (цементуемые стали) углеродом при нагреве в соответствующей среде — *карбюризаторе* (от фр. *carburer* — обогащать углеродом). В зависимости от применяемого карбюризатора различают два вида обработки — насыщение в твердой и газообразной средах.

Цементацию в твердом карбюризаторе используют в мелкосерийном производстве. Насыщающая среда (карбюризатор) — древесный уголь или торфяной кокс с добавками активизаторов процесса BaCO_3 и Na_2CO_3 (CaCO_3), которые способствуют образованию атомарного углерода $\text{C}_{\text{ат}}$ и последующему его переходу в твердый раствор $[\text{C}]_p$:

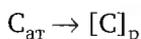
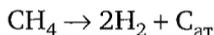


На поверхности образуется слой с повышенным содержанием углерода.

Цементация в газовом карбюризаторе проводится в среде газов, содержащих углерод. Карбюризатор — природный газ (метан) с добавка-

ми керосина и бензина. Температура процесса — 910—930 °С, время выдержки — 6—10 ч.

Реакции при насыщении:



Преимущества газовой цементации:

- 1) возможность автоматизации и механизации процесса;
- 2) поддерживается заданное количество углерода (углеродный потенциал) в среде, а следовательно, в слое;
- 3) ускорение процесса за счет проведения последующей термической обработки непосредственно после цементационного нагрева;
- 4) из-за небольшой продолжительности процесса рост зерна меньше, структура после обработки дисперснее.

Процесс газовой цементации используют в массовом производстве деталей, работающих при трении поверхности. После цементации обязательно проводится термическая обработка для получения заданных свойств цементованного слоя и сердцевины изделия. Цементованное изделие после термической обработки имеет поверхностный слой толщиной 0,1—0,7 мм со структурой *мартенсита отпуска с включениями глобулярных карбидов*; сердцевина, в зависимости от химического состава стали, может иметь структуру *сорбита*, *троостита* или даже *низкоуглеродистого мартенсита*. Твердость поверхности *HRC 58—62*, сердцевины — *HRC 38—42*.

Термическая обработка цементованных изделий:

- закалка прямо с температуры цементации или с подстуживанием с последующим низким отпуском — для деталей из наследственно-мелкозернистых сталей, у которых требуется только высокая твердость поверхности;
- охлаждение на воздухе после цементации, затем закалка от 850—900 °С и низкий отпуск для деталей из наследственно-крупнозернистых сталей с повышенными требованиями к свойствам детали;
- двойная закалка и последующий низкий отпуск для измельчения структуры цементованного слоя и сердцевины.

Азотирование стали — процесс диффузионного насыщения поверхностных слоев стали азотом для повышения износостойкости, твердости, предела выносливости, коррозионной стойкости поверхности. Твердость азотированного слоя — *HV 1000—1200* сохраняется при работе до 500—600 °С.

Азотирование — *окончательная* обработка изделия. Перед азотированием проводят закалку с высоким отпуском для упрочнения сердцевины изделия и получения структуры сорбита отпуска, а также механическую обработку для получения окончательных размеров детали.

Азотированию в герметических камерах, куда с определенной скоростью подается аммиак, подвергаются углеродистые стали (0,4 % С) и стали, легированные элементами, образующими нитриды (Al, Mo, V, Ti, Cr, Mn). Охлаждение с печью в потоке аммиака.

Структура азотированного слоя определяется диаграммой Fe—N и при рабочих температурах 500—650 °С возможно образование в слое следующих фаз: ϵ (нитрид Fe_2N переменного состава); γ' — нитрид Fe_4N переменного состава; α — азотистый феррит. Формирование азотированного слоя приводит к увеличению удельного объема и возникновению остаточных сжимающих напряжений, повышающих σ_{-1} .

Разновидности процесса азотирования:

- *ионное азотирование* (в тлеющем разряде) — между катодом (деталью) и анодом (установкой) в среде газа возбуждается тлеющий разряд. Происходит ионизация азотосодержащего газа, и ионы азота, бомбардируя поверхность катода, нагревают его до температуры насыщения и диффундируют в глубину слоя. Преимущество — ускорение процесса при температуре 470—580 °С и давлении $1,3 \cdot 10^2$ — $13 \cdot 10^2$ Па;

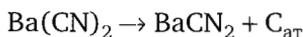
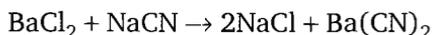
- *азотирование в жидких средах (тенифер процесс)* — проводят при 570 °С в течение 0,5—30 ч в жидкой среде расплавленных цианистых солей — 40 % KCNO , 60 % NaCN + 15 % $(\text{NH}_2)_2\text{CO}_3$, 45 % Na_2CO_3 , через которую пропускают сухой воздух. Соли расплавляют в тигле из титана, из-за низкой температуры в сталь диффундирует в основном азот; общая толщина карбонитридного слоя — 150—500 мкм;

- *нитроцементация* — одновременное насыщение поверхностных слоев стального изделия азотом и углеродом, осуществляется в газовой среде смесью науглероживающего газа и аммиака при температуре 830—870 °С, с последующей закалкой и низким отпуском. Структура поверхностного слоя толщиной 0,2—0,8 мм — *мелкокристаллический мартенсит, карбонитриды и аустенит остаточный, HRC 56—62.*

Применяется вместо газовой цементации, имеет преимущества: более низкая температура процесса, мельче зерно, меньше коробление, выше сопротивление износу, но стоимость процесса выше. Обычно процесс рекомендуют для деталей сложной конфигурации, которые склонны к короблению;

- *цианирование* (одновременное насыщение поверхностных слоев стального изделия азотом и углеродом) проводят в расплавленных солях (NaCN , NaCl , BaCl_2), содержащих группу CN при температуре 820—950 °С. После цианирования проводят закалку с низким отпуском.

Реакции с выделением атомарного азота и углерода:



Низкотемпературное цианирование (при 570 °С, выдержка до 3 ч) приводит к существенному повышению предела выносливости и кор-

розионной стойкости, твердости. Применяется для инструмента из быстрорежущих и штамповых сталей для повышения износостойкости.

Недостатком цианирования является токсичность процесса, что требует принятия специальных мер защиты.

Другие виды химико-термической обработки стальных изделий

Борирование — насыщение поверхностного слоя деталей бором. Слой состоит из боридов FeB и Fe_2B , толщина слоя — 0,1—0,2 мм. Процесс проводят в газовой среде, расплавленных солях или электролизом буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. Температура — 850—950 °С, время выдержки — 2—6 ч. При борировании повышается износостойкость (до 10 раз), окалинностойкость, теплостойкость, коррозионная стойкость. Применяют для деталей, работающих на износ, штампов, деталей пресс-форм и машин литья под давлением.

Диффузионное насыщение металлами (металлизация). Цель обработки — повышение коррозионной стойкости, жаростойкости деталей машин. Диффузионная металлизация может проводиться в твердых, жидких или газообразных средах при повышенных температурах.

Силицирование — насыщение поверхностных слоев кремнием. Структура слоя — α -твердый раствор кремния в $\text{Fe}(\alpha)$. Толщина слоя — 0,3—0,5 мм. При этом происходит повышение коррозионной стойкости поверхности изделия.

Хромирование — насыщение поверхностных слоев хромом. Структура слоя — α -твердый раствор хрома в α -железе и карбиды $(\text{Fe}, \text{Cr})_7\text{C}_3$, $(\text{Fe}, \text{Cr})_{23}\text{C}_6$. Толщина слоя — 0,1—0,2 мм. Применяется для повышения коррозионной стойкости, износостойкости поверхности изделия.

Алитурование — насыщение поверхностных слоев алюминием, проводится при температуре 800—1000 °С. Структура слоя — α -твердый раствор алюминия в $\text{Fe}(\alpha)$ и слой Al_2O_3 . Толщина слоя — 0,2—0,5 мм. Главная цель — повышение коррозионной стойкости за счет слоя Al_2O_3 .

Цинкование — насыщение поверхностных слоев цинком. Применяется для повышения коррозионной стойкости полуфабрикатов и специальных деталей холодильников, компрессоров и др.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему происходят фазовые превращения при нагреве или охлаждении стали?
2. В чем заключается различие между наследственно мелко- и наследственно крупнозернистыми сталями?
3. Что такое перегрев, пережог?
4. Расскажите о диаграмме изотермического распада аустенита.
5. В чем состоят особенности мартенситного превращения? Что такое остаточный аустенит?
6. Почему охлаждение стали со скоростью меньше критической дает пониженную твердость стали?

7. Какие процессы протекают при отпуске закаленной стали?
8. Как влияет температура отпуска на механические свойства стали?
9. Что такое нормализация и в каких случаях можно рекомендовать этот вид обработки?
10. Что такое прокаливаемость стали и от чего она зависит? Каковы характеристики прокаливаемости?
11. Что такое остаточные напряжения при термической обработке?
12. Что такое улучшение?
13. Как выбрать температуру нагрева под закалку без полиморфного превращения?
14. Что такое старение сплавов?
15. После отливки в изложницу сталь имела ярко выраженную дендритную ликвацию, что могло бы отрицательно сказаться на ее свойствах после пластической деформации слитка. Какая нужна обработка слитка для устранения подобного явления и что является причиной устранения ликвации?
16. Что такое химико-термическая обработка и для чего она проводится?
17. От чего зависит глубина образующегося диффузионного слоя при ХТО?
18. Для чего проводят диффузионное насыщение металлами?
19. Как меняется структура цементованного слоя от поверхности вглубь изделия, если концентрация углерода на поверхности 1,2 % (используйте диаграмму Fe—Fe₃C)?

Глава 9

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие положения. Материалы для изготовления конструкций (машин и сооружений), воспринимающих *силовую* нагрузку, называются конструкционными материалами. Определяющими параметрами таких материалов являются механические свойства — сопротивление сжатию, растяжению, работа на изгиб, выносливость при вибрационных нагрузках и т. д., что отличает их от других технических материалов (оптических, изоляционных, смазочных, лакокрасочных, декоративных, абразивных и др).

Длительный период в своем развитии человечество использовало для орудий труда и охоты, утвари, украшений и др. ограниченный круг материалов: дерево, камень, волокна растительного и животного происхождения, обожженную глину, стекло, бронзу, железо. Но совершенствование техники на каждом этапе развития предъявляло новые, непрерывно усложнявшиеся требования к конструкционным материалам (температурная стойкость, износостойкость, электрическая проводимость и др.). Например, создание паровых машин, двигателей внутреннего сгорания, электрических машин и автомобилей потребовало материалы, которые должны работать при сложных знакопеременных нагрузках, повышенных температурах и др. И основными конструкционными материалами стали металлические сплавы на основе железа (чугуны и стали), меди (бронзы и латуни), свинца и олова. В авиационном главном требованием, предъявляемым к конструкционным материалам, является высокая удельная прочность; судостроению необходимы стали и сплавы с хорошей свариваемостью и высокой коррозионной стойкостью, а химическому машиностроению — с высокой и длительной стойкостью в агрессивных средах. Научные исследования в области наноматериалов и нанотехнологий являются одними из наиболее значительных достижений современной науки. Эти материалы XXI в. все более широко используются в промышленности.

Все конструкционные материалы в основном разделяют на металлические и неметаллические, которые в свою очередь можно разбить по группам с близкими свойствами и применением (рис. 9.1).

Например, металлические сплавы различают: по системам сплавов — на железной основе и цветные; по структурному составу — на стали, латуни, бронзы, силумины и т. д.; по типам упрочнения — на закаливаемые, улучшаемые, стареющие, цементируемые и др.;

по технологическому исполнению — на деформированные (прокат, штамповки, пресованные профили и др.), литые, спекаемые, свариваемые (плавлением, взрывом, диффузионным сращиванием и т. п.).

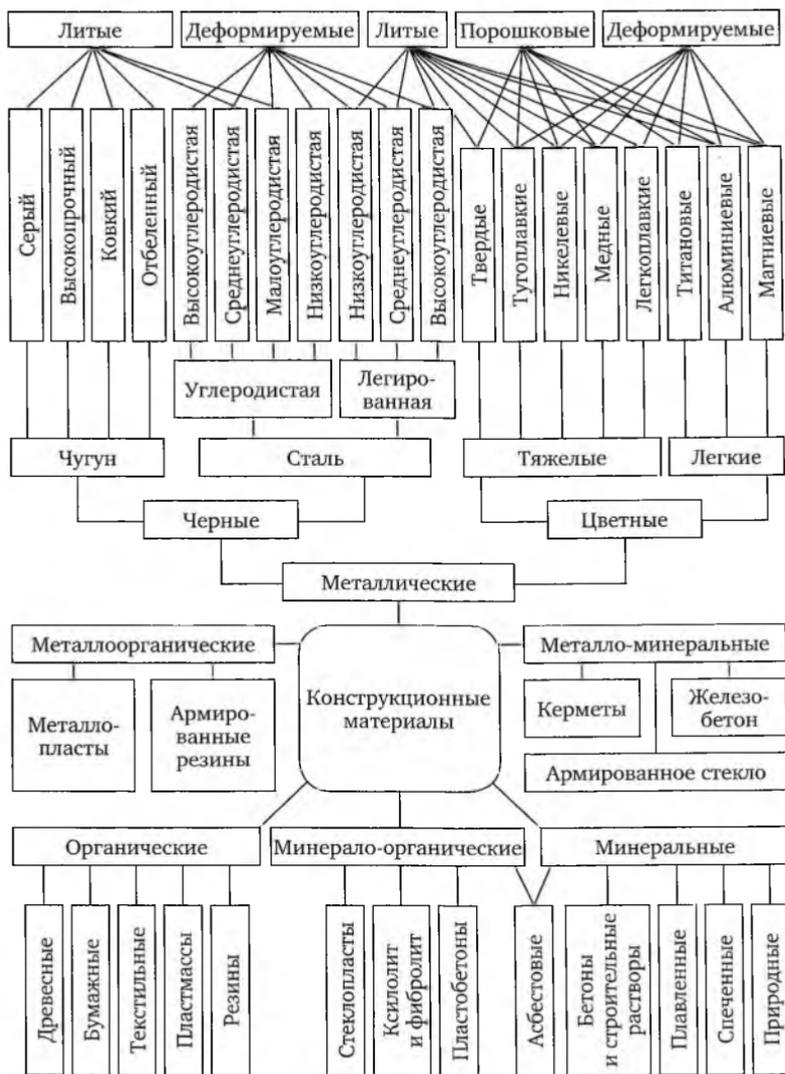


Рис. 9.1. Основные группы конструктивных материалов

Неметаллические конструктивные материалы подразделяют по изомерному составу, технологическому исполнению (пресованные, тканые, намотанные, формованные и пр.), по типам наполнителей (армирующих элементов) и по характеру их размещения и ориентации.

Некоторые конструктивные материалы, например сталь и алюминиевые сплавы, используются как строительные материалы и, наоборот, в ряде случаев строительные материалы, например железобетон, применяются в конструкциях машиностроения.

Технико-экономические параметры конструкционных материалов включают: технологические параметры — обрабатываемость металлов давлением, резанием, литейные свойства (жидкотекучесть, склонность к образованию горячих трещин при литье), свариваемость, паяемость, скорость отвердения и текучесть полимерных материалов при нормальных и повышенных температурах и др.; показатели экономической эффективности (стоимость, трудоемкость, дефицитность, коэффициент использования металла и т. п.)¹.

9.1. Углеродистые конструкционные стали

Из всех материалов, применяемых в настоящее время и прогнозируемых в будущем, только сталь позволяет получать сочетание высоких значений различных механических характеристик и хорошую технологичность при сравнительно невысокой стоимости. Поэтому сталь является основным и наиболее распространенным конструкционным материалом.

Углеродистая сталь наряду с железом и углеродом содержит марганец (0,1—1,0 %), кремний (до 0,4 %) и вредные примеси (фосфор, серу, газы — несвязанный азот и кислород).

Марганец (повышает прочность и практически не снижает пластичности стали) и *кремний* (повышая предел текучести, снижает способность стали к холодной пластической деформации) являются технологическими примесями, переходящими в сталь в процессе ее раскисления.

Фосфор, растворяясь в феррите, увеличивает пределы текучести и прочности, но уменьшает пластичность, особенно при низких температурах (хладноломкость), и вязкость. Причем снижение вязкости тем значительнее, чем больше в стали углерода. Содержание фосфора в стали не более 0,04—0,07 %.

Сера образует с железом химическое соединение FeS, которое практически не растворимо в твердом состоянии, но растворимо в жидком металле с образованием эвтектики при 988 °С. При кристаллизации она преимущественно располагается по границам зерен, и при нагреве стали до температур обработки давлением (1000—1200 °С) в местах ее расположения возникают надрывы и трещины (*красноломкость*). Сера также ухудшает свариваемость и коррозионную стойкость, поэтому ее содержание в стали не превышает 0,04—0,06 %.

Влияние азота, кислорода и водорода. Азот и кислород присутствуют в стали в виде неметаллических включений, которые охрупчивают сталь, или в твердом растворе. Очень вредным является растворенный в стали водород — он не только охрупчивает ее, но и приводит к образованию при обработке металлов давлением *флокенов* (нем.

¹ Способы производства и основные технологические методы формообразования заготовок, деталей и конструкций из машиностроительных материалов в данном учебнике не рассматриваются.

flocken, буквально — хлопья), представляющих собой очень тонкие трещины (в сотые доли миллиметра и меньше), поперечник флокена от 0,5 до 30—50 мм. При изломе обнаруживаются в виде серебристых пятен круговой формы кристаллического строения (рис. 9.2).



Рис. 9.2. Флокены обнаруживаются в изломе как серебристые пятна круглой или овальной формы, имеющие более крупнокристаллическое строение, чем остальная часть излома. Центром зарождения дефекта является пора или шлаковое включение

Углеродистая сталь обыкновенного качества (ГОСТ 380—94) в зависимости от назначения (используется для изготовления листов, полос, прутков, прокатных профилей труб, деталей в мостостроении, железнодорожных колес, рельсов и т. д.) подразделяется на три группы:

- группа А — гарантированы механические свойства (σ_B , σ_T , δ), применяют в горячекатанном состоянии для конструкций и деталей, изготавливаемых без применения горячей деформации и термообработки; поставляемая по механическим свойствам (табл. 9.1);

- группа Б — гарантирован химический состав, допускается наличие хрома, никеля, меди в количестве менее 0,3 % каждого (табл. 9.2);

- группа В — поставляемая по механическим свойствам и химическому составу, применяют для изделий, изготовленных с помощью обработки металлов давлением или сваркой, с последующей термической обработкой.

Таблица 9.1

Химический состав и механические свойства сталей группы А

| Марка стали | % С | σ_B , МПа | σ_T , МПа | δ , % | Примечание |
|-------------|-----------|------------------|------------------|--------------|---|
| | | | не менее | | |
| Ст0 | < 0,23 | >310 | — | 20 | Буква А в маркировку не вносится. Для кипящих сталей значения свойств σ_B , σ_T на 10 МПа меньше, а значение δ на 1 % больше, чем в сталях СП и ПС |
| Ст1 | 0,06—0,12 | 320—420 | — | 31 | |
| Ст2 | 0,09—0,15 | 340—440 | 200 | 29 | |
| Ст3 | 0,14—0,22 | 380—480 | 210 | 23 | |
| Ст4 | 0,18—0,27 | 420—540 | 240 | 21 | |
| Ст5 | 0,28—0,37 | 500—640 | 260 | 17 | |
| Ст6 | 0,38—0,49 | 640—600 | 300 | 12 | |

Химический состав сталей группы Б

| Марка стали | % С | % Mn | Содержание Si, % | | | % S | % P |
|-------------|-----------|----------|------------------|-----------|-----------|------|-----|
| | | | кп | пс | сп | | |
| БСт0 | < 0,23 | — | — | 0,05—0,17 | 0,12— 0,3 | 0,05 | 0,4 |
| БСт1 | 0,06—0,12 | 0,25—0,5 | 0,05 | | | | |
| БСт2 | 0,09—0,15 | 0,25—0,5 | 0,05 | | | | |
| БСт3 | 0,14—0,22 | 0,3—0,65 | 0,07 | | | | |
| БСт4 | 0,18—0,27 | 0,4—0,7 | 0,07 | | | | |
| БСт5 | 0,28—0,37 | 0,5—0,8 | | | | | |
| БСт6 | 0,38—0,49 | 0,5—0,8 | | | | | |

Маркировка — буквы Ст — «сталь» и цифры 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, определяющие номер марки. Чем выше номер, тем больше углерода в стали, выше прочность и ниже пластичность. К недостаткам углеродистых сталей обыкновенного качества можно отнести их низкую прочность и хладостойкость (не могут работать при низких температурах).

Углеродистые качественные стали (ГОСТ 1050—88) маркируются двумя цифрами, указывающими процент углерода в сотых долях (08, 15, 40, 70). Качество определяется содержанием вредных примесей (S и P < 0,035 %), допускается 0,35—0,8 % Mn, 0,17—0,37 % Si, подразделяются по содержанию углерода. Достоинством углеродистых качественных сталей является их невысокая стоимость, хорошая технологичность и достаточная прочность (табл. 9.3). Недостаток этих сталей — малая прокаливаемость ($D_{кр} < 12$ мм).

Низкоуглеродистые стали (менее 0,25 % С) имеют высокую пластичность, малую прочность, хорошую свариваемость. Стали 08, 08кп, 10, 10кп применяют без термической обработки для деталей, изготавливаемых холодной штамповкой; стали 15, 25, 30 — для малонагруженных деталей, упрочняемых цементацией (шестерни, звездочки, ролики, оси).

Среднеуглеродистые стали (менее 0,5 % С) применяют, в зависимости от требуемых свойств, после улучшения или закалки ТВЧ ($\sigma_{0,2} = 400 \div 600$ МПа, $KCU = 0,5$ МДж/м², критический диаметр прокаливаемости сталей — 10—12 мм). Стали 25, 30, 35, 40, 45 используют для средненагруженных деталей: шатуны, валы, шестерни, пальцы.

Высокоуглеродистые стали (более 0,5 % С) применяют после закалки и отпуска или закалки ТВЧ для деталей, работающих в условиях трения (пружины, рессоры, эксцентрики), а также крупных деталей после нормализации.

Углеродистые литейные стали (ГОСТ 977—88) маркируются так же, но с добавлением буквы Л — 15Л, 20Л, 35Л, 40Л и т. д. и имеют тот же химический состав. Отливки подвергают термической обработке. Применяют для деталей, работающих при ударных нагрузках, — арматура, отливки станин, крупных прокатных валков, шестерен и т. д.

Механические свойства качественных углеродистых сталей после улучшения

| Сталь | Температура отпуска $t_{отп}$, °C | Диаметр заготовки $d_{заг}$, мм | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % | ψ , % | KCU, Дж/см ² | Твердость |
|-------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------|------------------|--------------|------------|-------------------------|-----------|
| 30 | 500 | 20 | 490—590 | 640—760 | 23—16 | 71—65 | 240—160 | 175—208 |
| | | 60 | 390—440 | 540—630 | 27—18 | 68—61 | 210—120 | 150—175 |
| | | 20 | 400—460 | 590—660 | 25—19 | 78—71 | 270—200 | 165—184 |
| 35 | 600 | 60 | 350—390 | 490—570 | 28—21 | 72—66 | 230—150 | 138—158 |
| | | 20 | 540—640 | 700—820 | 19—14 | 67—62 | 190—140 | 193—226 |
| | | 60 | 420—470 | 590—680 | 22—16 | 64—58 | 160—90 | 162—185 |
| 40 | 600 | 20 | 420—480 | 630—690 | 22—17 | 74—68 | 230—180 | 173—191 |
| | | 60 | 370—410 | 530—610 | 24—20 | 68—64 | 190—120 | 145—168 |
| | | 20 | 590—680 | 760—870 | 16—13 | 65—61 | 160—120 | 208—239 |
| 45 | 500 | 60 | 440—500 | 630—720 | 18—15 | 61—55 | 120—70 | 175—200 |
| | | 20 | 450—500 | 660—720 | 19—16 | 71—67 | 200—160 | 184—200 |
| | | 60 | 390—430 | 570—640 | 21—19 | 66—62 | 150—110 | 158—180 |
| 45 | 600 | 20 | 640—730 | 820—920 | 14—12 | 62—59 | 140—100 | 225—247 |
| | | 60 | 470—520 | 680—770 | 16—14 | 58—52 | 90—60 | 185—210 |
| | | 20 | 480—520 | 690—750 | 17—16 | 68—65 | 180—140 | 195—209 |
| 45 | 600 | 60 | 410—440 | 610—680 | 20—18 | 64—61 | 120—90 | 168—190 |

| Сталь | Температура отпуска $t_{отп}$, °C | Диаметр заготовки $d_{зар}$, мм | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % | ψ , % | КСУ, Дж/см ² | Твердость |
|-------|--|--|----------------------|------------------|--------------|------------|-------------------------|-----------|
| 50 | 500 | 20 | 680—780 | 870—970 | 13—11 | 61—57 | 120—80 | 239—268 |
| | | 60 | 500—550 | 720—820 | 15—14 | 55—48 | 70—50 | 200—225 |
| | 600 | 20 | 500—540 | 720—780 | 16—15 | 67—62 | 160—120 | 200—217 |
| | | 60 | 430—460 | 640—720 | 19—17 | 62—59 | 110—70 | 180—200 |
| 55 | 500 | 20 | 730—820 | 920—1030 | 12—10 | 59—53 | 100—60 | 255—285 |
| | | 60 | 520—580 | 770—870 | 14—13 | 52—43 | 60—40 | 210—239 |
| | 600 | 20 | 520—570 | 750—810 | 15 | 65—58 | 140—110 | 209—225 |
| | | 60 | 440—490 | 680—760 | 18—16 | 61—56 | 90—60 | 190—210 |
| 60 | 560 | 30 | 530—600 | 900 | 15 | 42 | 30 | — |
| | 620 | | 450—500 | 820 | 22 | 55—50 | 45 | — |
| 70 | 480 | — | 850 | 1050 | 8 | 30 | — | — |

9.2. Легированные стали

Легированные стали кроме обычных примесей содержат элементы, специально вводимые в определенных количествах для обеспечения требуемых свойств. Эти элементы называются *легирующими*.

Известно (см. параграф 7.3), что все легирующие элементы можно подразделить на *ферритообразующие* (стабилизирующие феррит) и *аустенитообразующие* (стабилизирующие аустенит). Для определения класса стали по структуре пользуются структурными диаграммами, показывающими изменение структуры стали с изменением ее химического состава для разных легирующих элементов (рис. 9.3). При низком содержании углерода и большом количестве легирующего элемента, стабилизирующего феррит (Cr, Si, Mo, W, V и др.), образуется сталь, относящаяся к ферритному классу (рис. 9.3, а). Структура такой стали — феррит с некоторым количеством карбида. Увеличивая количество углерода или снижая процент легирующего элемента, можно получить стали разных классов, имеющих разную структуру, а следовательно, и свойства.



Рис. 9.3. Структурные диаграммы легированных сталей:
а — ферритообразующие; б — аустенитообразующие

То же самое можно сказать и об элементах, стабилизирующих γ -фазу (рис. 9.3, б). Большое количество аустенитообразующих элементов при небольшом содержании углерода приводит к образованию при любой температуре аустенита, возможно, с некоторым количеством карбида (при увеличении содержания углерода в стали).

По отношению к углероду легирующие элементы подразделяются на две группы.

1) *Графитизирующие* элементы (Si, Ni, Cu, Al), которые находятся в твердом растворе и образуют легированный феррит (α -твердый раствор углерода и легирующих элементов в α -железе) и легированный аустенит (γ -твердый раствор углерода и легирующих элементов в γ -железе). В феррите и аустените могут одновременно растворяться несколько элементов. Легирование *любыми* элементами, кроме Co, уве-

личивает устойчивость переохлажденного аустенита, снижает критическую скорость охлаждения, увеличивает прокаливаемость. Легирование твердых растворов приводит к их упрочнению.

2) *Карбидообразующие элементы* (Fe, Mn, Cr, Mo, W, Nb, V, Zr, Ti, Ta). При малом содержании в стали они могут растворяться в цементите, образуя легированный карбид $(Fe, Me)_3C$, например, $(Fe, Mn)_3C$, $(Fe, Cr)_3C$.

Карбиды, образующиеся в легированных сталях, разделяются на две группы. *Первая группа* — карбиды со сложной кристаллической решеткой типа $Me_{23}C_6$, Me_7C_3 , Me_5C , Me_4C (Me — металл, C — углерод), растворяющиеся в аустените при нагреве. *Ко второй группе* относятся карбиды, имеющие простую решетку типа MeC , Me_2C (VC , NiC , W_2C , Mo_2C), которые в реальных условиях нагрева стали практически не растворяются в аустените.

При высоком содержании легирующие элементы образуют с железом или друг с другом *интерметаллические соединения*, например: $FeMo_6$; $FeGr$ (σ -фаза); Fe_7Mo_6 ; Fe_2W ; Fe_7W_6 ; Ni_3Ti ; Ni_3TiAl ; Fe_3Nb_6 и др.

Легированные стали классифицируют:

— по химическому составу:

- низколегированные стали — общее количество л. э. $< 2,5 \%$,
- среднелегированные стали — $2,5—10 \%$ л. э.,
- высоколегированные стали — более 10% общего количества л. э.;

— по качеству (содержанию вредных примесей):

- сталь обыкновенного качества — $0,04 \%$ P, $0,05 \%$ S,
- качественная сталь — менее $0,035 \%$ P и S,
- высококачественная сталь — менее $0,025 \%$ P и S,
- особо высококачественная сталь — менее $0,025 \%$ P, менее $0,015 \%$ S;

— по назначению:

- конструкционные стали,
- инструментальные стали,
- стали с особыми свойствами;

— по структуре в равновесном (*отожженном*) состоянии и в *нормализованном* состоянии (после нагрева до $900^\circ C$ и охлаждения на воздухе).

Маркировка легированных сталей. По марке легированной стали можно судить о *качественном* и *количественном* составе стали, так как стали маркируют цифрами и буквами, например, 20X2H4A.

Углерод в легированной стали определяется числом в начале марки, соответствующее количеству углерода — в сотых долях процента. Каждому легирующему элементу присвоена русская буква: никель (Ni) — Н, медь (Cu) — Д, азот (N) — А, хром (Cr) — Х, бор (B) — Р, кобальт (Co) — К, молибден (Mo) — М, марганец (Mn) — Г, кремний (Si) — С, титан (Ti) — Т, ванадий (V) — Ф, вольфрам (W) — В, алюминий (Al) — Ю, ниобий (Nb) — Б, фосфор (P) — П, цирконий (Zr) — Ц. После буквы стоит число, показывающее количество элемента в целых процентах. При содержании элемента меньше $1—1,5 \%$ число не ставится. V, W, Ti, Nb, Zr, B, N нередко присутствуют в стали в сотых или тысячных долях

процента, но выносятся в марку, так как существенно влияют на свойства стали.

Буква А в конце маркировки показывает, что сталь *высококачественная* (менее 0,025 % S и 0,025 % P). *Особо высококачественная* сталь имеет в конце марки букву Ш.

Примеры расшифровки марок: 12Х2Н4А — ~0,12 % С, ~2 % Cr, ~4 % Ni, высококачественная; 12Х18АГ18-Ш — 0,12 % С, ~18 % Cr, ~18 % Mn, азотированная, получена рафинирующим электрошлаковым переплавом.

Отдельные стали имеют специальные обозначения. Например, Р18 — Р — быстрорежущая сталь, цифра — процентное содержание основного легирующего элемента вольфрама (18 % W); ШХ15 — Ш — шарикоподшипниковая сталь, в марку вынесен основной легирующий элемент — хром в десятых долях процента (ШХ15 — 1,5 % Cr); А20 — А — автоматная сталь, цифра после буквы показывает содержание углерода (А20 — 0,20 % С).

В некоторых случаях используют отраслевое обозначение сталей — ЭИ, ЭП или ЭК и цифры, показывающие порядковый номер (ЭИ736).

9.3. Легированные конструкционные стали

Конструкционные легированные стали (ГОСТ 4543—71) широко применяются для деталей машин и механизмов, работающих в условиях сложного нагружения, т. е. под действием статических, динамических, знакопеременных нагрузок или при их одновременном действии (автомобильная промышленность, сельскохозяйственное и транспортное машиностроение, строительство и т. д.).

Преимущества и недостатки конструкционных легированных сталей:

| Преимущества | Недостатки |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• при одном и том же содержании углерода эти стали после термической обработки имеют более высокие характеристики прочности;• прокаливаемость легированных сталей выше, так как большинство легирующих элементов стабилизирует аустенит, сдвигая С-образную диаграмму вправо;• легирование тормозит распад аустенита и снижает критическую скорость закалки, поэтому закалку проводят в масле, а иногда на воздухе; снижает брак по закалочным трещинам и меньше коробление детали;• легирование снижает температурный порог хладноломкости;• возможно измельчение зерна, что увеличивает предел текучести и улучшает запас вязкости | <ul style="list-style-type: none">• склонность к отпускной хрупкости (хромистые и хромоникелевые стали);• повышенное содержание в структуре после закалки остаточного аустенита снижает предел выносливости;• склонность к дендритной ликвации из-за малой скорости диффузии легирующих элементов, что приводит к анизотропии свойств после пластической деформации;• худшая обрабатываемость резанием;• высокая стоимость |

Основные марки конструкционных легированных сталей (например, 20X2H4A, 15XCHД, 18X2H4BA и др.) — это сложнолегированные стали, где наряду с основными элементами (Cr, Ni, Si, Mn), вводимыми в состав для упрочнения и повышения прокаливаемости, присутствуют специальные элементы (W, V, Ti, Al и др.), которые способствуют образованию в структуре дисперсных упрочняющих частиц типа VC, VN, AlN, WC, NbC и комплексных интерметаллидных фаз, повышающих упрочнение стали.

Для обеспечения работоспособности деталей из легированных сталей необходимо, чтобы они обладали высокой *конструктивной прочностью* — совокупностью характеристик материала, соответствующих необходимым служебным свойствам изделия в условиях реальной нагрузки. Конструктивная прочность определяется надежностью и долговечностью материала и обеспечивается рациональным легированием с учетом последующего упрочнения стали термической или другой обработкой.

Надежность — свойство материала противостоять хрупкому разрушению. Определяется пластичностью (δ , %; ψ , %); ударной вязкостью ($KCU > 0,5$ МДж/м²); температурным порогом хладноломкости T_{50} или $T_{пх}$; вязкостью разрушения KC_1 ; живучестью β .

Долговечность — свойство материала сопротивляться постепенному разрушению в течение заданного времени. Определяется механическими свойствами — σ_T , σ_B , пределом усталости σ_{-1} , износостойкостью. Коррозионная стойкость и жаропрочность определяют работу детали в сложных условиях нагрева или в агрессивной среде.

Принцип рационального легирования — минимальное количество легирующих элементов в стали должно обеспечивать необходимые механические свойства, прокаливаемость, температурный порог хладноломкости.

Основное назначение легирующих элементов в конструкционных сталях следующее.

- Хром (до 2 %) растворяется в феррите и аустените, упрочняя твердый раствор, увеличивает прокаливаемость, задерживает распад мартенсита при отпуске, способствует получению высокой и равномерной твердости в стали. При содержании хрома более 12 % сталь становится коррозионно-стойкой.
- Марганец (до 2 %) растворяется в феррите, упрочняя твердый раствор и повышая свойства прочности, снижает красноломкость, увеличивает прокаливаемость. Однако марганец повышает порог хладноломкости, способствует росту зерна при нагреве, что может отрицательно сказаться на эксплуатационных свойствах стали. В специальных сталях количество марганца может быть увеличено до 14 % (сталь Гатфильда).
- Никель (до 4 %) увеличивает прочность без снижения пластичности и вязкости, увеличивает прокаливаемость, снижает температурный порог хладноломкости. Однако никель — дорогой материал, и на практике стараются ограничить использование никелевых сталей из-за их стоимости.
- Кремний (до 2 %) растворяется в феррите, значительно упрочняя его и сохраняя при этом вязкость, повышает предел усталости, снижает

чувствительность к надрезу, способствует повышению свариваемости, штампуемости. В сталь вводится в сочетании с другими элементами.

- Молибден (0,3—0,45 %) снижает склонность к отпускной хрупкости; повышает прокаливаемость, понижает температурный порог хладноломкости, увеличивает статическую, динамическую и усталостную прочность, устраняет склонность к внутреннему окислению при цементации в среде эндогаза. В специальных сталях его количество может быть увеличено.

- Вольфрам (до 1,2 %) снижает склонность к отпускной хрупкости II рода, увеличивает прокаливаемость, упрочняет сталь, но снижает пластичность. Вольфрам измельчает зерно аустенита, повышает вязкость.

- Ванадий, цирконий, титан, ниобий (0,15—0,30 % каждого элемента) измельчают зерно, снижают температурный порог хладноломкости, уменьшают чувствительность к концентраторам напряжений. Но с увеличением их количества происходит снижение прокаливаемости и сопротивления хрупкому разрушению, что обусловлено увеличением количества карбидных частиц на границах зерна.

- Бор в количестве 0,003—0,004 % увеличивает прокаливаемость (затрудняет образование центров кристаллизации перлита на границах аустенитного зерна), однако повышает температурный порог хладноломкости.

- Присадки свинца и кальция улучшают обрабатываемость резанием.

Строительные стали (09Г2С, 15Г2СФ, 15ХСНД, 08Г2МФБ и т. д.) предназначены для использования в виде листов, сортового и фасонного проката без термической обработки у потребителя в капитальном строительстве, для труб, газопроводов, в судостроении, для металлоконструкций и в других отраслях машиностроения. Поставляются в горячекатанном состоянии с феррито-перлитной структурой (ГОСТ 19281—89).

Автоматные стали обладают высокой обрабатываемостью резанием и предназначены для массового изготовления деталей из них на металлорежущих станках-автоматах. Автоматные стали маркируются буквой А, а далее следует цифра, показывающая процент углерода в стали (А12, А20, А35Е, АС40). Селеносодержащие стали имеют в марке букву Е, стали со свинцом — букву С. При повышенном содержании марганца (до 1 %) в марке ставится буква Г.

Основные требования: хорошая обрабатываемость резанием, т. е. получение легко отделяемой, короткой и ломкой стружки. По сравнению с обычными углеродистыми сталями в автоматных сталях повышенное содержание серы (до 0,3 %) и фосфора (до 0,05 %). У автоматных сталей, содержащих Pb, Ca, S и другие элементы, скорость резания увеличивается на 25—50 %, а стойкость инструмента — в 2—3 раза.

Конструкционные машиностроительные стали предназначены для изготовления деталей машин и механизмов. Классифицируются

по составу (низко-, среднелегированные), обработке (цементуемые, улучшаемые), назначению (рессорно-пружинные, подшипниковые и т. д.).

Цементуемые стали (ГОСТ 1050—88) — низкоуглеродистые (до 0,25 %) низко- и среднелегированные стали — ГОСТ 4543—71. Количество легирующих элементов (марганец, хром, кремний, никель с добавками молибдена, ванадия, титана, бора) должно обеспечивать требуемую прокаливаемость, прочностные свойства и контактную выносливость. Свойства стали определяет последующая термическая обработка (твердый поверхностный слой HRC 58—62 и вязкая сердцевина HRC 30—35) (табл. 9.4). Термическая обработка — цементация или нитроцементация с последующей одинарной или двойной закалкой и низким отпуском (возможна закалка с нагрева под цементацию).

Улучшаемые стали (ГОСТ 4543—71) — среднеуглеродистые (до 0,5 % С), низко- и среднелегированные стали (табл. 9.5). Основные легирующие элементы — хром, никель, марганец, кремний, добавки ванадия, вольфрама, титана, молибдена, бора. Требования — высокая конструктивная прочность, прокаливаемость, низкий температурный порог хладноломкости, высокое сопротивление хрупкому разрушению.

Термическая обработка на структуру сорбит отпуска — закалка при температуре 820—880 °С в масло и высокий отпуск с 550—650 °С. Для деталей, которым требуется повышенная твердость поверхности, проводится закалка ТВЧ с низким отпуском.

Применение: шатуны, ступицы, валы, тяги, штанги толкателей, пальцы, валы карданные, втулки и другие детали, работающие в условиях сложного нагружения при динамических нагрузках.

Рессорно-пружинные стали (ГОСТ 14959—79) — среднеуглеродистые (0,5—0,8 % С), низко- и среднелегированные стали. Применение: рессоры и пружины различного назначения в разных областях машиностроения. Основные требования — высокое сопротивление малым пластическим деформациям (высокий предел упругости $\sigma_{упр}$), стойкость к релаксации напряжений, высокий предел выносливости σ_{-1} при достаточной пластичности, способность сопротивляться хрупкому разрушению, прокаливаемость (табл. 9.6). Не допускается остаточная деформация. Термическая обработка: закалка (820—870 °С) в масло, отпуск при 400—520 °С на структуру троостит отпуска (троостомартенсит).

Пружины из марганцовистой, кремнистой стали могут работать при температурах до 200 °С; из стали 50ХФА — до 300 °С.

На работоспособность пружин большое влияние оказывает состояние поверхности. Окисление, обезуглероживание поверхности, грубые риски, задиры и другие поверхностные дефекты не допускаются, так как снижают предел выносливости. Срок службы рессор может быть повышен гидроабразивной и дробеструйной обработкой (поверхностный наклеп). При этом на поверхности создаются напряжения сжатия, способствующие повышению предела выносливости σ_{-1} .

Состав и свойства некоторых цементуемых сталей

| Марка стали | С, % | Cr, % | Mn, % | Ni, % | Другие | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | КСУ, МДж/М ² |
|-------------|----------|---------|---------|---------|-----------|------------------|----------------------|--------------|-------------------------|
| 15Х | 0,1—0,2 | 0,7—0,9 | 0,3—0,9 | 0,03 | — | 700 | 500 | 12 | 0,7 |
| 20ХН | 0,1—0,25 | 0,4—0,8 | 0,3—0,9 | 1,0—1,4 | — | 800 | 600 | 14 | 0,8 |
| 18ХГТ | 0,2—0,25 | 0,7—1,0 | — | 0,03 | Ti < 0,09 | 1000 | 900 | 9 | 0,8 |
| 12Х2Н4ВА | 0,1—0,15 | 1,3—1,6 | 0,3—0,8 | 4,0—4,4 | — | — | — | — | — |
| 18Х2Н4МА | 0,14—0,2 | 1,3—1,6 | 0,2—0,5 | — | Mo < 0,4 | 1300 | 1100 | 14 | 10 |

Свойства улучшаемых сталей

| Марка стали | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | KCU , мДж/м ² | $d_{кр}$, мм | $T_{пк}$, °С |
|-------------|------------------|----------------------|--------------|----------------------------|---------------|---------------|
| 30X | 900 | 700 | 12 | 0,7 | 30 | -100 |
| 40X | 1000 | 800 | 10 | 0,6 | 30 | -100 |
| 40XФА | 900 | 750 | 10 | 0,9 | 35 | -100 |
| 40XГТР | 1000 | 800 | 11 | 0,8 | 75 | -60 |
| 30XГСА | 1100 | 850 | 10 | 0,45 | 75 | -60 |
| 40XН2МА | 1100 | 950 | 12 | 0,8 | 100 | -120 |
| 36XН2МФА | 1200 | 1100 | 12 | 0,8 | 120 | -120 |

Таблица 9.6

Свойства некоторых рессорно-пружинных сталей

| Марка стали | Термообработка | | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % | ψ , % | Применение |
|-------------|----------------|----------------|----------------------|------------------|--------------|------------|---|
| | $T_{зак}$, °С | $T_{отп}$, °С | | | | | |
| 65Г | 830 | 480 | 800 | 1000 | 8 | 30 | Пружины сцепления, пружины продольной рулевой тяги, пружины подвески, бамперы |
| 60С2 | 870 | 460 | 1200 | 1300 | 6 | 25 | |
| 70С3А | 860 | 460 | 1600 | 1800 | 6 | 25 | |
| 50ХГА | 850 | 470 | 1200 | 1300 | 6 | 25 | Штанга реактивная, рессорные листы легковых и грузовых автомобилей |
| 50ХФА | 850 | 520 | 1100 | 1300 | 8 | 35 | |
| 60С2ХФА | 850 | 410 | 1700 | 1900 | 5 | 20 | Рессоры грузовых автомобилей для работы с высокими динамическими нагрузками |
| 65С2ВА | 850 | 420 | 1700 | 1900 | 5 | 20 | |
| 60С2Н2А | 880 | 420 | 1600 | 1700 | 5 | 20 | |

Износостойкие стали. Шарикоподшипниковые стали по ГОСТ 801—78 имеют особую маркировку: после букв ШХ (Ш — шарикоподшипниковая, Х — хромистая) указывают среднее содержание хрома в десятых долях процента. Например, ШХ15 — высокоуглеродистые (0,9—1,1 % С) хромистые стали (0,4—2,0 % Cr), дополнительно легированные марганцем и кремнием для увеличения прокаливаемости (табл. 9.7). Применяются для изготовления ролико- и шарикоподшипников, валов, деталей дорожных машин работающих в условиях истирающего износа (трения качения, трения скольжения).

Химический состав и твердость некоторых шарикоподшипниковых сталей

| Марка стали | Содержание основных элементов, % | | | | HRC |
|-------------|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------|
| | C | Si | Mn | Cr | |
| ШХ4 | 0,95—1,05 | 0,15—0,30 | 0,15—0,30 | 0,35—0,50 | 62—64 |
| ШХ15 | 0,95—1,05 | 0,17—0,37 | 0,2—0,4 | 1,30—1,65 | 61—65 |
| ШХ15СГ | 0,95—1,05 | 0,40—0,65 | 0,9—1,2 | 1,30—1,65 | 60—64 |
| ШХ20СГ | 0,90—1,00 | 0,55—0,85 | 1,40—1,70 | 1,40—1,70 | 50—55 |

Основные требования: высокая твердость, износостойкость, сопротивление контактной усталости в сочетании с хорошей вязкостью. Рабочая структура: мартенсит отпуска с равномерно распределенными карбидами типа $(Fe, Cr)_3C$. Термическая обработка — закалка с температуры 840—860° С в масло, нагретое до 60° С, отпуск при 150—170° С. Присутствие в структуре неметаллических включений, пористости и карбидной полосчатости может привести к выкрашиванию в зоне контакта рабочих поверхностей.

Износостойкая сталь Гатфильда (110Г13 или 110Г13Л) — высокоуглеродистая (0,9—1,3 % С), высоколегированная (11,5—14,5 % Мп; 0,3—1,0 % Si; менее 0,05 % S и 0,12 % P) сталь аустенитного класса (ГОСТ 2176—77) для работы в условиях изнашивания при больших ударных нагрузках и ударно-абразивного износа (траки гусеничных машин, щеки дробилок, зубья ковша экскаваторов, крестовины трамвайных и железнодорожных путей и т. д.).

Термическая обработка — закалка с нагревом до 1100° С, охлаждение в воде. При нагреве избыточные карбиды $(Fe, Mn)_3C$, Mn_3C , присутствующие в структуре литой стали по границам зерен и снижающие ее прочность и вязкость, растворяются в аустените. После охлаждения в воде сталь имеет аустенитную структуру.

В процессе работы высокие удельные нагрузки (выше предела текучести σ_T) вызывают интенсивный наклеп, что приводит к росту твердости и износостойкости при сохранении хорошей вязкости.

Высокопрочные стали. К высокопрочным сталям относятся стали с пределом прочности σ_B более 1500 МПа при удовлетворительной пластичности и вязкости. Применение — корпуса двигателей, стволы артиллерийского и стрелкового оружия, катапульты самолетов, шасси, гидрокрылья, корпуса подводных лодок, в ракетной технике, в приборостроении для упругих элементов. Это дорогостоящие стали.

По способу упрочнения высокопрочные стали подразделяют на мартенситные низкоотпущенные и мартенситно-старенеющие сплавы железа с никелем.

Среднеуглеродистые легированные стали типа 30Х5М2СФ, 40ХГСНМФ, 30ХГСН2А (хромансиль) используются после закалки и низкого отпуска или изотермической закалки на структуру ниже-

го бейнита. Прочность таких сталей зависит от содержания углерода (0,3 % C — $\sigma_B = 1800$ МПа; 0,4 % C — $\sigma_B = 2000$ МПа). Повышают прочность этих сталей термомеханической обработкой (ВТМО и НТМО) или получением сверхмелкого зерна (14—15 баллов) при скоростной аустенизации методами сверхскоростного нагрева и очень коротких выдержек. В сверхмелкозернистых сталях при определенных температурах и скоростях нагружения можно получить очень высокие значения δ , % — явление сверхпластичности.

Мартенситно-стареющие стали — практически безуглеродистые стали (менее 0,03 % C), основной легирующий элемент — никель (Н18К9МТ, Н18К12М5Т2, Н16К4М5Т2Ю, Н18К14М5Т). Упрочняют стали закалкой на структуру безуглеродистого никелевого мартенсита и его последующего старения с выделением интерметаллидных фаз типа NiTi, Ni₃Ti, Ni₃TiAl, (Ni, Fe)Al, (Fe, Ni, Co)₂Mo, NiAl, Ni₃Al, (Ni, Fe)Al, Fe₂Mo и др. Хром, вводимый в сплавы Fe—Ni—Ti(Al), повышает сопротивление коррозии.

Мартенситно-стареющие стали обладают малой чувствительностью к надрезам, высоким сопротивлением хрупкому разрушению и низким порогом хладноломкости при $\sigma_B = 2000$ МПа. Они имеют высокую конструктивную прочность в интервале температур от криогенных (–196 °C) до 500 °C.

Коррозионно-стойкие (нержавеющие) стали. Коррозией (рис. 9.4) называют разрушение металла вследствие химического или электрохимического воздействия окружающей среды.



Рис. 9.4. Коррозия — это разрушение металла при его физико-химическом или химическом взаимодействии с окружающей средой

Общая сумма прямых коррозионных потерь по минимальной оценке составляет до 4,0 % валового национального продукта. Гораздо труднее поддаются подсчету косвенные потери. Замена прокорродировавшей трубы нефтеперегонной установки стоит несколько сотен долларов, но недовыработка продукции за время простоя может принести убыток до 20 000 долл. в час. Замена поврежденного коррозией котла на электростанции мощностью 300 МВт может привести к недовыработке электроэнергии на 60 000 долл. в день.

В основе процессов коррозии лежит явление окисления, которое может осуществляться механизмами химического или электрохимического взаимодействия с внешней (коррозионной) средой (рис. 9.5).

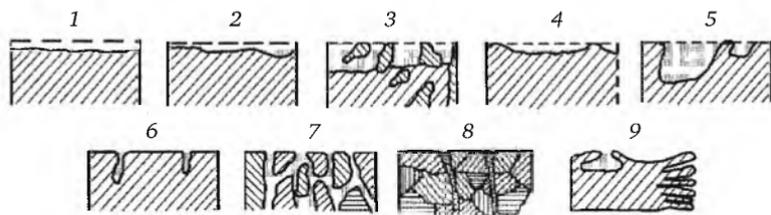


Рис. 9.5. Виды коррозионных разрушений:

площадная коррозия: 1 — равномерная; 2 — неравномерная; 3 — структурно-избирательная; местная коррозия: 4 — пятнами; 5 — язвами; 6 — точками; 7 — межкристаллитная; 8 — транскристаллитная; 9 — подповерхностная

Коррозия металлов является химической, если после разрыва металлической связи атомы металла непосредственно соединяются химической связью с теми атомами или группами атомов, которые входят в состав окислителей, отнимающих валентные электроны металла. Химическая коррозия металлов возможна в любой коррозионной среде, однако чаще всего она наблюдается в тех случаях, когда коррозионная среда не является электролитом (газовая коррозия, коррозия в неэлектропроводных органических жидкостях). Скорость ее чаще всего определяется диффузией частиц.

Коррозия металлов через поверхностную пленку продуктов коррозии металла и окислителя является электрохимической, если образующийся катион вступает в связь не с окислителем, а с другими компонентами коррозионной среды; окислителю же передаются электроны, освобождающиеся при образовании катиона. Такой процесс возможен в тех случаях, когда в окружающей среде существуют два типа реагентов, из которых одни (сольватирующие или комплексообразующие) способны соединяться устойчивыми связями с катионом металла без участия его валентных электронов, а другие (окислители) могут присоединять валентные электроны металла, не удерживая около себя катионы.

Коррозионно-стойкими сталями (ГОСТ 5632—72) называют стали (хромистые и хромоникелевые), обладающие высоким сопротивлением электрохимической коррозии. Основными легирующими элементами коррозионно-стойких сталей (кроме Si, Al, Mo, W, Nb, Ti, V, Mn, Co, Cu) являются *хром* и *никель*.

Применяют в самолето-, машино- и судостроении, химической промышленности — обшивки, трубопроводы, емкости и т. д. для изделий, подвергающихся холодной штамповке и сварке, так как обладают высокой пластичностью и вязкостью, хорошо свариваются. Однако эти стали имеют невысокую прочность.

Хромистые коррозионно-стойкие стали (табл. 9.8) содержат 13—30 % Cr, содержание углерода не превышает 0,4 %, так как в хромистых сталях образуются карбиды $(Cr, Fe)_{23}C_6$, $(Cr, Fe)_7C_3$, $(Cr, Fe)_3C$, которые снижают коррозионную стойкость стали.

Таблица 9.8

Химический состав и свойства некоторых хромистых сталей

| Марка стали | Содержание элементов, % | | Механические свойства | | | | Применение |
|-------------|-------------------------|-------|-----------------------|--------------|--------------------------|--------------|---|
| | | | отжиг | | закалка и высокий отпуск | | |
| | С | Cr | σ_B , МПа | δ , % | σ_B , МПа | δ , % | |
| 12X13 | 0,09—0,15 | 12—14 | 400 | 20 | 600 | 20 | Клапаны, детали, работающие с ударом |
| 20X13 | 0,16—0,25 | 12—14 | 500 | 20 | 660 | 16 | Режущий, хирургический инструмент, ножи и др. |
| 30X13 | 0,26—0,35 | 11—11 | 500 | 15 | 700 | 12 | |
| 40X13 | 0,36—0,45 | 11—11 | 600 | 15 | 800 | 9 | Оборудование для пищевой промышленности, сварные конструкции, легкая промышленность |
| 12X17 | < 0,12 | 16—18 | 400 | 20 | — | — | |
| 15X28 | 50,15 | 27—30 | 450 | 20 | — | — | |

После высокотемпературного нагрева, например при сварке, стали становятся склонны к межкристаллитной коррозии, так как часть хрома около границ зерна взаимодействует с углеродом, образуя карбиды, концентрация хрома в твердом растворе становится меньше 12 %, и сталь в этом месте начинает корродировать.

Хромистые коррозионно-стойкие стали имеют высокую коррозионную стойкость во влажной атмосфере, водопроводной и речной воде, азотной кислоте, в пищевых кислотах и других агрессивных средах.

Хромоникелевые коррозионно-стойкие стали (08X18N9, 08X18N9T, 12X18N9, 12X18N9T) содержат 0,08—0,20 % C; 18 % Cr и 9—10 % Ni. В зависимости от содержания Cr и Ni подразделяются на стали аустенитного и аустенито-мартенситного классов.

При высоких температурах эти стали имеют более высокие механические свойства и кислотостойкость, чем хромистые стали. Обладают высокой коррозионной стойкостью против атмосферной коррозии, в серной, соляной и органических кислотах и других агрессивных средах. Стали не упрочняются термической обработкой, но для повышения коррозионной стойкости закаляются с температуры 1000—1070 °C в воду для получения структуры аустенит.

Жаропрочные стали и сплавы. *Жаропрочность* — это способность сталей и сплавов длительное время сопротивляться деформированию и разрушению при работе в условиях высокой температуры. Характеристики жаропрочности — ползучесть и предел длительной прочности. Сроки службы жаропрочных сплавов составляют от 1—2 ч (ракеты) до сотен (авиационные турбины) и даже тысяч часов (стационарные газовые и паровые турбины).

Ползучесть — непрерывная деформация и разрушение металлов под действием *постоянно* приложенных напряжений при *высокой температуре*. Сопротивление ползучести характеризуется условным пределом ползучести — напряжением, которое вызывает за установленное время при данной температуре заданное удлинение или заданную скорость деформации.

Пример: предел ползучести $\sigma_{0,2/1000}^{700}$ показывает, что допускается деформация 0,2 % за 1000 ч при рабочей температуре 700 °С. Наиболее важный вид ползучести — медленная ползучесть, возникающая при работе в интервале температур $(0,4—0,7)T_{\text{пл}}$ материала.

Предел длительной прочности — напряжение, которое вызывает разрушение образца через *заданный* промежуток времени при *постоянной* высокой температуре.

Пример: предел длительной прочности σ_{1000}^{700} — при температуре 700 °С и заданном напряжении разрушение произойдет через 1000 ч.

Характеристики жаропрочности определяются путем специальных испытаний на ползучесть и длительную прочность. Эти понятия тесно связаны между собой, и разделить их не представляется возможным. Испытания на ползучесть и длительную прочность проводятся на одних и тех же установках (см. рис. 3.8). Жаропрочность стали зависит от ее состава и структуры.

Влияние состава стали. При работе в условиях ползучести происходят два процесса — пластическая деформация под воздействием нагрузки (*упрочнение*) и рекристаллизация (*разупрочнение*) при нагреве. Поэтому легирование жаропрочных сталей проводят:

- элементами, снижающими скорость диффузии и повышающими температуру плавления сплава, т. е. повышающими температуру рекристаллизации — тугоплавкими металлами W, Mo, Cr, V и др.;
- элементами, способными при высоких температурах образовывать фазы, препятствующие движению дислокаций и не обладающие склонностью к коагуляции (укрупнению) — образующими карбиды (Cr, Mo, Ti, V, W и др.) и интерметаллидные фазы (Ni, Ti, Al, Cu, Mo и др.).

Влияние структуры. Основу структуры жаропрочных сплавов составляют сложные по составу твердые растворы и упрочняющие фазы — карбиды, нитриды или интерметаллиды. Гетерогенная структура формируется при термической обработке — закалке с последующим старением для выделения упрочняющих фаз. Жаропрочные стали должны иметь крупнозернистую структуру, т. е. меньшую протяженность границ, что снижает вероятность разрушения. Деформация и разруше-

ние при высоких температурах проходят по границам зерна (там, где много дефектов кристаллического строения — вакансий, дислокаций и др.). Поэтому по границам легко проходит элементарный акт скольжения при пластической деформации при наличии нагрузки. Таким образом, при низких температурах границы тормозят движение дислокации, а при высоких способствуют разупрочнению.

Рабочие температуры жаропрочных сталей 500—750 °С. При температурах до 600 °С используются стали на основе феррита (α -твердого раствора), а при более высоких — на основе аустенита (γ -раствора), который обладает большей жаропрочностью.

Стали перлитного класса (котельные — 16М, 12Х1МФ, 15ХМ, 25Х1МФ со структурой после нормализации — легированный феррит и перлит, а после закалки — мартенсит или мартенсит и бейнит) применяются для узлов энергетических установок (рабочая температура не выше 600 °С). Содержат элементы, затрудняющие диффузию и повышающие температуру рекристаллизации феррита, — 0,5—1,5 % Cr, 0,25—0,35 % Mo, 0,15—0,3 % W.

Мартенситно-ферритные стали (18Х12ВМБФР и 15Х12ВНФБ) используют для деталей и узлов газовых турбин и паросиловых установок. В структуре содержат до 10 % феррита. В состав сталей кроме 11—13 % Cr входят W, V, Mo, Nb, которые повышают температуру рекристаллизации из-за образования карбидов и фазы Лавеса Fe_2W , Fe_2Mo . Упрочняются закалкой с 1030—1060 °С (масло), старение при 650—750 °С.

Мартенситные (клапанные) стали для выпускных клапанов автомобильных и тракторных двигателей внутреннего сгорания называются сильхромами. Состав сильхромов: 6—14 % Cr, 1—3 % Si, дополнительное легирование Mo, Ni, W, Cr, Si, повышающее температуру окисления до 850—900 °С, что обеспечивает хорошую сопротивляемость газовой коррозии.

Жаропрочные стали аустенитного класса содержат большое количество никеля (марганца), а для жаростойкости — хрома. Для достижения высокой жаропрочности дополнительно легируют молибденом, ванадием, вольфрамом, ниобием, бором. Рекомендуют для работы при 500—750 °С.

Аустенитные жаропрочные стали со структурой γ -твердого раствора — 09Х14Н16Б, 09Х14Н19В2БР. Из них изготавливают пароперегреватели и трубопроводы силовых установок, установок сверхвысокого давления, работающих при температурах 600—700 °С.

Аустенитные стали с карбидным упрочнением (структура аустенит + карбиды $Me_{23}C_6$, MeC — 45Х14Н14В2М, 40Х15Н7Г7Ф2МС) используют для клапанов турбин авиационных двигателей, крепежных деталей в газо- и турбостроении, деталей газовых турбин, работающих при температурах до 800 °С.

Аустенитные стали с интерметаллидным упрочнением для работы при температурах 850—950 °С имеют пониженное содержание углерода (менее 0,1 %), повышенное содержание никеля (25—37 %) и до-

бавки титана, алюминия, бора. Основная упрочняющая γ -фаза — Ni_3Ti , $\text{Nb}(\text{TiAl})$. Возможно образование карбидов типа MeC (TiC).

Сплавы на железоникелевой основе (ХН3ЗВТЮ, ХН38ВТ, 06ХН28МДТ, ХН60Ю) имеют в своем составе суммарное количество никеля и железа более 65 % (1:1,5), дополнительно легированы хромом (14—45 %), а также вольфрамом, алюминием, титаном, молибденом, медью. Основная структура — твердый раствор хрома и других элементов в Fe-Ni основе. Рабочая температура сплавов — 750—1100 °С. Благодаря высокому содержанию хрома обладают высокой коррозионной и жаростойкостью. Применяются для изготовления крепежных деталей газовых и паровых турбин, дисков и лопаток турбин.

Сплавы на основе никеля — нимоники — ХН77ТЮР, Н55ВМТКАЮ. Основные легирующие элементы: никель — > 55 %, хром — до 20 %, титан — 1,0—2,8 %, алюминий — 0,55—5,5 %. Для повышения жаропрочности — дополнительное легирование молибденом, вольфрамом, кобальтом, бором. Используют только в термически обработанном состоянии — закалка с 1050—1150 °С, старение при 500—600 °С. Упрочнение происходит за счет выделения при старении интерметаллидов Ni_3TiAl , NiTi , Ni_3Al . Применение — лопатки турбин, сопла, крепежные детали турбин, кольца, турбинные диски, работающие при 650—850 °С.

9.4. Чугуны

Классификация чугунов. В зависимости от формы графита (см. рис. 7.9) и условий его образования различают следующие виды графитизированных чугунов: серые, высокопрочные и ковкие. Серые технические чугуны, содержащие обычно 2,8—3,8 % С, 1,4—3,5 % Si и в качестве постоянных примесей — Mn, P и S, получают в результате естественной кристаллизации из расплава определенного химического состава, и его структура в отливках зависит в первую очередь от химического состава расплава и скорости кристаллизации. Кремний, способствуя процессу графитизации, замедляет скорость охлаждения. Ускоренное охлаждение чугуна в реальных условиях вносит существенные отклонения от равновесной структуры. На процесс графитизации влияют и карбидообразующие элементы (Cr, Mn, V, W, Mo), они повышают устойчивость всех видов цементита и способствуют формированию структуры белых и половинчатых (часть углерода — более 0,8 % содержится в виде цементита) чугунов. В графитизированных чугунах они увеличивают количество перлита в структуре.

В половинчатых чугунах могут сочетаться карбиды различных видов и графитные включения разной геометрической формы. Получать чугуны с такой структурой можно как в результате естественной кристаллизации из расплава, так и с помощью термической обработки отливок.

Серые чугуны с пластинчатым графитом (СЧ). В основу стандартизации серого чугуна заложен принцип регламентирования ми-

нимально допустимого значения временного сопротивления разрыву (предела прочности при растяжении σ_B), определяемого в образцах, вырезанных из стандартной литой заготовки диаметром 30 мм. Серые чугуны по ГОСТ 1412—85 маркируют буквами СЧ (серый чугун) и числом, указывающим минимальное значение временного сопротивления в килограмм-силы на квадратный миллиметр ($1 \text{ кгс/мм}^2 = 10^{-1} \text{ МПа}$). Марки и механические свойства серого чугуна приведены в табл. 9.9.

Таблица 9.9

Механические свойства серых чугунов по ГОСТ 1412—85

| Марка чугуна | σ_B , не менее | | Твердость, <i>HV</i> | Марка чугуна | σ_B , не менее | | <i>HV</i> |
|--------------|-----------------------|------|----------------------|--------------|-----------------------|-----|-----------|
| | кгс/мм ² | МПа | | | кгс/мм ² | МПа | |
| СЧ00 | Не регламентируется | СЧ25 | 25 | 245 | 183—248 | | |
| СЧ10 | 10 | 98 | 143—192 | СЧ30 | 30 | 294 | 187—255 |
| СЧ15 | 15 | 147 | 163—212 | СЧ35 | 35 | 343 | 197—269 |
| СЧ20 | 20 | 196 | 170—229 | СЧ40 | 40 | 392 | 207—285 |

Ферритные и ферритно-перлитные чугуны СЧ10 и СЧ15 применяют для изготовления малоответственных деталей, испытывающих в работе небольшие нагрузки (при толщине стенки отливки 10—30 мм). Так, чугун СЧ10 используют для изготовления строительных колонн, фундаментных плит, а чугун СЧ15 — литых малонагруженных деталей сельскохозяйственных машин, станков, автомобилей и тракторов, арматуры и т. д.

Перлитные чугуны СЧ20, СЧ25, СЧ30, СЧ35 применяют для изготовления ответственных отливок (станин мощных станков и механизмов, поршней, цилиндров, деталей, работающих в условиях изнашивания при больших давлениях, компрессоров, арматуры, дизельных цилиндров, блоков двигателей, деталей металлургического оборудования и т. д.) с толщиной стенки до 100 мм. Структура этих чугунов — мелкопластинчатый перлит (сорбит) с мелкими завихренными графитными включениями.

Основной особенностью микроструктуры серого чугуна, определяющей его физико-механические и эксплуатационные свойства, является наличие пластинчатого графита. Пластинки графита уменьшают сопротивление отрыву, временное сопротивление и особенно сильно пластичность чугуна. Относительное удлинение при растяжении серого чугуна независимо от свойств металлической основы практически равно нулю (примерно 0,5 %). Твердость чугуна находится в пределах 143—255 *HV*. Чем больше толщина стенок отливки, тем ниже механические свойства чугуна.

Графитные включения мало влияют на снижение предела прочности при сжатии и твердость, значения которых определяются главным образом структурой металлической основы чугуна. При сжатии чугун претерпевает значительные деформации, и разрушение имеет характер среза под углом 45° . Разрушающая нагрузка при сжатии в зависимости от качества чугуна и его структуры в 3—5 раз больше, чем при растяжении. Поэтому чугун рекомендуют использовать преимущественно для изделий, работающих на сжатие.

Вместе с тем благодаря пластинчатому графиту в сером чугуне обеспечивается уникальное сочетание высоких антифрикционных свойств, износостойкости, малой чувствительности к концентраторам напряжений и высокой демпфирующей способности. Очень важно, что графит улучшает обрабатываемость резанием, делая стружку ломкой.

Серый чугун — высокотехнологичный материал. Его расплав обладает хорошей жидкотекучестью, малой склонностью к образованию усадочных дефектов. Из него можно изготавливать отливки самой сложной конфигурации с толщиной стенок 2—500 мм.

Для снятия литейных напряжений и стабилизации размеров чугунные отливки отжигают при температуре 500—600 °С. В зависимости от формы и размеров отливки выдержка при температуре отжига составляет 2—10 ч. После такой обработки механические свойства изменяются мало, а внутренние напряжения снижаются на 80—90 %. Иногда для снятия напряжений в чугунных отливках применяют естественное старение чугуна — выдержку их на складе в течение 6—10 месяцев; такая выдержка снижает напряжения на 40—50 %.

Высокопрочные чугуны с шаровидным графитом (ВЧШГ). Существенное повышение механических свойств чугуна достигается при переходе от пластинчатой формы графита к шаровидной или вермикулярной (промежуточной). Для чугуна с шаровидным графитом характерны не только высокая прочность (отсюда и название — высокопрочный чугун), но и значительные пластичность и вязкость, во многих зарубежных стандартах его называют пластичным чугуном. Высокопрочный чугун получают путем модифицирования магнием или редкоземельными металлами (РЗМ).

Принцип маркировки ВЧШГ такой же, как и для серых чугунов: после букв ВЧ указывается минимальное значение предела прочности в килограмм-силы на квадратный миллиметр. Содержание углерода во всех марках ВЧШГ примерно одинаково и составляет 3,2—3,8 %. Основное различие между марками состоит в содержании кремния и в особенностях технологического процесса изготовления отливок и деталей.

ВЧШГ имеют широкий диапазон механических и эксплуатационных свойств. Ферритные чугуны характеризуются наивысшей среди чугунов пластичностью и вязкостью, обеспечивают литым деталям высокие хладо- и ударостойкость, хорошую свариваемость и обрабатываемость резанием. Перлитные ВЧШГ хорошо сопротивляются статическим и циклическим нагрузкам, обладают высокими износо- и задиростой-

костью. Все марки ВЧШГ имеют высокий модуль упругости и значительно большую, чем у стали, демпфирующую способность.

По способности выдерживать высокие механические нагрузки при наименьших деформациях и массе деталей ВЧШГ значительно превосходит сталь, ковкий и серый чугуны. Масса литых деталей из ВЧШГ может быть на 5—10 % ниже по сравнению с массой деталей из литой стали и ковкого чугуна и на 10—20 % меньше по сравнению со стальными поковками и штамповками.

Высокопрочные чугуны успешно заменяют углеродистую сталь и другие виды чугунов в деталях, работающих в условиях тепловых ударов, термоусталости (при температурах цикла до 600 °С), низких температур (до -100 °С), умеренно агрессивных сред, высоких давлений, знакопеременных динамических нагрузок.

Высокопрочные чугуны обладают хорошими литейными свойствами, что позволяет изготавливать из них высококачественные отливки с толщиной стенок 2,5—1000 мм и массой от нескольких десятков граммов (например, поршневые кольца) до 200 т (станины, цилиндры, контейнеры и др.). Высокая герметичность в сочетании с ударной и коррозионной стойкостью позволяют эффективно использовать ВЧШГ в виде наиболее экономичного материала для напорных труб и фитингов. Почти половину мирового производства ВЧШГ используют на эти цели.

Свойства ВЧШГ регламентированы ГОСТ 7293—85, в котором предусмотрены восемь марок чугуна. Относительное удлинение, твердость *HВ*, а также ударную вязкость *КС* определяют при наличии требований в нормативно-технической документации на отливки, причем значения этих свойств могут отличаться от приведенных в табл. 9.10.

Таблица 9.10

Марки и свойства ВЧШГ (по ГОСТ 7293—85)

| Марка чугуна | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , %, не менее | Твердость, <i>HВ</i> | Ударная вязкость <i>КС</i> при 20 °С, Дж/см ² |
|--------------|------------------|----------------------|------------------------|----------------------|--|
| | не менее | | | | |
| ВЧ35 | 343 | 216 | 22 | 140—170 | 80—150 |
| ВЧ40 | 392 | 245 | 15 | 140—202 | 30—80 |
| ВЧ45 | 441 | 304 | 10 | 140—225 | 30—60 |
| ВЧ50 | 491 | 314 | 7 | 153—245 | 30—50 |
| ВЧ60 | 589 | 363 | 3 | 192—277 | 10—30 |
| ВЧ70 | 687 | 412 | 2 | 228—302 | 10—25 |
| ВЧ80 | 785 | 471 | 2 | 248—351 | 10—30 |
| ВЧ100 | 981 | 687 | 2 | 270—360 | 10—20 |

Чугуны с вермикулярным графитом (ЧВГ). Вермикулярный графит имеет форму взаимосвязанных лепестков, но в отличие от пластинчатого графита лепестки вермикулярного графита имеют меньшую длину, большую толщину и округлую форму кромок (рис. 9.6).



Рис. 9.6. Формы вермикулярного графита

Специфическое сочетание физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств достигается в ЧВГ только при условии, что содержание вермикулярного графита в структуре чугуна составляет не менее 80 %, остальное — шаровидный графит; пластинчатый графит не допускается.

По прочности ЧВГ находится на уровне высокопрочных марок серого чугуна (СЧ30 — СЧ40) или превосходит их, однако пластичность, ударная вязкость, окалино- и ростоустойчивость, сопротивляемость коррозии, герметичность ЧВГ выше, чем у серого чугуна.

Чугун с вермикулярным графитом особенно эффективен для изготовления отливок большой массы (например, изложниц массой до 100 т с толщиной стенок до 500 мм), деталей сложной конфигурации независимо от массы (например, блок-картеров и головок цилиндров двигателей внутреннего сгорания), разностенных деталей. Обрабатываемость резанием ЧВГ лучше, чем ВЧШГ и стали.

В промышленности ЧВГ используется с 1968 г. Самостоятельного ГОСТа на марки ЧВГ до 1991 г. в нашей стране не было. В настоящее время используется ГОСТ 28394—89, в который включены четыре марки чугуна ЧВГ30 — ЧВГ45 с относительным удлинением не менее 3 % для ЧВГ30 и не менее 0,9 % для ЧВГ45.

Ковкие чугуны (КЧ) получают графитизирующим отжигом отливок из белого доэвтектического чугуна (рис. 9.7). При отжиге графит выделяется в виде компактных включений («хлопьевидный» графит или «углерод отжига», см. рис. 7.10, в). Благодаря компактному графиту ковкий чугун имеет повышенные значения прочности и пластичности. Повышенная пластичность послужила основанием для названия таких чугунов ковкими.

Ковкий чугун по прочностным свойствам и сочетанию механических свойств и износостойкости уступает ВЧШГ. Однако он превосходит их по хладостойкости и обрабатываемости резанием (особенно ферритный ковкий чугун). Обезуглероженный КЧ является единственным конструкционным чугуном, который хорошо сваривается и может быть

использован для получения сварно-литых конструкций. Ковкий чугун хорошо поддается запрессовке, расчеканке и легко заполняет зазоры. Отливки из ферритного ковкого чугуна можно подвергать холодной правке, из перлитного — правке в горячем состоянии.

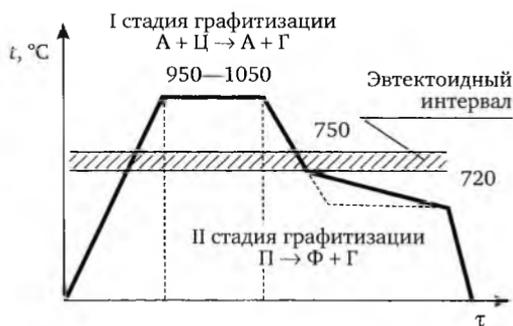


Рис. 9.7. Схема отжига ковкого чугуна:

A — аустенит; Ф — феррит; П — перлит; Ц — цементит; Г — графит

В основу стандартизации ковких чугунов заложен принцип регламентирования минимальных значений предела прочности при растяжении и относительного удлинения. После букв КЧ в марке чугуна указывают два числа — минимальные значения предела прочности в килограмм-силы на квадратный миллиметр и относительного удлинения в процентах. Механические свойства КЧ определяют на литых образцах диаметром 16 мм. В зависимости от толщины стенки отливки допускают также применение образцов диаметром 8 или 12 мм. Марки и свойства ковких чугунов в соответствии с ГОСТ 1215—79 приведены в табл. 9.11.

Таблица 9.11

Марки, свойства и структурные классы ковких чугунов по ГОСТ 1215—79

| Марка чугуна | σ_B , не менее | | δ , %, не менее | Твердость, НВ | Структурный класс |
|--------------|-----------------------|---------------------|------------------------|---------------|-------------------|
| | МПа | кгс/мм ² | | | |
| КЧ 30-6 | 294 | 30 | 6 | 100—163 | Ферритный |
| КЧ 33-8 | 323 | 33 | 8 | | |
| КЧ 35-10 | 343 | 35 | 10 | | |
| КЧ 37-12 | 362 | 37 | 12 | | |
| КЧ 45-7 | 441 | 45 | 7 | 150—207 | Перлитный |
| КЧ 50-5 | 491 | 50 | 5 | | |
| КЧ 55-4 | 539 | 55 | 4 | | |
| КЧ 60-3 | 589 | 60 | 3 | | |
| КЧ 65-3 | 637 | 65 | 3 | | |
| КЧ 70-2 | 687 | 70 | 2 | | |
| КЧ 80-1,5 | 785 | 80 | 1,5 | | |

Ковкий чугун применяют для изготовления тонкостенных деталей. Из него изготавливают детали, работающие при ударных и вибрационных нагрузках. Ферритные КЧ 37-12 и КЧ 35-10 используют для изготовления деталей, эксплуатируемых при высоких динамических и статических нагрузках (картеры редукторов, ступицы, крюки, скобы и т. д.), а КЧ 30-6 и КЧ 33-8 — для менее ответственных деталей (головки, хомутики, гайки, глушители, фланцы, муфты и т. д.). Из перлитных ковких чугунов изготавливают вилки карданных валов, звенья и ролики цепей конвейера, втулки, муфты, тормозные колодки и т. д.

Недостатками ковкого чугуна являются его пониженные литейные свойства, прежде всего жидкотекучесть. Поэтому минимальная толщина стенки в отливках из ковкого чугуна составляет 6 мм. Ограничение толщины стенки отливки максимальным значением 60 мм связано с плохой отжигаемостью исходного белого чугуна в больших сечениях.

Антифрикционные чугуны. Антифрикционные чугуны (АЧ) предназначены для применения в узлах трения со смазкой; они должны обеспечивать нормальную работу трущихся деталей без заедания и образования задиров при достаточно высокой износостойкости. Эти требования обеспечиваются в антифрикционных чугунах их микроструктурой, обычно содержащей перлитную, перлитно-ферритную или аустенитную металлическую основу и различной формы графитные включения. Дополнительное повышение износостойкости антифрикционных чугунов достигается наличием в их структуре небольших количеств цементита и фосфидной эвтектики. Графитные включения способствуют эффективному самосмазыванию при трении и хорошему удержанию смазочных масел, а также обеспечивают высокую теплопроводность, что создает нормальные тепловые условия работы узла трения.

Основные преимущества антифрикционных чугунов по сравнению с цветными антифрикционными сплавами (бронзами, цинковыми и алюминиевыми сплавами, баббитами) — значительно более высокая износостойкость, хорошая работоспособность при высоких давлениях, повышенных температурах и граничной смазке, низкая стоимость.

Основные марки антифрикционных чугунов установлены ГОСТ 1585—85. Чугуны марок АЧС-1 — АЧС-6 — серые чугуны с пластинчатым графитом, чугуны АЧВ-1 и АЧВ-2 — ВЧШГ, чугуны АЧК-1 и АЧК-2 — ковкие чугуны. При использовании антифрикционных чугунов нужно учитывать условия работы узла трения (скорость скольжения v , давление p), а также вид, состояние и твердость сопряженной трущейся детали (табл. 9.12).

Из антифрикционных чугунов изготавливают различные детали узлов трения (втулки, вкладыши, подшипники скольжения, уплотнения, ролики), изнашивающиеся детали горнорудного и угольного оборудования, строительных и дорожных машин, тракторов и экскаваторов, сельскохозяйственных машин, некоторые трущиеся детали турбин, компрессоров, двигателей и насосов.

Применение антифрикционных чугунов

| | | | | |
|-------|---|----------|----------|-----------|
| АЧС-1 | Для работы в паре с закаленным или нормализованным валом | 5,0—14,0 | 5,0—0,3 | 12,0—2,5 |
| АЧС-2 | То же | 10,0—0,1 | 0,3—3,0 | 2,5—0,3 |
| АЧС-3 | Для работы в паре с термообработанным или нетермообработанным валом | 6,0 | 1,0 | 5,0 |
| АЧС-4 | Для работы в паре с закаленным или нормализованным валом | 15,0 | 5,0 | 40,0 |
| АЧС-5 | Для работы в особо нагруженных узлах трения в паре с закаленным или нормализованным валом | 20—30 | 1,0—0,4 | 20,0—12,5 |
| АЧС-6 | Для работы в узлах трения при температуре до 300 °С в паре с нетермообработанным валом | 9,0 | 4,0 | 9,0 |
| АЧВ-1 | Для работы в узлах трения с повышенными скоростями в паре с термообработанным валом | 1,5—20,0 | 10,0—1,0 | 12,0—20,0 |
| АЧВ-2 | То же | 1,0—12,0 | 5,0—1,0 | 3,0—12,0 |
| АЧК-1 | Для работы в паре с закаленным или нормализованным валом | 20,0 | 2,0 | 20,0 |
| АЧК-2 | Для работы в паре с нетермообработанным валом | 0,5—12,0 | 5,0—1,0 | 2,5—12,0 |

Износостойкие белые чугуны. Основной структурной особенностью износостойких белых чугунов (ИБЧ) является наличие достаточно большого количества высокотвердых карбидов (легированного цемента и специальных карбидов), обеспечивающих высокую стойкость чугуна в условиях абразивного изнашивания. На свойства ИБЧ оказывает также влияние и металлическая основа, которая должна быть достаточно твердой, прочной и обеспечивать хорошее закрепление карбидных частиц.

Металлическую основу (матрицу) ИБЧ составляют аустенит и продукты его превращения. В наибольшей степени требованиям, предъявляемым к ИБЧ, отвечают мартенсит и неустойчивый остаточный

аустенит. ГОСТ 7769—82 предусматривает девять марок износостойких белых чугунов (ЧХЗТ, ЧХ9Н5, ЧХ16, ЧХ16М2, ЧХ22, ЧХ28Д2, ЧХ32, ЧГ7Х4, ЧН4Х2), которые классифицированы по химическому составу (хромистые, кремнистые, алюминиевые, марганцевые, никелевые низко- и высоколегированные). Цифры, стоящие после букв, означают примерную массовую долю основных легирующих элементов.

Максимальной износостойкостью обладают чугуны, содержащие 12—18 % Cr, структура которых приведена на рис. 9.8, а. Углерод повышает твердость чугуна, но снижает его прочность. Структура ванадиевых белых чугунов имеет композиционный характер (рис. 9.8, б). Эти чугуны обладают редким сочетанием высоких механических и эксплуатационных свойств, что позволяет использовать их для изготовления деталей, работающих при высоких нагрузках (в том числе и динамических) и в условиях интенсивного изнашивания.

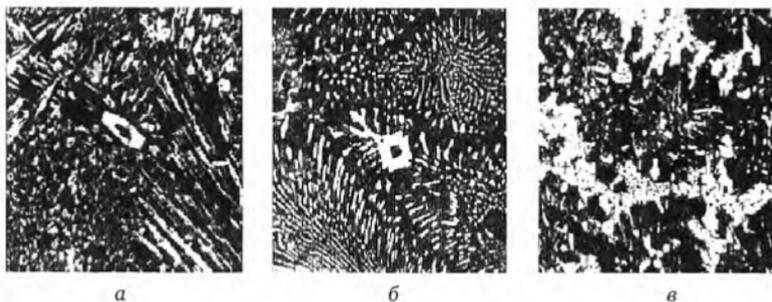


Рис. 9.8. Микроструктуры износостойких белых чугунов, $\times 150$:

а — с карбидами M_7C_3 ; б — с карбидами VC; в — с карбидами M_7C_3 и VC

Чугуны, легированные комплексом элементов, прежде всего ванадием и хромом (рис. 9.8, в), обладают преимуществами и хромистых, и ванадиевых чугунов. У них сочетаются повышенные механические свойства и очень высокая износостойкость, особенно ударно-абразивная.

Половинчатые чугуны. В структуре половинчатых чугунов (ПЧ) содержатся одновременно и графит, и включения карбидов. Многообразие половинчатых чугунов обусловлено тем, что в их структуре могут сочетаться графитные включения разной формы (от пластинчатой до шаровидной) с карбидами различных видов (Me_3C , Me_7C_3 , $Me_{23}C_6$, MeC , Me_6C и др.) и разной термодинамической стабильности (от неустойчивого цементита до высокоустойчивых карбидов легирующих элементов). Наиболее перспективны для практического использования половинчатые чугуны с карбидами Me_3C (стабилизированными хромом), Me_7C_3 (при повышенном содержании хрома) и MeC (при легировании ванадием). Наличие необходимого количества графита в структуре половинчатых чугунов обычно обеспечивается достаточным содержанием в них углерода и кремния. В связи с этим наибольшее применение находят хромокремниевые и ванадиево-кремниевые чугуны.

По износостойкости половинчатые чугуны уступают белым чугунам, но значительно превосходят графитизированные чугуны (серые, высокопрочные и ковкие). Коэффициент трения половинчатых чугунов зависит от удельной нагрузки p : он снижается от уровня серых чугунов при $p \sim 1$ МПа до уровня бронзы БрОЦС5-5-5 при $p \sim 4,5\text{—}5,0$ МПа.

Хромкремниевые половинчатые чугуны рекомендуют использовать как износостойкий, антифрикционный, жаропрочный и термостойкий материал. Из них можно изготавливать детали пресс-форм стекловырабатывающих машин, плунжерных пар машин литья под давлением, штампов горячего деформирования и др. Ванадиево-кремниевые половинчатые чугуны могут быть использованы для изготовления деталей штампов, матриц, волок, бронеплит, тормозных колодок, прокатных валков и других деталей.

Специальные легированные чугуны. К этой группе чугунов (ГОСТ 7769—82) относятся жаростойкие, которые обладают окалиностойкостью, росто- и трещиноустойчивостью, жаропрочные и коррозионно-стойкие чугуны.

Жаростойкость серых чугунов и ВЧШГ может быть повышена легированием кремнием (ЧС5) и хромом (ЧХ28, 4Х32)¹. Эти чугуны характеризуются жаростойкостью (окалиностойкостью) до 800 °С на воздухе, в топочных и генераторных газах. Высокой термостойкостью и сопротивляемостью окалинообразованию обладают аустенитные чугуны: высоколегированный никелевый серый ЧН15Д7 и с шаровидным графитом ЧН15ДЗШ. В качестве жаропрочных чугунов используют аустенитные чугуны с шаровидным графитом ЧН19ХЗШ и ЧН11Г7Ш.

Аустенитные чугуны применяют также в качестве парамагнитных. Немагнитные чугуны используют в тех случаях, когда требуется минимальная потеря мощности (крышки масляных выключателей, концевые коробки трансформаторов и т. д.) или когда нужно избежать искажений магнитного поля (стойки для магнитов).

9.5. Выбор марки стали и вида ее обработки для типовых деталей машин

Общие положения. При выборе стали исходят из общих эксплуатационных, технологических и экономических требований.

Эксплуатационные требования заключаются в обеспечении надежной работы детали по конструктивной прочности, выносливости, контактной усталостной прочности, износостойкости и т. д. Наиболее полные данные о надежности получают проведением натуральных испытаний (производственных и стендовых).

Технологические требования состоят в обеспечении минимальной трудоемкости изготовления детали. Сталь должна обладать достаточно

¹ Ч — чугун, С — кремний, Х — хром, Н — никель, Д — медь. Цифры после букв указывают содержание легирующего элемента в процентах.

хорошей обрабатываемостью резанием и давлением, а для заготовок, получаемых литьем, — удовлетворительными литейными свойствами.

Экономические требования включают в себя не только минимизацию стоимости стали и расходов на изготовление деталей, но и обеспечение их оптимальной эксплуатационной стойкости. Дорогие легированные стали целесообразно использовать, когда более дешевые стали не обеспечивают требования, предъявляемые к изделию, а также в случае существенного и конструктивно оправданного повышения долговечности деталей и уменьшения расхода запасных частей.

Эти общие требования нередко противоречивы. Так, например, более прочные материалы менее технологичны (труднее обрабатываются, хуже свариваются и т. д.). В массовом производстве предпочитают упрощение технологии и снижение трудоемкости при некоторой потере свойств. Наоборот, в специальных отраслях машиностроения выбор материала и его термической или химико-термической обработки рассматривают, исходя из условий достижения максимальных эксплуатационных свойств. При выборе упрочняющей обработки, особенно в условиях массового производства, предпочтение следует отдавать наиболее экономичным и производительным технологическим процессам: поверхностной закалке, газовой цементации, нитроцементации и т. д.

Первыми параметрами, определяющими выбор стали, являются механические свойства и распределение их по сечению детали. Оптимального сочетания прочности, пластичности и ударной вязкости достигают после термического улучшения при сквозной прокаливаемости. При полной прокаливаемости механические свойства стали мало зависят от ее легирования. Исключение составляет легирование никелем и молибденом, повышающее сопротивление хрупкому разрушению. Не следует стремиться к излишне высокой прокаливаемости за счет легирования стали хромом, марганцем и кремнием, так как при этом возрастает склонность стали к хрупкому разрушению.

Глубоко прокаливающиеся стали применяют для крупных деталей с большим сечением. Если детали работают на изгиб или кручение, то сквозная прокаливаемость не нужна, так как в этих условиях напряжения распределяются неравномерно, достигая максимальных значений на поверхности детали.

Для деталей, испытывающих растягивающие напряжения (шатуны, торсионные валы, ответственные болты и др.), а также для рессор и пружин нужно обеспечивать полную прокаливаемость.

Для изделий, от которых требуются высокая ударная вязкость и низкий порог хладноломкости (работающих при низких температурах с высокими скоростями приложения нагрузки, особенно при наличии концентраторов напряжений), следует применять наследственно мелкозернистые спокойные стали, предпочтительно легированные никелем и молибденом.

Состав сталей, подвергаемых поверхностному упрочнению, должен обеспечивать требуемую прокаливаемость поверхностного слоя при сохранении вязкой и пластичной сердцевины. Структура поверхностного слоя после закалки должна быть мартенситно-аустенитной и не содержать продуктов промежуточного превращения переохлажденного аустенита.

Рекомендации по выбору марки стали и вида ее обработки. Предварительный выбор сталей для типовых деталей машин можно проводить на основе рекомендаций, базирующихся на практике использования материалов в современном машиностроении.

Валы и оси. Эксплуатационная стойкость валов определяется усталостной прочностью в условиях кручения и изгиба, контактной прочностью и износостойкостью.

Малонагруженные, медленно вращающиеся валы изготавливают из сталей 35; 40; 45; Ст3; Ст4; Ст5. Их не подвергают термической обработке.

Валы небольших размеров, которые должны обладать повышенной прочностью на изгиб и кручение и усталостной прочностью, изготавливают из сталей 40X (диаметр вала $d = 20 \div 25$ мм), 50X ($d = 35 \div 40$ мм), 40XГР ($d = 50 \div 56$ мм). Их подвергают закалке и отпуску, чаще всего — низкотемпературному при 180—220 °С на 45—50 HRC, реже — среднетемпературному при 410—430 °С на 35—42 HRC (для валов с небольшой скоростью вращения).

Средненагруженные валы диаметром до 100 мм, работающие в основном на изгиб и кручение, изготавливают из сталей 45, 40X и 50X, подвергая их улучшению на 217—285 HB ($\sigma_b = 800 \div 1000$ МПа).

Высоконагруженные валы большого диаметра (свыше 100 мм) изготавливают из сталей 50XH, 40XHMA, 34XH3MA, 38XH3MΦA и подвергают улучшению на $\sigma_b > 1000$ МПа. Для валов в турбо- и компрессоростроении, которые должны обладать высокой прочностью в больших сечениях, применяют стали 30XH2BΦA, 36XH1MΦA, 38XH3MΦA, 30X2HВΦA, 34XH1M, 34XH3M, 34XH1MA, 34XH3MA, 35XM, 35XMA, 38XM, подвергаемые улучшению.

Гладкие, ступенчатые и шлицевые валы, работоспособность которых определяется контактной выносливостью и износостойкостью, должны иметь поверхностную твердость 48—50 HRC и более. Такие валы изготавливают из сталей 45 и 50, упрочняя их поверхностной закалкой при индукционном нагреве (с толщиной упрочненного слоя 1,3—2 мм). Если валы должны обладать также и высокой усталостной прочностью, то перед поверхностной закалкой их подвергают улучшению. В этом случае чаще используют стали 40X, 40XГТ и др., обеспечивающие повышенную прокаливаемость.

Если требуется высокая износостойкость, то быстроходные валы изготавливают из сталей 20X ($d = 25 \div 30$ мм), 18XГТ ($d = 60 \div 80$ мм), 12XH3A ($d = 80—100$ мм) и подвергают их цементации с последующей нормализацией от температуры 880 °С, закалкой и отпуском при темпе-

ратуре 170—200 °С для получения поверхностной твердости 5662 HRC с толщиной упрочненного слоя 0,7—1,6 мм.

Для шестеренных и червячных валов, шлицевых валов, валов редукторов используют также стали 33ХС, 38ХС, 40ХС после улучшения на твердость не менее 255 НВ; 25ХГСА — 35ХГСА после улучшения на 235—269 НВ; 40Г, 40Г2, 50Г2 после улучшения на 250—300 НВ. Распределительные и карданные валы изготавливают из марганцевых сталей 40Г, 40Г2, 50Г2, улучшаемых на 250—300 НВ.

Валы и оси особо ответственного назначения изготавливают из сложнотермически упрочненных улучшаемых сталей 35ХН1М2ФА (248—293 НВ), 38ХН3МА, 38ХН3МФА (293—331 НВ).

Для изготовления осей и полуосей применяют улучшаемые стали 30—55, 30Г2, 40Г2, 30Х — 50Х, 40ХФА, 47ГТ, 40ГТР, 38ХГН, 30ХРА. Тяжелонагруженные оси, работающие при больших ударных нагрузках и изнашивании, можно изготавливать из сталей 25Х2ГНТА, 20Х2Н4А и 12ХН3А, подвергаемых цементации.

Коленчатые валы воспринимают высокие нагрузки от сил инерции поступательного и вращательного движения масс. Эти силы вызывают износ шеек вала и усталостные явления по галтелям и в местах выхода масляных каналов. Коленчатые валы обычно изготавливают из сталей, в ряде случаев из высокопрочных и ковких чугунов.

Коленчатые валы тихоходных судов и автотракторных двигателей изготавливают из сталей 40, 45, 40Х, 40Г. Для коленчатых валов быстроходных двигателей применяют улучшаемые стали 40Х, 40ХН, 40ХФА, 45Х. Шейки валов подвергают поверхностной закалке ТВЧ и самоотпуску (стали 40Х, 40ХН, 40ХФА) или азотированию (сталь 45Х). Для повышения усталостной прочности галтели иногда упрочняют обкаткой роликами или подвергают дробеструйному наклепу.

Высоконагруженные коленчатые валы изготавливают из улучшаемых сталей 40ХНМА и 18Х2Н4ВА, подвергаемых иногда азотированию. Коленчатые валы дизельных двигателей изготавливают из сталей 18Х2Н4ВА, 18Х2Н4МА, 14Х2Н3МА, подвергаемых улучшению и азотированию (600—700 НУ) или закалке и отпуску при температуре 200 °С.

Шпиндели должны обладать высокой поверхностной твердостью и износостойкостью. Шпиндели для станков нормальной и повышенной точности изготавливают из сталей 50 и У8 и упрочняют поверхностной закалкой с нагревом ТВЧ (58—62 HRC) или объемной закалкой с отпуском на 40—50 HRC. Шпиндели станков особо высокой точности упрочняют цементацией (20Х, 18ХГТ, 12ХН3А с поверхностной твердостью 56—62 HRC) или азотированием из сталей 18ХГТ, 40ХФА (твердостью 600—700 НВ) и 38Х2МЮА (твердостью не менее 850 НВ).

Зубчатые колеса наиболее часто выходят из строя в связи с контактным усталостным разрушением, торцовым износом, заеданием зубьев, а также с поломкой зубьев из-за усталости или кратковременных перегрузок.

Для тяжелонагруженных (силовых) зубчатых колес применяют легированные цементуемые стали 20ХГНМ, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХНЗА, 18Х2Н4ВА, 20ХНМ, 25Х2ГНТА (твердость после термообработки 56—64 HRC) и нитроцементуемые стали 40Х (твердость 48—53 HRC), 25ХГТ, 25ХГМ (твердость 52—62 HRC).

Для средненагруженных колес применяют также стали 45, 50, 40Х, 50Х, упрочняя колеса по контуру зубьев (в том числе и во впадинах) закалкой ТВЧ или объемной закалкой с последующим отпуском при температуре 180—220 °С на твердость 48—54 HRC. Для средне- и малонагруженных колес применяют улучшаемые стали 40, 45, 50Г, 40Х, 30ХГС (при единичном и мелкосерийном производстве).

Азотированию подвергают мало- и средненагруженные колеса сложной конфигурации, изготавливаемые из сталей 40Х или 40ХФА. После азотирования проводят только притирку или хонингование зубьев.

Трубчатые детали (втулки, гильзы и т. д.) должны обладать высокой износостойкостью, стабильностью формы и размеров. Их изготавливают из азотируемых сталей 40ХФА, 30ХНЗВА, 38Х2МЮА или цементуемых сталей 20Х (толщина стенки 14—18 мм), 18ХГТ (40—45 мм), 12ХНЗА (70—75 мм).

Нормали (болты, винты, гайки, шпильки и т. д.) изготавливают из нормализуемых сталей 40, 40Х, 30ХГС с твердостью 25—30 HRC (малонагруженные детали), улучшаемых сталей 40, 40Х, 30ХГС с твердостью 30—35 HRC (средненагруженные детали) и улучшаемых или нормализуемых сталей 40ХН, 40ХНМА с твердостью 30—35 HRC (высоко- и сложнонагруженные детали).

Выбор марки стали по критическому диаметру прокаливаемости. Выбор марки стали состоит из нескольких этапов:

- анализ условий работы заданной детали и особенностей ее конструкции;
- предварительный выбор марок сталей, удовлетворяющих требуемым условиям;
- сравнительный анализ выбранных марок сталей (по механическим свойствам с учетом прокаливаемости) и окончательный выбор материала с учетом его эксплуатационных и технологических характеристик и стоимости;
- выбор вида и режима термической или химико-термической обработки детали.

Проверку соответствия выбранной марки стали принятому распределению твердости по сечению детали проводят с учетом прокаливаемости стали. Если твердость полумартенситной зоны улучшаемой стали меньше 45 HRC, то для сердцевины детали используют условие «твердость не менее 45 HRC». Для цементуемой стали минимальная твердость полумартенситной зоны лимитируется и составляет 30—35 HRC.

Выбор марки стали по глубине закаленного слоя. Недостаток метода выбора марки стали по критическому диаметру прокаливаемости (с полумартенситной структурой в центре изделия) состоит в том, что

свойства полумартенситной структуры зависят от содержания углерода; кроме того, в полумартенситной зоне вместо 50 % троостита присутствует смесь троостита, феррита и перлита в различных сочетаниях, что может приводить к существенной нестабильности свойств по сечению детали.

Более стабильные свойства обеспечивает выбор стали по ее способности получать заданную твердость на определенной глубине. При этом следует учитывать, что легирование дает возможность закалять изделия больших сечений и вести охлаждение с меньшей скоростью, что снижает опасность появления закалочных дефектов.

Для выбора стали по глубине закаленного слоя необходимо иметь данные о твердости на разных расстояниях. На рис. 9.9 показана связь эквивалентных скоростей охлаждения различных точек стандартного образца для торцевой закалки и прутков различного диаметра, закаленных в воде (рис. 9.9, а) и масле (рис. 9.9, б), а также плиты, закаленной в масле (рис. 9.9, в). При выборе марки стали важно знать содержание углерода и количество мартенсита, при которых обеспечивается желаемая твердость стали в закаленном и отпущенном состояниях.

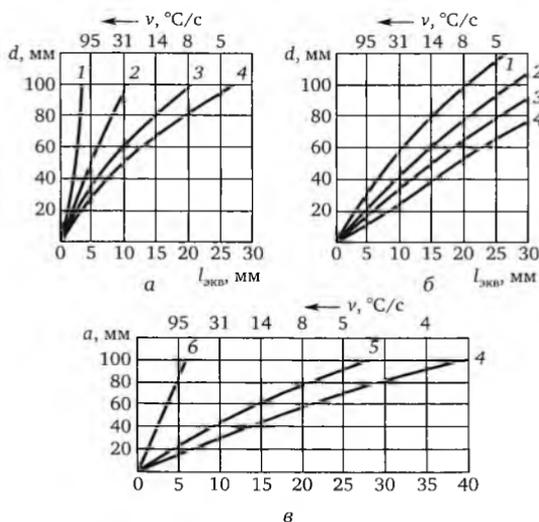


Рис. 9.9. Соотношения скоростей охлаждения и эквивалентного расстояния $l_{\text{экв}}$ для разных точек стандартного образца, для торцевой закалки и закаленных изделий в виде прутков диаметром d (а, б) и плит толщиной s (в):

а — охлаждение в воде; б, в — охлаждение в масле; 1 — на поверхности; 2 — на расстоянии $0,75R$ от центра (R — радиус прутка); 3 — на расстоянии $0,5R$ от центра; 4 — в центре; 5 — на расстоянии от поверхности $1/4$ толщины плиты; 6 — на расстоянии от поверхности $1/16$ толщины плиты

Связь между твердостью сталей в этих состояниях показана на рис. 9.10, а, а зависимость твердости закаленной стали от содержания в ней углерода и количества мартенсита — на рис. 9.10, б. Практика показывает, что следует выбирать такие стали, у которых минималь-

ную рекомендуемую твердость в закаленном состоянии получают при содержании мартенсита, меньшем 90 %.

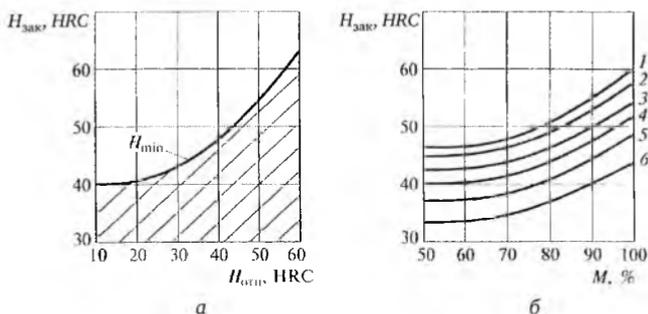


Рис. 9.10. Связь между твердостью сталей в закаленном $H_{\text{зак}}$ и отпущенном $H_{\text{от}}$ состояниях (а) и между твердостью стали и количеством мартенсита M в ее структуре (б):

H_{min} — минимальная твердость закаленной стали; 1, 2, 3, 4, 5 и 6 — зависимости соответственно для сталей с содержанием углерода, %: 0,50; 0,45; 0,40; 0,35; 0,30; 0,20

У деталей, работающих на изгиб, структура, содержащая более 90 % мартенсита, должна распространяться от поверхности на глубину, равную примерно $0,25R$ (где R — расстояние от поверхности до центральной части изделия). Для таких деталей, как шатуны, коленчатые валы, шарниры рулевого управления, болты шатунов, осевые валы, зубчатые колеса и т. п., приемлема закалка, в результате которой на расстоянии $0,25R$ образуется около 80 % мартенсита. Если же у деталей, работающих на изгиб, наружные слои нагружены слабо, то достаточно еще меньшая глубина закалки. При закалке болтов и других подобных деталей, работающих на растяжение, целесообразно получать в центре структуру, содержащую 60—90 % мартенсита. К деталям, требующим сквозной прокаливаемости (не менее 90 % мартенсита в центре сечения), относят пружины.

Во всех случаях выбора стали нужно стремиться к использованию менее легированной (более дешевой) стали. При этом необходимо также учитывать следующее:

- высокоуглеродистые стали склонны к повышенной хрупкости при нормальных и отрицательных температурах;
- повышенное содержание углерода увеличивает твердость стали, затрудняя ее обрабатываемость, повышает склонность стали к образованию трещин и изменению размеров при термической обработке.

Поэтому чаще всего используют стали, содержащие менее 0,5 % С. Требования по прокаливаемости в конструкторской или технологической документации задают в соответствии с ГОСТ 5657—69 одним из следующих способов (рис. 9.11):

- по минимальной твердости на определенном расстоянии от охлаждаемого водой торца (при торцевой закалке);

- по максимальной твердости на определенном расстоянии;
- по минимальной и максимальной твердости на заданном расстоянии;
- по минимальному и максимальному расстоянию от охлаждаемого торца образца до сечения с определенной твердостью, эквивалентной твердости сечения изделия, интересующего конструктора;
- по максимальной твердости на разных расстояниях от торца.

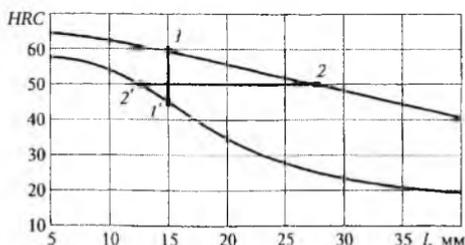


Рис. 9.11. Способы задания требований по прокаливаемости (на полосе прокаливаемости) в соответствии с ГОСТ 5657—69:

l — расстояние от торца образца; 1 и 1' — максимальное и минимальное значения твердости на заданном расстоянии; 2 и 2' — максимальное и минимальное расстояние с заданной твердостью

Располагая данными о прокаливаемости сталей, можно обеспечить изготовление изделий, обладающих наилучшим комплексом эксплуатационных свойств. В настоящее время экспериментально построены полосы или графики прокаливаемости для большинства применяемых марок сталей.

Выбор марки стали для деталей, работающих в условиях усталостного нагружения. Характеристика твердости еще не дает полного представления о служебных свойствах детали. Известно, что 80 % всех разрушений носят усталостный характер. Сопротивление металлических материалов усталости определяется пределом выносливости. Резкое влияние на предел выносливости оказывают дефекты поверхности. По сравнению с полированными образцами стали предел выносливости шлифованных образцов ниже на 10—15 %, а фрезерованных на 45—50 %. С увеличением размера детали предел выносливости уменьшается («масштабный фактор»).

В справочной литературе приводят данные о пределе выносливости для ограниченного числа марок сталей. Значительно больше данных по другим свойствам — твердости и пределу прочности. В связи с этим при оценке усталостной прочности целесообразно использовать зависимости между пределом выносливости, с одной стороны, и твердостью или пределом статической прочности (временным сопротивлением разрыву), с другой стороны. Неплохая корреляция в ряде случаев наблюдается между пределом выносливости и твердостью. Например, для углеродистых сталей $\sigma_{-1} = 1,26 + 1,53 HB$, для легированных сталей

$\sigma_{-1} = 1,64 \div 2,17 HB$. Однако эти зависимости имеют частный характер и не распространяются на высокопрочные стали.

Для среднеуглеродистых легированных термообработанных сталей между пределом выносливости и твердостью установлена более сложная зависимость. При более высокой твердости резко увеличивается область разброса значений предела выносливости, причем минимальные их значения оказываются почти не зависящими от твердости. Поэтому по значениям твердости можно с достаточной точностью проводить оценку минимальных значений предела выносливости лишь для сталей с твердостью менее 40 HRC. Более достоверные данные по соотношениям между пределом выносливости и твердостью для конкретных марок сталей надо искать в специальной литературе.

Установлены также зависимости между пределом выносливости и пределом статической прочности. Например, для сталей $\sigma_{-1} = (0,4 \div 0,6)\sigma_B$. Однако имеются данные и о значительном влиянии химического состава стали на эту зависимость. Известно, что при малом содержании углерода (менее 0,15 %) значение отношения σ_{-1}/σ_B уменьшается, особенно для легированных сталей. Значительное влияние оказывает и степень легирования. В целом характеристики выносливости менее чувствительны к структурным изменениям, вызываемым термической обработкой и изменениями в составе стали, чем многие другие механические свойства.

9.6. Инструментальные стали

Инструментальными сталями, применяемыми для изготовления различного инструмента, называются углеродистые и легированные стали, обладающие высокой твердостью (HRC 60—68), износостойкостью и прочностью.

Основные требования: высокая износостойкость, высокая твердость (в 2—3 раза больше твердости обрабатываемого материала), достаточная прочность, пластичность и вязкость, высокая прокаливаемость и теплостойкость — способность сохранять высокую твердость (структуру мартенсит) при нагреве, т. е. сопротивляться разупрочнению при отпуске. Большое значение имеют технологические свойства — малые объемные изменения при закалке, обрабатываемость давлением, резанием, шлифуемость, устойчивость против перегрева.

Основной химический состав сталей: содержание углерода — 0,7—1,3 % (для инструмента, работающего с ударом, количество углерода — 0,3—0,5 %); важнейшие карбидообразующие легирующие элементы — хром, марганец, кремний, вольфрам, ванадий, молибден, ниобий, кобальт.

Термическая обработка на структуру *мартенсит отпуска* — закалка и низкий отпуск. Для инструментов, от которых требуется повышенная вязкость, применяется средний отпуск на твердость HRC 35—45.

Углеродистые инструментальные стали поставляются (ГОСТ 1435—99) после отжига на зернистый перлит (HV не более 180—200), хорошо обрабатываются резанием и деформируются, что необходимо для изготовления инструмента.

Инструментальные стали классифицируют:

- по теплостойкости (нетеплостойкие; полутеплостойкие; теплостойкие);
- прокаливаемости (нетеплостойкие стали небольшой прокаливаемости; низколегированные повышенной прокаливаемости; средние и высоколегированные);
- назначению: для режущего инструмента (HRC 62—65); штамповые стали для холодного деформирования (HRC более 60); штамповые стали для горячего деформирования (HRC 48—55); стали для измерительного инструмента (HRC 65—67).

Маркировка — буква У и число, показывающее содержание углерода в десятых долях % — У7 — У13, У10А, У13А. Буква А в конце маркировки (У10А, У12А) показывает, что сталь высококачественная и имеет в составе меньше серы и фосфора.

Стали У7 — У9 (HRC 44—48) применяют для зубил, молотков и деревообрабатывающего инструмента, так как они имеют хорошую ударную вязкость из-за небольшого содержания углерода.

Стали У10, У12, У13 применяют для изготовления режущего инструмента, работающего с небольшой скоростью резания, — резцы, фрезы, напильники, лезвия и др., а также для штампов холодного деформирования при обработке малопрочных материалов. Недостаток — малая прокаливаемость, не позволяющая изготовить инструмент сечением более 20—25 мм, стали нетеплостойкие.

Режущий инструмент с твердостью режущей кромки HRC 60—65 (должна превышать твердость обрабатываемого материала) после закалки и низкого отпуска изготавливается из легированной инструментальной стали.

Стали неглубокой прокаливаемости (не обладают теплостойкостью — 7ХФ, 11ХФ, 13Х, В2Ф, ХВ4, табл. 9.13) применяют для изготовления инструмента, работающего с небольшими скоростями резания без нагрева режущей кромки выше 200—260 °С, — метчиков, пил, ножей, резцов, фрез и другого режущего инструмента размером сечения не более 25 мм. Структура после упрочняющей термообработки (закалка с 780—860 °С в горячее масло, отпуск при 140—160 °С) — мартенсит отпуска и карбиды.

Стали глубокой прокаливаемости (не обладающие теплостойкостью или полутеплостойкие — Х, 9ХС, ХВГ, ХВГС, 9Х5ВФ, 8Х4В3М3Ф2, табл. 9.14) применяют для режущего инструмента с размером сечения больше 25 мм. Структура после термообработки — (закалка с 830—860 °С в масло и низкий, с 150—200 °С, отпуск) — мартенсит отпуска и карбиды типа Me_3C , MeC .

Химический состав и термическая обработка сталей неглубокой прокаливаемости (ГОСТ 5950 — 73) (нетеплостойкие)

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | Термообработка, T, °C | | Твердость, HRC |
|-------------|-------------------------|----------|-----------|---------|-------------------------|-----------------------|---------|----------------|
| | C | Mn | Si | Cr | другие | закалка | отпуск | |
| 9ХФ | 0,8—0,9 | 0,3—0,6 | 0,15—0,35 | 0,4—0,7 | V 0,15—0,3 | 830—860 | 140—160 | 62—65 |
| 11ХФ (11Х) | 1,05—1,15 | 0,4—0,7 | 0,15—0,35 | 0,4—0,7 | V 0,15—0,3 | 830—860 | 140—160 | 62—65 |
| 13Х | 1,25—1,40 | 0,3—0,6 | 0,15—0,35 | 0,4—0,7 | — | 780—800 | 100—120 | 65—67 |
| В2Ф | 1,05—1,22 | 0,2—0,5 | 0,15—0,35 | 0,2—0,4 | W 1,6—2,0 V 0,2—0,3 | 810—830 | 140—160 | 64—65 |
| ХВ4 | 1,25—1,45 | 0,15—0,4 | 0,15—0,35 | 0,4—0,7 | W 3,5—4,0 V 0,15—0,3 | 810—830 | 120—140 | 64—65 |

Химический состав и термическая обработка сталей глубокой прокаливаемости (ГОСТ 5950—73)

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | Термообработка, T, °C | | Твердость, HRC |
|-------------|-------------------------|----------|-----------|-----------|-------------------------|-----------------------|---------|----------------|
| | C | Mn | Si | Cr | другие | закалка | отпуск | |
| X | 0,95—1,0 | 0,15—0,4 | 0,15—0,35 | 1,3—1,65 | — | 840—850 | 140—160 | 64—65 |
| 9XC | 0,85—0,95 | 0,3—0,6 | 1,2—1,6 | 0,95—1,25 | — | 860—880 | 140—160 | 62—65 |
| ХВГ | 0,9—1,05 | 0,8—1,1 | 0,15—0,35 | 0,9—1,20 | 1,2—1,6 W | 840—860 | 140—160 | 62—64 |
| ХВСГ | 0,95—1,05 | 0,6—1,1 | 0,65—1,0 | 0,6—1,1 | 0,5—0,8 W | 840—860 | 140—160 | 62—64 |
| 9ХЗВФ | 0,85—1,0 | 0,3—0,6 | 0,15—0,35 | 4,5—5,5 | 0,8—1,2 W 0,15—0,3 V | 900—1000 | 400—450 | > 58 |

Сталь ХВГ имеет малую деформацию при закалке и применяется для длинных стержневых инструментов сечением до 45 мм — сверла, развертки, протяжки. Стали 9Х5ВФ и 8Х4ВЗМЗФ2 (полутеплостойкие) применяют для деревообделочного инструмента, работающего с большими скоростями резания.

Быстрорежущие стали (теплостойкие стали ледебуритного класса, табл. 9.15) предназначены для изготовления различного режущего инструмента при работе с большими скоростями резания в тяжелых тепловых условиях (разогрев режущей кромки из-за трения при резании до 600—650 °С).

Для повышения теплостойкости эти стали легируют большим количеством вольфрама в сочетании с хромом (~ 4 %), молибденом и ванадием, кобальтом. Основные марки — Р18, Р12, Р9, Р6М5, Р6АМ5, Р9Ф5, Р10К5Ф5, Р18К5Ф2, Р2АМ9К5. Их фазовый состав в отожженном состоянии — легированный феррит и карбиды типа Me_6C , $Me_{23}C_6$, Me_3C , MeC , а также сложные карбиды типа $(Fe_n, W_m) C$, где $n + m = 6$.

В структуре литой стали присутствует эвтектика типа ледебурита, расположенная по границам зерна (участки пестрого ледебурита между темными дендритами превращенного в троостит аустенита на рис. 9.12, а), что снижает вязкость. Ее устраняют горячей деформацией (ковкой), при которой эвтектика дробится на отдельные карбиды: первичные (крупные) и вторичные (мелкие) карбиды вольфрама в сорбитной матрице быстрорежущей стали (рис. 9.12, б).

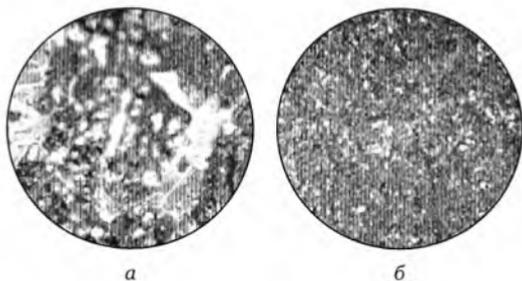


Рис. 9.12. Сталь Р18. Литая структура (а) и микроструктура послековки и отжига (б), $\times 250$

После деформации дается отжиг для облегчения обрабатываемости резанием при изготовлении инструмента. Структура после отжига — сорбитообразный перлит: феррит + карбиды I (эвтектические) + карбиды II (образовались после отжига при распаде аустенита). При недостаточной деформации возможна карбидная неоднородность, карбидная ликвация, представляющая собой вытянутые, деформированные участки не разрушенной эвтектики и ухудшающая свойства вязкости.

Термообработка инструмента на свойства — закалка с 1260—1280 °С в масло и последующий трехкратный отпуск при 560 °С. Структура закаленной стали — высоколегированный мартенсит и до 30 % остаточного аустенита. Для уменьшения количества остаточного аустенита и снятия закалочных напряжений дается трехкратный отпуск при 560 °С или обработка холодом (–180° С) и отпуск 560 °С.

Таблица 9.15

Химический состав и свойства наиболее распространенных быстрорежущих сталей

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | | | | Твердость, HRC | Теплостойкость, °C |
|-------------|-------------------------|---------|----------|---------|---------|---------|----|----------------|--------------------|
| | C | Cr | W | V | Mo | Co | | | |
| P18 | 0,7—0,8 | 3,8—4,4 | 17—18,0 | 1,0—1,4 | < 1,0 | — | 62 | 620 | |
| P12 | 0,8—0,9 | 3,1—3,6 | 12—13,0 | 1,5—1,9 | < 1,0 | — | 62 | 620 | |
| P6M5 | 0,82—0,90 | 3,8—4,4 | 5,5—6,5 | 1,7—2,1 | 5,0—5,5 | — | 64 | 620 | |
| P12Ф3 | 0,95—1,05 | 3,8—4,3 | 12—13,0 | 2,5—3,0 | 0,5—1,0 | — | 64 | 630 | |
| P9K5 | 0,9—1,05 | 3,8—4,4 | 9,0—10,5 | 1,8—2,4 | < 1,0 | 5,0—6,0 | 63 | 630 | |
| P6M5K8 | 0,84—0,92 | 3,8—4,4 | 6,0—7,0 | 1,7—2,2 | 4,8—5,3 | 5,0—6,0 | 64 | 630 | |
| P18K5Ф2 | 0,85—0,95 | 3,8—4,4 | 17—18 | 1,2—2,4 | < 1,0 | 5,0—6,0 | 63 | 640 | |

При отпуске происходит выделение дисперсных карбидов, что вызывает дисперсионное отверждение мартенсита и повышение твердости — явление вторичной твердости. Структура после трехкратного отпуска — $M_{от} + 3—5\% A_{от} + +$ карбиды. Карбиды трудно коагулируют при отпуске, задерживают распад мартенсита и обеспечивают теплостойкость.

Быстрорежущие стали, полученные методом порошковой металлургии (POM2ФЗ-МП, M6Ф1-МП, M6Ф3-МП, 10P6M5-МП, P12M3K8-МП, где МП — метод порошковой металлургии), предложенные взамен сталей P18 и P6M5, обладают повышенной теплостойкостью. Стали имеют пониженное содержание вольфрама и повышенное — ванадия.

Штамповые стали для холодного деформирования металла (табл. 9.16). Стали, используемые для изготовления штампов пластически деформирующих металл при нормальных температурах (вытяжных, вырезных, гибочных и высадных, волочильных досок, роликов для накатывания резьбы и др.), должны обладать высокой твердостью, износостойкостью и прочностью, сочетающейся с достаточной вязкостью. В процессе деформирования с большой скоростью штампы разогреваются до 200—350 °С, поэтому стали этого класса должны быть и теплостойкими. Стали высокоуглеродистые (1,2—1,6 % С), количество легирующих элементов (хром, ванадий, молибден, вольфрам) определяется необходимой износостойкостью и прокаливаемостью.

Требования — высокая твердость ($HRC\ 56—60$), износостойкость, прочность при достаточной вязкости, теплостойкость до температур 400—500 °С.

Штампы небольшого размера изготавливают из стали X, ХВСГ, ХВГ. Крупные штампы, работающие с большими скоростями, изготавливают из сталей X12M, X12Ф1, 7ХГ2ВМ, 6Х6В3МФС. В структуре этих сталей содержится большое количество карбидов — 16—17 % $(Cr, Fe)_{7-8}C_3$, обеспечивающих хорошую износостойкость.

Штамповые стали для деформирования металла в горячем состоянии (см. табл. 9.16). Стали, применяемые для штампов, деформирующих металл в горячем состоянии, должны иметь высокие механические свойства (прочность и вязкость) при повышенных температурах и обладать окалино- и разгаростойкостью, т. е. способностью выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования разгарных трещин.

При нагреве штампа до температур ниже 550 °С применяют стали 5ХНМ, 5ХГМ, 5ХНВ, 5ХНВС, при температурах выше 550 °С — 4ХЗВМФ, 4Х5В2ФС, 4Х5МФ1С, 3Х2В8Ф, 5ХЗВ3МФС и др. Основные легирующие элементы (никель, хром, молибден, ванадий, вольфрам) обеспечивают заданные свойства.

Стали для измерительных инструментов — X (0,95 % С, 1,3—1,6 % Cr), 12X1 (1,15—1,25 % С, 1,3—1,65 % Cr) — калибры, скобы, шаблоны и т. д. — должны обладать постоянством размеров и формы в течение длительного времени, износостойкостью, хорошей полируемостью. Термическая обработка — закалка с 850—870 °С в масло, обработка холодом (до -70 °С) и длительный отпуск (12—50 ч) при 120—130 °С на твердость $HRC\ 62—64$.

Химический состав, термическая обработка и твердость штамповых сталей (ГОСТ5950—73)

| Марка стали | Содержание элементов, % | | | | Термообработка, T, °C | | Твердость, HRC |
|--|-------------------------|---------|----------|---------------------------------------|-----------------------|---------|----------------|
| | C | Cr | V | другие | закалка | отпуск | |
| Стали для штампов холодного деформирования | | | | | | | |
| X12M | 1,45—1,65 | 11—12,5 | 0,15—0,3 | Mo 0,4—0,6 | 1030—1050 | 181—200 | 60—62 |
| X12Ф1 | 1,25—1,45 | 1—12,5 | 0,7—0,9 | — | 1030—1050 | 180—200 | 60—62 |
| X6ВФ | 1,05—1,15 | 5,5—6,5 | 0,5—0,8 | W 1,1—1,5 | 980—1000 | 150—170 | 62—63 |
| 7Г2ВМ | 0,68—0,76 | 1,5—1,8 | 0,1—0,25 | Mn 1,8—2,3 W 0,5—0,9 Mo 0,5—0,8 | 850—860 | 140—180 | 59—60 |
| Стали для штампов горячего деформирования | | | | | | | |
| 5ХНМ | 0,5—0,6 | 0,6—0,8 | — | Ni 1,4—1,8 Mo 0,15—0,3 | 830—860 | 500—580 | 45—38 |
| 5ХНВ | 0,5—0,6 | 0,6—0,8 | 0,6—0,9 | Ni 1,4—1,8 W 0,4—0,7 | 840—860 | 500—580 | 45—38 |
| 4Х3ВМФ | 0,4—0,48 | 2,8—3,5 | 0,6—0,9 | W 0,6—1,1 Mo 0,4—0,6 | 1050 | 570 | 47—49 |
| 4Х5В2ФС | 0,37—0,45 | 4,5—5,5 | 0,6—0,9 | W 1,6—2,2 Si 0,8—1,2 | 1020—1040 | 560—580 | 47—49 |

9.7. Стали и сплавы с особыми физическими свойствами

Магнитные стали и сплавы. У железа, никеля, кобальта и редкоземельных металлов Gd, Tb, Dy, Ho, Er ниже определенной температуры (точки Кюри Θ) устанавливается определенный порядок магнитных моментов коллективизированных электронов и даже в отсутствии внешнего магнитного поля они обладают постоянной намагниченностью, т. е. являются *ферромагнитными*. Магнитная проницаемость μ ферромагнетиков (характеризует связь между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H в веществе) не является постоянной величиной, так как сильно зависит от индукции B_0 внешнего поля (рис. 9.13).

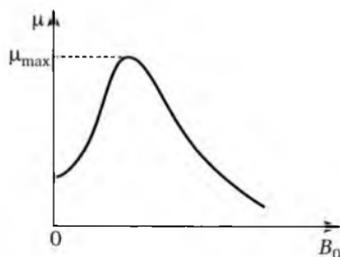


Рис. 9.13. Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от индукции внешнего магнитного поля B_0

Каждый реальный магнитный материал разделен по всему объему на множество замкнутых областей — *доменов*, в каждом из которых самопроизвольная намагниченность J_S однородна и направлена по одной из осей легкой намагниченности. Такое состояние энергетически выгодно и кристалл в целом немагнитен, так как магнитные моменты доменов ориентированы в пространстве равновероятно. Между соседними доменами возникают граничные слои (стенки Блоха), внутри которых векторы намагниченности плавно поворачиваются (рис. 9.14, а, б).

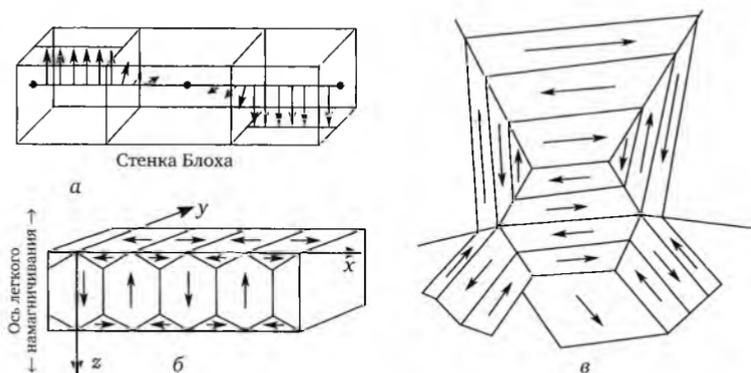


Рис. 9.14. Граничные слои между соседними доменами (а); идеализированная доменная структура кристаллического ферромагнетика (б) и доменная структура поликристалла (в)

Объем домена может колебаться в широких пределах (10^{-1} — 10^{-6} см³). Ширина границы между антипараллельными доменами для железа 10^{-7} м, т. е. около 500 элементарных ячеек и зависит, главным образом, от соотношения энергий: обменной (возникает, если электронная оболочка содержит больше одного электрона) и магнитоупругой, и магнитной анизотропии. Размеры самих доменов зависят от неметаллических включений, границ зерен, скоплений дислокаций и других неоднородностей. Обычно домены имеют правильную форму.

Непостоянство магнитной проницаемости приводит к сложной нелинейной зависимости индукции B магнитного поля в ферромагнетике от индукции B_0 внешнего магнитного поля — характерной особенностью процесса намагничивания ферромагнетиков является зависимость намагничивания от предыстории образца. Кривая намагничивания $B(B_0)$ ферромагнитного образца представляет собой петлю сложной формы, которая называется *петлей гистерезиса* (рис. 9.15). При $|B_0| > B_{oc}$ наступает магнитное насыщение — намагниченность образца достигает максимального значения. Если теперь уменьшать магнитную индукцию B_0 внешнего поля и довести ее вновь до нулевого значения, то ферромагнетик сохранит *остаточную намагниченность* — поле внутри образца будет равно B_r .

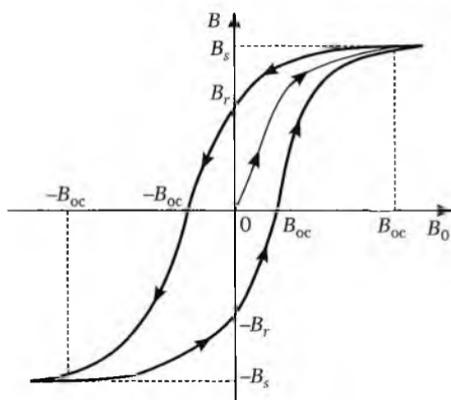


Рис. 9.15. Петля гистерезиса ферромагнетика.

Стрелками указано направление процессов намагничивания и размагничивания ферромагнитного образца при изменении индукции B_0 внешнего магнитного поля

Остаточная намагниченность образцов позволяет создавать постоянные магниты. Для того, чтобы полностью размагнитить образец, необходимо, изменив знак внешнего поля, довести магнитную индукцию B_0 до значения B_{oc} , которое принято называть *коэрцитивной силой*. Далее процесс перемагничивания может быть продолжен, как это указано стрелками на рис. 9.15.

У магнитомягких материалов значения коэрцитивной силы B_{oc} невелико — петля гистерезиса таких материалов достаточно «узкая». Материалы с большим значением коэрцитивной силы, т. е. имеющие «широкую» петлю гистерезиса, относятся к магнитотвердым.

Магнитотвердые стали и сплавы:

- EX3, EX5K5, EX9K15M2; буква E означает магнитотвердую сталь для постоянных магнитов;
- литые сплавы системы Fe—Ni—Al (ЮНД4, ЮНДК18, ЮНДК35Т5Б), дополнительно легированные Cu, Co, Ti, Nb, имеют большую прокаливаемость, применяют для крупных магнитов;
- порошковые сплавы системы Fe—Ni—Al — ММК (магнит металлокерамический) обладают повышенной прочностью;
- деформируемые сплавы на основе Fe_{0,3}, Co, Cu: хромко (45 % Fe, 30 % Cr); викаллоу (52 % Co, 13 % V, ост. Fe); кунико (50 % Cu, 21 % Ni, 29 % Co). После деформации этих сплавов формируется кристаллографическая текстура, приводящая к хорошим магнитным свойствам;
- углеродистые стали У10 и У12; легированные хромом, вольфрамом и кобальтом стали для повышения коэрцитивной силы $H_{\text{коэрц}}$

Магнитомягкие стали и сплавы предназначены для магнитопроводов, элементов магнитных систем, проводящих магнитный поток, и должны иметь малую коэрцитивную силу и большую магнитную восприимчивость.

Электротехнические стали содержат 0,05—0,005 % С и 0,8—4,8 % Si. Маркируются как 1211, 1212, 1311, 2211, 3414 и др. Первая цифра — класс по структуре и виду прокатки, вторая — содержание кремния, третья — свойства, четвертая — номер типа стали по основной характеристике. По содержанию Si эти стали подразделяются на группы: 0 — до 0,49 % Si; 1 — 0,4—0,8 % Si; 2 — 0,8—1,2 % Si; 3 — 1,8—2,8 % Si; 4 — 2,8—3,8 % Si; 5 — 3,8—4,8 % Si. Электротехнические стали подразделяют на динамную и трансформаторную. Динамная электротехническая сталь содержит 0,5—2,3 % Si, она более пластична; трансформаторная — 3,5—4,8 % Si, более магнитомягкая.

Пермаллоу — бинарные и легированные сплавы на основе Fe—Ni (например, 79НМА — 78—80 % Ni, Mo) применяются в технике слабых токов.

Сплавы с высоким электрическим сопротивлением применяют для изготовления нагревательных элементов электропечей и приборов, а также для реостатов. Требования — высокое удельное электросопротивление, низкий температурный коэффициент электросопротивления, высокая окалиностойкость. Сплавы на основе Fe — X13Ю4 (фехраль), OX23Ю5 (хромель) или Ni — X20Н80 (нихром) имеют рабочую температуру до 1100 °С, для изготовления сопротивлений в приборах применяют сплав на основе Cu МНМц40-15 (константан) со структурой твердого раствора.

Сплавы с заданным температурным коэффициентом линейного расширения разработаны на основе легированной Со системы Fe—Ni, и применяются для различных электротехнических и электронных приборов, для спайки со стеклом, керамикой и другими материалами. Наиболее распространены:

- 36Н (инвар) — 36 % Ni, ост. Fe — почти не расширяется до температуры 100 °С;
- 48Н (платинит) — 48 % Ni, ост. Fe — имеет такой же коэффициент расширения, как стекло и платина, применяется в электролампах для впаивания в стекло электрода;
- 29НК (ковар) — 29 % Ni; 18 % Co, ост. Fe — применяют для впаивания в молибденовые стекла.

Сплавы с особыми упругими свойствами имеют постоянный, не изменяющийся до 100 °С модуль упругости. Необходимы для изготовления упругих элементов приборов, датчиков, часов и т. д. Разработаны элинвар — сплав железа с никелем и хромом (36НХ — 36 % Ni и 12 % Cr); 36НХТЮ — добавки Ti и Al (упрочняется термической обработкой).

Сплавы с эффектом «памяти формы» после пластической деформации восстанавливают свою первоначальную форму при нагреве (эффект памяти формы) или сразу после снятия нагрузки (сверхупругость).

Эго сплавы на основе систем: Ni—Al, Ni—Co, Ni—Ti, Ti—Nb, Fe—Ni, Cu—Al, Cu—Al—Ni и др. с обратным термоупругим мартенситным превращением. Наиболее широко применяется сплав нитинол на основе мононикелида титана NiTi. Он имеет высокую прочность ($\sigma_B = 770 + 1000$ МПа), пластичность, коррозионную стойкость, демпфирующую способность (поглощает шум). Его применяют в вычислительной технике, запоминающих устройствах и т. д.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие углеродистые стали относятся к сталям обыкновенного качества? Как они маркируются?
2. Как маркируются качественные углеродистые стали? Как оценивается качество стали?
3. Как классифицируются углеродистые стали по степени раскисления?
4. Какие углеродистые стали обыкновенного качества можно применять для деталей и конструкций, упрочняемых термической обработкой?
5. Какие элементы, кроме железа и углерода, присутствуют в составе углеродистых сталей, какие из них вредные и почему?
6. На заводе имеются следующие марки стали: БСтЗ, Стб, 08, 10, ВСт1. Рекомендуйте сталь, которую необходимо применить для деталей, изготовленных методом холодной штамповки, и объясните свой выбор.
7. Что такое легированная сталь? Какова цель легирования?
8. Как классифицируются легированные стали?
9. Запишите марку стали, имеющую следующий состав: 0,42—0,45 % С, до 0,8 % Mn, до 1 % Cr, 1,3—1,8 % Ni, 0,2—0,3 % Mo, высококачественная.
10. Какие требования предъявляют к конструкционным материалам? Что такое конструктивная прочность?
11. Какие стали относятся к износостойким сталям, где их применяют?
12. Какие стали считаются высокопрочными? Какие способы достижения высокой прочности используются?
13. Охарактеризуйте основные виды коррозии материала в агрессивной среде.

14. Какие стали относятся к коррозионностойким? Какие группы сталей этого класса используются в промышленности?
15. Какие стали называют жаропрочными? Дайте характеристики жаропрочности.
16. Какие основные требования предъявляют к легированным инструментальным сталям?
17. Что такое теплостойкость инструментальных сталей?
18. Какие стали можно рекомендовать для режущего инструмента?
19. Что такое быстрорежущая сталь? Назовите основные марки, принцип легирования.
20. Что такое разгаростойкость штамповых сталей?
21. Приведите классификацию чугунов.
22. Какие формы графита могут быть в чугунах? Как влияет графит на механические, технологические и эксплуатационные свойства чугунов?
23. Как получают в чугуне шаровидный и вермикулярный графит?
24. Каковы особенности свойств ферритного и перлитного ковких чугунов?
25. Как обеспечивают специальные свойства чугунов?
26. Какими требованиями определяется выбор марки стали для различных деталей машин?
27. Какие стали и с какой упрочняющей обработкой целесообразно использовать для изготовления валов, работающих в условиях усталостного нагружения и изнашивания?
28. В каких случаях для валов необходима сквозная прокаливаемость? Как выбирают марки стали по критическому диаметру прокаливаемости?
29. Какие способы задания требований по прокаливаемости определены стандартом?
30. Назовите марки, состав и области применения магнитомягких материалов.
31. Назовите марки, состав и области применения магнитотвердых материалов.
32. Рекомендуйте сплав для элемента сопротивления нагревательного прибора.
33. Что такое элинвар? Где можно применить этот сплав?

Глава 10

ЦВЕТНЫЕ МЕТАЛЛЫ И ИХ СПЛАВЫ

Цветные металлы — техническое название всех металлов и их сплавов, кроме железа и его сплавов. В русском языке термин «цветные металлы» соответствует термину «*нежелезные металлы*» во многих других языках: английский — *non-ferrous metals*; французский — *metaux non-ferreux, metaux non-ferrugineux*; немецкий — *Nichteisenmetalle* (также *farbige Metalle* — цветные металлы и *Buntmetalle*, дословно — пестрые металлы).

В технике принята условная классификация цветных металлов (по группам редких металлов):

- *легкие* — литий (Li), рубидий (Rb), цезий (Cs), бериллий (Be);
- *тугоплавкие* — титан (Ti), цирконий (Zr), гафний (Hf), ванадий (V), ниобий (Nb), тантал (Ta), молибден (Mo), вольфрам (W);
- *рассеянные* — галлий (Ga), индий (In), таллий (Tl), германий (Ge)*, селен (Se)*, теллур (Te)*, рений (Re);
- *редкоземельные* — скандий (Sc), иттрий (Y), лантан и лантаноиды;
- *радиоактивные* — франций (Fr), радий (Ra), актиний (Ac), торий (Th), протактиний (Pa), уран (U), плутоний (Pu) и другие трансурановые элементы, полоний (Po), технеций (Tc).

Германий, селен и теллур (*) отнесены к металлам условно: в отличие от металлов, они являются полупроводниками.

Наиболее широко в машиностроении применяют в чистом виде и в составе многих сплавов: *медь, алюминий, магний, титан, цинк, никель, свинец, олово.*

10.1. Сплавы на основе алюминия

Алюминий (лат. *Aluminium*, химический символ Al, III группа периодической системы Менделеева, атомный номер 13, атомная масса 26,9815) — мягкий, легкий, серебристо-белый металл, быстро окисляющийся, удельная плотность 2,7 г/см³, температура плавления 660 °С. По распространенности в земной коре алюминий занимает первое место среди металлов. В природе представлен стабильным нуклидом ²⁷Al; наиболее долгоживущий из радиоактивных изотопов алюминия ²⁶Al имеет период полураспада 720 тыс. лет.

Производство. Основное исходное вещество для производства алюминия — оксид алюминия Al_2O_3 , который не проводит электрический ток и имеет температуру плавления около $2050^\circ C$. Очищенный Al_2O_3 получают переработкой природного боксита (28—70 % глинозема; 0,5—20 % кремнезема; 2—50 % оксида железа; 0,1—10 % окиси титана). Способ для снижения температуры плавления оксида алюминия предложили П. Эру (Франция) и Ч. Холл (США), обнаружив, что глинозем хорошо растворяется в расплавленном криолите (Na_3AlF_6). Этот расплав и подвергают электролизу при температуре всего около $950^\circ C$. Запасы криолита в природе незначительны, поэтому был создан синтетический криолит, что существенно удешевило производство алюминия.

Электролизер для получения алюминия (рис. 10.1) состоит из катодного и анодного устройств 6. Катодное устройство заключено в кожух 1, футерованный изнутри слоем огнеупорного углеродистого материала 3. Боковые стенки футеровки 2 вместе с подиной образуют ванну глубиной 400—600 мм. В ванне находятся расплавленный алюминий 4 и криолит 5, из-за высокой разности температур внутренней и наружной поверхности футеровки 3 образуется гарнисаж 8. Электрический ток отводится стальными стержнями к шинопроводу 9. Катодом служит поверхность жидкого алюминия 4, соприкасающегося с электролитом. К глинозему 7, основному расходуемому материалу, предъявляются высокие требования по чистоте и размерам частиц. Присутствие в нем оксидов более электроположительных элементов, чем алюминий, ведет к загрязнению алюминия. При достаточном содержании глинозема ванна работает нормально.

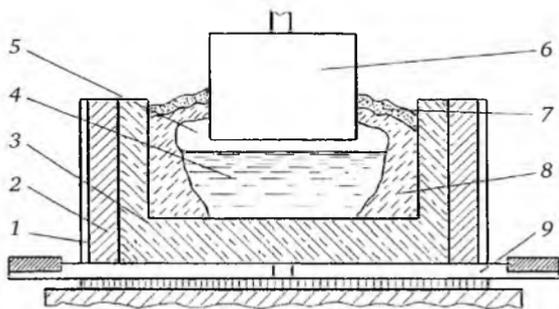


Рис. 10.1. Электролизер для получения алюминия:

- 1 — кожух катодного устройства; 2 — футеровка; 3 — углеродистая футеровка;
 4 — расплавленный алюминий; 5 — криолит; 6 — анодное устройство;
 7 — глинозем; 8 — гарнисаж; 9 — токопровод

Первый алюминиевый завод в России был построен в 1932 г. в Волхове. Производство требует больших затрат электроэнергии — на получение 1 т металла затрачивается 15 000 кВт·ч электроэнергии (потребление электричества 150-квартирным домом в течение месяца). Производство алюминия экологически опасно, так как атмосферный воздух загрязняется летучими соединениями фтора.

В зависимости от чистоты различают алюминий: особой чистоты — А999 (99,999 % Al); высокой чистоты — А995 (99,995 % Al), А99 (99,99 % Al), А95 (99,95 % Al) и технической чистоты: А85, А8, А6, А0 (99,0 % Al).

Применение. По масштабам применения алюминий и его сплавы занимают второе место — после железа и его сплавов. Широкое применение алюминия марок АД0 и АД1 в различных областях техники и быта связано с совокупностью его физических, механических и химических свойств: малой плотностью, коррозионной стойкостью в атмосферном воздухе (на поверхности образуется тонкая прочная пленка Al_2O_3), высокой тепло- и электропроводностью, пластичностью и сравнительно высокой прочностью. Алюминий легко обрабатывается различными способами — ковкой, штамповкой, прокаткой и др.

Алюминий высокой чистоты применяют для изготовления проволоки (электропроводность алюминия составляет 65,5 % от электропроводности меди, но алюминий более чем в три раза легче меди, поэтому часто заменяет медь в электротехнике) и фольги, используемой как упаковочный материал. Основная часть выплавленного алюминия расходуется на получение различных сплавов.

Сплавы алюминия отличаются малой плотностью, повышенной (по сравнению с чистым алюминием) коррозионной стойкостью и высокими технологическими свойствами: высокой тепло- и электропроводностью, жаропрочностью, прочностью и пластичностью; на сплавы алюминия легко наносятся защитные и декоративные покрытия, поэтому они широко применяются в авиации, судо- и автостроении, строительстве и других отраслях промышленности.

Сплавы на основе алюминия классифицируются по способу производства изделий из алюминиевых сплавов на деформируемые (сплавы А на рис. 10.2), литейные (сплавы В на рис. 10.2), по способности упрочнения термической обработкой (сплавы I и II на рис. 10.2), свойствам (жаропрочные, коррозионно-стойкие и т. д.) и спеченные.

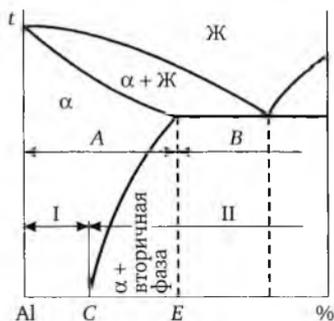


Рис. 10.2. Схема диаграммы состояния алюминий — легирующий элемент:

- α — твердый раствор легирующего элемента в алюминии;
- I — неупрочняемые термической обработкой однофазные сплавы;
- II — упрочняемые термической обработкой двухфазные сплавы;
- А — деформируемые сплавы; В — литейные сплавы

Деформируемые сплавы на основе алюминия из-за высокой пластичности используются для изготовления полуфабрикатов, поковок, штамповок различными способами ОМД (прокатка, ковка и т. д.). *Литейные* сплавы на основе алюминия с хорошей жидкотекучестью (за счет образования эвтектики) и малой склонностью к образованию усадочных и газовых пустот, трещин и раковин предназначены для изготовления деталей методами фасонного литья.

Однофазные сплавы I (см. рис. 10.2) со структурой α -твердого раствора до точки C не упрочняются термической обработкой. Например, сплавы алюминия с марганцем (АМц) и магнием (АМг) обладают высокой пластичностью, коррозионной стойкостью, свариваемостью (табл. 10.1). Из сплавов АМг и АМц изготавливают листы, прутки, проволоку, сварные конструкции, заклепки. Сплавы АМц, АМг2, АМг3 применяют для изготовления бензобаков, трубопроводов, в судостроении — для палубных надстроек, в строительстве. Сплавы АМг5, АМг6 применяют для средненагруженных деталей — рамы и кузова вагонов, подвесные потолки, переборки судов, лифты, корпуса и мачты судов и т. д.

Таблица 10.1

**Химический состав и механические свойства
некоторых деформируемых алюминиевых сплавов**

| Марка сплава | % Mg | % Mn | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % |
|--------------|---------|---------|----------------------|--------------|
| АМц | 3,2—3,8 | 1,0—1,6 | 130 | 23 |
| АМг3 | 4,8—5,8 | 0,3—0,6 | 200 | |
| АМг5 | 5,8—6,8 | | 300 | 20 |
| АМг6М | | 0,65 | 340 | 20 |
| АМг6Н* | | 0,65 | 390 | 10 |

*Н — сплав упрочняется нагартовкой.

Двухфазные сплавы II (см. рис. 10.2) упрочняются термической обработкой за счет выделения избыточной фазы из α -твердого раствора при содержании легирующего элемента между точками C и E и образования структуры α -твердого раствора и эвтектики при содержании легирующего элемента больше точки E. В сплав могут добавляться другие элементы, которые придают ему дополнительные свойства без изменения основных.

Термическая обработка: закалка с температур 500—550 °С (в зависимости от сплава), затем искусственное (при температуре 150—200 °С) или естественное (при нормальной температуре в течение 10—24 ч) старение.

Химический состав (ГОСТ 4784—74) и типичные механические свойства* некоторых деформируемых алюминиевых сплавов после закалки и старения

| Марка сплава** | Содержание элементов, % | | | | | | Механические свойства | | |
|----------------------------------|-------------------------|----------|----------|---------|----------------------------|----------------------|-----------------------|--------------|--|
| | Cu | Mg | Mn | Si | другие | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % | |
| Дуралюмин | | | | | | | | | |
| Д1 | 3,8—4,8 | 0,4—0,8 | 0,4—0,8 | — | — | 320 | 490 | 14 | |
| Д16 | 3,8—4,9 | 1,2—1,8 | 0,3—0,9 | — | — | 400 | 540 | 11 | |
| Сплав авиаль | | | | | | | | | |
| АВ*** | 0,1—0,5 | 0,45—0,9 | 0,15—0,3 | 0,5—1,2 | — | 200 | 260 | 15 | |
| Высокопрочные алюминиевые сплавы | | | | | | | | | |
| В95 | 1,4—2,0 | 1,8—2,8 | 0,2—0,6 | — | 5—7 Zn; 0,1—0,25 Cr | 540 | 560—600 | 8 | |
| В96 | 2,2—2,8 | 2,5—3,2 | 0,2—0,5 | — | 7,6—8,6 Zn; 0,1—0,25 Cr | — | — | — | |
| Ковочные алюминиевые сплавы | | | | | | | | | |
| АК6 | 1,8—2,6 | 0,4—0,8 | 0,4—0,8 | 0,7—1,2 | — | 300 | 420 | 12 | |
| АК8 | 3,9—4,8 | 0,4—1,0 | 0,4—1,0 | 0,6—1,2 | — | 380 | 480 | 10 | |
| Жаропрочные алюминиевые сплавы | | | | | | | | | |
| АК4-1 | 1,9—2,5 | 1,4—1,8 | — | 0,35 | 0,8—1,4 Fe; 0,8—1,4 Ni; | 280 | 430 | 13 | |
| Д20 | 6—7 | — | 0,4—0,8 | — | 0,02—0,1 Ti; $\leq 0,2$ Zr | 250 | 400 | 12 | |

* Механические свойства даны для прессованных прутков и профилей после закалки и старения. Листы имеют более низкие механические свойства.

** Буква Д обозначает сплав типа дуралюмин; А в начале марки — технический алюминий (АД, АД1); АК — алюминиевый ковочный сплав. Если в начале марки стоит буква В — высокопрочный. После условного номера может стоять обозначение, характеризующее состояние сплава: М — мягкий (отожженный), Т — термически обработанный (закалка и старение), Н — нагартованный, П — полунагартованный.

*** Механические свойства после закалки и естественного старения.

Деформируемые термически упрочняемые алюминиевые сплавы

Дуралюмины — сплавы системы Al—Cu—Mg—Mn (*дуралюмины*, от нем. *Düren* — город, где в начале 1920-х гг. было начато промышленное производство сплава Д1), с высокой прочностью при достаточной пластичности, хорошей свариваемостью точечной сваркой и обработкой резанием, малой плотностью (табл. 10.2). Недостаток — малая коррозионная стойкость. В качестве примесей в дуралюмине присутствуют железо и кремний, образующие с алюминием соединения, влияющие на его механические свойства.

Наиболее широко применяется в авиации (лопасти воздушных винтов, лонжероны, обшивка самолетов, шпангоуты, заклепки), строительстве, автомобилестроении (кузова автомобилей).

Сплавы авиаль (АВ) уступают дуралюминам по прочности, но обладают лучшей пластичностью в холодном и горячем состоянии (см. табл. 10.2), коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием и свариваются. Применение — детали невысокой и средней прочности, отделка кабин, салонов самолетов и вертолетов, в строительстве и судостроении.

Ковочные сплавы (см. табл. 10.2) отличаются высокой пластичностью и удовлетворительными литейными свойствами, позволяющими получить качественные слитки. Ковку и штамповку сплавов проводят при 450—475 °С, с последующей термической обработкой: закалка с 505—525 °С с охлаждением в воде, искусственное старение при 150—165 °С 10—12 ч. Применение — изготовление штамповых и кованых деталей сложной формы в самолетостроении, автостроении, строительстве.

Высокопрочные сплавы (см. табл. 10.2) с упрочняющими фазами MgZn₃, Т-фаза (Al₂Mg₃Zn₃) и S-фаза (Al₂CuMg) обладают хорошей пластичностью в горячем состоянии и достаточно легко деформируются в холодном состоянии после отжига. Применяются в самолетостроении для нагруженных конструкций, работающих при температурах выше 120 °С (обшивки, шпангоуты, лонжероны), силовых каркасов в строительстве и других нагруженных конструкций.

Жаропрочные сплавы (см. табл. 10.2) после термической обработки (закалка с 530 ± 5 °С в воду, старение при 200 °С 12 ч) применяют для деталей, работающих при температуре до 300 °С (поршни, головки цилиндров, лопасти и диски компрессоров, обшивка сверхзвуковых самолетов и др.).

Литейные сплавы на основе алюминия

Литейные сплавы систем Al—Si, Al—Cu, Al—Mg, легированные дополнительно Mn, Ni, Cr, Zn, маркируются буквами АЛ и далее цифра — номер сплава. Классифицируются по химическому составу, содержат в своей структуре эвтектику, поэтому имеют низкую температуру плавления, хорошую жидкотекучесть, небольшую усадку в сочетании с хорошими механическими свойствами (табл. 10.3, 10.4).

Химический состав и свойства некоторых сплавов (ГОСТ 2685—75)

| Система | Марка сплава | Содержание элементов, % | | | | | | Свойства | | |
|---------------------|--------------|-------------------------|----------|---------|---------------|---------------------------|----------------------|--------------|--|--|
| | | Si | Mg | Cu | Mn | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | | |
| Al—Si | АЛ2 | 10—13 | — | — | — | 180 | 80 | 6 | | |
| | АЛ4 | 8,0—10,5 | 0,17—0,3 | — | 0,25—0,5 | 260 | 200 | 4 | | |
| Al—Mg (магналин) | АЛ8* | — | 9,5—11 | — | — | 315 | 200 | 11 | | |
| | АЛ13* | 0,8—1,3 | 4,5—5,5 | — | 0,1—0,4 | 330 | 280 | 3,0 | | |
| Al—Cu | АЛ7* | — | — | 4,0—5,0 | — | 250 | 150 | 5,0 | | |
| | АЛ19* | — | — | 4,5—5,3 | 0,6—0,1 Zn | 370 | 250 | 5 | | |

* Свойства этих сплавов приведены после термической обработки — закалки 510—520 °С и искусственного старения при 150—170 °С.

Алюминиевые литейные сплавы

| Марка сплава | Способы литья* | Виды обработки | Твердость, НВ | Назначение |
|--------------|------------------|---------------------------|---------------|--|
| АЛ2 | ЗМ, ВМ, КМ, К, Д | — | 50 | Малонагруженные детали (корпуса приборов, кронштейны и др.) |
| | | Отжиг | | |
| АЛ4 | З, В, К, Д | — | 50 | Крупные нагруженные детали (корпуса компрессоров, картеров, блоков) |
| | К, Д | Старение | 70 | |
| | ЗМ, ВМ, К | Закалка и полное старение | 70 | |
| АЛ9 | З, В, К, Д | — | 50 | Детали средней загруженности сложной конструкции (головки цилиндров, поршни, картеры, сцепления и др.) |
| | З, В, К, Д | Отжиг | 45 | |
| | З, В | Старение | 50 | |
| | ЗМ, ВМ | Закалка и полное старение | | |
| АЛ10В | З, К | Старение | 80—90 | Детали, работающие при повышенных температурах |
| АЛ8 | З, В, К | Закалка | 60 | Детали высоконагруженные, воспринимающие вибрационные нагрузки |

* Обозначения: З — в песчано-глинистые формы; В — по выплавляемым моделям; К — кокиль; Д — под давлением. Буква М, следующая за первой буквой, обозначает: сплав при литье подвергается модифицированию.

Сплавы Al—Si (силумины АЛ2, АЛ4, АЛ9) имеют наилучшие литейные свойства, не упрочняются термической обработкой. В структуре есть эвтектика ($\alpha + Si$) и грубые выделения Si игольчатой формы (рис. 10.3, б, г), которые играют роль надразов, что снижает механические свойства. Для улучшения свойств проводят модифицирование присадкой в жидкий расплав 1 % смеси солей фтористого или хлористого натрия, влияющее на положение линий диаграммы (рис. 10.3, а).

После модифицирования сплав становится доэвтектическим и имеет структуру измельченной эвтектики ($\alpha + Si$) и округлых выделений избыточной α -фазы (рис. 10.3, д), за счет чего прочность повышается в 1,5 раза при достаточной пластичности. АЛ4 и АЛ9 кроме модифицирования могут дополнительно упрочняться термической обработкой. Применяются силумины для малонагруженных корпусных деталей (кронштейны, корпуса приборов, барабаны, корпуса тормозов, детали патрубков, башмаков). Жаропрочные силумины АЛ1, АЛ21, дополнительно легированные хромом, титаном, упрочняются термической обработкой, могут работать при температурах до 300 °С.



Рис. 10.3. Диаграмма Al—Si (а) и микроструктура силуминов:
 б — доэвтектический; в — эвтектический; z — заэвтектический;
 д — модифицированный

Магналин (АЛ8 — АЛ13) — высококоррозионные сплавы системы Al—Mg; литейные свойства хуже, чем у силуминов, так как в структуре отсутствует эвтектика, а включения Al_3Mg_2 на границах зерен охрупчивают сплав. Применяются для деталей и узлов, подвергающихся ударным нагрузкам во влажной атмосфере (авиация, судостроение).

Сплавы системы Al—Cu (АЛ7, АЛ19) — жаропрочные, хорошо обрабатываются резанием, но имеют низкие литейные свойства (большая усадка) и коррозионную стойкость, упрочняются термической обработкой. Применяются для высоконагруженных деталей, работающих при температуре до 250—300 °C.

Спеченные алюминиевые сплавы

САП — спеченный алюминиевый порошок или алюминиевая пудра. Получают холодным, а затем горячим брикетированием при 500—600 °C тонкого окисленного порошка (пудры) алюминия (размер частиц 3—4 мкм). Горячепрессованные брикеты подвергают последующей деформации (прокатке, ковке, прессованию). Содержание Al_2O_3 — от 6—9 % (САП-1) до 18—22 % (САП-4). С увеличением содержания оксида алюминия предел прочности σ_B повышается до 460 МПа (САП-4), а пластичность падает до $\delta = 1,5$ %. Плотность САП близка к плотности алюминия, он обладает высокой теплопроводностью, хорошей электропроводностью. Материал сваривается, подвергается обработке резанием и имеет повышенную жаропрочность при 500 °C; длительная прочность за 100 ч около 70 МПа. Недостатком САП является его хрупкость и большая чувствительность к надрезу.

Применение: прутки, полосы, трубы, профили, детали, работающие при температуре до 500 °C.

САС — спеченные алюминиевые сплавы. Получают горячим брикетированием с последующим прессованием при ~ 500 °C порошков окисленных алюминиевых сплавов (САС-1 — 25—30 % Si, 5—7 % Ni, ост. Al; САС-2 — 25—30 % Si, 5—7 % Fe, ост. Al). Обладают низким коэффициентом линейного расширения, имеют удовлетворительный предел

прочности ($\sigma_B = 220 \div 240$ МПа) и текучести ($\sigma_T = 210 \div 230$ МПа), высокий модуль упругости, жаропрочны. Однако обладают низким относительным удлинением ($\delta \sim 0,5\%$), т. е. малопластичны.

Применение: детали приборов, работающих в паре со сталью при температуре 20—200 °С, у которых требуется сочетание низкого коэффициента линейного расширения и малой теплопроводности; детали, длительно работающие при 300—500 °С, а при кратковременной работе — до 700 °С. Возможно применение вместо легированных Cr—Ni—Ti-сталей для отдельных деталей приборов в самолетостроении.

10.2. Сплавы на основе меди

Историческая справка. Медь и ее сплавы относятся к числу металлов, известных с глубокой древности, которые сыграли большую роль в развитии материальной культуры. Раннему знакомству человека с медью способствовало то, что она встречается в природе в свободном состоянии в виде самородков, которые иногда достигают значительных размеров. Медь была, по-видимому, первым металлом, который человек научился восстанавливать из кислородных соединений, содержащихся в рудах. Латинское название меди происходит от названия острова Кипр, где древние греки добывали медную руду.

В древности для обработки скальной породы ее нагревали на костре, быстро охлаждали и порода растрескивалась. Дальнейшее восстановление вели в кострах с большим количеством угля и с вдуванием воздуха посредством труб и мехов. Костры окружали стенками, которые постепенно повышались, что привело к созданию шахтной печи. Позднее методы восстановления уступили место окислительной плавке сульфидных медных руд с получением промежуточных продуктов — штейна (сплава сульфидов), в котором концентрируется медь из шлака (сплава оксидов).

Медь (лат. *Cuprum*) — Cu, химический элемент I группы периодической системы Менделеева; атомный номер 29, атомная масса 63,546; мягкий, ковкий металл красного цвета (розовый при отсутствии оксидной пленки). Природная медь состоит из смеси двух стабильных изотопов — ^{63}Cu (69,1 %) и ^{65}Cu (30,9 %). Металл имеет гранцентрированную кубическую решетку с $a = 3,6074 \text{ \AA}$; плотность 8,96 г/см³ (20 °С).

Получение. В рудах медь обычно находится в виде сернистых соединений (CuFeS_2 , CuS , Cu_2S), оксидов (Cu_2O , CuO) или гидрокарбонатов [$\text{CuCO}_3\text{—Cu(OH)}_2$, $2\text{CuO}_3\text{—Cu(OH)}_2$].

Медные руды характеризуются невысоким (1—6 %) содержанием меди, поэтому перед плавкой тонкоизмельченную руду подвергают механическому обогащению для получения концентратов (медных, цинковых, пиритных) и отвальных хвостов. В мировой практике 80 % меди извлекают из концентратов пирометаллургическими методами, основанными на расплавлении *всей* массы материала. На большинстве современных заводов плавку ведут в отражательных печах (необходимое для плавления тепло получают сжиганием углеродистого топлива —

природного газа, мазута) или в электрических печах (тепло получают пропуская через расплавленный шлак электрического тока).

В процессе плавки, вследствие большего сродства меди к сере, а компонентов пустой породы и железа — к кислороду, медь концентрируется в сульфидном расплаве (*штейне*), а оксиды образуют шлак (рис. 10.4). Штейн отделяют от шлака отстаиванием. Получающийся при плавке жидкий штейн (в основном Cu_2S , FeS) заливают в конвертор и продувают сжатым воздухом. Конвертирование штейнов протекает в две стадии. Сначала окисляется сульфид железа, для связывания оксидов железа в конвертор добавляют кварц — образуется конверторный шлак. Затем окисляется сульфид меди с образованием металлической (черновой) меди и SO_2 . Черновую медь разливают в формы и слитки и для удаления вредных примесей направляют на *огневое рафинирование*. Оно основано на большем, чем у меди, сродстве металлов-примесей к кислороду: Fe, Zn, Co и частично Ni в виде оксидов переходят в шлак, а сера (в виде SO_2) удаляется с газами.

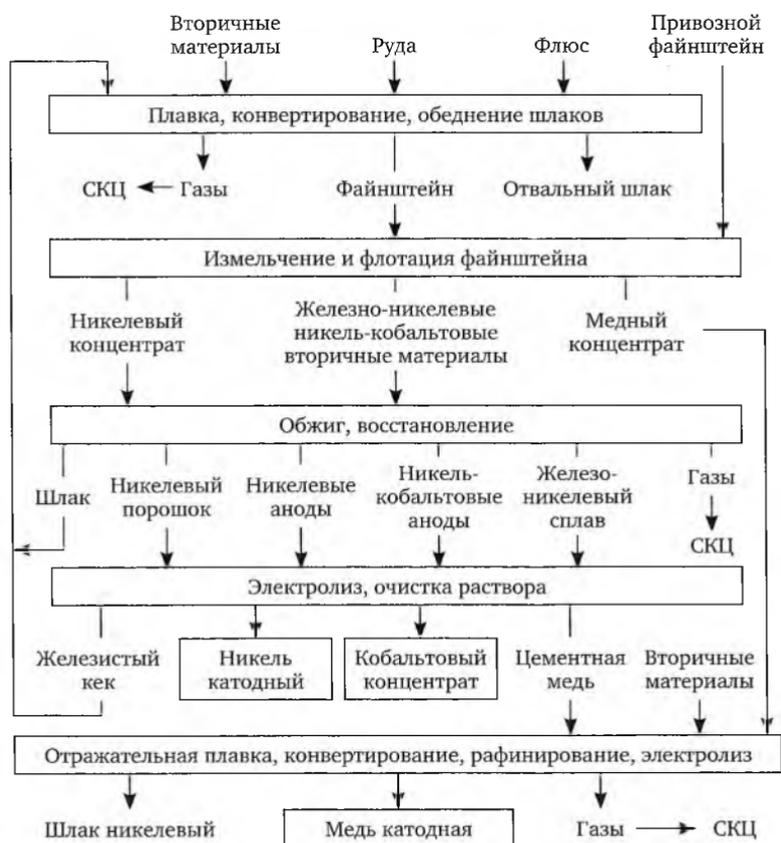


Рис. 10.4. Технологическая схема производства меди, никеля и кобальта на АО «Комбинат Североникель».

СКЦ — сернооксидный цех; файнштейн — полупродукт металлургического производства (безжелезистый сульфид), получаемый при конвертировании штейнов

Для электролитического рафинирования слитки (аноды) подвешивают в ванне с раствором CuSO_4 . При пропускании тока они растворяются, а чистая медь отлагается на катодах из тонких медных листов. Полученную катодную медь промывают водой и переплавляют. Ценные спутники (Au, Ag, Se, Fe, Bi, Se, Te и др.) концентрируются в анодном шламе, из которого их извлекают специальной переработкой. Никель концентрируется в электролите, и его получают в виде никелевого купороса.

Наряду с пирометаллургическими методами получения меди применяют также гидрометаллургические (преимущественно из бедных окисленных и самородных руд). Эти методы основаны на избирательном растворении медьсодержащих минералов в слабых растворах H_2SO_4 или аммиака.

Медь по чистоте подразделяют на марки: М0 (99,95 % Cu), М1 (99,9 % Cu), М2 (99,7 % Cu), М3 (99,5 % Cu), М4 (99 % Cu).

Применение. Большая роль меди в технике обусловлена рядом ее ценных свойств и прежде всего высокой электро- и теплопроводностью, пластичностью. Все примеси понижают электропроводность меди, а потому в электротехнике используют металлы, содержащий не менее 99,9 % Cu (М0 и М1). Высокие теплопроводность и сопротивление коррозии позволяют изготавливать из меди ответственные детали теплообменников, холодильников, вакуумных аппаратов и т. п. Более 30 % меди идет на сплавы.

Сплавы на основе меди классифицируются: по химическому составу (латуни и бронзы); по способу производства из них заготовок и деталей (литейные и деформируемые); по способу упрочнения термической обработкой (упрочняемые и неупрочняемые).

Латуни

Латуни — двойные или многокомпонентные сплавы меди, в которых основным легирующим элементом является цинк. По сравнению с чистой медью латуни имеют более высокую прочность, коррозионную стойкость, лучшие литейные свойства.

Маркировка латуней: начальная буква Л — латунь, после чего следуют первые русские буквы основных элементов сплава, далее цифры: первая — содержание меди, последующие — содержание легирующих элементов. Например, ЛЖМц 59-1-1: Л — латунь, Ж — железо, Мц — марганец; 59 % Cu, 1 % Fe, 1 % Mn, остальное Zn; ЛКС 80-3-3: Л — латунь, К — кремний, С — свинец; 80 % Cu, 3 % Si, 3 % Pb, остальное — Zn.

По химическому составу латуни подразделяются на двойные (ТОМ-ПАК) и специальные (многокомпонентные), по способу производства латуни могут быть литейные и деформируемые; в зависимости от состава латуни упрочняются термической обработкой.

Диаграмма состояния Cu—Zn и влияние цинка на свойства латуни приведены на рис. 10.5 и в табл. 10.5. Увеличение содержания цинка приводит к увеличению σ_b и относительного удлинения δ (рис. 10.5, б).

Такая закономерность необычна, так как пластичность должна падать. При появлении в структуре β -фазы (30—32 % Zn) пластичность резко падает.

Таблица 10.5

Химический состав и свойства двойных латуней
(ГОСТ 15527—70)

| Марка латуни | Содержание элементов, % | | $\sigma_{\text{н}}$, МПа | δ , % | Структура |
|--------------|-------------------------|-------|---------------------------|--------------|------------------|
| | Cu | Zn | | | |
| Л96 | 95—97 | 5—3 | 240 | 52 | α |
| Л85 | 84—86 | 16—14 | 280 | 43 | α |
| Л80 | 79—81 | 21—19 | 310 | 52 | α |
| Л70 | 69—72 | 31—28 | 320 | 55 | α |
| Л68 | 67—70 | 33—30 | 330 | 56 | $\alpha + \beta$ |

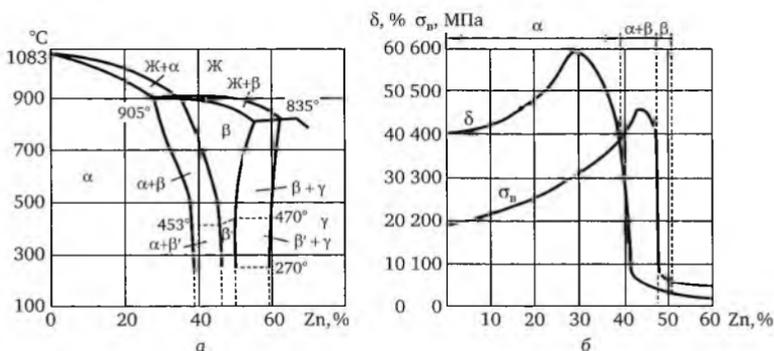


Рис. 10.5. Диаграммы расплава Cu—Zn (а)
и влияние содержания цинка на свойства латуни (б)

По структуре простые латуни подразделяются:

- на α -латуни (структура α -твердого раствора цинка в меди);
- ($\alpha + \beta$)-латуни со структурой ($\alpha + \beta$), где β — твердый раствор цинка в решетке химического соединения CuZn;
- β -латуни со структурой β -твердого раствора.

Двойные латуни не имеют фазовых превращений и поэтому не упрочняются термической обработкой, хорошо обрабатываются давлением как в холодном, так и в горячем состоянии. Применение простых латуней — радиаторные и конденсаторные трубки (Л96, Л90), сильфоны, гибкие шланги, прокладки (Л85, Л80), гайки, болты, детали автомобиля (Л68), толстостенные детали (Л159). Полуфабрикат (листы, ленты, проволока) получают глубокой вытяжкой.

Многокомпонентные (специальные) латуни — это двухфазные латуни с добавками легирующих элементов, которые (кроме свинца) увели-

чивают прочность (твердость) и коррозионную стойкость, но ухудшают пластичность латуней.

Основные легирующие элементы:

- Sn — повышает прочность, увеличивает коррозионную стойкость;
- Ni, Mn — повышают прочность, коррозионную стойкость;
- Si — повышает прочность, износостойкость, антифрикционные свойства;
- Pb — улучшает обрабатываемость резанием, но ухудшается пластичность;
- Fe — улучшает жидкотекучесть.

Как показано на рис. 10.6, внутри образовавшегося из β -фазы CuZn α -твердого раствора на основе меди (светлые выделения) обнаруживаются частицы не растворимого в меди свинца, который затвердел в последнюю очередь. Включения свинца увеличивают хрупкость латуни настолько, насколько необходимо для обламывания стружки при обработке сплава на автоматических металлорежущих станках;

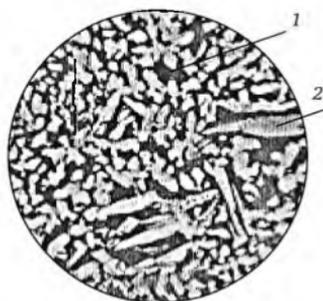


Рис. 10.6. Двухфазная латунь (автоматная) ЛС59-1:

- 1 — темная матрица (β -фаза — CuZn); 2 — α -твердый раствор на основе меди с частицами не растворимого в меди свинца, который затвердел в последнюю очередь

По технологическому признаку многокомпонентные латуни подразделяются на *литейные* и *деформируемые*.

Литейные латуни:

- ЛАЖМц 66-6-3-2 (64—66 % Cu, 6—7 % Al, 2—4 % Fe, 1,5—2,5 % Mn) имеет хорошую коррозионную стойкость, применяется для литья в землю, кокиль (гайки, червячные винты);
- ЛКС80-3-3 (79—81 % Cu, 2,5—4,5 % Si, 2—4 % Pb) применяется для литья в землю, кокиль (вкладыши подшипников, втулок и т. д.);
- ЛМцЖ 52-4-1 (49—53 % Cu, 3—5 % Mn, 0,9—1,2 % Fe) предназначена для литья в кокиль (детали ответственного назначения, подшипники, арматура);
- ЛМцОС 58-2-2-2 (56—60 % Cu, 1,5—2,5 % Mn, 1,5—2,5 % Sn, 0,5—2,5 % Pb) отливается в землю и кокиль (отливка шестерен).

Деформируемые латуни:

- ЛА 77-2 (76—79 % Cu, 1,75—2,5 % Al); ЛМц 58-2 (57—60 % Cu, 1—2 % Mn); ЛАЖ 60-1-1 (58—61 % Cu, 0,8—1,2 % Al, 0,8—1,2 % Fe);

ЛЖМ 5911 (58—60 % Cu, 0,9—1,1% Fe, 0,9—1,1 % Mn) предназначены для изготовления труб, проволоки, листов, поковок;

- ЛО70-1 и ЛО62-1 — соответственно — 70 и 62 % Cu и 1 % Sn (морская латунь); обладают высокими коррозионными свойствами в пресной и морской воде, применяются в судостроении;

- ЛС 59-1 (58—62 % Cu и 0,5—1,2 % Pb) обладает хорошей обрабатываемостью резанием, применяют в виде труб, листа, полуфабрикатов.

Бронзы

Бронзы — сплавы меди с любым другим, кроме цинка, металлом как основным легирующим элементом. Маркировка — Бр — бронза, далее начальная русская буква основного легирующего элемента, затем русские буквы легирующих элементов и цифры, показывающие их среднее содержание в процентах. Например, БрОЦ 4-3 — бронза (Бр), основной легирующий элемент олово (О), легирована цинком (Ц) в количествах ~ 4 % Sn и ~ 3 % Zn; БрАЖМц 10-3-1,5 — бронза алюминиевая (А), легирована железом и марганцем в количествах ~ 10 % Al, ~ 3 % Fe и 1,5 % Mn.

Бронзы называют по основному легирующему элементу. Например, система Cu—Al — алюминиевая бронза, Cu—Sn — оловянная, Cu—Pb — свинцовая, Cu—Be — бериллиевая и т. д. Бронзы классифицируют: по химическому составу (простые и многокомпонентные); по технологии изготовления (деформируемые и литейные); по способу упрочнения термической обработкой (упрочняемые и неупрочняемые).

Основные легирующие элементы бронз — олово, алюминий, никель, кремний — повышают прочность, упругие свойства и коррозионную стойкость, а в сочетании с другими элементами (свинцом, фосфором, цинком) также и антифрикционные свойства. Свинец улучшает обрабатываемость резанием, большинство бронз (кроме алюминиевых) хорошо свариваются.

Оловянные бронзы (табл. 10.6) характеризуются высокими антифрикционными свойствами, хорошей жидкотекучестью, низкой литейной усадкой. Влияние олова на механические свойства сплава показано на рис. 10.7.

Таблица 10.6

Характеристики оловянных бронз

| Технологический передел | Марка бронзы | Механические свойства | | |
|-------------------------|---------------|-----------------------|--------------|-----|
| | | σ_B , МПа | δ , % | НВ |
| Литейные | БрОЦС 3-12-5 | 210 | 5 | 60 |
| | БрО 19 | 300 | 0,5 | 60 |
| | БрОС 16-5 | 250 | 0,5 | 120 |
| | БрОС 10-10 | 200 | 5 | 65 |
| Деформируемые | БрОФ 6,5-0,4 | 400 | 65 | 80 |
| | БрОЦ4-3 | 350 | 40 | 60 |
| | БрОЦС 4-4-2,5 | 325 | 40 | 60 |

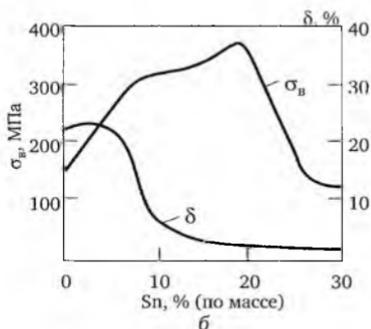
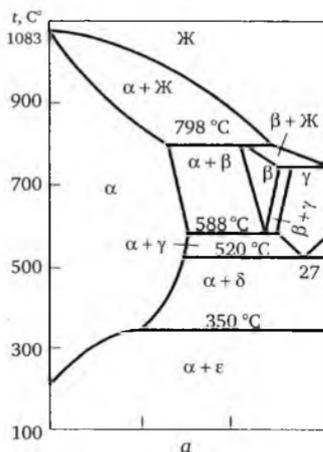


Рис. 10.7. Диаграммы состояния сплава Cu—Sn (а) и влияния олова на свойства бронзы (б)

Оловянные бронзы легируют Zn, Fe, P, Pb, Ni и др. Фосфор улучшает литейные свойства ($P > 0,3\%$), Pb улучшает обрабатываемость резанием, Ni, Fe улучшают механические свойства, коррозионную стойкость. Структура оловянистых бронз состоит из α -твердого раствора олова в меди; β -твердого раствора на базе решетки электронного соединения Cu_2Sn ; δ -твердого раствора на базе решетки электронного соединения $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$. Однофазные оловянные бронзы (структура α -твердого раствора) содержат до 8 % Sn. Двухфазные оловянные бронзы имеют структуру ($\alpha + \delta$) и содержат около 20 % Sn (при 350 °C δ -фаза должна распадаться на α - и ϵ -фазы, но превращение идет так медленно, что при охлаждении на воздухе оно не происходит).

Применение: различные детали, получаемые методом фасонного литья, антифрикционные детали (подшипники скольжения), художественное литье.

Безоловянные бронзы (литейные и деформируемые) — заменители оловянных бронз, не содержащие дефицитного олова и часто превосходящие их по многим свойствам. Наиболее распространены бериллиевые (БрБ2), алюминиевые (БрА7Мц15ЖЗН2Ц2) и кремниевые (БрКН1-3) бронзы, способные сильно упрочняться при закалке с последующим искусственным старением.

Свинцовые бронзы (система Cu и Pb) — это литейные бронзы, обладающие хорошими антифрикционными свойствами. Как следует из диаграммы состояния (рис. 10.8), свинец практически не растворяется в меди; в системе при 327 °C происходит эвтектическое превращение, эвтектика по составу — почти чистый Pb и Cu. Свинцовые бронзы применяют как антифрикционный материал для подшипников скольжения. Мягкая свинцовая составляющая структуры дает хорошую прирабатываемость к валу. Бронзы БрС3О, БрОС10-10, БрОСН10-2-3 применяют для отливки вкладышей подшипников скольжения, втулок.

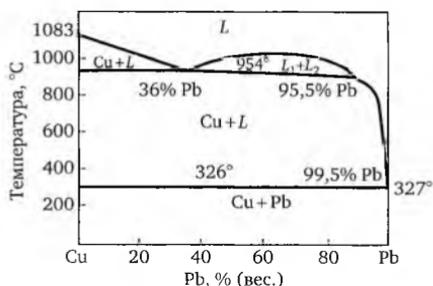


Рис. 10.8. Диаграмма равновесия Cu—Pb

Алюминиевые бронзы — двойные (БрА5 и БрА7) и легированные (Ni, Mn, Fe и др.) обладают повышенной коррозионной стойкостью в морской воде и влажной атмосфере. По структуре эти бронзы могут быть однофазные (α -твердый раствор), обладающие высокой пластичностью, и двухфазные — $\alpha + \gamma$ ($\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$). γ -Фаза появляется при ускоренном охлаждении. Двухфазные бронзы (БрАЖ 9-4; БрАЖН 10-4-4; БрАЖН 10-4-4-л) более прочные, но пониженной пластичности. Эти бронзы могут быть деформируемыми (однофазные) и литейными. Их применяют для изготовления прутков, поковок, фасонного литья.

Кремнистые бронзы — система Cu—Si, содержание Si до 3,5 %. Легируют Ni, Mn для улучшения механических свойств, а также коррозионной стойкости. Бронза БрКМц 3-1 может быть рекомендована для изготовления упругих элементов, работающих при температуре до 250 °C и в агрессивных средах.

Бериллиевые бронзы (система Cu—Be) относятся к деформируемым сплавам, упрочняемым термической обработкой. Предельная растворимость бериллия в меди (α -твердый раствор) при 860 °C — 2,7 %, а при 300 °C — всего 0,2 %. Это указывает на возможность термического упрочнения (закалка с 820—860 °C в воде и последующего старения при 325 °C) за счет выделения соединения CuBe (γ). Наиболее распространенные марки — БрБ2, БрБНТ-1,9 (цифры указывают процент бериллия). Применяются для упругих элементов (пружины, мембраны, торсионы и т. д.), способных работать в коррозионных средах, а также для ударных инструментов, когда недопустимо искрообразование.

Никелевые бронзы — сплавы меди с никелем со структурой непрерывного α -твердого раствора отличаются хорошей коррозионной стойкостью, высокими механическими, электрическими свойствами. Коррозионно-стойкие сплавы — мельхиор МНЖМц 30-1-1, МН 19, нейзильбер МНЦС 16-29-1,8 — обладают красивым серебристым цветом, не окисляются на воздухе, в органических кислотах, морской воде. Легко обрабатываются давлением как в холодном, так и в горячем состоянии, хорошо свариваются, свинец вводится для улучшения обрабатываемости резанием. Применяются для деталей точной механики (часы, часовые и радиомеханизмы), медицинского инструмента, химической аппаратуры, бытовой посуды и столовых приборов.

10.3. Антифрикционные сплавы на основе свинца и олова

Антифрикционные сплавы на основе свинца и олова применяют для заливки вкладышей подшипников скольжения. Свойства антифрикционных сплавов зависят от структуры. Структура должна быть гетерогенной — мягкая, пластичная основа и включения более твердых частиц, которых не должно быть слишком много, иначе подшипник будет плохо прирабатываться, так как под давлением вала частицы будут ломаться, и осколки, попадая между валом и вкладышем, будут царапать вал. При вращении вал опирается на твердые частицы, обеспечивающие износостойкость, а мягкая основа легко прирабатывается к валу и, образуя микроскопические трещины (каналы), удерживает смазку (рис. 10.9). Требования — достаточная твердость, способность деформироваться под влиянием местных напряжений, малый коэффициент трения. Сплавы должны иметь хорошую теплопроводность и коррозионную стойкость, а также низкую температуру плавления.

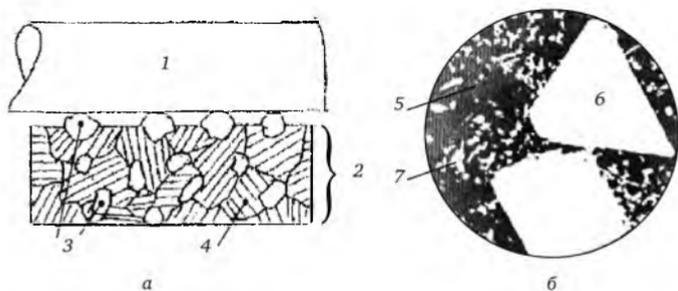


Рис. 10.9. Схема взаимодействия «вал — антифрикционный сплав» (а)
и микроструктура баббита Б83 (б):

1 — вал; 2 — вкладыш; 3 — твердые частицы; 4 — основа пластичная, вязкая; 5 — мягкий твердый раствор на основе олова (матрица); 6 — ограниченные кристаллы SnSb (с высокой твердостью); 7 — включения Cu_3Sn , кристаллизующиеся первыми и препятствующие ликвации по плотности

Для подшипников наиболее широко применяют сплавы на основе свинца и олова — баббиты (табл. 10.7). Баббиты обозначаются буквой Б, справа от которой ставится цифра, показывающая процент олова, или буква, характеризующая специальный элемент, входящий в сплав. Например, Б83, Б16, Б6 имеют 83, 16, 6 % олова соответственно, БН — в сплав введен никель, БТ — теллур, БК — кальций.

• Оловянные баббиты (сплавы системы Sn—Sb) — мягкая основа — α -твердый раствор сурьмы в олове, твердые включения — кристаллы β -фазы — SnSb; основной легирующий элемент — медь до 6,5 % (рис. 10.9, б). Оловянные баббиты Б88, Б83 используют в подшипниках турбин турбонасосов, турбокомпрессоров и других тяжело нагруженных машин.

Химический состав оловянных и свинцовых баббитов

| Марка баббита | Химический состав, % | | | | | | | | | | | | |
|---------------|----------------------|-----------|---------|---------|-----------|---------|--------|--------|--------|------|--------|--------|-----------|
| | основные компоненты | | | | | | | | | | | | |
| | олово | сурьма | медь | кадмий | никель | мышьяк | свинец | железо | мышьяк | цинк | свинец | висмут | алюминий |
| Б88 | Остальное | 7,3—7,8 | 2,5—3,5 | 0,8—1,2 | 0,15—0,25 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Б83 | Остальное | 10,0—12,0 | 5,5—6,5 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Б83С | Остальное | 9,0—11,0 | 5,0—6,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | 1,0—1,5 |
| Б16 | 15,0—17,0 | 15,0—17,0 | 1,5—2,0 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | Остальное |
| БН | 9,0—11,0 | 13,0—15,0 | 1,5—2,0 | 0,1—0,7 | 0,—0,5 | 0,5—0,9 | То же | — | — | — | — | — | То же |
| БС6 | 5,5—6,5 | 5,5—6,5 | 0,1—0,3 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| Марка баббита | Примеси, не более | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | Б88 | 0,05 | 0,05 | 0,005 | 0,1 | 0,05 | 0,005 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,005 |
| | Б83 | 0,10 | 0,05 | 0,004 | 0,35 | 0,05 | 0,005 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,005 |
| | Б83С | 0,10 | 0,10 | 0,01 | — | 0,05 | 0,005 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,005 |
| | Б16 | 0,08 | 0,20 | 0,07 | — | 0,10 | 0,010 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,010 |
| | БН | 0,10 | — | 0,02 | — | 0,10 | 0,05 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,05 |
| БС6 | 0,10 | 0,05 | 0,01 | Cd/0,05 | 0,07 | 0,005 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,005 | |

Примечания:

1. По требованию потребителя в баббите марки Б88 допускается замена компонентов кадмия и никеля на олово и увеличение примеси свинца до 0,35 %.
2. По требованию потребителя в баббите марки Б83 массовая доля примеси свинца может быть увеличена до 0,5 %.
3. По требованию потребителя в баббите марки Б83С массовая доля свинца может быть увеличена до 3,0 %.

- Свинцовые баббиты (Б16, БС6) более мягкие и пластичные, чем оловянные; основные легирующие элементы — Sn, Cu, Sb. Эти баббиты имеют структуру α -твердого раствора легирующих элементов в свинце, который является мягкой составляющей сплава, и твердых частиц β -фазы (SnSb), Cu_3Sn и Cu_2Sb . Применяют для менее нагруженных подшипников.

- Кальциевые баббиты (БК) системы Pb—Ca—Na. Мягкая составляющая — α -твердый раствор Na и Ca в Pb, а твердая — кристаллы Pb_3Ca . Эти сплавы используют на железнодорожном транспорте (подшипники вагонов, тепловозов и т. д.).

10.4. Титан и его сплавы

Титан расположен в группе IVB, в 4-м периоде периодической системы элементов, серебристо-белый металл. Титан существует в виде двух аллотропических модификаций: ниже температуры 882 °С устойчивая α -форма с гексагональной плотноупакованной решеткой ($a = 2,951 \text{ \AA}$, $c = 4,679 \text{ \AA}$), а выше этой температуры — β -форма с кубической объемно-центрированной решеткой $a = 3,269 \text{ \AA}$. Примеси и легирующие добавки могут существенно изменять температуру $\alpha \rightarrow \beta$ превращения.

У титана низкая плотность в сочетании с высокой прочностью и высокой стойкостью к коррозии; температурный коэффициент расширения составляет около половины от температурного коэффициента расширения нержавеющей стали и меди; модуль упругости составляет половину от модуля упругости нержавеющей стали, что делает титан стойким и прочным к ударам.

Производство. Наиболее распространенными рудами для получения титана являются ильменит $\text{FeO} \cdot \text{TiO}_2$, рутил TiO_2 , титаномагнетит $\text{FeTiO}_3 \cdot \text{Fe}_3\text{O}_4$. После обогащения концентраты титановых руд обычно содержат 42—65 % TiO_2 . Получение металлического титана заключается в восстановлении четыреххлористого титана или оксидов титана магнием или натриетермическим способом. Титан и магний обычно производят на одном заводе, и хлористый магний, побочный продукт при получении титана, служит сырьем для получения магния. Хлор получают как побочный продукт при производстве магния.

Концентраты ильменитовых руд содержат более 40 % оксидов железа (FeO и Fe_2O_3). Эти оксиды отделяют от основного компонента — концентрата титановой руды, диоксида титана плавкой в смеси с восстановителем — древесным углем или антрацитом. В процессе плавки в руднотермических печах оксиды железа и титана восстанавливаются, образуя железно науглероживается и получается чугуна, а низшие оксиды титана переходят в шлак. Титановый шлак (содержит 80—90 % TiO_2 , 2—5 % FeO и примеси — SiO_2 , CaO , MgO , MnO , Al_2O_3 , Cr_2O_3 и др.) хлорируют для образования четыреххлористого титана (TiCl_4), из которого в реакторах восстанавливается титан. Побочный продукт этого процесса — чугун — используют в металлургическом производстве.

Твердые частицы восстановленного титана спекаются в пористую массу — губку (рис. 10.10), а жидкий $MgCl_2$ выпускают через летку реактора. Губка титана пропитана магнием и хлористым магнием; общее содержание этих примесей составляет 35—45 %. Титановые губки на слитки плавят в вакуумных дуговых печах. Полученные слитки титана могут иметь дефекты (раковины, поры), поэтому их вторично переплавляют, используя как расходные электроды. Для получения сплавов титана с другими металлами (алюминием, марганцем, ванадием и др.) эти металлы припешивают к губке, поступающей на первую плавку. После второго переплава эти металлы уже равномерно распределяются в объеме слитка.



Рис. 10.10. Титановая губка

Слитки титана с чистотой 99,6—99,7 %, полученные после вторичного переплава, используют для прокатки на лист, профильный материал,ковки, штамповки заготовок деталей (рис. 10.11).

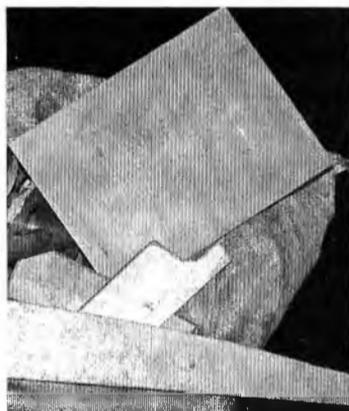


Рис. 10.11. Слитки из титана с чистотой 99,6—99,7 %, полученные после вторичного переплава

Применение. Роль титана как конструкционного материала, основы высокопрочных сплавов для авиации, судостроения и ракетной техники быстро возрастает. Именно в сплавы идет большая часть выплавляемого в мире титана. Значительные количества титана использует металлургия. Существуют сотни марок сталей и других сплавов, в состав которых титан входит как легирующая добавка. Его вводят для

улучшения структуры металлов, увеличения прочности и коррозионной стойкости. Технический титан идет на изготовление емкостей, химические реакторы, трубопроводов, арматуры, насосов и других изделий, работающих в агрессивных средах, например в химическом машиностроении. В гидрометаллургии цветных металлов применяется аппаратура из титана. Он служит для покрытия изделий из стали. В условиях глубокого холода прочность титана повышается при сохранении хорошей пластичности, что позволяет применять его как конструкционный материал для криогенной техники. Титан хорошо поддается полировке, цветному анодированию и другим методам отделки поверхности и поэтому идет на изготовление различных художественных изделий, в том числе и монументальной скульптуры (памятник в Москве, сооруженный в честь запуска первого искусственного спутника Земли).

Титан биологически безвреден, поэтому применяется для изготовления оборудования пищевой промышленности и в восстановительной хирургии.

Сплавы титана применяются в химической и бумажной промышленности, в пищевой промышленности (котлы, детали холодильников), в авиа- и турбостроении (компрессоры, лопатки турбин), судостроении (обшивки, гребные винты), электронной и вакуумной технике (газоплотители, детали приборов), в медицине (инструменты, внутренние протезы). Легирующие элементы, добавляемые в титан, характеризуют по их влиянию на температуру полиморфного превращения.

Альфа-стабилизаторы — Al, O, N, B, C, La элементы, *повышающие* температуру полиморфного превращения и расширяющие область существования α -модификации титана. Некоторые элементы этой группы образуют соединения с титаном (рис. 10.12, а, б).

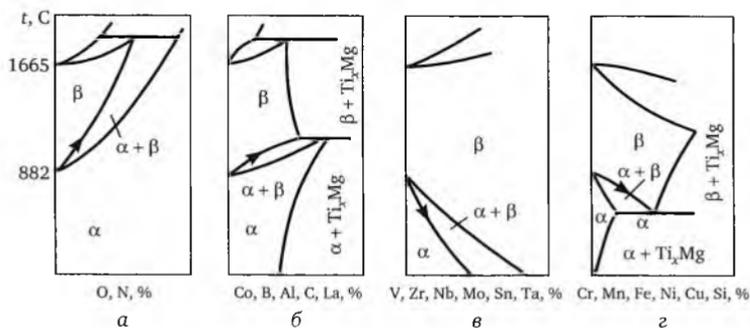


Рис. 10.12. Влияние элементов α - (а, б) и β -стабилизаторов (в, з) на положение температуры полиморфного превращения титана

Бета-стабилизаторы — элементы, *понижающие* температуру полиморфного превращения и расширяющие область β -модификации (рис. 10.12, в, з). В эту группу входят элементы, изоморфные β -модификации и образующие с Ti непрерывный ряд твердых растворов (V, Zr, Nb, Mo, Sn, Ta), и Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Si, вызывающие эвтектоидный распад β -фазы с образованием интерметаллидов Ti_xMe_y (титанидов). В зависи-

мости от легирования сплавы титана делятся на α -сплавы, $(\alpha + \beta)$ -сплавы и β -сплавы.

Сплавы на основе титана классифицируются:

1) по структуре:

- сплавы с α -структурой не упрочняются термообработкой;
- псевдо α -сплавы (в составе есть небольшое количество β -стабилизаторов) упрочняются термообработкой (закалка по мартенситному типу и старение);

- β -сплавы с повышенным содержанием β -стабилизаторов имеют структуру β -твердого раствора; псевдо β -сплавы имеют в структуре не-многого α -фазы;

- двухфазные $(\alpha + \beta)$ -сплавы упрочняются закалкой по мартенситному типу и старением (структура зависит от соотношения α - и β -стабилизаторов). К двухфазным относятся и α -сплавы, из которых после термообработки выделяется интерметаллидная фаза;

2) по технологии производства:

- деформируемые сплавы — используется ОМД — ковка, прессование вытяжкой и т.д; маркируются буквами ВТ и цифрами, показывающими номер сплава (табл. 10.8);

Таблица 10.8

Химический состав и свойства некоторых деформируемых сплавов титана

| Марка сплава | Содержание элементов, % | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | Применение |
|--|--|------------------|----------------------|--------------|--|
| α-сплавы | | | | | |
| BT5 | 5 % Al | 750— 900 | 660— 850 | 10—15 | Термически неупрочняемые, жаропрочные до 500 °С. Изготавливают поковки, трубы, прокат, детали, работающие с нагревом |
| BT5-1 | 5 % Al; 2,5 % Sn | | | | |
| Псевдо α-сплавы | | | | | |
| OT4-1 | 1,5 % Al; 1,0 % Mn | 600— 700 | 560— 600 | 15 | Упрочняются термической обработкой, жаропрочны, технологичны. Применяют для сварных деталей и узлов в самолетостроении |
| BT-20 | 6,0 % Al; 2,0 % Zr; 1,0 % Mn; 1,0 % V | 950— 1000 | 900— 950 | 10 | |
| $(\alpha + \beta)$-сплавы (мартенситный класс) | | | | | |
| BT3-1 | 6 % Al; 2,5 % Mo; 0,2 % Si; 0,5 % Fe; 2 % Cr | 1100— 1200 | 1050— 1100 | 12—14 | Упрочняются термической обработкой, обладают жаропрочностью, хорошо свариваются. Применяются для деталей газотурбинных двигателей в самолето- и ракетостроении |
| BT6 | 6 % Al; 4 % V | | 1000— 1050 | 14—16 | |

| Марка сплава | Содержание элементов, % | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | Применение |
|------------------------|------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|--|
| BT14 | 4,5 % Al; 13,9 % Mo; 1,0 % V | 1150— 1400 | 1080— 1300 | 6—10 | |
| Псевдо β -сплавы | | | | | |
| BT15 | 4 % Al; 11 % Cr; 8 % Mo | 130— 1500 | | 4—3 | Упрочняются термической обработкой, хорошо штамуются. Применение ограничено из-за плохой свариваемости и низких свойств в зоне шва |
| BT30 | 11 % Mo; 4,5 S; 5,5 % Zn | 1400— 1500 | | 7—11 | |

Примечание. Сплавы BT5-1, OT4 и BT8 приведены после отжига, остальные — после закалки и старения.

• литейные сплавы — отличаются хорошей жидкотекучестью, способностью заполнять формы сложной конфигурации. Недостаток — много литейных дефектов (ликвация, усадочные поры и раковины). Маркировка такая же, как и для деформируемых сплавов (*тот же состав*), но добавляется буква Л (табл. 10.9).

Таблица 10.9

Химический состав и свойства литейных сплавов титана

| Марка сплава | Содержание элементов, % | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | Применение |
|--------------|---|------------------|----------------------|--|
| ВТЛ1 | 5 % Al; 1 % Si | 850 | 5 | Данные сплавы применяются для фасонного литья. Они обладают жаропрочностью (до 400 °С), коррозионной стойкостью. Из этих сплавов отливают детали двигателей в самолето- и ракетостроении |
| ВТ5Л | 5 % Al | 700— 900 | 6—13 | |
| ВТ14Л | 5 % Al; 0,5 % Cr; 3 % Mo; 0,5 % Fe | 900 | 5 | |
| ВТ21Л | 6,6 % Al; 0,3 % Cr; 0,7 % Mo; 1,2 % V; 5 % Zr | 1000 | 4 | |

• порошковые сплавы — для изготовления крупных деталей сложной конфигурации по размерам, близким к чистовым методам порошковой металлургии из элементарных порошков (ЭП), предварительно легированных порошков (ПЛ) или методом быстрой кристаллизации (БК). Наиболее распространен способ легированных порошков. Этот метод позволяет при тех же эксплуатационных характеристиках, что и у литого или деформированного металла, добиться снижения до 50 % времени и стоимости изготовления деталей.

10.5. Магний и его сплавы

Магний — самый легкий конструкционный материал, используемый в промышленных масштабах. Его плотность ($1,7 \text{ г/см}^3$) составляет менее двух третей плотности алюминия.

Производство. Основным сырьем для получения магния являются карналлит ($\text{MgCl}_2 \cdot \text{KCl} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), магнезит (MgCO_3), доломит ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$), бишофит ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Аналогично алюминию основной способ производства магния — электролитический. Основная составляющая электролита — хлористый магний MgCl_2 , а для снижения температуры плавления электролита и повышения его электропроводности в него вводят NaCl , CaCl_2 , KCl и небольшие количества NaF и CaF_2 .

В электролизных ваннах получают черновой магний, который содержит 5 % примесей: металлические примеси (Fe , Na , K , Al , Ca) и неметаллические (MgCl_2 , KCl , NaCl , CaCl_2 , MgO). Магний рафинируют переплавкой с флюсами, охлаждают до 670°C и разливают в изложницы на чушки. Чистота магния МГ-1 составляет 99,92 %, а МГ-2 — 99,82 %.

Легирующие элементы Al , Zn , Mn образуют с магнием ограниченные твердые растворы. Изменение растворимости этих элементов позволяет упрочнять сплавы на основе магния закалкой с последующим старением. Кроме твердых растворов в магниевых сплавах присутствуют интерметаллидные фазы Mg_4Al , MgZn_2 , Mg_4Zn_2 , $\text{Mg}_4\text{Zn}_3\text{Al}$. Для повышения жаропрочности возможно дополнительное легирование церием, неодимом, литием. Марганец способствует повышению коррозионной стойкости магния за счет образования защитной пленки оксида магния и марганца и очистки сплава от железа. Церий и цирконий повышают также механические свойства за счет измельчения зерна.

Применение. Сплавы магния весят вчетверо меньше стали. Кроме того, магний прекрасно обрабатывается и может быть отлит и переделан любыми стандартными методами металлообработки (прокатка, штамповка, волочение, ковка, сварка, пайка, клепка). Особенно широко применяют сплавы магния с алюминием, цинком и марганцем. Ракеты, ядерные реакторы, детали моторов, корпуса вагонов, автобусов, легковых машин, колеса, отбойные молотки, пневмобуры, фото- и киноаппараты, очень мощные резервные электрические батареи — вот далеко не полный перечень приборов, узлов и деталей, где используют магниевые сплавы. Сплавы магния обладают низкой способностью поглощать тепловые нейтроны и не взаимодействуют с ураном. Применяются в самолето- и ракетостроении, атомной промышленности (трубчатые тепловыделяющие элементы ядерных реакторов). Магниевые сплавы подразделяются на деформируемые и литейные.

Деформируемые сплавы маркируются буквами МА, далее следует цифра, показывающая номер сплава, например МА21.

- Сплавы МА1 и МА8. Основной легирующий элемент — марганец; термической обработкой не упрочняются, структура α -твердого раствора; обладают хорошей технологичностью, коррозионной стойкостью. Применяют в самолетостроении для ненагруженных деталей.

- Сплавы МА5, МА21. Основные легирующие элементы — Al (4—9 %), Mn (0,15—0,5 %), Zn (0,2—2,0 %). Упрочняются термической обработкой (закалка, старение) за счет выделения фаз — Mg_4Al_3 и $Mg_3Zn_3Al_2$. Сплавы технологичны, хорошо свариваются, коррозионно-стойкие.

- Сплав МА12. Основной легирующий элемент — Nd (неодим). Обладает жаропрочностью из-за фазы Mg_9Nd . Применяют для работы до 300 °С.

Литейные сплавы маркируются буквами МЛ, далее следует цифра, показывающая номер сплава. Для этих сплавов характерны грубозернистая структура, а следовательно, и более низкие свойства.

- Сплавы МЛ5 и МЛ6 легированы Al (7,5—10 %), Mn (0,1—0,5 %), Zn (0,2—1,2 %). Кристаллизуются с образованием эвтектики ($\alpha + Mg_4Al_3$), после гомогенизации — структура α -раствора и не растворившиеся частицы Mg_4Al_3 . Применяют для сложных отливок в самолетостроении, ракетной технике, автомобилестроении (корпуса, колеса).

- Сплав МЛ12 легирован Zn (4,0—5,0 %) и Zr (0,6—1,1 %). Имеет высокие механические и технологические свойства ($\sigma_b = 230$ МПа). Может быть упрочнен термической обработкой (закалка с 400 °С, воздух, длительное старение при 150 °С). Повысить его механические свойства можно измельчением зерна (модифицированные мелом). Обладает коррозионной стойкостью и жаропрочностью. Применяют для отливок, деталей с хорошей герметичностью и прочностью при динамических нагрузках.

10.6. Порошковые материалы

Металлокерамика, или порошковая металлургия, — отрасль технологии, занимающаяся производством металлических порошков с диаметром частиц 0,5—500 мкм и получением из них методом прессования и последующего спекания полуфабрикатов или готовых изделий. Порошки из пластичных и легкоплавких металлов и сплавов получают способами, основанными на раздуве жидкого материала струей воды или газа. Механическим путем (измельчением в шаровых или вибрационных мельницах), как правило, получают порошки из отходов основного производства. Режимы и технология изготовления порошков приведены в специальной справочной литературе.

Основными технологическими свойствами порошков являются текучесть, прессуемость и спекаемость.

Текучесть — способность порошка заполнять форму, которая ухудшается с уменьшением размеров частиц порошка и повышением влаж-

ности. Количественной оценкой текучести является скорость [мм·с⁻¹] вытекания порошка через отверстие диаметром 1,5—4,0 мм.

Прессуемость — способность порошка уплотняться под действием внешней нагрузки и не разрушаться за счет сцепления частиц — зависит от пластичности материала частиц, их размеров и формы. Повысить прессуемость можно введением в состав порошка поверхностно-активных веществ.

Спекаемость — прочность сцепления частиц после термической обработки полуфабрикатов или готовых изделий.

Методом порошковой металлургии получают различные сплавы.

- Пористые сплавы, в которых после окончания обработки сохраняется 10—30 % остаточной пористости между частицами порошка.
- Компактные сплавы, в которых после обработки остаточная пористость не превышает 1—5 %.
- Антифрикционные сплавы (табл. 10.10) изготавливают из порошков как черных, так и цветных металлов с добавками графита, который заполняет поры и является твердой смазкой.
- Фрикционные сплавы для тормозных устройств с хорошей износостойкостью и высоким коэффициентом трения (см. табл. 10.10). Из этих материалов изготавливаются изделия в форме дисков, колодок, накладок, лент и т. д.
- Конструкционные материалы. Наиболее часты композиции на основе железа. Марки порошковых сталей — СПХ17Н2, СПН12Х5М3Т, СПХ23Н18 и др. (СП — сталь порошковая). Детали машин — шестерни, плоские рычаги, храповики, сепараторы подшипников и т. д. из порошковых сталей прессуют практически с окончательными размерами, что дает большой экономический эффект. Возможно создание новых композиций сплавов нестандартного химического состава с новыми свойствами.

- Керамические твердые сплавы отличаются большой твердостью и теплостойкостью при высокой прочности: ВК (WC + Co), ТК (WoTiC + Co), ТТК (WC + TiC + TaC + Co). Наиболее распространены марки: ВК6, ВК20 (6,2 % Co), ТЗОК6 (30 % TiC, 6 % Co), ТТ8К6 (TiC + TaC — 8 %, Co — 6 %). Применение твердых сплавов в виде наплавов на режущую кромку инструмента позволяет повысить стойкость инструмента.

- Сплавы с особыми свойствами. Электротехнические материалы из сплавов систем Al—Ni—Cu, Al—Co—Ni—Cu используют для изготовления контактов, сердечников, индукционных катушек и т. д. Магнитномягкие изделия получают из порошков системы Fe—Ni, ферромагнитные материалы (постоянные магниты) — из порошков системы Al—Ni—Co.

- Метод порошковой металлургии может быть рекомендован и для изготовления деталей простой формы (цилиндр, конус, зубчатые колеса), малой массы и небольших размеров, поверхность которых не должна иметь внутренних полостей, выемок и т. д.

Химический состав и механические свойства некоторых антифрикционных и фрикционных порошковых материалов

| Марка материала | Содержание элемента, % | | | | | Механические свойства | |
|---|------------------------|---------|-----------|------|-------------------------------------|---|--------|
| | Fe | гра-фит | Cu | Sn | другие | $\sigma_{\text{в}}$ кгс/ мм ² | НВ |
| Антифрикционные материалы на железной основе* | | | | | | | |
| ЖГр-1 | 99 | 1,0 | | | | 10—18 | 50—100 |
| ЖГр-3 | 97 | 3,0 | | | | 10 | 50—120 |
| ЖГр-7 | 93 | 7,0 | | | | 20—35 | 50—125 |
| ЖГр-2Д2,5 | 95,5 | 2,0 | | | 2,5 сульфидов | 20—30 | 50—125 |
| ЖГр-2Д10 | 88,2 | 1,8 | | | 10 сульфидов | — | — |
| Антифрикционные материалы на медной основе** | | | | | | | |
| БрОГрЮ-2 | | 2 | 88 | 10 | | 10—18 | 18—40 |
| БрОГр8-4 | | 4 | 86 | 10 | | 10—18 | 18—40 |
| Свинцовая бронза | | | 7—72 | 0—15 | 10,5—30 Рb | 25—30 | 5—6 |
| Фрикционные материалы | | | | | | | |
| ФМК-11 | Остальное | 9 | 15 | | 6 барита; 5 В ₄ С; 3 FeS | 3,5—4,5 | 65—110 |
| МКВ-50 | То же | 8 | 10 | | 5 SiC; 3 асбеста; 5 барита | 3—4 | 80—120 |
| МК-5 | 4 | 8 | Остальное | 10 | 8 Рb | — | 25—40 |

* Коэффициент трения по стали сухую и со смазкой 0,07—0,09. Железографит используют при рабочем давлении не более 100—150 кгс/см² и температуре 80—100 °С. Структура железографита — перлит.

** Коэффициент трения бронзографита по стали сухую 0,04—0,07 и со смазкой 0,05—0,007.

Процесс приготовления смеси состоит из разделения порошков по размерам частиц (50 мкм и больше), смешивания в специальных устройствах и предварительной обработки. В металлические порошки вводят технологические присадки различного назначения — пластификаторы (парафин, стеарин, олеиновую кислоту и др.), облегчающие процесс прессования и получения заготовки высокого качества; легкоплавкие присадки, улучшающие процесс спекания, и различные летучие вещества для получения деталей с заданной пористостью. Для повышения текучести порошок иногда предварительно *гранулируют*. Предварительную механическую или термическую обработку (например, отжиг) применяют для повышения технологических свойств порошков.

Способы формообразования заготовок и деталей — прессование (холодное, горячее, гидростатическое) и прокатка.

Холодное прессование. В пресс-форму 2 засыпают определенное количество подготовленного порошка 3 и прессуют пуансоном 1 (рис. 10.13). В процессе прессования увеличивается контакт между частицами, уменьшается пористость, деформируются или разрушаются отдельные частицы. Прочность получаемой заготовки обеспечивается силами механического сцепления частиц порошка, электростатическими силами притяжения и трения. С увеличением давления прессования прочность возрастает. Давление распределяется неравномерно по высоте прессуемой заготовки из-за влияния сил трения порошка о стенки пресс-формы. Это является причиной получения заготовок с различной прочностью и пористостью по высоте. В зависимости от размеров и сложности прессуемых заготовок применяют одно- и двустороннее прессование. Рабочие детали пресс-форм изготавливают из высоколегированных, инструментальных сталей и твердых сплавов.

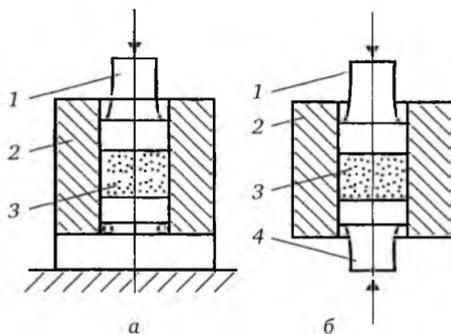


Рис. 10.13. Схемы холодного прессования:
а — одностороннее; б — двустороннее

Односторонним прессованием (рис. 10.13, а) изготавливают заготовки простой формы с отношением высоты к диаметру меньше единицы и заготовки типа втулок с отношением диаметра к толщине стенки меньше трех, вследствие чего обеспечивается равномерная плотность

получаемых заготовок. *Двусторонним прессованием* с нижним пуансоном 4 (рис. 10.13, б) получают заготовки сложной формы с равномерной плотностью. При извлечении детали из пресс-формы ее размеры увеличиваются. Величина упругого последействия в направлении прессования составляет 0,3—0,5 % и 0,1—0,2 % — в направлении, перпендикулярном прессованию.

При *горячем прессовании* технологически совмещаются процессы формообразования заготовки и получения готовой детали из твердых сплавов и специальных жаропрочных материалов спеканием. Недостатками горячего прессования являются низкая производительность, малая стойкость графитовых пресс-форм (4—7 прессовок), необходимость проведения процесса в среде защитных газов.

Гидростатическое прессование. Это прессование без дорогостоящих пресс-форм применяют для получения металлокерамических заготовок, к которым не предъявляют высоких требований по точности. Сущность процесса заключается в том, что порошок, заключенный в эластичную резиновую или металлическую оболочку, подвергают равномерному и всестороннему обжатию в специальных герметизированных камерах. При давлении жидкости до 3000 МПа обеспечивается получение заготовок высокой прочности и плотности.

Прокатка — один из наиболее производительных способов переработки металлокерамических материалов. Прокаткой получают ленты из различных материалов (в том числе и двухслойные) толщиной 0,02—3,0 мм и шириной до 300 мм из различных металлокерамических материалов (пористых, твердосплавных, фрикционных и др.). Применение валков определенной формы позволяет получить прутки различного профиля, в том числе и проволоку диаметром от 0,25 мм до нескольких миллиметров.

Спекание в электрических печах сопротивления или с индукционным нагревом проводят для повышения прочности предварительно полученных прессованием или прокаткой заготовок. В процессе спекания одновременно протекают такие процессы, как диффузия, восстановление поверхностных оксидов, рекристаллизация и др. Температура спекания составляет 0,6—0,9 температуры плавления порошка однокомпонентной системы или ниже температуры плавления основного материала для порошков, в состав которых входит несколько компонентов.

Процесс спекания рекомендуется проводить за три этапа: I — нагрев до температуры 150—200 °С (удаление влаги); II — нагрев до 0,5 температуры спекания (снятие упругих напряжений и активное сцепление частиц); III — окончательный нагрев до температуры спекания. Время выдержки после достижения температуры спекания *по всему сечению* составляет 30—90 мин.

Для предотвращения окисления спекают в нейтральных или защитных средах, а для повышения плотности и прочности получаемые заготовки повторно прессуют и спекают. Требуемой точности достигают

с помощью отделочных операций. Калибруют заготовки дополнительным прессованием в специальных стальных пресс-формах или продавливанием пруткового материала через калиброванное отверстие. При этом уплотняется поверхностный слой заготовки.

Обработку резанием (точение, сверление, фрезерование, нарезание резьбы и т. д.) применяют в тех случаях, когда прессованием нельзя получить детали заданных размеров и форм. Не рекомендуется применять обычные охлаждающие жидкости, которые, впитываясь в поры, вызывают коррозию. Пропитка маслом пористых заготовок перед обработкой также нежелательна, так как в процессе резания масло вытекает из пор и, нагреваясь, дымит. При обработке резанием используют инструмент, оснащенный пластинками из твердого сплава или алмаза (см. параграф 11.5). Для сохранения пористости при обработке необходимо применять хорошо заточенный и доведенный инструмент.

10.7. Аморфные сплавы

Методы получения аморфных (некристаллических) сплавов основаны на применении очень высоких скоростей охлаждения ($\geq 10^6$ град/с) для подавления диффузии атомов — закалка расплава, напыление пленок на охлажденную подложку, электрическое осаждение, катодное распыление, разрушение кристаллической решетки (ионная имплантация). При этом не успевают образоваться зародыши кристаллов и фиксируется структура жидкого металла.

В структуре аморфных сплавов сохраняется ближний порядок, подобно жидкому сплаву, атомная структура которого не имеет кристаллического строения. Легче всего получить аморфное состояние в сплавах на основе железа, никеля, кобальта, хрома. К ним добавляют аморфизирующие элементы — фосфор, кремний, бор, германий и др. В аморфном состоянии могут находиться не только вещества, состоящие из отдельных атомов и обычных молекул, как стекла (рис. 10.14) и жидкости (низкомолекулярные соединения), но и вещества, состоящие из длинноцепочечных макромолекул — высокомолекулярные соединения, или полимеры.

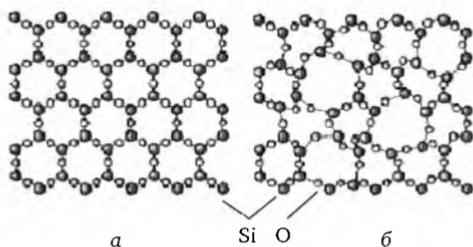


Рис. 10.14. Расположение молекул оксида кремния SiO_2 (кремнекислородный тетраэдр) в кристаллическом (а) и аморфном кварце (б)

Механические свойства аморфных материалов — сочетание высокой прочности, близкой к теоретической, с достаточной пластичностью. Характерная особенность аморфных сплавов — высокий предел текучести (табл. 10.11) при почти полном отсутствии деформационного упрочнения — хрупки при растяжении, но пластичны при изгибе и сжатии, что позволяет подвергать их холодной прокатке.

Таблица 10.11

Состав и свойства некоторых аморфных сплавов

| Состав сплава | HV, МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа |
|---|---------|----------------------|------------------|
| $\text{Cu}_{57}\text{Zn}_{43}$ | 5400 | 1380 | 2000 |
| $\text{Ti}_{50}\text{Be}_{40}\text{Zn}_{10}$ | 7400 | 2300 | |
| $\text{Fe}_{80}\text{B}_{20}$ | 11 000 | 3700 | |
| $\text{Fe}_{72}\text{Cr}_8\text{P}_{13}\text{C}_7$ | 8500 | 3420 | |
| $\text{Fe}_{60}\text{Ni}_{20}\text{P}_{13}\text{C}_7$ | 6600 | 1900 | 2500 |
| $\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$ | 13 000 | 4500 | |

Широкому применению аморфных металлов (табл. 10.12) препятствуют высокая себестоимость, сравнительно низкая термическая устойчивость, а также малые размеры получаемых лент, проволоки, гранул. Кроме того, применение аморфных сплавов в конструкциях ограничено из-за их низкой свариваемости.

Таблица 10.12

Свойства и области применения аморфных металлических материалов

| Состав сплава | Свойство | Применение |
|---|--|---|
| $\text{Fe}_{75}\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$ | Высокая прочность, высокая вязкость | Проволока, армирующие материалы, пружины, режущий инструмент |
| $\text{Fe}_{45}\text{Cr}_{25}\text{Mo}_{10}\text{P}_{13}\text{C}_7$ | Высокая коррозионная стойкость | Электродные материалы, фильтры для работы в растворах кислот, морской воде, сточных водах |
| $\text{Fe}_{81}\text{B}_{15}\text{C}_2$ | Высокая магнитная индукция насыщения, низкие потери | Сердечники трансформаторов, преобразователи, дроссели |
| $\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$ | Высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила | Магнитные головки и экраны, магнетометры, сигнальные устройства |
| $\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$ | Постоянство модулей упругости и температурного коэффициента линейного расширения | Инварные и элинварные материалы |

10.8. Наноструктурные материалы

Нанотехнологии сегодня одно из самых быстро развивающихся и востребованных направлений современного материаловедения. Основной целью Программы развития в Российской Федерации работ в области нанотехнологий и наноматериалов до 2015 года, принятой в 2006 г., является «...создание и развитие научной, технической и технологической базы в области нанотехнологий и наноматериалов в Российской Федерации, обеспечивающей достижение и поддержание паритета с ведущими государствами в ряде ключевых областей науки и техники, ресурсо- и энергосбережения, в создании экологически адаптированных современных промышленных производств, в здравоохранении и производстве продуктов питания, а также необходимый уровень обороноспособности и безопасности государства».

Сама десятичная приставка «нано»- (от греч. *nanos* — карлик) означает одну миллиардную часть чего-либо. Таким образом, чисто формально в сферу этой деятельности попадают объекты с размерами R (хотя бы вдоль одной координаты), измеряемыми нанометрами. Реально диапазон рассматриваемых объектов изменяется от отдельных атомов ($R < 0,1$ нм) до их конгломератов и органических молекул, содержащих свыше 100 атомов и имеющих размеры гораздо более 1 мкм в одном или двух измерениях. Принципиально важно, что они состоят из счетного числа атомов, и, следовательно, в них уже в значительной степени проявляются дискретная атомно-молекулярная структура вещества и (или) квантовые закономерности его поведения.

В силу действия различных причин (как чисто геометрических, так и физических) вместе с уменьшением размеров падает и характерное время протекания разнообразных процессов в системе, т. е. возрастает ее потенциальное быстродействие. Например, в серийно производимых компьютерах достигнуто быстродействие (время, затрачиваемое на одну элементарную операцию) около 1 нс, и его можно уменьшить на несколько порядков величины в ряде наноструктур. Но существующие сейчас массовые технологии производства практически достигли своих теоретических пределов.

Общепризнано, что первое упоминание методов, которые впоследствии будут названы нанотехнологией, связывают с выступлением в 1959 г. американского физика Р. Фейнмана на ежегодной встрече Американского физического общества, где рассматривались возможности механического перемещения одиночных атомов при помощи манипулятора соответствующего размера, причем сам процесс не должен был противоречить известным физическим законам. Но при этом необходимо учитывать, что в устройстве такого механизма силы гравитации, действующие в макромире, будут оказывать все меньшее влияние, а силы межмолекулярных взаимодействий и ван-дер-ваальсовы силы будут все больше влиять на его работу.

Новая парадигма (греч. *παράδειγμα* — пример, модель, образец) в технологии — «снизу вверх», вытесняющая и дополняющая старую — «сверху вниз» (т. е. от большой заготовки — к готовому изделию путем отсечения лишнего материала) базируется на глубоких знаниях свойств каждого атома из таблицы Менделеева и использует силы притяжения между ними (см. рис. 2.14, 2.15) при нанометровых расстояниях. В результате действия этих сил могут образовываться атомные конфигурации, стабильность которых определяется типом и прочностью внутренних связей, абсолютной температурой и характером окружения. Чем меньше частица и ниже температура, тем сильнее проявляются ее квантовые качества. Свойства наночастиц сильно изменяются по сравнению с макрочастицами того же вещества, как правило, уже при размерах $R_c = 10 \div 100$ нм. Для различных характеристик (механических, электрических, магнитных, химических) этот критический размер может быть разным, как и характер их изменений (монотонный-немонотонный) при $R < R_c$ (рис. 10.15).

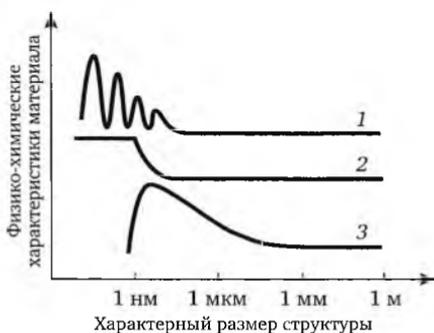


Рис. 10.15. Примеры специфического поведения вещества на субмикронном масштабном уровне и основные причины специфики нанобъектов:

1 — осциллирующий характер изменения свойств; 2 — рост характеристики с насыщением; 3 — рост характеристики с максимумом

Общеизвестно, что доля атомов α , находящихся в тонком приповерхностном слое (~ 1 нм), растет с уменьшением размера частички вещества R , поскольку $\alpha \sim S/V \sim R^2/R^3 \sim 1/R$ (где S — поверхность частички, V — ее объем) и поверхностные атомы обладают свойствами, отличающимися от «объемных», поскольку они связаны с соседями по-иному, нежели в объеме. В результате на поверхности может произойти атомная реконструкция и возникнет другой порядок расположения атомов. Для атомов, оказавшихся на краях моноатомных террас, уступов и впадин на них, где координационные числа значительно ниже, чем в объеме, возникают совершенно особые условия. Взаимодействие электронов со свободной поверхностью порождает специфические приповерхностные состояния (уровни Тамма). Поверхность также служит стоком (причем почти бесконечной емкости) для большинства дефектов кристаллической структуры. Все это

вместе взятое заставляет рассматривать приповерхностный слой как некое новое состояние вещества.

При рассмотрении любого процесса переноса (протекание электрического тока, теплопроводность, пластическую деформацию и т. п.) носителям приписывается некоторая эффективная длина свободного пробега R_f . При $R \gg R_f$ рассеяние носителей происходит в объеме и слабо зависит от геометрии объекта, а при $R < R_f$ все характеристики переноса начинают сильно зависеть от размеров образца. Наконец, если объект имеет атомарный масштаб в одном, двух или трех направлениях, его свойства могут резко отличаться от объемных свойств для того же материала, из-за проявления в поведении квантовых закономерностей. Например, когда хотя бы один из размеров объекта становится соизмеримым с длиной волны де Бройля для электронов, вдоль этого направления начинается размерное квантование. Для анализа свойств нанобъектов используют широкий спектр физических подходов и методов.

Всего за несколько последних лет разработаны сотни наноструктурированных продуктов конструкционного и функционального назначения и реализованы десятки способов их получения и серийного производства: высокопрочные нанокристаллические и аморфные материалы, тонкопленочные и гетероструктурные компоненты микроэлектроники и оптоэлектроники следующего поколения, магнитомягкие и магнитотвердые материалы, нанопористые материалы для химической и нефтехимической промышленности (катализаторы, адсорбенты, молекулярные фильтры и сепараторы), интегрированные микроэлектромеханические устройства, негорючие наноконкомпозиты на полимерной основе, топливные элементы, и другие преобразователи энергии, биосовместимые ткани для трансплантации, лекарственные препараты.

Наиболее массовым является производство высокопрочных конструкционных материалов, главным образом — металлов и сплавов. Известно, что прочность материалов определяется химическим составом и реальной атомарной структурой, т. е. наличием или отсутствием кристаллической решетки и всем спектром ее несовершенств (рис. 10.16). Высоких прочностных показателей можно добиваться двумя прямо противоположными способами: снижая концентрацию дефектов структуры (в пределе приближаясь к идеальному монокристаллическому состоянию) или, наоборот, увеличивая ее вплоть до создания мелкодисперсного нанокристаллического или аморфного состояния. Оба пути широко используют в современном физическом материаловедении и производстве.

Разработаны составы и технологии нанесения сверхтвердых покрытий толщиной около 1 мкм, уступающих по твердости только алмазу¹. При этом резко увеличиваются износостойкость режущего инстру-

¹ В 2005 г. в Байрейтском университете (Германия) синтезировали материал, названный ADNR (*aggregated diamond nanorods* — агрегированные наностержни алмаза) и превосходящий на 10 % твердость алмаза. Он состоит из сверхтонких алмазных стержней, «расположенных» случайным образом, со средней длиной до 1 мкм, что в 200 раз больше среднего диаметра. Пока производство ADNR намного дороже добычи или синтеза обычных алмазов.

мента, жаростойкость, коррозионная стойкость изделия, сделанного из сравнительно дешевого материала. По пленочной технологии можно создавать не только сплошные или островковые покрытия, но и щетинообразные, с упорядоченным расположением нановорсинок одинаковой толщины и высоты. Они могут работать как сенсоры, элементы экранов высокого разрешения и в других приложениях.



Рис. 10.16. Схематическая зависимость прочности от плотности атомарных дефектов Q в материале; G — модуль сдвига

Способность углерода образовывать цепочки $—C—C—C—$ используется природой для создания биополимеров, а человеком — синтетических полимеров и разнообразных пластмасс. Стабильные фуллерены C_{60} и C_{70} (кластеры или многоатомные молекулы) углерода имеют необычную симметрию (см. рис. 7.2, $z — e$) и уникальные свойства. Все ковалентные связи в них насыщены, и между собой они могут взаимодействовать только благодаря слабым ван-дер-ваальсовым силам. К каждой такой молекуле можно «привить» другие атомы и молекулы, можно поместить чужеродный атом в центральную полость фуллереновой молекулы, как в суперпрочный контейнер, или полимеризовать их, раскрыв внутренние связи, и т. д.

Впоследствии научились выращивать одно- и многослойные углеродные нанотрубки. У однослойных нанотрубок полусферические вершины далеки от идеальной полусферы (рис. 10.17), многослойные нанотрубки отличаются от однослойных большим разнообразием форм и конфигураций.

В 2007 г. в Калифорнийском университете в Лос-Анжелесе был получен самый твердый после алмаза материал — **диборид рения** (ReB_2) — атомы бора, образуя короткие ковалентные связи, внедряются между атомами рения, минимально изменяя гексагональную кристаллическую структуру металла. Важное преимущество диборида рения состоит в том, что производство этого сверхтвердого материала не требует высокого давления и оказывается весьма недорогим.

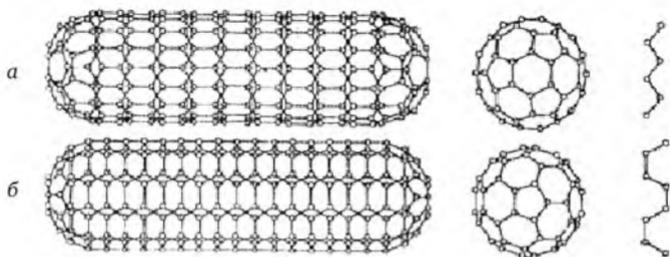


Рис. 10.17. Структура нанотрубок: зигзагная (а) и кресельная (б)

Крайне важно, что свойствами нанотрубок удастся управлять, изменяя их хиральность — скрученность решетки относительно продольной оси. При этом легко можно получить проволоку нанометрового диаметра как с металлическим типом проводимости, так и с запрещенной зоной проводимости заданной ширины. Соединение двух таких нанотрубок образует диод, а трубка, лежащая на поверхности окисленной кремниевой пластинки, — канал полевого транзистора. Такие наноэлектронные устройства уже созданы и показали свою работоспособность. Кроме того, нанотрубки могут использоваться как сенсоры, элементы экранов дисплеев сверхвысокого разрешения.

Нанотрубки с регулируемым внутренним диаметром служат основой идеальных молекулярных сит высокой селективности и газопроницаемости, контейнеров для хранения газообразного топлива, катализаторов. На рис. 10.18 показан фрагмент мембраны толщиной 50 мкм из нанопроволоки, сделанной в США из оксида марганца, способной впитывать объем органических жидкостей, вес которых в 20 раз превышает вес самой мембраны. Материал можно безопасно нагревать до 600 °С (в таких условиях органические вещества разлагаются), что позволяет многократно использовать мембрану для очистки воды от нефтяных пятен.

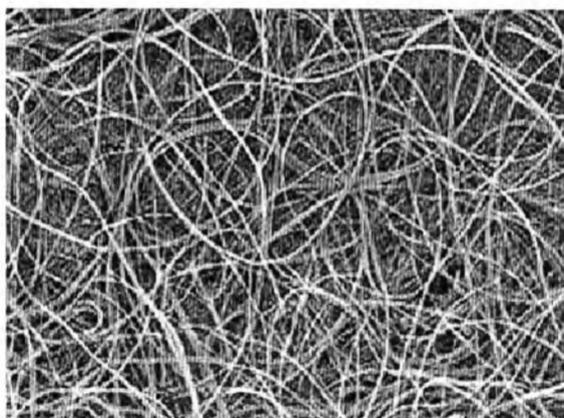


Рис. 10.18. Мембрана из нанопроволоки, обладающая способностью впитывать большие количества органических жидкостей и при этом не впитывать воду

Основные методы создания тонкопленочных структур можно разбить на два больших класса, базирующихся на физическом (в первую очередь, молекулярно-лучевой эпитаксии) и химическом осаждении. При малой толщине (до нескольких атомных слоев) двумерная подвижность осаждаемых на подложку атомов может быть очень высокой. Например, в исследовательском центре компании *IBM*, последовательно перемещая атомы на поверхности монокристалла никеля, выложили логотип компании, используя 35 атомов Xe (рис. 10.19).

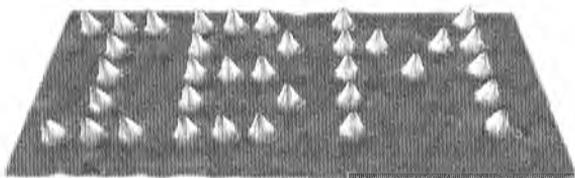


Рис. 10.19. 35 атомов ксенона на пластинке из никеля (1990 г.)

В результате быстрой диффузии по поверхности происходит самосборка нанообъектов, обладающих ярко выраженными квантовыми свойствами: образуются квантовые точки, квантовые ямы, квантовые проволоки, кольца и др. Если систему квантовых точек покрыть слоем инертного материала, а затем снова напылить активный материал, то опять образуются островки, самоупорядочивающиеся на поверхности и даже скоррелированные с положением их предшественников. Повторяя такие процедуры множество раз, можно получить объемно упорядоченные структуры (квазирешетки) из квантовых ям или точек, называемые гетероструктурами, и сделать на их основе лазерные источники света, фотоприемники (в том числе инфракрасного излучения в области длин волн 8—14 мкм, соответствующих максимуму теплового излучения человеческого тела), накопители информации. Вся современная микроэлектроника базируется на планарных полупроводниковых технологиях, которые дают возможность создавать самые разнообразные многослойные тонкопленочные структуры с функциями сенсоров, логической и арифметической обработки сигнала, его хранения и передачи по электронным или оптическим линиям связи.

Появление наноструктур потребовало новых методов и средств, позволяющих изучать их свойства. Сейчас известны десятки различных вариантов зондовой сканирующей микроскопии (*SPM* — *scanning probe microscopy*). Как следует из названия, общее у этих методов — наличие зонда (чаще всего это хорошо заостренная игла с радиусом при вершине ~ 10 нм) и сканирующего механизма, способного перемещать его над поверхностью образца в трех измерениях. Все известные в настоящее время методы *SPM* можно условно разбить на три основные группы:

- сканирующая туннельная микроскопия; в ней между электропроводящим острием и образцом приложено небольшое напряжение ($\sim 0,01$ —

10 В) и регистрируется туннельный ток в зазоре, зависящий от свойств и расположения атомов на исследуемой поверхности образца;

- атомно-силовая микроскопия; в ней регистрируют изменения силы притяжения иглы к поверхности от точки к точке. Игла расположена на конце консольной балочки (кантилевера), имеющей известную жесткость и способной изгибаться под действием небольших ван-дер-ваальсовых сил, которые возникают между исследуемой поверхностью и кончиком острия;

- ближнепольная оптическая микроскопия; в ней зондом служит оптический волновод (световолокно), сужающийся на том конце, который обращен к образцу, до диаметра меньше длины волны света. Световая волна при этом не выходит из волновода на большое расстояние, а лишь слегка «вываливается» из его кончика. На другом конце волновода установлены лазер и приемник отраженного от свободного торца света. При малом расстоянии между исследуемой поверхностью и кончиком зонда амплитуда и фаза отраженной световой волны меняются, что и служит сигналом, используемым при построении трехмерного изображения поверхности.

В лучших модификациях туннельной и атомно-силовой микроскопии удается обеспечить атомное разрешение при комнатной, повышенной и криогенной температуре, на воздухе, в вакууме и в жидкости, в условиях действия сильных магнитных и электрических полей, СВЧ- и оптического облучения и т. п.

Зондовыми методами можно исследовать самые разнообразные материалы: проводящие, диэлектрические, биологические и др. без трудоемкой подготовки образцов. Они могут использоваться для локального определения атомных конфигураций, магнитных, электрических, тепловых, химических и других свойств поверхности. Особенно интересны попытки зарегистрировать спин-зависимые явления, определяющие величину туннельного тока в зависимости от поляризации одного-единственного электрона в атоме на исследуемой поверхности. Это прямой путь к решению задач одноэлектроники и спинтроники.

Очень важно, что помимо исследовательских функций сканирующая туннельная микроскопия может выполнять еще и активные — обеспечивать захват отдельных атомов, перенос их в новую позицию, атомарную сборку проводников шириной в один атом, локальные химические реакции, манипулирование отдельными молекулами.

Важным ограничением для использования наноструктурных конструкционных материалов является их склонность к коррозии из-за очень большой объемной доли границ зерен, поэтому они не могут работать в условиях, способствующих такой коррозии (например, высокие температуры в сочетании с коррозионными воздействиями, радиация).

Другим ограничением является *нестабильность* структуры наноматериалов, что осложняет получение материалов с заданной структурой и распределением компонентов — при термических, радиационных

и деформационных воздействиях неизбежны рекристаллизационные, релаксационные, сегрегационные и гомогенизационные процессы, а также явления распада, спекания и заплывания нанопор и нанокапилляров, аморфизации или кристаллизации.

Контрольные вопросы и задания

1. Какие металлы относятся к цветным металлам, чем они отличаются от черных?
2. Какие сплавы на основе алюминия относятся к литейным сплавам? Каковы особенности структуры, свойства, определяющие их литейные характеристики?
3. Какие сплавы на основе алюминия упрочняются термической обработкой?
4. Какие сплавы на основе алюминия являются деформируемыми?
5. Как подразделяются сплавы на основе меди?
6. Как маркируются бронзы?
7. Как маркируются латуни? Какие латуни относятся к деформируемым?
8. Что такое баббиты? Назовите основные марки, области применения.
9. Маркировка титана, примеси в титане, влияние примесей на свойства титана, полиморфизм титана.
10. Маркировка титановых сплавов, их применение, обработка.
11. Назовите порошковые сплавы на основе алюминия и титана; их марки, применение.
12. Магний, классификация сплавов на основе магния.
13. Что такое металлокерамика?
14. Основные технологические свойства металлических порошков.
15. Изделия и полуфабрикаты, получаемые методами порошковой металлургии.
16. Особенности аморфных сплавов.
17. Основы классификации наноматериалов.

Глава 11

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Неметаллические материалы по происхождению разделяют на *природные* (асбест, горные породы, натуральный каучук, древесина, стекло, кожа, хлопок, смолы и др.), *искусственные* (получают из природных материалов — целлофан, вискоза, сложные эфиры и др.) и *синтетические* (композиции на основе низкомолекулярных соединений — полимеров). Неметаллические материалы являются не только заменителями металлов, но и применяются как самостоятельные, иногда даже незаменимые материалы. Например, в синтетических неметаллических материалах нет свободных электронов (другой тип химической связи, чем у металлов), поэтому они являются электрическими изоляторами и полупроводниковыми, радиопрозрачными материалами. Отдельные материалы обладают высокой механической прочностью, термической и химической стойкостью, эластичностью при низкой плотности, они коррозионностойки, обладают тепло- и звукоизоляцией.

11.1. Классификация полимеров

Основу полимеров составляют макромолекулы, которые состоят из многократно повторяющихся элементарных звеньев одного и того же химического состава, соединенных между собой ковалентными связями. По форме макромолекулы полимеры делят на линейные, лестничные и пространственные. Строение макромолекулы определяет своеобразие свойств полимеров.

Линейные (цеповидные) и разветвленные полимеры (рис. 11, а, б) — длинные зигзагообразные или закрученные в спираль цепочки. Обеспечивают свойства эластичности, способность размягчаться при нагреве и затвердевать при охлаждении.

Лестничные полимеры (рис. 11.1, в) состоят из двух цепей, соединенных химическими связями. Основная цепь более жесткая, прочная. Отличаются повышенной теплостойкостью, большой жесткостью.

Пространственные полимеры (*сетчатой* или *паркетной* формы, рис. 11.1, г, д) образуются при соединении (сшивке) макромолекул в поперечном направлении прочными химическими связями. Они имеют повышенную твердость, теплостойкость, нерастворимость в органических растворителях.

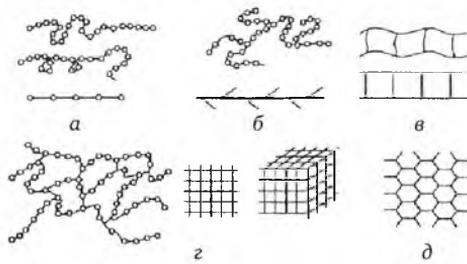


Рис. 11.1. **Формы макромолекул полимеров:**

а — линейная; б — разветвленная; в — лестничная; г — пространственная, сетчатая; д — паркетная

Макромолекулы в полимерах расположены не хаотично, а имеют упорядоченное взаимное расположение. Структуры, возникающие в результате различной укладки макромолекул, называются *надмолекулярными* и зависят от сил притяжения между молекулами, теплового движения молекул (поворот частей молекул относительно друг друга) и их гибкости. По надмолекулярной структуре полимеры подразделяются на аморфные и кристаллические.

Аморфные полимеры однофазные и построены из линейных молекул, собранных в пачки из многих рядов макромолекул, расположенных друг за другом, которые способны перемещаться относительно соседних элементов структуры. Они могут образовывать клубок свернутых цепей — глобул, которые придают полимеру невысокие механические свойства, так как возможно хрупкое разрушение по границам глобул. При нагреве глобулы могут распрямиться в линейные образования, что повышает механические свойства полимера. Структура аморфных полимеров нестабильная, флуктуационная и сохраняется короткое время.

Кристаллические полимеры образуются при многократном повороте на 180°C гибких пачек макромолекул (рис. 11.2, а), которые укладываются в виде ленты, и, присоединяясь друг к другу плоскими сторонами, образуют пластины. Эти пластины накладываются друг на друга и формируют правильный кристалл. Возможно образование сферолитов, состоящих из лучей, образованных чередованием кристаллических и аморфных участков (рис. 11.2, б).

По отношению к электрическому полю полимеры подразделяются на *полярные* и *неполярные*. Полярность полимера можно оценить по величине относительной диэлектрической проницаемости ϵ (у полярных полимеров $\epsilon > 3,5$). Полярные полимеры имеют повышенную прочность, жесткость, но низкую морозостойкость (хрупкость уже при $-10...20^\circ \text{C}$), их можно сваривать током высокой частоты. Неполярные полимеры (на основе углеводородов) представляют собой высококачественные диэлектрики, обладают хорошей морозостойкостью.

Свойства полимеров (механические, упругие и др.) зависят, главным образом, от их физического состояния при определенной температу-

ре — стеклообразного, высокоэластичного или вязкотекучего (участки I, II и III на рис. 11.3).

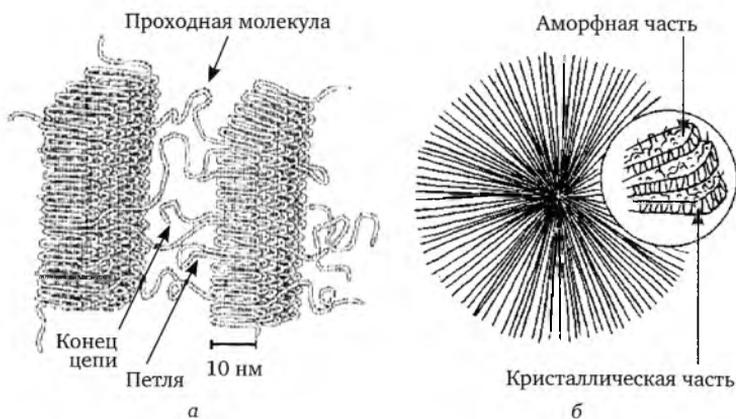


Рис. 11.2. Виды кристаллических полимеров:
а — ламелла; б — сферолит

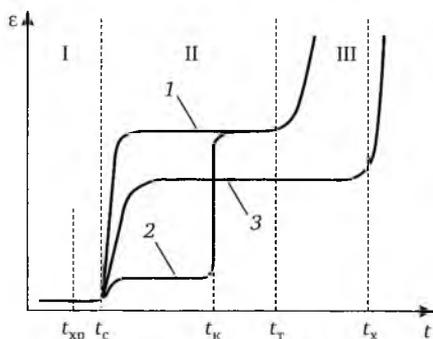


Рис. 11.3. Термомеханические кривые некристаллического линейного (1), кристаллического (2) и редкосетчатого (3) полимеров:

$t_{хр}$, t_c , t_k , t_T , t_x — температуры хрупкости, стеклования, кристаллизации, начала вязкого течения и начала химического разложения, соответственно; I, II, III — участки стеклообразного, высокоэластичного и вязкотекучего состояния

Стеклообразное твердое состояние (аморфное, кристаллическое) имеет фиксированное расположение макромолекул. Переход полимера в подобное состояние происходит при определенной температуре t_c (температура стеклования), которая и определяет теплостойкость и морозоустойчивость полимера. В стеклообразном состоянии находятся полимеры с пространственной сетчатой структурой.

Высокоэластичное состояние возможно при температуре выше температуры стеклования t_c и характеризуется подвижностью звеньев или групп звеньев в цепи макромолекул при отсутствии перемещения цепи в целом, даже при небольших нагрузках. Макромолекулы способны только изгибаться.

С увеличением температуры полимер переходит в вязкотекучее, подобное жидкому, состояние, но отличается от него повышенной вязкостью. Энергия теплового движения макромолекул превышает силы межмолекулярного взаимодействия, и макромолекулы свободно перемещаются под действием даже небольших усилий.

Различия в физическом состоянии полимеров с изменением температуры наглядно проявляются при тепловой деформации. Графическая зависимость деформации, которая развивается за определенное время при заданном напряжении, от температуры называется *термомеханической кривой полимера* (см. рис. 11.3).

Термомеханическая кривая состоит из трех участков, соответствующих разным физическим состояниям полимера: I — стеклообразное, II — высокоэластичное, III — вязкотекучее. Для линейного некристаллического полимера (см. рис. 11.3, кривая 1) в области I наблюдается упругая деформация. Атомы и молекулы полимера, имеющего температуру меньше t_c , совершают только колебательные движения около положения равновесия. Материал при деформировании при этих температурах имеет хорошие упругие свойства. Точка t_{xp} , лежащая ниже точки t_c , является температурой хрупкости. При температурах ниже t_{xp} полимер приобретает плотную структуру с прочными межмолекулярными связями и разрушается хрупко.

Повышение температуры выше t_c приводит к движению макромолекул, выпрямлению скрученных участков и ориентированию макромолекул вдоль приложенной силы. Материал деформируется упруго, после снятия нагрузки макромолекулы занимают первоначальную форму под действием сил межмолекулярного взаимодействия. Вблизи температуры текучести t_t возможна пластическая деформация. При повышении температуры выше t_t полимер переходит в вязкотекучее состояние. Отдельные фрагменты макромолекул поворачиваются, и макромолекула получает подвижность. Полимер ведет себя подобно жидкости.

Сетчатые полимеры (*типа резин*) имеют кривую типа 3 (см. рис. 11.3). Узлы сетки препятствуют перемещению полимерных цепей, поэтому с повышением температуры нет вязкого течения, расширяется высокоэластичная область, ее верхней границей становится температура химического разложения полимера t_x .

Каждому из этих трех физических состояний (I, II и III) соответствует определенная область технического применения полимера. Производство волокон, конструкционных деталей требует стеклообразного состояния полимера, резиновая промышленность — высокоэластичного в широком интервале температур и т. д.

В полимерах в стеклообразном состоянии при действии больших напряжений могут возникнуть деформации, по своей природе близкие к высокоэластичным. При температурах около t_c (см. рис. 11.3) наблюдается предел *вынужденной эластичности* (максимум на кривой на рис. 11.4). Выше температуры t_c деформация обратима, т. е. образец полностью восстанавливается до первоначального размера. Вынужден-

ная деформация развивается из-за распрямления и вытягивания скрученных макромолекул при нагрузке, материал течет, образуется «шейка», которая на участке $a - b$ распространяется на весь образец.



Рис. 11.4. Диаграмма растяжения для полимера в стеклообразном состоянии:

I — область упругой деформации; II — область высокоэластичного состояния;

$\sigma_{\text{вын. эл}}$ — предел вынужденной эластичности

Кристаллические полимеры (см. рис. 11.3, кривая 2) ниже температуры t_k — твердые, но имеют разную жесткость. При температуре t_k кристаллическая часть полимера плавится и полимер практически скачком достигает участка кривой 1, отвечающего высокоэластичному состоянию. Для кристаллических полимеров (полиэтилен, полиамиды) имеется четкий переход на разных этапах деформирования (рис. 11.5). Деформация, полученная на участке C, не исчезает после снятия нагрузки и достигает сотни процентов, потому что кристаллы приобретают другую форму (образуется «шейка») и ориентируются в одном направлении. Изменение структуры полимера в процессе деформирования называется *рекристаллизацией*.

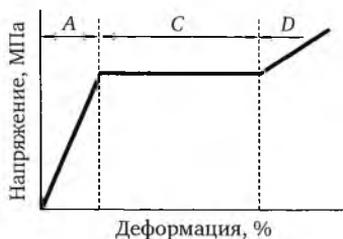


Рис. 11.5. Зависимость напряжения от деформации для кристаллического полимера:

A — удлинение пропорционально действующей силе; C — внезапное образование «шейки» по всему образцу; D — стадия нарастающего напряжения и разрыва

Механические свойства полимеров зависят от времени действия нагрузки и скорости ее приложения. Это связано с процессом релаксации, т. е. переходом полимеров из неравновесного состояния, вызванного деформацией, в равновесное.

При приложении нагрузки к полимеру равновесное состояние макромолекул нарушается: происходят раскручивание и распрямление цепей, взаимное перемещение макромолекул, их пачек, других макромолекулярных структур. При снятии нагрузки процесс пойдет в сто-

рону восстановления свернутости молекул. Для достижения равновесия при деформировании (релаксации) требуется длительное время (от нескольких суток до месяцев). Процессы релаксации в полимерах протекают всегда, их вклад в кинетику и величину деформации определяется соотношением времени приложения нагрузки t и временем релаксации t_p .

Для линейных полимеров напряжение падает до нуля из-за перемещения макромолекул. Для сетчатых полимеров напряжение стремится к равновесному значению в бесконечности, так как наличие химических связей между макромолекулами не допускает их смещения. Процесс релаксации полимеров при действии постоянного напряжения, т. е. процесс ползучести в полимерах, представлен на рис. 11.6. В линейных полимерах (1) по истечению времени τ_1 продолжается деформация ($B'C'$), а в сетчатых (2) устанавливается предельная деформация (BC). После снятия нагрузки (время τ_2) упругая деформация ($CD, C'D'$, OA) снимается, а высокоэластичная релаксируется в сетчатых полимерах до нуля. В линейных полимерах остается остаточная деформация $\varepsilon_{пл}$, так как идет процесс необратимого вязкого течения.

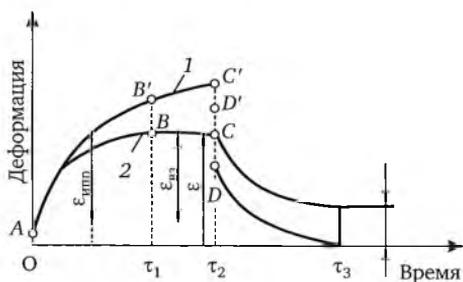


Рис. 11.6. Зависимость деформации от времени при постоянном напряжении: 1 — линейный полимер; 2 — сетчатый полимер

11.2. Пластические массы

Пластические массы (пластмассы, пластики) — материалы, содержащие в своем составе полимер, который в период формирования изделий находится в вязкотекучем или высокоэластичном состоянии, а при эксплуатации — в стеклообразном или кристаллическом состоянии. В зависимости от характера процессов, сопутствующих формированию изделий, пластические массы делят на *термопласты* и *реактопласты*.

Термопласты. При формировании изделий из термопластов не происходит отверждения, и материал в изделии сохраняет способность вновь переходить в вязкотекучее состояние. В основе термопластов лежат полимеры линейных и разветвленных структур (см. рис. 11.1, а, б), они способны работать до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, а специальные термостойкие полимеры — до $400\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Предел прочности термопластов — $10\text{--}100\text{ МПа}$, модуль упругости — $(1,8\text{--}3,5)\cdot 10^3\text{ МПа}$. Длительное статическое на-

гружение снижает прочность термопласта из-за появления вынужденно-эластической деформации. Пластические массы обычно содержат различные — наполнители, красители, пластификаторы, отвердители и т. д.

Наполнители в пластмассах составляют от 40 до 70 % состава и придают прочность, жесткость, твердость, антифрикционные свойства. Наполнителем могут быть ткань, бумага, волокнистые и порошковые материалы. В зависимости от наполнителя различают пресс-порошковые, волокнистые и слоистые пластмассы, а также *пенопласты*, когда наполнитель применяется в виде газа (воздух или нейтральный газ).

Пластификаторы (стеарин, воск, олеиновая кислота, дибутилфталат) вводят для повышения пластичности, эластичности пластмасс.

Отвердители (амины) и катализаторы (перекисные соединения) вводят для отверждения, т. е. создания крепких межмолекулярных связей за счет выстраивания молекул отвердителя в общую молекулярную сетку.

Красители — минеральные пигменты, органические краски, придающие пластмассе необходимый цвет.

Среди термопластов наиболее широко применяются *полиэтилен*, *поливинилхлорид* и *полистирол* (табл. 11.1), преимущественно в виде гомогенных или эластифицированных материалов, реже газонаполненных и наполненных минеральными порошками или синтетическими органическими волокнами.

Полиэтилен (ПЭ) получается полимеризацией газообразного этилена при низком (ПЭНД) или высоком (ПЭВД) давлении. Полиэтилен способен длительно работать при 60—100 °С, морозостоек до -70 °С, химически стоек в растворителях, при 20 °С эластичный диэлектрик, подвержен старению (для защиты от старения вводят 2—3 % сажи). Выпускается в виде пленки, листов, труб, блоков. Применяется для изоляции проводов, коррозионно-стойких труб, уплотнителей, шлангов, деталей высокочастотных установок, оболочек контейнеров.

Полистирол (ПС) — полярный, аморфный полимер, имеющий преимущественно линейное строение. Обладает высокой твердостью и жесткостью, имеет высокие диэлектрические свойства, химическую стойкость в щелочах и кислотах, маслах, при температуре выше 200 °С разлагается с образованием стирола. Полистирол хрупок при низких температурах, со временем на поверхности постепенно образуются трещины, приводящие к разрушению. Применение: слабонагруженные детали, высокочастотные изоляторы.

Поливинилхлорид (ПВХ) — полярный линейный аморфный полимер. Существует в двух видах — блочный винипласт и пластикат. *Винипласт* содержит стабилизаторы, а *пластикат* — пластификаторы. ПВХ стоек во многих химически активных средах. Применяется как защитные покрытия, в виде труб для подачи агрессивных газов, жидкости, воды. Пластикат, содержащий до 40 % пластификатора, выпускается в виде труб, листов (как кожзаменитель), лент, уплотнитель гидросистем, изолятор проводов.

Свойства некоторых термопластов

| Материал | Плотность, кг/м ³ | Рабочая температура, °С | | σ_B , МПа при растя- жении | Модуль упругости, МПа | δ , % на разрыв | Ударная вязкость, кДж/м ² |
|-----------------|---------------------------------|-------------------------|-----|---|-----------------------------|---------------------------|--|
| | | min | max | | | | |
| Полиэтилен ПЭВД | 913—929 | -70 | 105 | 10—17 | 120—260 | 15—20 | Не ломается |
| Полиэтилен ПЭНД | 949—953 | -70 | 125 | 18—35 | 650—750 | 10—12 | 2—150 |
| Полистирол | 1050—1080 | -20 | 90 | 35 | 2700 | 1,5 | 16—20 |
| Фторопласт 4 | 2150—2240 | -269 | 250 | 14—35 | 470—850 | 250—500 | 10—100 |
| Поливинилхлорид | 1400 | -40 | 80 | 40—120 | 2600—3000 | 5—100 | 75—80 |
| Полиметилакрид | 1200 | 60 | 60 | 63—100 | 2900—4160 | 2,5—20 | 8—18 |

Полиметилакрилат (органическое стекло) — полярный аморфный полимер, прозрачен, стоек к разбавленным кислотам и щелочам, но растворяется в органических кислотах, рабочий диапазон температур от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выпускается в виде листов 0,8—24 мм для изготовления многослойных стекол (триплексов), остекления кабин самолетов и автомобилей, создания оптических линз.

Политетрафторэтилен (фторпласт 4) — неполярен, имеет аморфно-кристаллическую структуру, работает до $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Имеет невысокую твердость, обладает уникальной химической стойкостью в соляной, серной, азотной кислотах, царской водке, в щелочах и перекисях. Этот материал не горит и не смачивается водой и многими жидкостями, не охрупчивается до $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ и сохраняет пластичность до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Низкий коэффициент трения (0,04) не зависит от температуры. Применяется для изготовления деталей, стойких к действию агрессивных сред (емкости для хранения сильных окислителей, аккумуляторы, трубы, шланги, мембраны, уплотнители, антифрикционные покрытия на металлических втулках, подшипниках, а также на электрических и радиотехнических деталях). Недостаток — токсичен из-за выделения фтора при работе в условиях высоких температур и низкая пластичность.

Реактопласты. Это материалы, переработка которых в изделия сопровождается химической реакцией сеччатого полимера — отверждением; при этом пластик *необратимо* утрачивает способность переходить в вязкотекучее состояние (раствор или расплав). Изготавливаются на основе термореактивных смол — формальдегидных, аминокальдегидных, эпоксидных, кремнеорганических, полиамидных, полиэфиров, которые являются связующим веществом. Смолы склеивают как отдельные слои наполнителя (порошки, волокна и др.), так и элементарные волокна, воспринимая нагрузку одновременно с ними. После окончания формования изделий из реактопластов фаза приобретает сеччатую (трехмерную) структуру. Поэтому отвержденные реактопласты имеют более высокие, чем термопласты, показатели по твердости, модулю упругости, теплостойкости, усталостной прочности, более низкий коэффициент термического расширения; при этом свойства отвержденных реактопластов не столь резко зависят от температуры.

Пластмассы с порошковым наполнителем (древесная мука, молотые кварц, асбест, слюда, графит и т. д.) имеют невысокие механические свойства, водо- и химически стойки. Обладают повышенными электроизоляционными показателями, устойчивы к влажному тропическому климату. Пластмассы на основе резольных и новолачных смол с асбестовым или слюдяным наполнителем жаростойки и влагостойки. Маркируются эти пластмассы буквой К, номером связующей смолы и цифрой, соответствующей наполнителю: целлюлоза — 1, древесная мука — 2, слюдяная мука — 3, плавиковый шпат — 4, молотый кварц — 5, асбест — 6.

Например: К-220-2-3 — резольная смола № 220, древесная (2) и слюдяная (3) мука.

Пластмассы с волокнистым наполнителем в зависимости от наполнителя включают следующие марки:

- хлопковые очесы (волокнит) ВЛ;
- асбестовые нити (асбоволокнит) Кб, КФЗ;
- стеклянное волокно — стекловолокнит (АГ-4В, АГ-4С).

Эти материалы обладают большей, чем порошковые пластмассы, ударной вязкостью и прочностью при растяжении.

Асбоволокниты. Наполнитель — асбест, связующее вещество — формальдегидная смола. Применяют для фрикционных дисков, колодок тормозов.

Стекловолокниты. Наполнитель — стекловолокно, связующее вещество — синтетическая смола. Применяют для деталей любой конфигурации, работающих в диапазоне температур от -60 до 200 °С, силовых деталей (шкивы, маховики, втулки), электроизоляторов.

Слоистые пластмассы. Наполнители — листы различных материалов, уложенные слоями, которые придают материалу пластичность, но создают анизотропию свойств. Связующими являются различные смолы. Материал выпускают в виде заготовок, труб, листов, из которых делают различные детали.

Текстолит. Наполнитель — хлопчатобумажная ткань, связка — терморезактивные смолы. По назначению подразделяются на конструктивные (ПТК, ПТ, ПТМ), электротехнические (А, БГ, ВЧ), гибкие. Применение — зубчатые колеса, вкладыши подшипников. Могут заменять бронзу. Рабочая температура не должна превышать 90 °С. Вкладыши подшипников применяют в прокатных станах, турбинах, насосах и т. д.

Асботекстолит. Наполнитель — асбестовая ткань и до 43 % связующей смолы. Конструкционный, фрикционный и термоизоляционный материал. Применяют для изготовления лопаток бензонасосов, фрикционных дисков, тормозных колодок, в качестве теплозащитного и теплоизоляционного материала.

Стеклотекстолит. Наполнитель — стеклянные ткани из органического стекла. Обладает высокой прочностью (σ_b более 500 МПа), по удельной прочности превосходит металлические сплавы, коррозионно- и теплостоек, имеет высокие диэлектрические свойства. Широко применяется в самолетостроении, электротехнике (обшивка крыльев, закрылки, детали оперения и т. д.). Марки: КАСТ (основа — формальдегидная смола), СТК, СТК-9Ф, СК-9А (основа — кремнийорганические смолы).

Гетинакс. Наполнитель — бумага, основа — различные смолы. Различают два вида пластмасс — электротехнические и декоративные. Декоративный вид пластмасс работает при температуре 120 — 140 °С, устойчив против химического воздействия. Применяется для обшивки вагонов, кабин самолетов, кают, в строительстве.

ДСП — древесно-слоистая пластмасса. Наполнитель — тонкие листы древесного шпона, пропитанные феноло- и крезольно-формальдегидными смолами и спрессованные в виде листов и плит. Имеет вы-

сокие физико-механические свойства, низкий коэффициент трения. Заменяет текстолит, цветные сплавы. Применяют для зубчатых колес, работающих без шума, подшипников, втулок, шкивов, деталей лодок, текстильных машин и т. д.

Газонаполненные пластмассы — гетерогенные дисперсные системы, состоящие из твердой или упругоэластичной фаз. Структура этих пластмасс: эластичный полимер как связка, который образует стенки элементарных ячеек или пор с распределенной в них фазой — наполнителем-газом. Подобная структура определяет малую плотность и высокие теплоизоляционные и звукоизоляционные свойства.

Пенопласты изготавливают на основе полистирола, поливинилхлорида, фенола, эпоксидных смол, полиуретана, поролона и других полимеров при их вспенивании в состоянии высокоэластичной деформации, т. е. при температурах, превышающих температуру стеклования t_c на 10—20 °С. Применение — пенопласты используют как теплоизоляционный материал (холодильники) или для ударопоглощающей тары. *Пенополистирол* (ПС), *пенополивинилхлорид* (ПВХ) способны работать до +60 °С. *Фенолкаучуковые* пенопласты с добавкой в их состав алюминиевой пудры (ФК-20-А-20) способны работать до 250 °С.

Поропласты (зубчатые материалы) — система ячеек с частично разрушенными перегородками. Газообразная фаза в такой системе может циркулировать. Поропласты выпускают в виде блоков с пленкой на поверхности. Эти материалы отличаются высокой звукопоглощающей способностью.

Сотопласты изготавливают из гофрированных листов полимера, склеенных в виде пчелиных сот. Применяются для обшивки панелей и как теплоизоляционный, электроизоляционный материал.

11.3. Резиновые материалы

Резиновые материалы — особый вид пластмасс (реактопласты с редкосетчатой структурой), когда связывающий полимер, каучук натуральный (НК) или синтетический (СК), находится в высокоэластичном состоянии. Свойства резины: высокая эластичность, хорошие амортизационные свойства, сильно выражена зависимость механических свойств от температуры (термическое старение резины: с повышением температуры прочность падает).

При динамическом нагружении свойства резин определяют упругогистерезисными (остаточная деформация) и усталостно-прочностными характеристиками. Морозостойкость резины определяется температурой хрупкости t_x и коэффициентом морозостойкости K_m .

Резиновые материалы — сложные вещества, в состав которых кроме каучука входят ускорители вулканизации, наполнители, пластификаторы, противостарители и красители.

Наполнители — вулканизирующие вещества до 30 % об. (сера, оксиды цинка, перекисные и нитросоединения) участвуют в создании макромолекул резины. Активные наполнители — сажа, оксид кремния повышают прочность и твердость резины, ее износостойкость. Инертные наполнители — тальк, мел и др. вводят с целью удешевления резины. Пластификаторы — вазелин, парафин, стеариновая кислота, различные масла (до 30 % об.) увеличивают эластичность и морозостойкость. *Противостарители* химического (альдоль, неозон) и физического (парафин, воск) действия, которые, взаимодействуя с кислородом или затрудняя его диффузию из воздуха, препятствуют присоединению кислорода к месту двойной связи в каучуке и ее разрыву, который приводит к потере эластичности и охрупчиванию резины. *Красители* исполняют декоративные функции и задерживают световое старение.

Резиновые материалы делятся на резины общего и специального назначения.

Резины общего назначения выпускаются на основе каучука с неполярными связями (бутадиеновый каучук — СКВ, бутадиеностирольный — СКС-10, СКС-30, дивинильный) для работы в водной и воздушной средах, в слабых растворах кислот и щелочей, в спирте, ацетоне, жирных кислотах. Интервал рабочих температур: $-50\dots+130$ °С. Эти резины, особенно мягкие, не стойки к светоозонному и тепловому старению. Они набухают при контакте с жирными и ароматическими растворителями (бензин, керосин, масло и т. д.). Предназначены для шин авиа- и автоколес, протекторов, покрышек, прокладок, обычных шлангов, амортизаторов и т. д. Марки резин общего назначения — 15РИ 10, 14РИ 32456.

Резины специального назначения — обладают негорючестью, морозо-, тепло- и озоностойкостью, электропроводностью, а также стойкостью к горюче-смазочным материалам. Резины, стойкие к действию озона и света, изготовлены на основе хлоропренового каучука (наирит) и бутилкаучука (БК) с изобутиленом. Марки резины специального назначения — 3826, НО-68-1, В-14-1, ИРП 1287, ИРП 1338.

11.4. Клеи и герметики

Клеи и герметики относятся к пленкообразующим материалам на основе полимеров. Способность пленкообразующих материалов сцепляться с поверхностью оценивается *адгезией*, которая зависит от явлений взаимодействия между пленкой и подложкой. Клеи и герметики могут быть в виде жидкостей, паст, замазок, пленок.

Конструкционные клеи — композиции на основе синтетических смол и каучуков для создания неразъемных соединений различных материалов. Клеи марок БЗ, КБЗ, ВИАМ и др. для склеивания пластмасс и древесины — на основе формальдегидной смолы. *Фенолкаучуковые*

клеи ВК-32-200, ВКЗ, ВК-4 — для склеивания металлических частей, стеклопластиков. Эпоксидные клеи холодного (Л-4) и горячего отверждения ВК-22-ЭМ, К-153 и др. — для склеивания силовых конструкций. Полиуретановые клеи (клей Лейконат) — для склеивания любых материалов силовых и виброконструкций. Резиновый клей 88Н — для склеивания резины с резиной, металлом.

Герметики — композиции на основе полимеров (замазки, пасты, растворы для обеспечения непроницаемости и уплотнения клепаных, сварных соединений и других конструкций). Подразделяются на атмосферно-, водо- и химически стойкие; в зависимости от состава — смоляные и каучуковые. По температуре отверждения — *самотвердеющие* и требующие *подогрева*. Герметизация — за счет отверждения полимера или образования пленки при испарении растворителя. *Анаэробные герметики* (анатерм, унигерм) стойки к ударам, могут работать в агрессивных средах при температурах от -200 до $+200$ °С. *Фтор-каучуковые* — СКФ-260НМ, СКФ-260НМ-2 — негорючие, работают в агрессивных средах до температур 300 °С.

Лакокрасочные материалы и покрытия. Лакокрасочные материалы — жидкие вещества на основе полимеров, способные после нанесения их на специально подготовленную поверхность высыхать с образованием стойких пленок, прочно связанных с поверхностью, и образовывать покрытие.

Лакокрасочные покрытия придают поверхности блеск, цвет, рисунок, предохраняют от коррозии, а неметаллические материалы защищают от загнивания и старения. В состав лакокрасочных материалов входят *пленкообразователи* (смолы, эфиры, целлюлоза); *пластификаторы*; *пигменты* и *наполнители*; *растворители*; *разбавители*.

Лакокрасочные материалы классифицируются:

- по составу: лаки, эмали, грунты, шпаклевки, краски, нитролаки;
- по пленкообразующему веществу — смоляные, нитро- и эфироцеллюлозные, маслосодержащие (битумные, канифольные);
- по условиям эксплуатации (7 групп) — атмосферостойкие (А), химически стойкие (Х, ХК), водостойкие (ВМ), термостойкие (Т), маслостойкие (М), бензостойкие (Б), электроизоляционные (Э).

Маркировка буквенно-цифровая — вид материала (лак, эмаль, ...), далее — пленкообразователь (КФ, ГФ и т. д.), затем следуют цифры, определяющие назначение, номер материала, цвет (словами).

Например: лак ГФ-95; эмаль МЛ 12-38-голубая.

Эмали состоят из лака и пигмента. *Пигменты* придают эмали цвет и свойства атмосферостойкости, сопротивляемости ультрафиолетовым лучам, токопроводимости и т. д. Для металлических изделий, работающих при высоких температурах, применяют *силиконовые эмали* — лак на основе кремнийорганической смолы с добавлением порошка алюминия. *Нитроэмали* — нитролаки с добавками пигментов.

Лаки — растворы масла и смолы в спирте (медленносохнущие, быстро сохнущие, летучие). В зависимости от цвета лаки могут быть черные (битумные) и светлые. В зависимости от соотношения смолы и масла — жирные, средние и тощие (мало масла). Нитролаки — раствор нитратов целлюлозы в азотной и серной кислоте.

11.5. Неорганические неметаллические материалы (стекло, ситаллы, полиморфные модификации углерода и нитрида бора)

Стекло — это переохлажденный расплав стеклообразующих оксидов (SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 , P_2O_5), разновидность аморфного состояния. Стеклообразующий каркас стекла представляет собой неправильную пространственную сетку, образованную кремнекислородными тетраэдрами $[\text{SiO}_4]^{4-}$. При частичном замещении кремния в тетраэдре на алюминий или бор образуется сетка из алюмосиликатного $[\text{Si}_x\text{AlK}_4]^{2-}$ или боросиликатного $[\text{Si}_x\text{BO}_4]^{2-}$ стекла (рис. 11.7, а).

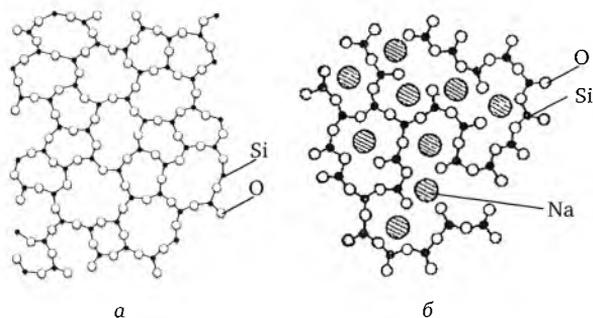


Рис. 11.7. Структура кварцевого стекла (а) и натрий-силикатного стекла (б)

Стеклообразующие оксиды — SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 , P_2O_5 — неорганические полимеры с сетчатой структурой.

Модификаторы — оксиды щелочных и щелочноземельных металлов (Na_2O , K_2O , Li_2O , CaO) — улучшают технологические свойства стекла, понижая при этом прочность. Ионы щелочных (Na, K, Li) и щелочноземельных (Ca, Mg, Ba) металлов располагаются в структурной сетке стекла в промежутках тетраэдрических группировок (рис. 11.7, б). Оксиды двухвалентных металлов — ZnO , PbO , BaO , а также оксиды алюминия, железа, титана, частично замещая стеклообразующие оксиды в каркасе стекла, сообщают стеклу специальные свойства.

Классифицируют стекла:

- по химическому составу: *щелочные* — до 15 % Na_2O , K_2O , CaO ; *бесщелочные* — до 5 % оксидов щелочных металлов; *кварцевые* — чистые SiO_2 ; *алюмосиликатные* — $\text{SiO}_2 \times \text{Al}_2\text{O}_3$; *ситаллы* — стеклокристаллические материалы;

- по назначению: оптические, лабораторные, транспортные, светотехнические, приборные, защитные, теплозвукоизоляционные, химические (кварцевые), электропроводящие.

Стекла характеризуются хрупкостью (отношение модуля упругости E к прочности при растяжении σ_B), химической стойкостью, прозрачностью для света и непрозрачностью для ультрафиолетовых лучей, способностью отражать, рассеивать, преломлять световые лучи (табл. 11.2).

Таблица 11.2

Свойства стекол

| Свойство | Вид стекла | | |
|---|---------------------------|--|-----------------|
| | кварцевые (прозрачные) | малощелочные и содержащие оксиды тяжелых металлов | ситаллы |
| Плотность ρ , кг/м ³ | 220 | 250—6500 | 2450—5760 |
| $T_{\text{размягчения}}$, °С | 1200—1600 | 500—800 | 1000—1250 |
| Коэффициент температурного расширения $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹ | +0,5 | 1—15 | -0,7... +30 |
| Теплопроводность λ , Вт/мк | 1,5 | 0,7—1,4 | 2,0—7,0 |
| Модуль упругости E , ГПа | 66—70 | 65—73 | 84—141 |
| Предел прочности σ_B , МПа | 50—60 | 30—70 | 70—120 |
| Термостойкость, °С | До 1100 | До 500 | До 900 |
| Химическая стойкость | Кислоты, щелочи | Кислоты, щелочи | Кислоты, щелочи |

Кристаллический кварц и кварцевое стекло — различные формы оксида кремния (SiO_2). В кварцевом стекле оксид кремния находится в аморфной форме и поэтому он не растрескивается при резком перепаде температур, как кристаллический кварц, имеет чрезвычайно низкий коэффициент температурного расширения и теплопроводности.

В отличие от обычного стекла, которое состоит из смеси различных компонентов, кварцевое стекло состоит только из оксида кремния, а количество примесей других химических элементов чрезвычайно мало. Это приводит к тому, что кварцевое стекло обладает чрезвычайно широким спектром пропускания (через стекла из кварцевого стекла можно даже загорать), малым поглощением света (обычное оконное стекло поглощает столько же света, сколько и кварцевое стекло толщиной в 100 м), высокой оптической гомогенностью (рис. 11.8), низким коэффициентом температурного расширения (примерно в 20 раз меньше по сравнению с обычным стеклом), высокой рабочей температурой (более 1200 °С).



Рис. 11.8. Спектр оптического пропускания синтетического кварцевого стекла *Suprasil 300*, оптического стекла BK 7 и обычного стекла. Спектр видимого света лежит в пределах от 400 до 800 нм

Изготовление листового стекла, предназначенного для остекления светопрозрачных строительных конструкций, средств транспорта, мебели, а также изготовления стекол с покрытиями — зеркал, закаленных и многослойных стекол и других изделий строительного, технического и бытового назначения регламентируется ГОСТ 111—2001.

В соответствии с оптическими искажениями стекло подразделяют на марки М0—М7, а в зависимости от размеров различают следующие категории:

- стекло твердых размеров (ТР) — стекло, изготовленное и поставленное по спецификации потребителя;
- стекло свободных размеров (СВР) — стекло, изготовленное и поставленное в заводском ассортименте размеров.

Условное обозначение стекла состоит из обозначения марки, категории размеров, длины, ширины, толщины стекла и обозначения стандарта.

Пример условного обозначения листового стекла марки М1 твердых размеров длиной 1800 мм, шириной 1200 мм, толщиной 4 мм: стекло листовое М1—ТР—1800 × 1200 × 4 ГОСТ 111—2001.

Пример условного обозначения листового стекла марки М5 свободных размеров длиной 2000 мм, шириной 1500 мм, толщиной 6 мм: стекло листовое М5—СВР—2000 × 1500 × 6 ГОСТ 111—2001.

Повысить свойства стекол можно термическим упрочнением — закалкой стекла (ГОСТ 30698—2000) в высоковязком пластическом состоянии с температурой выше температуры стеклования t_c . Стекла, применяемые для изготовления закаленного стекла, должны выдерживать воздействие температуры до 630 °С без изменений физических, химических и оптических свойств.

Условное обозначение закаленного стекла должно включать:

- буквенное обозначение закаленного стекла (З);
- обозначение исходного стекла по нормативной документации (например, М1 по ГОСТ 111—2001);
- длину, ширину и толщину листа стекла, мм;

- класс защиты (стекло должно выдерживать без разрушения удар мягкого тела массой (45 ± 1) кг;
- обозначение настоящего стандарта.

Пример условного обозначения стекла закаленного, изготовленного из листового стекла марки М1 по ГОСТ 111—2001 длиной 1400 мм, шириной 800 мм и толщиной 5 мм, класс защиты СМ2, изготовленного по настоящему стандарту: 3М1—1400—800—5—СМ2 ГОСТ 30698—2000.

Класс защиты стекла в зависимости от высоты падения тела:

| класс защиты стекла | СМ1 | СМ2 | СМ3 | СМ4 |
|-------------------------|-----|-----|------|------|
| высота падения тела, мм | 300 | 450 | 1200 | 2000 |

Энергосберегающие стекла. Потери тепла через стекло складываются из теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Излучательная способность стекла является основной характеристикой энергосбережения. Под излучательной способностью стекла — *эмиссией* понимают способность стеклянной поверхности отражать длинноволновое невидимое человеческим глазом тепловое излучение определенной длины волны.

Эмисситент поверхности определяет излучательную способность стекла и, следовательно, способность как бы «отражать» обратно в помещение тепловое излучение — чем ниже эмисситент, тем меньше потери тепла. Для придания стеклу энергосберегающих свойств на его поверхность наносятся низкоэмиссионные оптические покрытия, обеспечивающие прохождение через стекло коротковолнового солнечного излучения, но препятствующие выходу длинноволнового теплового излучения, например от отопительного прибора в помещении.

Стекла с таким покрытием получили название *низкоэмиссионных*, или *селективных*. У обычного стекла числовое значение величины излучательной способности составляет более 0,83, а у энергосберегающих стекол — меньше 0,04.

Теплосберегающие стекла. Для уменьшения теплопотерь используют стекла с нанесенными на них покрытиями, обладающими малой излучательной способностью. Обычное стекло, как все диэлектрики, является материалом с большей, по сравнению с металлами, излучательной способностью, что является одной из причин, приводящих к потере тепла за счет излучения. Изменяя терморadiационные свойства поверхности стекла, можно изменить его излучательную способность и уменьшить потери за счет излучения.

В настоящее время для этих целей используется два типа покрытий: «твердые» и «мягкие». *Твердые* покрытия — на основе индий-оловянных оксидов, наносимых на поверхность стекла пиролитическим способом. Такие покрытия позволяют снизить потери за счет излучения примерно в 7—8 раз по сравнению с чистым стеклом. *Мягкие* покрытия наносят на стекло путем магнетронного распыления. Такие покрытия представ-

ляют собой ряд полупрозрачных слоев металла (как правило, серебра) с системой просветляющих слоев оксидов. Такие покрытия позволяют уменьшить излучение в несколько десятков раз. Использовать подобные стекла с теплосберегающим покрытием в обычных системах остекления бесполезно, поскольку конструкция остекления не обеспечивает надежную герметичность и атмосферная влага, конденсирующаяся на поверхности покрытия, будет увеличивать его излучательную способность. Такое стекло обычно используют в составе стеклопакета покрытием внутрь. Преимуществами стеклопакета являются его полная герметичность и сравнительно малая толщина. Для уменьшения потерь за счет теплопроводности такой стеклопакет обычно заполняется инертным газом.

Солнцезащитные стекла обладают способностью снижать пропускание световой и солнечной тепловой энергии. До недавнего времени значения пропускания полного излучения и естественного света через стекло были практически прямо пропорциональны друг другу, поэтому величина пропускания естественного света солнцезащитными стеклами снижалась при уменьшении величины проникания излучения в целом. Темный цвет солнцезащитных стекол означал, что они эффективно защищают от солнечного излучения. Только стекла зеленого цвета были исключением из правила.

По механизму действия солнцезащитные стекла можно разделить на преимущественно отражающие излучение и преимущественно поглощающие излучение. На поверхность стекол, *преимущественно отражающих излучение*, в процессе производства наносится тонкий металлический слой, который препятствует проникновению излучения через стекло. Следует отметить, что отражающие слои одновременно частично поглощают излучение. Путем последовательного нанесения покрытия на поверхность стекла получают полностью отражающие поверхности прозрачных стекол. Как правило, количество покрывающих слоев — пять, из которых четыре — это слои оксидов металлов и работающий слой — серебряный. Серебро обладает способностью пропускать видимый свет, как и обычное стекло. Кроме того, такие стекла обладают и хорошей теплоизолирующей способностью.

При изготовлении *поглощающих стекол* на расплавленную стекольную массу наносятся либо кристаллы металлов, либо оксиды металлов, которые обладают способностью поглощать часть солнечного излучения. В процессе поглощения излучения стекла нагреваются и отдают большую часть полученного ими тепла в наружное пространство.

Для производства **ударостойкого, пожаростойкого и защитного** стекла применяют *полимерные пленки*: при нанесении на стекло (варьируются типы пленок, их количество и последовательность расположения) они придают стеклоконструкциям комплекс защитных, потребительских и эстетических свойств.

Защитная пленка, выпускаемая толщиной в диапазоне от 50 до 300 мкм, представляет собой многослойную систему, сочетающую

прочный, чувствительный к давлению клей, специальные прослойки (металлов), упругий полиэстр, а также износостойчивое, защищающее от царапин специальное покрытие. Состав клея и спаттерное напыление металлов (поверхность основы бомбардируется в вакууме микрочастицами титана, меди, бронзы, нержавеющей стали) гарантируют длительное сохранение цвета пленки.

Ситаллы (стеклокерамика). Ситаллы (образовано из слов — *стекло* и *кристалл*) получают путем кристаллизации жидких неорганических стекол на основе CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , MgO с добавками катализаторов (рис. 11.9). Катализаторами кристаллизации служат светочувствительные соли меди, золота, серебра, платины, а также фосфатные и фтористые соединения. Применяются для изготовления обтекателей, деталей остекления машин и самолетов, вкладышей подшипников для работы без смазки до 540°C , труб для химической промышленности, лопастей винтов и компрессоров, жаропрочных деталей в ракетных двигателях.

Ситаллы подразделяются по способу получения.



Рис. 11.9. Схема кристаллизации стекла при образовании ситаллов с помощью катализаторов

Фотоситаллы (фотокерамы) — стекла литиевой системы. Для облегчения равномерного распределения центров кристаллизации (металлических частиц) процесс проводится при облучении ультрафиолетовыми или рентгеновскими лучами. При последующей термообработке (ситаллизации) вокруг центров происходит равномерный рост поликристаллической структуры ситалла.

Термоситаллы (термокерамы) получают из стекол систем: $\text{MgO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$, $\text{CaO—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$. Содержат катализаторы — оксиды титана, фосфора, ванадия, хрома, фториды и сульфосемииды. При выплавке происходит распределение исходного оксидного стекла на две фазы, одна из которых выпадает в виде коллоидных частиц. При последующей термообработке эти частицы кристаллизуются сами и вызывают полную кристаллизацию стекла.

Шлакоситаллы получают на основе доменных шлаков и катализаторов (сульфаты, порошок железа и соединения фтора).

Техническая керамика (табл. 11.3) — неорганический материал, полученный спеканием тонкодисперсных порошков чистых высокотемпературных кислых оксидов (оксидная керамика) или порошков карбидов, боридов, нитридов, силицидов, сульфидов (бескислородная керамика).

Оксидная керамика — спекание порошков оксидов алюминия, циркония, бериллия, магния, тория, урана, церия, кальция (Al_2O_3 , ZnO_2 , BeO , MgO , ThO_2 , UO_2 , CaO). Температура плавления — $2000\text{—}3300^\circ\text{C}$, рабочие температуры — $(0,8\text{—}0,9) T_{\text{пл}}$ (с повышением температуры ко-

эффицент линейного расширения возрастает). Имеет высокую кислото- и щелочностойкость (кроме BeO , MgO), устойчивы против окисления, хорошо работают на сжатие и изгиб. Применяют для элементов двигателей, как огнеупорный материал в печах, теплоизоляционный материал реакторов, печей, вакуумной керамики реакторов, тиглей для плавения металлов и др.

Бескислородная керамика отличается высокой огнеупорностью, твердостью, износостойкостью. Карбид кремния SiC (*карборунд*) используют как защитные покрытия, вкладыши сопел двигателей, электронагреватели для печей.

Карбид титана TiC применяют для изготовления жаропрочных материалов.

Бориды циркония, молибдена, бора и кремния, силициды MoSi_2 применяют в качестве жаропрочных, термостойких и окислостойких материалов для деталей двигателей в самолето- и ракетостроении, а также для защитных термостойких покрытий абразивных материалов.

Полиморфные модификации углерода и нитрида бора. Высокая эффективность работы автоматических линий, станков с ЧПУ и гибких производственных модулей обеспечивается применением для режущей части инструмента сверхтвердых материалов (СТМ) на основе поликристаллических алмазов, кубического и гексагонального нитрида бора и керамики, твердость которых по Виккерсу свыше 35 ГПа. Основным направлением конструирования инструментов из СТМ и керамики является создание резцов и фрез с механическим креплением цельных и двухслойных круглых и многогранных режущих пластин.

Графит и графитоподобный (вюрцитный) нитрид бора, имеющие слоистую гексагональную структуру, являются очень мягкими материалами. Их смазывающие свойства объясняются легкостью скольжения кристаллографических плоскостей относительно друг друга (графитоподобный нитрид бора получил название «белый графит»). Очень большое сходство со структурой графита свидетельствует, что возможен переход нитрида бора в другую структуру, сходную со структурой второй модификации углерода — алмаза.

Алмаз и плотные модификации нитрида бора, имеющие тетраэдрическое распределение атомов в решетке (см. рис. 7.2, а), являются самыми твердыми структурами. Уникальные физические и химические свойства (высокая химическая устойчивость, твердость, износостойкость) этих материалов объясняются чисто ковалентным характером связи атомов в сочетании с высокой локализацией валентных электронов у атомов углерода и бора.

Алмаз термодинамически устойчив при сверхвысоких давлениях, а стабильной формой существования углерода является гексагональная модификация углерода — графит (см. рис. 7.2, б). Поэтому и в случае нитрида бора стабильной фазой при относительно невысоких давлениях является гексагональная форма BN , а получение кубической модификации этого соединения потребует использования техники сверхвысоких давлений.

Свойства керамик

| | ρ , кг/м ³ | $T_{\text{пл}}$, °C | $\alpha \cdot 10^{-6}$, К ⁻¹ | λ , Вт/мК | σ_B , МПа | E , ГПа |
|--|----------------------------|----------------------|--|-------------------|------------------|-----------|
| Оксидная керамика* | | | | | | |
| $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (корунд) | 3900 | 2050 | 7,5 | 30—6,08 | 140—265 | 350—490 |
| BeO | 3000 | 2570 | 10,6 | 218,6—151,4 | 105—280 | 274—70 |
| ThO ₂ | 97—10 000 | 3200—3300 | 10,4 | 10,4—3,34 | 84—49 | 140—85 |
| UO ₂ | 10 950 | 2860 | 10,0 | 9,8—3,4 | — | 140—210 |
| Керамика** | | | | | | |
| SiC (корунд) | 3200 | 2600 | 5,2 | 16,7 | 155 | 394 |
| ZnB ₂ + 10 % MoSi ₂ | 5500 | 2370 | 4,6 | 53—30 | — | 450 |
| BN | 2340 | 2350 | 7,51 | 15—12,3 | 50—110 | 317 |
| Сиалон Si _{6-x} -Al _x -N _{8-x} -O _x | 2000—3000 | < 1500 | 3,0 | — | 500 | 200 |

* Свойства замерялись в температурном интервале 25—1500 °C.

** Свойства замерялись при 25 °C.

Обозначения: ρ — плотность; α — коэффициент температурного расширения; λ — теплопроводность; σ_B — предел прочности; E — модуль упругости.

Впервые синтетический алмаз и кубический нитрид бора были получены методом каталитического синтеза при высоких статических давлениях. Алмаз был синтезирован в результате прямого фазового перехода в однокомпонентной системе и при ударном сжатии графита (1961), и при статическом сжатии (1963). Одновременно был осуществлен бескатализаторный синтез плотных модификаций нитрида бора при статическом сжатии и в условиях ударного сжатия.

Размеры получаемых такими способами СТМ, как правило, не превышали долей миллиметра; СТМ являлись монокристаллами или представляли собой поликристаллические агрегаты, состоящие из отдельных монокристаллических зерен. Небольшие размеры синтезируемых зерен СТМ предопределили первоначальное их использование только в абразивных инструментах.

Применение их для изготовления лезвийного инструмента стало возможным после получения алмаза и нитрида бора в виде крупных поликристаллических образований.

СТМ на основе плотных модификаций нитрида бора различаются технологией производства, структурой и физико-механическими свойствами.

- На основе фазового превращения графитоподобного нитрида бора в кубический производят СТМ — композит 01 (*эльбор*) и композит 02 (*белбор*). Применяют для тонкого и чистового точения резцами в условиях безударной нагрузки и торцового фрезерования закаленных сталей и чугунов любой твердости, твердых сплавов с содержанием кобальта более 15 %.

- Частичным или полным превращением вюрцитного нитрида бора в кубический производят СТМ — композит 01 (*гексанит-Р*) и модификации композита. Применяют для предварительного и окончательного точения и торцового фрезерования сталей.

- Спеканием частиц кубического нитрида бора (КНБ) производят СТМ — композит 05, *киборит* и *ниборит* (рис. 11.10). Применяют для предварительного и чистового точения и торцового фрезерования закаленных деталей из чугунов любой твердости с наличием поверхностной литейной корки.

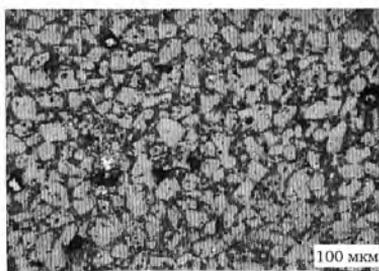


Рис. 11.10. Микроструктура кубического нитрида бора (микротвердость 40 ГПа; шероховатость поверхности $Ra = 0,17$ мкм)

Алмазные материалы. Физические и химические свойства алмаза, главным образом его высокая твердость и износостойкость, в десятки тысяч раз превосходящие свойства промышленных абразивных материалов, позволяют обрабатывать алмазным инструментом (рис. 11.11) твердые сплавы (в том числе труднообрабатываемые и жаропрочные), различные конструкционные материалы (оптическое кварцевое стекло, керамику, ситаллы, ферриты и др.), строительные материалы (бетон, мрамор, гранит), а также фарфор, хрусталь, драгоценные камни и др.

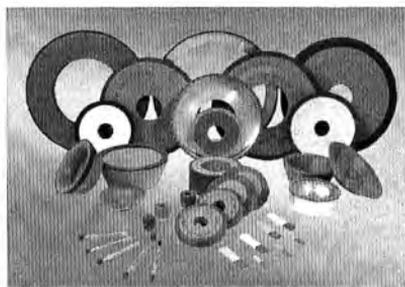


Рис. 11.11. Эльборовый и алмазный инструмент для промышленных предприятий

Работа режущего алмазного инструмента по сравнению с инструментами, оснащенными другими материалами, характеризуется минимальными силами резания, меньшей потребляемой мощностью, более низкой температурой в зоне резания. Качество обработанных поверхностей отличается большой точностью и малой шероховатостью.

Алмазный инструмент (шлифовальные круги и бруски, хоны, резцы и фрезы с алмазными пластинками; фильеры; карандаши и ролики для правки абразивных инструментов; выравнивающий инструмент — гладилки, буровой инструмент и алмазные пасты главным образом для притирки деталей и поверхностей) изготавливается с использованием природных или синтетических алмазов в виде порошков (например, в абразивных инструментах) или отдельных обработанных кристаллов (например, фильеры, карандаши и ролики), которыми оснащается его режущая часть (рис. 11.12).

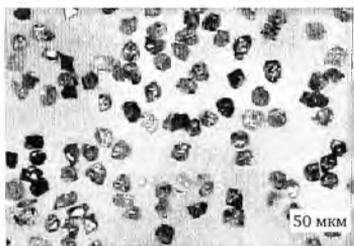


Рис. 11.12. Шлифпорошок из синтетических алмазов марки АС 20 зернистостью 63/50

В зависимости от назначения режущего алмазного инструмента его изготавливают из алмазных порошков на различных связках: органичес-

кой, керамической, эластичной (резиновой), металлической и др. Содержание алмаза в инструменте определяется его концентрацией в алмазном слое. При 100 %-ной концентрации в 1 мм³ алмазного слоя содержится 0,878 мг алмазного порошка.

Для повышения эффективности алмазного инструмента применяют алмазную обработку с наложением электрического тока — электролитическое шлифование, алмазнокатодную обработку; с наложением ультразвука — ультразвуковое шлифование и др.

Применение алмазного инструмента, особенно из синтетических алмазов, резко сокращает стоимость производства за счет повышения стойкости инструмента, улучшения качества обработки, повышения надежности и долговечности деталей, увеличения производительности труда.

11.6. Композиционные материалы

Композиционными материалами (КМ) называются материалы, состоящие из объединенных в монолит различными технологическими способами двух или более материалов. При этом имеется четкая граница раздела между составляющими материала (КМ на основе металлической матрицы или на основе полимерной матрицы). Свойства материалов определяются каждым компонентом.

Все КМ подразделяются по принципу их создания.

- *Слоистые КМ с двумерным наполнителем* — слоистые (двух-, трехслойные) биметаллы, образованные сочетанием разнородных металлов.

- *Слоистые пластики* (гетинакс, текстолит, стеклотекстолит и др.) — неметаллические наполнители (бумага, текстиль и т. д.) укладываются слоями в связующей матрице.

- *Дисперсно-упрочненные КМ с нульмерными наполнителями* — металлическая матрица упрочняется дисперсными частицами диаметром 0,01—0,1 мкм, или в полимер (каучук) вводится наполнитель в виде керамики, или металла и керамики вместе.

- *Волокнистые КМ с одномерным наполнителем* — металлическая или полимерная матрица с введенными в нее нитями (волокнами) более прочных материалов, которые однородно и жестко сцеплены с матрицей.

Композиционные материалы на основе металлической матрицы

Дисперсионно-упрочненные — металлическая матрица с равномерно распределенными частицами второй фазы (размер частиц от 0,01—50 мкм). Матрица принимает основную часть нагрузки, а частицы тормозят движение дислокаций. Оптимальное содержание второй фазы не превышает 15 %. Эти материалы могут быть получены на основе большинства применяемых металлов и сплавов.

КМ с алюминиевой матрицей. Основа — алюминий, упрочнение частицами Al_2O_3 . Получают методом порошковой металлургии — САП-1, САП-2, САП-3. Они сохраняют свои свойства до температур $0,8T_{\text{пл}}$.

КМ с никелевой матрицей. Матрица — никель, упрочняющая фаза — частицы диоксида тория (ThO_2) или диоксида гафния (HfO_2) — сплавы ВДУ-1 и ВДУ-2 соответственно. Используют как жаропрочные материалы при работе до $1000\text{—}1200^\circ\text{C}$.

Металлокерамика. Основа — металлы группы железа и тугоплавкие металлы. Частицы — оксиды, нитриды, карбиды, бориды и т. д. — обладают повышенной жаропрочностью, теплоэрозионной стойкостью и могут применяться в авиационной и космической технике (камеры сгорания, формажные камеры, горячие газопроводы и др.).

Слоистые КМ позволяют получать высокую пластичность, трещиностойкость, коррозионную стойкость в сочетании с хорошей прочностью. Это сплавы алюминия, плакированные чистым алюминием, биметаллы, двух или трехслойные подшипниковые материалы (композиции — сталь — бронза, сталь — бронза — баббит и др.). Например, композиция для четырехслойного металлического подшипника скольжения: баббит — никель — бронза — сталь. Стальная основа обеспечивает прочность и жесткость детали. Верхний слой, баббит, улучшает прирабатываемость. Когда он изнашивается, рабочим становится следующий слой — бронза. Слой никеля — барьер, не допускающий диффузию олова из баббита в свинец бронзы.

Волокнистые КМ с одномерным наполнителем. Упрочнителем являются волокна и нитевидные кристаллы. Волокна равномерно распределены по объему матрицы, однородно и жестко сцеплены с ней, на границе раздела «волокно — матрица» нет проскальзывания. Нагрузка распределяется между волокном и матрицей. Прочность и работа разрушения такого материала зависят от объемной доли волокна в материале (V) и его длины (l). Если ввести небольшую объемную долю волокон V , то прочность композиции будет определяться прочностью матрицы, т. е. будет иметь место разупрочнение композиции.

Это наблюдается до определенной величины V_{fc} (разрушение матрицы с дроблением волокна) (рис. 11.13, а). С увеличением объемной доли $V > V_{fc}$ волокна начинают воспринимать нагрузку и прочность композиции увеличивается. Критическая длина волокна $l_{кр}$ определяется из равновесия усилий в матрице на границе с волокном и в волокне с учетом симметричности распределения напряжений в нем (рис. 11.13, б) — $l_{кр} = \sigma_b / 2\tau$, где τ — касательное напряжение. В качестве волокна используют высокопрочную проволоку из стали, вольфрама, молибдена, титана и их сплавов, стекловолокно, волокна из углерода, бора, волокнистые монокристаллы Al_2O_3 , SiO и др.

Метод получения волокнистых КМ зависит от размеров, профиля, составляющих материала. Чаще всего используют одновременную прокатку, волочение или прессование при высоких температурах, сварку взрывом. Возможно применение метода пропитки волокон расплавом

матрицы и метод направленной кристаллизации расплава эвтектических сплавов. Часто эти методы дополняются прокаткой или прессованием.

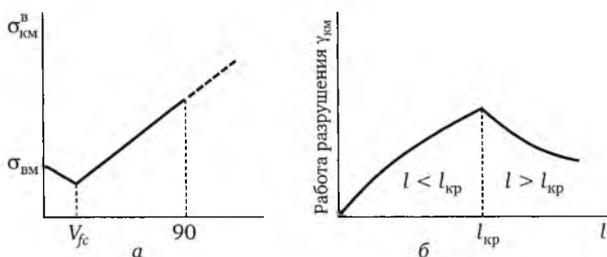


Рис. 11.13. Изменение предела прочности и работы разрушения волокнистого КМ в зависимости от объемной доли волокна (а) и длины (б)

Эвтектические КМ — эвтектические композиции, получаемые в процессе кристаллизации эвтектик. Структура с упорядоченным расположением фаз получается за счет управления температурой кристаллизации, скоростью превращения, направленностью теплоотвода. Одна из фаз формируется в виде волокна или пластин. Эвтектические композиции (табл. 11.4) имеют высокую прочность, жаропрочность, термическую стабильность. Применяют в самолето- и ракетостроении (например, из сплава Ni_3Al — NiNb отливают лопатки турбины).

Таблица 11.4

Механические свойства эвтектических композиционных материалов

| Эвтектическая композиция | $\sigma_{\text{в}}$, МПа | $\sigma_{\text{дл}}$, МПа | $\tau_{\text{разр}}$ |
|---|---------------------------|----------------------------|----------------------|
| (Co, CrH, Co) ₇ C ₃ | 1400/300 | 70—80 | 100 |
| (Co, Cr, Ni)—TaC | 1150/400 | 105 | 618 |
| Ni_3Al — NiNb | 1200/700 | 175 | 100 |
| (Co, Cr) — NbC | 1040/450 | 100 | 1200 |
| Сплав ЖС6У | 1000/200 | 45 | 100 |

Композиционные материалы на основе полимерной матрицы. Полимерная матрица в КМ определяет деформационную устойчивость при повышенных температурах, длительную прочность, стабильность характеристик при работе в агрессивных средах, технологию изготовления деталей. Армирующее волокно обеспечивает высокую прочность, усталостную прочность, жесткость конструкции. От схемы укладки волокон зависят свойства композита: материал может быть изотропным или анизотропным. Применяют укладку из трех, четырех и более нитей в осевом, радиальном и окружном направлениях (рис. 11.14).

Стекловолокниты — полимерная матрица и стеклянное волокно, стеклонити, стекложгуты, стеклоткани в виде различного плетения. Могут быть однонаправленными и перекрестными. Их основное досто-

инство — высокая механическая прочность, усталостная прочность, коррозионная стойкость, радиопрозрачность, низкая чувствительность к надрезам, радиационная стойкость. Широко используются в самолетостроении (детали крыльев, фюзеляжа), ракетостроении, в качестве плат в ЭВМ.

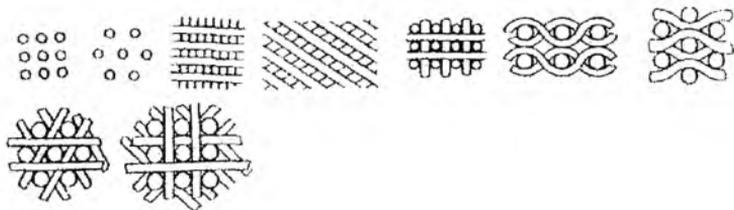


Рис. 11.14. Схема укладки волокон в КМ

Бороволокниты — полимерная матрица и борное волокно. Имеет высокий предел прочности при растяжении и сжатии, модуль упругости, хорошие полупроводниковые свойства, повышенную тепло- и электропроводимость. К недостаткам бороволокнитов относится трудность механической обработки. Применяют в самолетостроении (профили, стрингеры, лопасти несущих винтов вертолетов и т. д.), где определяющим качеством материала являются удельные значения прочности и жесткости.

Углепластики в качестве наполнителя содержат углеродные волокна. Они имеют низкую плотность, высокий модуль упругости, термостойкость, низкий коэффициент линейного расширения, высокую износостойкость. Их применяют в узлах трения — подшипники, диски тормозов и т. д.

Контрольные вопросы и задания

1. Что представляют собой неметаллические материалы? Как они подразделяются?
2. Как влияет форма макромолекул на свойства полимера?
3. Как влияет температура на свойства полимеров?
4. Что такое пластмассы? Каковы их состав, свойства, классификация?
5. Охарактеризуйте состав и назначение компонентов для получения изделий из резины.
6. Назовите основные пленкообразующие материалы, их состав, применение.
7. Что такое стекла? Каковы их состав, классификация, свойства, области применения?
8. Что вызывает упрочнение композиционных материалов с разной формой наполнителя?
9. Охарактеризуйте композиционные материалы с металлической и полимерной матрицей. В чем их отличие? Как влияет матрица на свойства материала?

Глава 12

ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МЕТАЛЛОПРОДУКЦИИ

12.1. Качество промышленных материалов

Промышленным материалом называют исходный, необработанный на данном предприятии предмет труда, используемый для производства средств производства и предметов потребления (т. е. товарной продукции). Материаловедение определяет исходные положения для правильного выбора и использования материалов не только по структуре и свойствам, но и по экономическим и экологическим показателям, согласно ГОСТ Р ИСО 9000—2001 «Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь».

Валидация — подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что требования, предназначенные для конкретного использования или применения, выполнены.

Верификация — подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены. Деятельность по подтверждению может включать: осуществление альтернативных расчетов; сравнение научной и технической документации по новому проекту с аналогичной документацией по апробированному проекту; проведение испытаний и демонстраций; анализ документов до их выпуска.

Испытание — определение одной или нескольких характеристик согласно установленной процедуре.

Качество — степень соответствия присущих характеристик требованиям.

Контроль качества продукции — проверка соответствия показателей качества продукции установленным требованиям. Этот контроль может включать проведение измерений, экспертизы, испытаний или оценки одной или нескольких характеристик.

Менеджмент качества — скоординированная деятельность по руководству и управлению организацией применительно к качеству. При этом отдельные обязанности по менеджменту качества лежат на руководителях всех структурных подразделений, но общее руководство деятельностью этих должностных лиц возлагается на первое лицо предприятия.

Надзор за качеством продукции — это контроль качества продукции, осуществляемый специальными органами.

Обеспечение качества — часть менеджмента качества, направленная на создание уверенности в том, что требования к качеству будут выполнены.

Оценка уровня качества продукции — это совокупность операций, включающая выбор номенклатуры показателей качества оцениваемой продукции, определение значений этих показателей и сопоставление их с базовыми. При этом под показателем качества продукции понимают количественную характеристику одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемую применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления.

Планирование качества — часть менеджмента качества, направленная на установление целей в области качества и определяющая необходимые операционные процессы жизненного цикла продукции и соответствующие ресурсы для достижения целей в области качества.

Процесс квалификации — процесс демонстрации способности выполнять установленные требования. Квалификация может распространяться на работников, продукцию, процессы или системы, например квалификация аудиторов (экспертов по квалификации систем качества), квалификация материалов и т. п.

Система менеджмента качества — система менеджмента для руководства и управления организацией применительно к качеству.

Улучшение качества — часть менеджмента качества, направленная на увеличение способности выполнить требования к качеству.

Управление качеством — часть менеджмента качества, направленная на выполнение требований к качеству. Управление качеством заключается в постоянном, планомерном и целеустремленном процессе воздействия на факторы и условия, обеспечивающие создание продукции оптимального качества с целью ее максимально эффективного использования.

Экспертиза качества товаров — самостоятельное исследование, проводимое компетентным специалистом (экспертом) на основании объективных фактов с целью получения достоверного решения поставленной задачи. Цель экспертизы — на основе тщательного анализа качества товара определить его потребительскую стоимость.

По функциональному назначению промышленные материалы подразделяются на две группы — *основные* и *вспомогательные*:

- основные материалы обеспечивают заданные технические характеристики изделий (машин, механизмов, сооружений и т. п.) — прочность, теплостойкость, электропроводность и т. д.;
- вспомогательные материалы обеспечивают параметры сооружений и агрегатов в процессе их эксплуатации (материалы для смазки узлов трения, для охлаждения, для защиты от коррозии и других видов

химического и физического воздействия, для декоративной отделки и обеспечения эстетических параметров и т. д.).

Другие классификационные признаки группируются:

- по назначению (по промышленным секторам, объектам производства и т. п.);
- по технологичности обработки (материалы для обработки давлением, литья, резания и т. п.);
- по степени готовности к использованию (сырье, полуфабрикаты и т. д.);
- по уровню эффективности применения (технологичность, серийность выпуска, оптовая цена и т. д.);
- по дефицитности, по возможности замены на другие материалы и т. п.;
- по степени безопасности использования;
- по экологическим параметрам.

Инженерно-технические свойства материалов определяются требованиями технической задачи и организации производства. Из практики использования металлов и сплавов в промышленности известно, что основное значение придается механическим (прочность, упругость, деформируемость, жесткость) и термическим свойствам, плотности (удельная масса), коррозионной стойкости и возможности формообразования.

Анализ свойств разных групп материалов (рис. 12.1) показывает, что материалы отличаются прежде всего по прочности, упругости и вязкости.

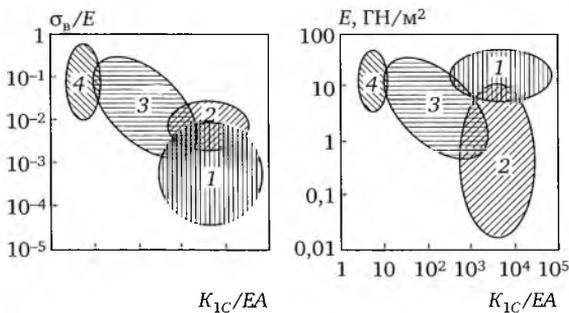


Рис. 12.1. Зависимость нормализованной прочности (σ_n/E) и модуля упругости (E) от нормализованной вязкости (K_{1C}/EA), где K_{1C} — вязкость разрушения, A — атомный радиус для конструкционных материалов различных типов: 1 — металлы и сплавы; 2 — полимеры; 3 — композиты; 4 — керамика

Металлы, обладающие высокой вязкостью разрушения, уступают керамике по нормативной прочности, что затрудняет замену металла другим материалом, например полимером.

Значение конструкционного материала можно определить и по его положению во всем диапазоне свойств материала (табл. 12.1). При достаточно высокой прочности сталь имеет широкий диапазон ее варьирования, высокую температуру плавления, низкую теплопроводность,

высокую вязкость разрушения. Но особенно важным преимуществом стали является возможность расширения диапазона нужных свойств изменением ее химического состава, термической обработкой (определенной структурой), возможностью формообразования изделия в жидком и твердом состояниях и соединения сваркой.

Таблица 12.1

Механические и термические свойства материалов

| Свойство | Различие свойств, определяемое физической природой материала | | |
|--|--|---------------|-----------|
| | | | |
| Плотность, г/см ³ | 7,8—0,5 (1) | 7,9 (2) | 22,5 (3) |
| Предел прочности при растяжении, Н/мм ² | 10 (4) | 440—2100 (2) | 4800 (5) |
| Вязкость разрушения K_{1C} , МПа·м ^{1/2} | 0,2 (6) | 140—220 (2) | 350 (7) |
| Коэффициент термического расширения, 10 ⁻⁶ °С/К | 0,5 (8) | 10—20 (2) | 250 (9) |
| Теплопроводность, Вт/(м·К) | 0,1 (1) | 15—60 (2) | 350 (10) |
| Температура плавления, К | 365 (11) | 1570—1800 (2) | 3925 (12) |

Примечание: 1 — древесина; 2 — сталь; 3 — осмий; 4 — свинец; 5 — стекловолокно; 6 — цемент; 7 — никель; 8 — стекло; 9 — полиэтилен; 10 — медь; 11 — поливинилхлорид; 12 — графит.

Сравнение конструкционных материалов показывает также, что принципиальное различие свойств, определяемых физической природой каждого материала, делает его замену другим материалом во многих случаях невозможной. Использовать материал целесообразно только в той области, где наиболее полно проявляются его инженерно-технические свойства.

Например, по расчетам замена стали алюминием снижает массу детали на 63 %, а необходимость сохранения допустимых ударной нагрузки и жесткости — только до 50 %. Использование стеклопластиков должно снизить массу изделия на 81 %, но при сохранении жесткости позволяет снизить ее только на 25 %. Кроме того, пластмассы теряют необходимые служебные свойства в процессе эксплуатации («стареют»).

Оценка использования конструкционных материалов показывает, что масштабы и объемы производства конкретного материала определяются и технико-экономической эффективностью его применения.

Рассмотрим экономическую целесообразность замены, например, стали альтернативными материалами. Для сохранения стоимости изделия из нового материала должна соблюдаться зависимость:

$$C_C = C_3 \cdot M,$$

где C_C и C_3 — цены материалов: основного (сталь) и заменяющего (заменитель) соответственно; M — масса изделия из заменителя, выраженная в долях единицы от массы изделия из исходного материала, для которого $M = 1$.

Зависимость отношений цен материалов от массы изделия ($1/M = C_3/C_C$) показывает, что при снижении массы изделия на 50 % цена заменителя должна не более чем вдвое превышать цену стали (рис. 12.2). При уменьшении веса изделия на 90 % ($M = 0,1$) цена заменителя может превышать цену стали в 10 раз. Помимо экономичности использования конструкционного материала важнейшими его характеристиками являются цена исходного сырья и энергоёмкость производства.

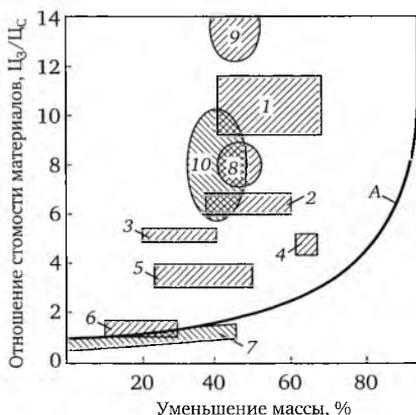


Рис. 12.2. Показатели экономичности замены стали альтернативными материалами в машиностроении РФ в 1980–1990 гг.

(A — линия равной стоимости материалов по ценам 1995 г.):

- 1 — углеродное волокно по сравнению со сталью; 2 — кованный алюминий по сравнению с мягкой сталью; 3 — кованный алюминий по сравнению с высокопрочной сталью; 4 — алюминий по сравнению с чугуном;
- 5 — углеродное волокно по сравнению со сталью; 6 — магний по сравнению с алюминием; 7 — высокопрочная сталь в сравнении с мягкой сталью;
- 8 — алюминий по отношению мировых цен; 9 — алюминий, Россия; 10 — алюминий, Украина

Потребление энергии для производства материалов, МДж/кг:

| | |
|---|---------|
| первичный алюминий (из бокситов) | 160—240 |
| вторичный алюминий (переплав лома) | 12—20 |
| пластмассы (гранулы, поливинилхлорид, полиэтилен) | 45—70 |
| сталь кислородно-конверторная (на базе руды) | 16—27 |
| электросталь (на базе скрапа) | 10—18 |

На основании этих данных можно рассчитать, во сколько раз удельные (масс.) затраты энергии для производства разных групп материалов превышают этот показатель для стали:

| Заменители стали | Кислородно-конверторная сталь | Электросталь |
|--------------------|-------------------------------|--------------|
| Алюминий первичный | 9,3 | 14,3 |
| Алюминий вторичный | 0,7 | 1,1 |
| Пластмассы | 2,7 | 4,1 |

Например, использование вторичного алюминия делает эти затраты почти одинаковыми, но резкое снижение качества ограничивает его применение. Полное сравнение материалов требует составления удельных показателей не только по массе, но и по объему.

Удельные показатели по объему также показывают преимущество стали перед другими материалами. И только низкая плотность пластмасс делает их менее энергоемкими, чем сталь (табл. 12.2). Это, однако, может иметь лишь формальное значение ввиду полной несопоставимости свойств.

Таблица 12.2

Преимущество углеродистой стали по энергоемкости производства

| Материалы | Энергоемкость производства материалов, ГДж/м ³ | Относительно углеродистой стали |
|--------------------|---|---------------------------------|
| Углеродистая сталь | 452 | 1,0 |
| Титан и сплавы | 2542 | 5,6 |
| Нержавеющая сталь | 855 | 1,9 |
| Полиэтилен | 73 | 0,2 |
| Алюминий и сплавы | 783 | 1,7 |
| Углепластик | 6000 | 13,3 |

12.2. Показатели качества материалов

Показатель качества продукции (ГОСТ 15467—79) — это количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции (надежность, безопасность, эстетические свойства, уровень стандартизации и унификации, транспортабельность и др.), рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания, эксплуатации или потребления.

Рассматриваются единичные, комплексные (несколько свойств), определяющие, интегральные, обобщающие и дополнительные показатели качества.

Определяющий показатель качества продукции — показатель, по которому принимается решение оценивать качество.

Интегральный показатель качества продукции является отношением суммарного полезного эффекта от эксплуатации или потребления

продукции к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию или потребление.

Обобщающие показатели характеризуют качество продукции независимо от ее вида или назначения — объем и удельный вес производства в общем выпуске продукции данной группы, величина экономического эффекта от использования материалов повышенного качества и т. д.

Дополнительные показатели качества продукции классифицируют по критериям:

- по количеству характеризующих свойств (единичные и комплексные);
- отношению к различным свойствам материалов (показатели прочности, долговечности, технологичности, безопасности и др.);
- стадии определения (проектные, производственные, эксплуатационные);
- характеру использования для оценки уровня качества (базовые и относительные);
- способу выражения (безразмерные, например баллы или проценты, и размерные).

Показатели стандартизации и унификации определяют степень *конструктивного единообразия* изделий, так как характеризуют использование в конкретном материале стандартизированных составляющих — сырья (шихтовых компонентов сплавов, составляющих элементов композиционных материалов и т. п.), а также уровень унификации составных частей, сложных по пространственной структуре, в том числе многослойных материалов (стандартизированных, унифицированных и оригинальных).

К *стандартизированным* относятся составные части материалов, выпускаемые по международным, государственным или отраслевым стандартам (например, медная фольга, стеклоткань и полимерные связующие при производстве фольгированных стеклопластиков или стандартные ферросплавы, применяемые при выплавке сталей).

К *унифицированным* относятся составные части материала, которые:

- предприятие получает в готовом виде как комплектующие материалы, находящиеся в серийном производстве;
- изготавливаются по стандартам предприятия, являющегося головным в отрасли, и используются не менее чем в двух типоразмерах или видах материалов, выпускаемых данным или смежным предприятием;
- ранее спроектированы как оригинальные для конкретного материала и применены не менее чем в двух типоразмерах или видах продукции.

К *оригинальным* относятся составные части материала, разработанные *только* для данного материала.

Показателями стандартизации и унификации материалов являются:

- коэффициент *применяемости по типоразмерам*

$$K_{\text{ип}} = \frac{Q_{\text{т}} - Q_{\text{т.оп}}}{Q_{\text{т}}} 100 \%;$$

- *стоимостный коэффициент применяемости*

$$K_{\text{о.ип}} = \frac{C_{\text{об}} - C_{\text{оп}}}{C_{\text{об}}} 100 \%,$$

где $Q_{\text{т}}$ — общее количество типоразмеров составных частей в материале; $Q_{\text{т.оп}}$ — количество оригинальных типоразмеров составных частей; $C_{\text{об}}$ — общая стоимость материала; $C_{\text{оп}}$ — стоимость составных частей материала, входящих в оригинальные типоразмеры.

Патентно-правовые показатели качества продукции характеризуют уровень патентно-правовой защиты материала в Российской Федерации и за рубежом, а также уровень патентной чистоты. Например, показатель патентной защиты материала внутри страны

$$q_j = \frac{1}{\Pi} \sum_{i=1}^m q_{\text{В}i} \cdot \Pi_{ji},$$

где Π — общее количество составных частей в данном материале; m — число групп значимости (в зависимости от назначения и характера конкретного материала все его составные части могут быть разделены на несколько, обычно две или три, групп значимости); $q_{\text{В}i}$ — коэффициент весомости i -й составной части, защищенной патентами и свидетельствами внутри страны, по группам значимости; Π_{ji} — количество i -х составных частей, защищенных патентами и свидетельствами в стране, по группам значимости.

12.3. Контроль качества металлопродукции

Контроль качества — проверка соответствия показателей качества продукции установленным требованиям — включает проведение измерений, экспертизы, испытаний или оценки характеристик объектов и сравнение полученных результатов с установленными требованиями для определения соответствия.

Надзор за качеством — это деятельность по непрерывному наблюдению и аудиту состояния объекта с целью удостоверения того, что установленные требования выполняются.

Система контроля качества — совокупность видов, методов и средств оценки качества и профилактики брака на различных этапах существования продукции. Имеет, как правило, несколько уровней управления (предприятие — цех — участок — рабочее место) и позволяет осуществлять своевременное и целенаправленное воздействие на уровень качества выпускаемой продукции, обеспечивая оперативное выявление и ликвидацию сбоев в работе с наименьшими затратами ресурсов.

В состав отделов и управлений технического контроля предприятий обычно входят следующие специализированные подразделения (по выполнению отдельных видов работ по контролю качества):

- контроля технического состояния и точности оборудования (ОТК);
- контроля технологической оснастки;
- контроля качества инструмента собственного изготовления;
- входного контроля качества продукции, получаемой по кооперации;
- пооперационного (технологического) контроля качества продукции в цехах и на участках;
- приемочного контроля готовой продукции;
- контрольных испытаний продукции;
- контроля качества упаковки и хранения продукции на складах;
- контроля качества продукции в процессе ее эксплуатации и потребления (в том числе анализа претензий и рекламаций потребителей на выпускаемую продукцию);
- инспекционного контроля;
- технического и технологического обеспечения процессов контроля качества;
- измерительной техники (в том числе внедрения новых средств и методов технического контроля — неразрушающего, активного и др.);
- ремонта контрольно-испытательного оборудования, измерительных приборов и оснастки;
- учета, анализа и классификации брака в производстве;
- изоляции брака;
- разработки, внедрения и контроля функционирования системы управления качеством продукции на предприятии.

Операции контроля качества, осуществляемые персоналом ОТК предприятий, являются неотъемлемой составной частью технологического процесса изготовления продукции, а также ее последующей упаковки, транспортировки, хранения и отгрузки потребителям. Приведенный перечень подразделений может быть существенно расширен за счет включения в него лабораторий, бюро и групп, не входящих, как правило, в состав отделов и управлений технического контроля, но оказывающих тем не менее существенное и непосредственное влияние на общее состояние работ по контролю качества.

Классификация видов технического контроля материалов может быть проведена по следующим признакам.

1. В зависимости от объектов контроля различают контроль качества: предметов труда, средств труда, условий труда, процесса труда и результатов труда.

2. В зависимости от субъектов контроля качества выделяют контроль: общегосударственный, ведомственный, межведомственный, общественный.

3. По признаку контролируемых этапов жизненного цикла материалов можно выделить контроль качества: при разработке новой продукции, в процессе производства продукции, в сфере обращения продукции, в процессе потребления (эксплуатации) и утилизации.

4. В зависимости от иерархических уровней контроля различают контроль качества: федеральными органами исполнительной власти, отраслевой, на предприятиях и в организациях, в производственных единицах, цеховой, на производственных участках, бригадный, индивидуальный.

5. По занимаемому месту в процессе производства выделяют входной контроль, межоперационный (технологический) контроль, приемочный контроль готовой продукции, инспекционный контроль.

6. В зависимости от характера контролируемых свойств и параметров материалов различают контроль физических, химических и механических свойств, структуры, а также контроль геометрических и других параметров.

7. Способ определения контролируемых свойств и параметров материалов позволяет выделить такие его виды, как контактный, бесконтактный, непрерывный, периодический, летучий, контроль качества при непосредственной оценке, контроль качества методом сравнения.

8. По степени охвата контролируемой продукции выделяют контроль сплошной, простой выборочный и статистический выборочный.

9. По уровню использования технических средств контроля различают контроль органолептический, регистрационный, измерительный, а также контроль качества по образцу (эталоны).

10. По степени технической оснащенности процессов контроля различают контроль немеханизированный, механизированный, автоматизированный, активный.

11. По характеру воздействия на контролируемую продукцию выделяют разрушающий и неразрушающий контроль.

12. В зависимости от характера воздействия контроля на процесс формирования качества продукции и возникновения дефектов различают профилактический и последующий (фиксирующий) контроль.

Порядок проведения входного контроля качества металлопродукции на предприятиях. Предприятия-производители осуществляют поставку материалов потребителю по определенным условиям. Например, общие правила приемки готовой металлопродукции регламентированы ГОСТ 7566—94 «Сталь. Общие требования приемки, упаковки, маркировки и оформления документации». Стандарт обязывает предприятие-изготовитель гарантировать соответствие качества продукции требованиям стандартов, а также *оговоренным* в заказе. На заводах-изготовителях такие гарантии обеспечивает аппарат технического контроля.

В основе организации входного контроля материалов на машиностроительных предприятиях — требования, сформулированные в ГОСТ 24297—87 «Входной контроль продукции. Основные положения». Для

продукции массовых видов стандартами предусмотрен выборочный контроль, который, естественно, не может дать 100 %-ной гарантии качества. Это допускается проектной и исполнительской технологией производства. Но неоправданно высокий объем продукции, подлежащей контролю, увеличивает издержки производства (затраты времени, потери материалов, трудоемкость анализа и пр.), поэтому поставщик и потребитель согласуют между собой задачи и объемы контроля.

Входной контроль материалов позволяет в общем случае:

- определять по сопроводительной документации соответствие поступившего материала требованиям стандартов, технических условий и заказу;
- обнаруживать дефекты в материале, выявлять их характер, устанавливать степень пораженности материала дефектами;
- предотвращать случайное попадание дефектного материала со склада в производственные цехи;
- накапливать информацию о качестве материалов и давать оценку поставщикам о качестве продукции;
- осуществлять работу с поставщиками по повышению качества материалов.

Порядок входного контроля, отражающий специфические требования к качеству металлопродукции, устанавливается отраслевыми стандартами или стандартами предприятия, разрабатываемыми на основании требований ГОСТ 24297—87.

Процедура входного контроля включает следующее.

1. Идентификация партии материала, проверка соответствия данных сертификата на данную партию требованиям заказа и стандарту (техническим условиям), оценка полноты (объема) проведенных поставщиком контрольных испытаний.

2. Внесение сертификатных данных в регистрационную систему (компьютер, журнал и т. д.).

3. Отбор образцов от партии материала и осуществление необходимых испытаний, объем которых предписывается государственным стандартом (техническими условиями) на данную продукцию. В ряде случаев объем контроля в зависимости от специальных требований отрасли (предприятия) определяется отраслевым стандартом или стандартом предприятия на порядок входного контроля. Результаты контрольных испытаний вносят в регистрационную систему.

4. Отправка материала, удовлетворяющего ГОСТу и ТУ (вместе с сопроводительными документами) на склад.

5. Если при входном контроле выявляется недопустимый дефект материала, то производят повторную проверку, условия и объем которой определяются ГОСТами или договором между поставщиком и потребителем. В случае подтверждения дефекта партия материала бракуется.

Возможные действия с забракованным (задержанным) материалом:

- предъявление рекламации и возврат материала поставщику;
- использование не по прямому назначению и по новой согласованной цене;

- осуществление сплошного контроля с разбраковкой;
- исправление дефекта;
- как исключение, использование материала по прямому назначению, по обходной технологии, если это не связано с ухудшением качества и эксплуатационных характеристик выпускаемых изделий.

Как правило, предпочтение следует отдавать первому варианту, так как при этом вся ответственность и экономические санкции ложатся на поставщика. Однако и в остальных случаях можно предъявлять поставщику требования об оплате дополнительных расходов.

6. Анализ и оценка качества поставляемого материала на основе предварительной информации (для совместной с поставщиком работы по улучшению продукции). Например, поставщику может быть оказана помощь в оснащении необходимыми средствами контроля или усиление/сокращение контроля материалов по некоторым показателям качества.

Виды входного контроля металлопродукции:

- визуальный осмотр без применения увеличительных приборов или с их применением;
- измерение линейных размеров и конфигурации профиля;
- анализ химического состава;
- определение механических свойств;
- анализ микро- и макроструктуры;
- проведение технологических испытаний;
- специальные виды проверки и анализов.

Результаты входного и выходного контроля являются приемо-сдаточными параметрами в общей цепи производства.

Методы контроля качества металлопродукции. Дефекты материалов классифицируются по следующим признакам.

- По размерам дефекты подразделяют на макро- и микродефекты. Макродефекты изучают визуально-оптическим методом при увеличении до 50 раз. Микродефекты, так же как и микроструктуру, чаще всего анализируют с помощью оптических микроскопов.

- По расположению дефекты подразделяются на поверхностные и внутренние. К поверхностным дефектам металлопроката относят продольные и поперечные трещины, пережимы, разрывы, спаи, закаты, складки и т. п. К внутренним дефектам относят пары и газовые пузыри, внутренние расслоения, флокены, неметаллические включения и пр.

- В зависимости от причин возникновения дефекты могут быть литейными (неметаллические включения, поры и газовые пузыри, грубые зоны ликвации), механическими (разрывы, закаты, отпечатки валков, риски), термическими (закалочные трещины, пережог, обезуглероживание), химическими (поры и язвы травления) и т. п.

По отношению к исследуемому материалу методы контроля качества материалов разделяются на *разрушающие* и *неразрушающие*.

Разрушающие методы контроля трудоемки и обязательно используются только при выборочном контроле качества материалов.

- Механические испытания (см. гл. 3).
- Технологические пробы. К ним относятся испытания, выявляющие способность материала принимать определенные деформации или воздействия, подобные тем, которые материал должен претерпевать при обработке или в условиях дальнейшей эксплуатации (рис. 12.3).

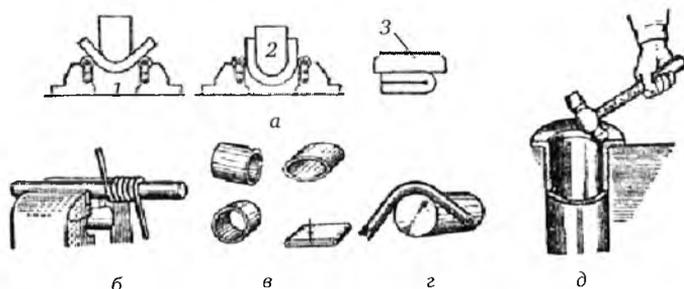


Рис. 12.3. Технологические пробы:

- а* — на изгиб; *б* — на навивание проволоки; *в* — на сплющивание труб; *г* — на загиб труб; *д* — на бортование труб; 1 — загиб на определенный угол; 2 — загиб до параллельности сторон; 3 — загиб до соприкосновения сторон

Стандартизованы следующие виды технологических проб: испытание листов и лент на вытяжку сферической лунки (ГОСТ 10510—80); испытание листов и лент на перегиб (ГОСТ 13813—68); испытание листа на двойной кровельный замок (ГОСТ Р 52246—2004); технологические испытания на изгиб (ГОСТ 14019—80); испытания на осадку (ГОСТ 8817—82); испытание на расплющивание (ГОСТ 8818—73); испытание проволоки на навивание (ГОСТ 10447—93); испытание проволоки на перегиб (ГОСТ 1579—93); испытание проволоки на скручивание (ГОСТ 1545—80); испытание труб на загиб (ГОСТ 3728—78); испытание труб гидравлическим давлением (ГОСТ 3845—75); испытание труб на бортование (ГОСТ 8693—80); испытание труб на раздачу (ГОСТ 8694—75); испытание труб на сплющивание (ГОСТ 8695—75); испытание труб на раздачу кольца конусом (ГОСТ 11706—78).

Критериями годности в большинстве случаев являются отсутствие на образце после испытания трещин, надрывов, расслоений или количество циклов воздействия на образец до разрушения. Поэтому металлургические факторы, которые повышают вязкость стали, будут способствовать достижению лучших результатов технологических испытаний.

- Контроль структуры осуществляется в рамках ТУ или внутризаводских стандартов в качестве дополнительного средства, обеспечивающего контроль комплекса свойств материала, заданных потребителем.

Как правило, отбраковка по структуре проводится на основе сравнения с существующими в нормах производственного контроля стандартами и техническими условиями, путем сравнения с эталонными шкалами вида поверхности, формы частиц, величины зерна, анизотропии зерна, разнотерности, неоднородности, кластерности, строчечности частиц (неметаллических включений, карбидов, графита и т. п.).

Для проведения контроля используются оптические анализаторы изображений (типа «Квантимет», «Эпиквант» и т. п.), которые работают как со шлифом, так и с его изображениями на пленке. Нижняя граница регистрируемых элементов структуры определяется разрешающей способностью оптического микроскопа, которая должна составлять не менее 1 мкм.

- **Аттестация изломов.** Поверхность разрушения характеризует структурные и металлургические факторы, определяющие вязкость материала. Поэтому требования к строению изломов включены в нормативные документы на металлопродукцию.

Максимальная полнота извлечения информации о разрушении обеспечивается при анализе строения изломов на макроуровне (рис. 12.4), когда измеряемые элементы рельефа сопоставимы с габаритами образца или изделия, и на микроуровне, если измеряются элементарные площадки разрушения (фасетки, ямки). Для визуального наблюдения объемных картин при небольших увеличениях (до $\times 100$) используют *бинокулярные лупы* и *стереомикроскопы*. Для анализа микростроения излома обычно используется растровая электронная микроскопия (см. рис. 3.7).

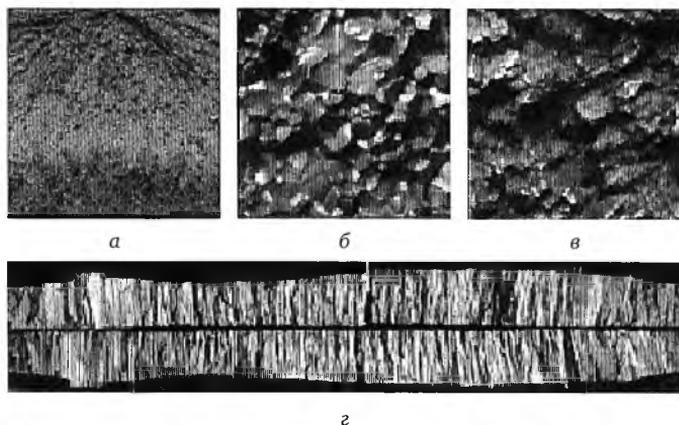


Рис. 12.4. Изломы металлов ($\times 5$):

а — вязкий излом; *б* — интеркристаллитный хрупкий излом; *в* — транс-кристаллитный хрупкий излом; *г* — слоистый излом

Неразрушающие методы контроля основаны на получении информации в виде электрических, световых, звуковых и других сигналов о качестве проверяемых объектов при их взаимодействии с физическими полями (электрическим, магнитным, акустическим и др.) и (или) веществами (рис. 12.5), и предназначены:

- для выявления дефектов нарушения сплошности материала изделий;
- оценки структуры материала изделий;
- контроля геометрических параметров изделий;
- оценки физико-химических свойств материала изделий.

В зависимости от принципа работы контрольных средств методы неразрушающего контроля подразделяются на акустические, капил-

лярные, магнитные, оптические, радиационные, радиоволновые, тепловые, методы контроля течейскаием, электрические и электромагнитные (методы вихревых токов).



Рис. 12.5. Принцип метода ультразвукового рассеивания для определения глубины закаленного слоя

В дефектоскопии для контроля металлов и изделий чаще всего применяют визуально-оптические, капиллярные, магнитные, токовихревые, ультразвуковые и радиационные методы, которые позволяют осуществить сплошной контроль.

В движущихся изделиях или в изделиях, нагретых до высоких температур, дефекты обнаруживаются путем использования бесконтактного контроля. Например, в металлургии работают средства магнитного контроля структуры листа при его скорости до 5 м/с, рентгеновского анализа фазового состава и текстуры движущейся полосы, ультразвуковой дефектоскопии горячего сляба с бесконтактным (индукционным или лазерным) вводом и выводом сигнала.

12.4. Экспертиза качества материалов

Экспертиза — самостоятельное исследование, проводимое компетентным специалистом — экспертом на основании объективных фактов с целью получения достоверного решения поставленной задачи. При экспертизе материалы, подобно всем другим видам промышленной металлопродукции, рассматриваются как товары с определенной совокупностью потребительских свойств. На практике в основном применяются комплексная и оперативная экспертизы (табл. 12.3).

Комплексная экспертиза проводится для всестороннего изучения и оценки качества групп *однотипных* материалов, выпускаемых серийно для массового потребления. В процессе экспертизы формируются критерии оценки, отбираются базовые образцы и показатели качества. Поэтому комплексные экспертизы позволяют получить не только научные результаты, но и определенный методический и нормативный материал, необходимый для проведения других видов экспертизы.

Классификация методов проведения экспертизы потребительских свойств продукции

| Виды и методы экспертизы потребительских свойств продукции | Объекты экспертизы | | | | | серийно выпускаемая продукция |
|--|--------------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------------|--|-------------------------------|
| | техническое задание | проектно-конструкторская документация | опытный образец (опытная партия) | промышленный образец | экспертное решение | |
| Оперативная экспертиза: | Экспертиза технических решений | Экспертиза документации | Экспертиза опытных образцов | Экспертиза промышленных образцов | Аттестация продукции по категориям качества | |
| экспертные методы | п. 1—4* | п. 1—4; п. 6—8 | п. 1—4; п. 6—8 | п. 1—3; п. 6—8 | п. 1—4; п. 6—8 | |
| расчетно-инструментальные методы | — | — | п. 5 | — | п. 5 | |
| Комплексная экспертиза: | — | — | Комплексная экспертиза опытных партий изделий | — | Комплексная экспертиза опытных групп изделий | |
| исследовательские и социологические методы | — | — | — | — | п. 1—3; 6 | |
| экспертные методы | — | — | п. 1—4; п. 6—8 | — | п. 1—4; п. 6—8 | |
| расчетно-инструментальные методы | — | — | п. 5 | — | п. 5 | |

Условные обозначения:

1. Разработка потребительских классификаций.
2. Выявление тенденций изменения конструктивно-технических и художественно-стилевых особенностей продукции данного вида и класса.
3. Разработка модели потребления продукции человеком.
4. Разработка номенклатуры потребительских свойств и показателей качества.
5. Проведение измерений и определение значений показателей.
6. Формирование критериев оценки.
7. Составление базового ряда образцов и шкал оценки.
8. Оценка потребительских показателей качества.

Оперативная экспертиза материалов анализирует результаты предварительно проведенных комплексных экспертиз и проводится как на основных стадиях разработки новых материалов (техническое задание, проект, конструкторская документация, опытный образец), так и в процессе массового выпуска и потребления продукции (включая аттестацию продукции по категориям качества).

Оперативная экспертиза предусматривает:

- использование (по возможности) собранных ранее данных о материалах определенного вида, потребителях этих материалов, условиях потребления, результатах испытаний и т. д.;
- сокращенные сроки проведения;
- вынесение коллективного суждения экспертов о потребительском уровне качества материалов.

Конструкторско-технологическая экспертиза является важнейшей составной частью оперативной экспертизы. Цель проведения:

- изучение структуры и свойств материалов на всех стадиях их жизненного цикла;
- принятие решения об использовании того или иного материала в конструкциях, машинах и приборах;
- исследование технологии обработки сырья, полуфабрикатов и изготовления продукции;
- определение соответствия продукции технологическим режимам и нормативам по количественному и качественному состоянию;
- определение правильности выбора необходимого оборудования, приспособлений, моделей, инструмента, расположения производственных мощностей и др.

Выводы конструкторско-технологической экспертизы часто используются в судебной практике.

Экономическая экспертиза проводится экспертом-экономистом с целью:

- выявления экономической целесообразности производства и (или) потребления того или иного материала;
- установления фактического состояния дел и обстоятельств, возможности решения вопросов из области правовых отношений.

Эта экспертиза используется для определения общей суммы приписок к выполненным заданиям по выпуску товарной продукции, при расследовании дел о фальсификации товаров; выполнении планов производства товарной продукции по ее видам, количеству и качеству; ее сохранности при транспортировании потребителю; при реализации и определении себестоимости продукции.

Критерии, используемые при анализе и оценке потребительских свойств продукции, подразделяются на общие и конкретные. *Общие критерии* — это сложившиеся в обществе ценностные представления, ориентации и нормы. *Конкретные критерии* — это реальные требования к качеству продукции данного вида, зафиксированные в нормативных документах, а также базовые образцы и показатели, принятые

за исходные при сравнительном анализе и оценке потребительских свойств.

В качестве базовых образцов могут быть использованы:

- реальная продукция отечественного или зарубежного производства, основные потребительские свойства которой соответствуют лучшим мировым достижениям или превышают их;
- перспективные образцы и проектные разработки, в которых учтены основные тенденции развития данного вида продукции и качество которых соответствует прогнозируемому уровню качества.

При проведении экспертизы отдельных групп потребительских свойств эксперты формируют ценностные меры и шкалы, включающие базовые ряды образцов ранжированных по уровню потребительской ценности. Этот специфический вид критериев (базовый ряд образцов) используется, в частности, при анализе и оценке эстетических свойств продукции.

Процедура проведения экспертизы. При экспертной оценке качества продукции основные операции группируются в три этапа: подготовительный, основной и заключительный. Основные этапы экспертизы потребительских свойств продукции представлены на рис. 12.6.

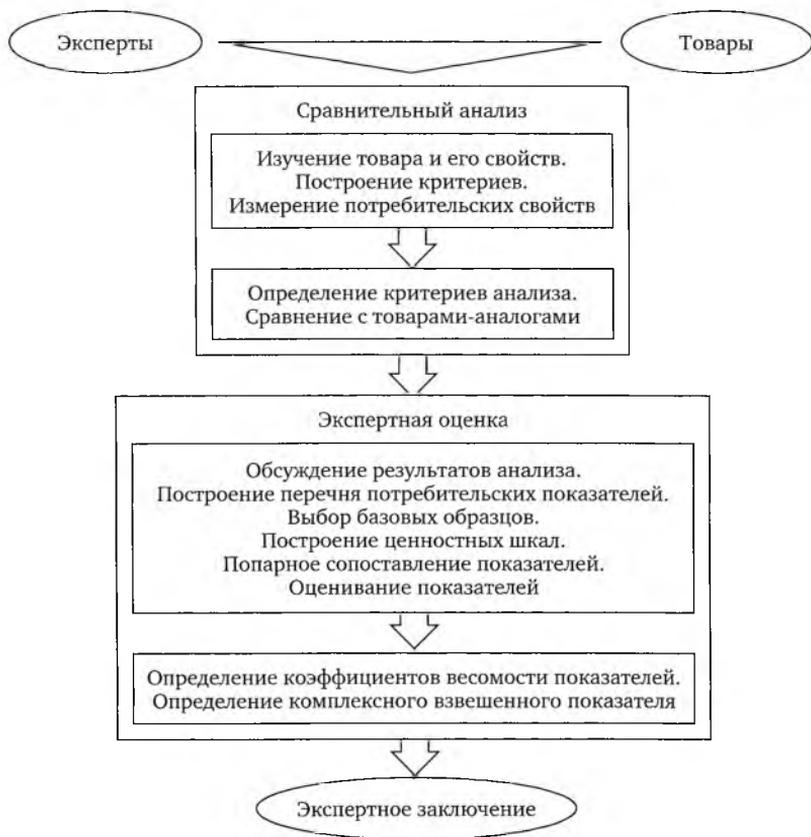


Рис. 12.6. Основные этапы экспертизы потребительских свойств продукции

На *подготовительном этапе* принимается решение о создании экспертной комиссии, ее структуре и составе рабочей группы, формулируются цели экспертизы.

Основной этап включает операции, выполняемые в процессе экспертизы.

Рабочая группа выбирает способы и методы оценки, подготавливает анкеты, осуществляет опрос экспертов и т. д. Экспертная группа проводит классификацию товаров и потребителей, определяет номенклатуру показателей, их коэффициенты весомости, значения базовых показателей, оценивает показатели качества анализируемой продукции.

Заключительный этап включает обработку результатов рабочей группой и анализ этих результатов с целью подготовки обобщенного мнения экспертной комиссии.

Результатом экспертизы является зафиксированная особым способом качественная или количественная оценка потребительских свойств продукции. Итоговая оценка строится на основе обобщения мнений экспертов, согласования результатов оценки с каждым отдельным экспертом и утверждения ее организатором экспертной комиссии.

Структура и содержание акта экспертизы. Результаты экспертизы оформляются на основании записей эксперта в рабочей тетради в процессе проведения экспертизы. *Акт экспертизы* составляется на бланках единой формы с приложением (контрактные экспертизы) или на бланках других форм (рис. 12.7) для иных видов экспертизы (таможенные, консультационные, оценочные).

Оригинальный экземпляр акта экспертизы составляется экспертом на русском языке *собственноручно* четко, без помарок и сокращений слов (за исключением общепринятых).

Акт экспертизы состоит из трех частей: протокольной, констатирующей и заключения.

Протокольная часть акта экспертизы. В заглавной части указывается десятизначный номер акта экспертизы, соответствующий регистрационному номеру наряда.

Результаты экспертиз нескольких партий товара, проведенных по одному наряду у одного заказчика, эксперт оформляет отдельными актами, регистрационные номера которых выражаются дробью, в числителе указывается регистрационный номер наряда, в знаменателе — порядковый номер акта.

В пунктах протокольной части акта экспертизы эксперт указывает сведения, соответствующие наименованиям пункта. При отсутствии данных для заполнения какого-либо пункта указанный пункт не заполняется, о чем в констатирующей части акта делается соответствующая запись.

Констатирующая часть акта экспертизы должна содержать описание хода изучения предъявленных документов; аргументированное изложение методов и фактически установленных в соответствии с поставленной задачей результатов экспертизы (осмотра и (или) исследо-

роваться с констатирующей частью акта. Заключение подписывает только эксперт.

Количество экземпляров актов согласовывается с заказчиком, все экземпляры акта должны быть читаемы. Оформленный акт экспертизы и приложения к нему заверяются печатью (круглым штампом).

Исправления в протокольной или констатирующей части контрактного акта экспертизы заверяются подписью эксперта и подписями представителей заказчика; других актов экспертизы — подписью эксперта. Исправления, вносимые в заключение акта экспертизы, должны быть оговорены и заверены подписью только эксперта.

12.5. Управление качеством материалов

В соответствии с ГОСТ Р ИСО 9000—2001 управление качеством — часть менеджмента качества (скоординированная деятельность по руководству и управлению организацией применительно к качеству), направленная на выполнение требований по обеспечению и поддержанию необходимого уровня качества.

Непосредственными объектами управления являются показатели характеристики качества продукции, факторы и условия, влияющие на их уровень, а также процессы формирования качества продукции на разных этапах жизненного цикла.

Механизм управления качеством любой продукции (и том числе и качеством материалов) представляет собой совокупность используемых принципов, систем, методов, моделей и функций управления на различных этапах жизненного цикла продукции и уровнях управления качеством.

Функции механизма управления качеством:

- прогнозирование потребностей рынка, технического уровня и качества продукции;
- планирование повышения качества продукции;
- нормирование требований к качеству продукции и стандартизация;
- разработка и постановка продукции на производство;
- технологическая подготовка производства;
- организация взаимоотношений по качеству продукции между поставщиками сырья, материалов, полуфабрикатов и комплектующих изделий, предприятиями-изготовителями и потребителями продукции;
- обеспечение стабильности запланированного уровня качества продукции на всех стадиях ее жизненного цикла;
- контроль качества и испытания продукции;
- профилактика брака в производстве;
- внутрипроизводственная аттестация продукции, технологических процессов, рабочих мест, исполнителей и т. д.;

- сертификация продукции, работ, услуг, систем качества и производств;
- стимулирование и ответственность за достигнутый уровень качества;
- внутрипроизводственный учет и отчетность по качеству продукции;
- технико-экономический анализ изменения качества продукции;
- обеспечение управления качеством продукции (организационное, материально-техническое, метрологическое, технологическое, информационное, правовое, финансовое);
- специальная подготовка и повышение квалификации кадров.

Выделяют три основные категории организационно-технических проблем управления качеством выпускаемой продукции: статистический контроль качества материалов, полуфабрикатов и готовых изделий; анализ причин снижения качества; разработка управляющих моделей менеджмента качества.

Значение статистического контроля заключается в том, что, будучи основанным на выборочных пробах, он обеспечивает высокую надежность результатов. В настоящее время для организации статистического приемочного контроля применяют положения ГОСТ 18242—81, составленного с учетом рекомендаций ИСО, регламентирующего объемы выборок, приемочные и браковочные числа в зависимости от объема партии и допустимого уровня дефектности, называемого приемочным уровнем качества.

В производстве статистический приемочный контроль осуществляется в трех основных формах:

- *входной контроль* — проверка качества поступающего сырья и полуфабрикатов (металл, поковки, отливки, метизы, неметаллические материалы);
- *технологический (промежуточный) контроль* — проверка качества продукции на отдельных стадиях производства;
- *выходной (окончательный) контроль* — проверка качества выпускаемой продукции.

Статистический приемочный контроль устанавливает приемочный уровень дефектности — приемлемый уровень качества (англ. *Acceptable Quality Level, AQL*) по ГОСТ Р 50779.71—99, обеспечивая одновременно выбранную верхнюю границу риска потребителя (риска приемки партий с низким качеством). Чтобы уменьшить вероятность появления ошибок в статистическом приемочном контроле, существует понятие риска изготовителя α — максимальной доли выбракованных партий с уровнем дефектности, не превышающим *AQL*.

Роль стандартизации в управлении качеством материалов. *Стандартизация* — это процесс установления и применения стандартов. Стандарт как нормативно-технический документ устанавливает комплекс норм, правил и требований к объекту стандартизации. Стандарт может быть разработан как на материальные предметы (продук-

цию, эталоны, образцы веществ), так и на нормы, правила, требования в различных областях, в частности для обеспечения управления качеством продукции.

Исходными положениями современной стандартизации является система предпочтительных чисел. Сущность этой системы состоит в том, что если при выборе любых параметров (производительность, скорость, число оборотов, мощность, давление, размеры) руководствоваться определенным научно обоснованным рядом чисел, то изделия окажутся согласованными с другими видами продукции, связанными с ними. Например, масса и размеры материалов будут соответствовать мощности и габаритам транспортных средств и обрабатывающего оборудования.

Государственные и отраслевые стандарты, стандарты предприятий устанавливают требования и нормы к показателям качества освоенной и перспективной продукции, системам управления качеством, а также к процессам проведения контрольных операций, испытаний, разработки конструкторской и технологической документации, организации и управления производством, аттестации и сертификации с целью улучшения всей работы предприятия.

В настоящее время методологической основой системы управления качеством являются стандарты ИСО серии 9000, разработанные для того, чтобы помочь организациям всех видов и размеров внедрять и обеспечивать функционирование эффективных систем менеджмента качества:

- ГОСТ Р ИСО 9000—2001 описывает основные положения систем менеджмента качества и устанавливает терминологию для систем менеджмента качества;
- ГОСТ Р ИСО 9001—2001 определяет требования к системам менеджмента качества для тех случаев, когда организации необходимо продемонстрировать свою способность предоставлять продукцию, отвечающую требованиям потребителей и установленным к ней обязательным требованиям, и направлен на повышение удовлетворенности потребителей;
- ГОСТ Р ИСО 9004—2001 содержит рекомендации, рассматривающие как результативность, так и эффективность системы менеджмента качества. Целью этого стандарта является улучшение деятельности организации и удовлетворенность потребителей и других заинтересованных сторон.

Организационно-технической основой комплексного управления качеством продукции на уровне предприятий являются стандарты предприятия (СТП), обеспечивающие непосредственную связь процесса управления предприятием с управлением на уровне отрасли.

При формировании комплексной системы управления качеством продукции (КС УКП) на машиностроительном заводе разрабатывается основной СТП (устанавливает функции управления качеством на стадиях разработки, производства и эксплуатации изделий) и специальные

СТП (определяют порядок выполнения работ, правила, нормы, методы и формы документов, действующих в каждой из подсистем КС УКП), комплектуемых в группы по факторам управления качеством изделий.

Специальные стандарты предприятия разрабатываются по следующим основным направлениям:

- на *номенклатуру используемых материалов* комплектующих изделий (сокращение рядов типоразмеров, регламентация параметров комплектующих изделий и материалов, проверяемых при входном контроле);
- на *технологическую оснастку* (унификация станочных приспособлений, пресс-форм, штампов, режущего и измерительного инструмента, контрольной аппаратуры, тары, элементов внутризаводского технологического транспорта и пр.);
- на *типовые операции технологических процессов* штамповки, литья, механической обработки, сборки, контроля и испытаний изделий;
- на *классификаторы, кодификаторы первичной информации*;
- на *требования, нормы* (по технике безопасности, производственной санитарии), специфичные для выполнения конкретной работы;
- на *требования, обеспечивающие высокую культуру производства*, создание условий, необходимых для выполнения заданных параметров качества высокоточных и особо ответственных изделий;
- на *осуществление контроля загазованности, загрязненности* механическими частицами, влажности воздуха, его температуры в сборочных помещениях и контрольно-испытательных станциях.

Эффективным средством повышения качества промышленной продукции являются стандартизованные системы технической документации ЕСКД, ЕСТД, ЕСТПП и надзор за соблюдением требований ГОСТов, ОСТов, СТП. Для реализации этих мероприятий на предприятии разрабатывается специальный СТП «Порядок организации работ по внедрению нормативно-технической документации», учитывающий особенности, назначение выпускаемой продукции, характер и тип производства.

Одним из наиболее эффективных направлений экономии металлов и сплавов является и повышение их качества за счет улучшения режимов термической обработки, поэтому в этой области производства приоритет отдается СТП «Организация и совершенствование термической обработки».

Почти половина получаемой в машиностроении экономии проката черных металлов является результатом повышения требований стандартов и технических условий к его химическому составу, улучшению механических характеристик. Из этого количества 75 % экономии достигается путем повышения качественных характеристик самого металлопроката, а 25 % — за счет замены черных металлов более прогрессивной продукцией. Применение прогрессивных видов металлопродукции¹ в капитальном строительстве дает около 60 % экономии

¹ Развитие внутреннего рынка цветных металлов и прогрессивных видов металлопродукции в период до 2015 г. будет связано с увеличением их потребления преж-

материальных затрат и примерно на 90 % обеспечивает условия для снижения массы зданий и сооружений.

Повышенные требования государственных стандартов к снижению массы выпускаемых машин, механизмов, оборудования на единицу их полезного эффекта приводят к экономии и других материальных ресурсов, в частности — топлива и энергии. Например, снижение массы автомобиля (допустим, за счет применения пластмасс и алюминиевых сплавов) на 100 кг дает экономию 1 л топлива на 100 км пробега.

12.6. Современные системы менеджмента качества

В настоящее время конкурентоспособность любого предприятия независимо от формы его собственности и масштабов деятельности зависит в первую очередь от качества и стоимости (цены) его продукции. В 1950—1960-е гг. основой бизнеса являлось соотношение:

$$\boxed{\text{Затраты производства}} + \boxed{\text{Желаемая прибыль}} = \boxed{\text{Цена}} .$$

По ряду причин тогда возможно было навязывать свою цену, и рыночный механизм еще способствовал получению желаемой прибыли от реализации высококачественной продукции, удовлетворяющей требованиям потребителя. Издержки проектирования и производства не были главной заботой производителя, а рынок позволял поддерживать цену на желаемом для производителя уровне, делая фактически существующий рынок *рынком производителя*. Начиная с 1970-х гг. условия для бизнеса начали изменяться и в 1990-е гг. формула успешного бизнеса трансформировалась в другую:

$$\boxed{\text{Цена}} - \boxed{\text{Затраты производства}} = \boxed{\text{Прибыль}} .$$

Наиболее эффективной рабочей моделью управления становится модель *всеобщего менеджмента качества* (англ. *Total Quality Management, TQM*).

Если конкурент способен внедрить современную рабочую модель качества быстрее, у него появляется конкурентная скорость, и в резуль-

де всего в следующих направлениях: алюминия — на производство тароупаковочных материалов, строительных конструкций, транспортных средств; меди — на создание энергосберегающего безопасного оборудования и приборов, теплообменных аппаратов, прогрессивных видов медного и латунного проката для автомобилестроения, авиации, производства товаров длительного пользования; цинка — на увеличение производства стальной оцинкованной продукции, резинотехнических изделий и лакокрасочных материалов (приказ Министерства промышленности и энергетики РФ от 29 мая 2007 г. № 177 «Об утверждении стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации на период до 2015 года»).

тате ваши ресурсы уменьшаются, в том числе из-за сокращения объема продаж. Единственный выход в такой ситуации — это умение управлять качеством продукции в зависимости от изменяющихся запросов потребителя.

Кто быстрее сможет отреагировать на эти запросы при минимальных затратах на обеспечение требуемого качества, тот и будет иметь больше шансов выиграть борьбу за потребителя у своих конкурентов.

Оперативность реагирования на изменение требований рынка и создание продукта, оправдывающего ожидания потребителя, возможны только в том случае, когда в этом процессе активно и осознанно участвуют все лица, как со стороны потребителя, так и со стороны производителя. Все должны ясно представлять результат и пути достижения этого результата на взаимовыгодных условиях. Этой обоюдной выгоде и служит внедрение *TQM*.

TQM позволяет обеспечить требуемое рынком качество продукта (сервиса) и его стоимость. В то же время его возможности значительно шире, чем просто обеспечение качества продукта или сервиса. *TQM* — это принципиально новый подход к управлению любой организацией, нацеленной на качество, основанный на участии всех ее членов (персонала во всех подразделениях и на всех уровнях организационной структуры) и направленный на достижение долгосрочного успеха через удовлетворение требований потребителя и выгоды как для членов организации, так и общества.

Каждое предприятие рано или поздно вынуждено радикально пересматривать производственный процесс на основе современного менеджмента качества, концепция которого (рис. 12.8) включает следующее.

1. Принятие научно обоснованных решений на основе анализа полной и объективной информации, собранной и обработанной с помощью современных методов (включая статистические методы сбора и анализа данных).
2. Отказ от авторитарного стиля руководства и переход к лидерству.
3. Как можно более глубокое и полное делегирование полномочий на всех уровнях, сопровождаемое соответствующим наделением ответственностью.
4. Постоянное обучение всех, везде и всегда.
5. Работа предприятия по принципу: «Мы все вместе делаем одно дело».
6. 100 %-ная ответственность руководителей за работу системы.

Система менеджмента качества на основе стандартов ИСО серии 9000. В соответствии со стандартами ИСО серии 9000 для обеспечения соответствия поставляемой продукции установленным требованиям организация должна разработать, документально оформить и поддерживать в рабочем состоянии эффективную систему качества, основной принцип которой — направленность на потребителя. Этот принцип заключается в том, чтобы на всех этапах жизненного цикла продукции

(услуги) обеспечить анализ, оценку и контроль всех процессов с тем, чтобы не отклониться от требований потребителя (заказчика).



Рис. 12.8. Концепция современного менеджмента качества

Основная цель системы качества — тотальная борьба с «несоответствиями». Именно на переходах с этапа на этап происходят основные потери качества. Поэтому горизонтальная цепь — маркетинг, НИОКР, разработка технологии, производств — наиболее важная в системе качества.

Особенность горизонтальных процессов в том, что они способны функционировать практически без вмешательства высшего руководства. В стандартах ИСО серии 9000 горизонтальная цепь изготовления и применения продукции называется «петля качества» (рис. 12.9).

Задача системы качества состоит в том, чтобы все процессы (и все составляющие их элементы) находились под контролем, выявлялись и устранялись все несоответствия требованиям качества. При этом главной задачей является предупреждение возможных несоответствий.

Основными задачами системы качества являются следующие:

- достижение и поддержание качества продукции на уровне, обеспечивающем постоянное удовлетворение установленных или предполагаемых запросов потребителя;



Рис. 12.9. Петля качества

- обеспечение уверенности потребителей и других заинтересованных лиц в том, что качество поставляемой продукции будет соответствовать требованиям;
- обеспечение уверенности руководства организации и других работников в том, что требования к качеству выполняются, а также в том, что качество продукции неуклонно повышается.

Система качества должна разрабатываться с учетом конкретной деятельности организации и соответствующих элементов системы качества, приведенных в международных стандартах ИСО серии 9000. Главный принцип системы качества — за качество на предприятии отвечают все.

При создании системы качества необходимо реализовывать следующие основные принципы:

- приоритетность требований потребителя (заказчика);
- предупреждение проблем качества;
- личная ответственность высшего руководства организации за разработку, внедрение системы качества и контроль ее функционирования, а также ответственность за определение политики в области качества, за организацию и общее руководство работами по его обеспечению;
- комплексный учет всех факторов и условий, прямо или косвенно воздействующих на качество, системный подход к организации процессов управления по всем уровням от руководства организации до отдельных исполнителей работ на всех стадиях создания, серийного производства и технического сопровождения в эксплуатации продукции;
- ответственность, самоконтроль и стимулирование персонала за качественно выполненную работу;
- обеспечение понимания всеми сотрудниками организации требований системы и политики в области качества;
- использование экономических методов с целью реализации оптимального соотношения между затратами на качество и получаемым эффектом.

Система качества должна быть документально оформлена в комплексе специальных документов (руководствах, стандартах предприятия, ин-

струкциях и т. д.). Документированная система качества — это модель, которая описывает деятельность предприятия в соответствии с требованиями МС ИСО серии 9000. Система качества включает 20 элементов, содержание каждого из которых приведено в ГОСТ Р ИСО 9001.

Внедрение системы менеджмента качества:

- способствует успешной реализации продукции (услуг), повышает качество продукции и ее конкурентоспособность, способствует удовлетворению запросов потребителя, расширяет рыночные возможности, улучшает имидж предприятия;
- повышает культуру менеджмента и уровень управляемости предприятием; оптимизирует последовательность в достижении целей, мотивацию персонала, использование времени и ресурсов, способствует взаимодействию персонала;
- экономит затраты на производство и применение продукции (услуг), снижает потери от брака, уменьшает количество ошибок и переделок, снижает отходы, экономит эксплуатационные затраты.

На завершающем этапе создания системы качества представляется целесообразным сертифицировать ее национальным или международным органом, ответственным за сертификацию системы качества.

12.7. Сертификация продукции, производств и систем качества

В общей системе менеджмента качества важным звеном является *сертификация*. В соответствии с Законом РФ от 10 июня 1993 г. № 5151-1 «О сертификации продукции и услуг» *сертификация* — процедура подтверждения соответствия, посредством которой независимая от изготовителя (продавца, исполнителя) и потребителя (покупателя) организация удостоверяет в письменной форме, что продукция соответствует установленным требованиям. Правила по проведению сертификации в Российской Федерации, утвержденные постановлением Госстандарта России от 10 мая 2000 г. № 26 «Об утверждении Правил по проведению сертификации в Российской Федерации», применяются при организации и проведении работ по обязательной и добровольной сертификации и распространяются на сертификацию продукции, услуг и иных объектов (процессов, работ, систем качества и др.), как отечественных, так и импортируемых.

Сертификация предполагает достижение следующих конечных целей:

- создание условий для деятельности предприятий, учреждений, организаций и предпринимателей на едином товарном рынке РФ, а также для участия в международном экономическом, научно-техническом сотрудничестве и международной торговле;
- содействие потребителям в компетентном выборе продукции;
- содействие экспорту и повышение конкурентоспособности продукции (продукция, экспортируемая в промышленно развитые страны из развивающихся стран, может легче найти рынок сбыта, если имеет сертификат соответствия, выданный заслуживающим доверие органом);

- защита потребителя от недобросовестности изготовителя (продавца, исполнителя, в том числе предотвращение импорта в страну продукции, не соответствующей требуемому уровню качества);
- контроль безопасности продукция для окружающей среды, жизни, здоровья и имущества;
- подтверждение показателей качества продукции, заявленных изготовителем.

Участниками сертификации являются национальный орган по сертификации (Госстандарт России), государственные органы управления, осуществляющие работы по сертификации, центральные органы систем сертификации, органы по сертификации, юридические лица, взявшие на себя функцию органа по добровольной сертификации, испытательные лаборатории, изготовители (продавцы, исполнители) продукции. Системы сертификации регистрируются Госстандартом России. При сертификации должна соблюдаться конфиденциальность информации, составляющей коммерческую тайну.

В работах по сертификации участвуют предприятия, учреждения: организации, независимо от форм собственности (в том числе других стран), признающие и выполняющие ее правила. При проведении сертификации перечисленные субъекты осуществляют взаимодействие с международными, региональными и национальными системами сертификации других стран.

Обязательная сертификация осуществляется только в случаях, предусмотренных законодательными актами РФ (законы РФ, государственные стандарты, санитарные нормы и правила, строительные нормы и правила, нормы по безопасности и др.).

Организацию и проведение работ по обязательной сертификации осуществляет Комитет Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации (Госстандарт России). По отдельным видам продукции организацию и проведение работ по обязательной сертификации могут осуществлять другие государственные органы. Номенклатуру товаров, подлежащих обязательной сертификации, определяют Госстандарт России и другие уполномоченные на это государственные органы управления.

Добровольная сертификация проводится по инициативе юридических лиц и граждан на основе договора между заявителем и органом по сертификации.

Сертификация продукции, выдача сертификатов и лицензий на применение знака соответствия осуществляется только специально созданными для этого органами сертификации.

Центральный орган системы сертификации — независимый орган, возглавляющий систему сертификации однородной продукции. В случае выполнения одним юридическим лицом функции испытательной лаборатории и органа по сертификации используется термин «сертификационный центр» или «центр по сертификации».

Перед началом своей деятельности органы по сертификации (испытательные лаборатории) проходят процедуру *аккредитации* — уполномоченный в соответствии с законодательными актами РФ вышестоящий орган по сертификации официально признает возможность выполнения данным органом по сертификации конкретных работ в заявленной области.

Аккредитацию органов по сертификации и испытательных лабораторий организуют и осуществляют Росстандарт (Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии) и другие государственные органы управления (в пределах своей компетенции и на основании результатов их аттестации), как правило, комиссиями, состав которых определяется таким образом, чтобы обеспечить компетентную и объективную оценку аккредитуемых органов и испытательных лабораторий. Для этого в состав комиссий обычно включают экспертов, представителей изготовителей, обществ потребителей, научно-исследовательских организаций, территориальных органов Госстандарта России и других государственных органов управления. Результаты аккредитации оформляют аттестатом аккредитации (рис. 12.10).



Рис. 12.10. Аттестат аккредитации испытательной лаборатории

Аккредитованная испытательная лаборатория, в отличие от сертификационного центра, осуществляет только испытания конкретной продукции (или конкретные виды испытаний) и выдает протоколы испытаний в орган сертификации.

Сертификация проводится по схемам, установленным системами сертификации однородной продукции. Сертификация отечественной и импортируемой продукции проводится по одним и тем же правилам.

В общепринятой современной терминологии в качестве основополагающего понятия используется не сертификация, а *подтверждение*

соответствия, определяемое как процедура, результатом которой становится заявление, дающее уверенность в том, что продукция, процесс или услуга соответствуют заданным требованиям. Подтверждение соответствия может, например, проводиться посредством принятия изготовителем (продавцом, исполнителем) декларации о соответствии. Декларация о соответствии является документом, в котором изготовитель (продавец, исполнитель) удостоверяет, что поставляемая (продаваемая) им продукция соответствует установленным требованиям.

Постановление Правительства РФ, принятое в феврале 2010 г., определяет изменения в перечне продукции, подлежащей обязательной сертификации органом по сертификации, обладающим необходимой аккредитацией в системе Росстандарта (Ростехрегулирования) и имеющим право выдачи сертификатов соответствия требованиям технических регламентов и ГОСТ Р (рис. 12.11). Наличие у продукции сертификата подтверждает ее надежность, а следовательно, обеспечивает повышенный потребительский спрос. Для повышения уровня продаж многие предприниматели сертифицируют свою продукцию на соответствие техническим регламентам или ГОСТ Р даже в случаях, когда это не является обязательным.



Рис. 12.11. Сертификат соответствия и разрешение на применение знака соответствия системы добровольной сертификации

Продукция, не состоящая в данном списке, может сертифицироваться на добровольной основе. Полученный сертификат является полноценным подтверждением соответствия конкретного вида продукта существующим требованиям качества и безопасности, определяемым соответствующими документами — законодательными и нормативными.

Сертифицированная продукция маркируется знаком соответствия, который наносят на продукцию (тару, упаковку), сопроводительную

техническую документацию, поступающую к потребителю при реализации. Знак соответствия — зарегистрированный в установленном порядке знак, который по правилам, установленным в данной системе сертификации, подтверждает соответствие маркированной им продукции установленным требованиям.

Для обеспечения признания сертификатов и знаков соответствия за рубежом правила и рекомендации по сертификации построены в соответствии с действующими международными нормами и правилами, изложенными в руководствах Международной организации по стандартизации (ИСО) и Международной электротехнической комиссии (МЭК), международных стандартах ИСО серий 9000, 10 000 и 14 000, европейских стандартах (EN) серий 45 000 и 29 000, в документах других международных и региональных организаций, осуществляющих работы по сертификации.

Инспекционный контроль деятельности центральных органов систем сертификации, аккредитованных органов по сертификации и испытательных лабораторий организуют Госстандарт России и другие государственные органы управления в пределах своей компетенции.

Инспекционный контроль сертифицированной продукции (если он предусмотрен схемой сертификации) осуществляют органы, проводившие сертификацию этой продукции.

Получение сертификата на систему качества, т. е. на соответствие требованиям стандартов ИСО серии 9000, следует рассматривать как первый шаг на пути освоения современных концепций менеджмента качества. В мире, начиная с 1987 г., каждые 10—15 месяцев происходит удвоение числа предприятий, получивших сертификаты соответствия своим системам качества требованиям МС ИСО серии 9000, сейчас их насчитывается уже сотни тысяч.

Контрольные вопросы и задания

1. Как по функциональному назначению подразделяются промышленные материалы?
2. Разберите особенности замены одного материала другим материалом.
3. Рассмотрите показатели качества материалов.
4. Что такое контроль качества металлопродукции?
5. Расскажите о методах контроля качества продукции.
6. В чем состоит экспертиза качества материалов?
7. Что такое управление качеством материалов?
8. Разберите особенности современных систем менеджмента качества.

Литература

Основная

1. *Лахтин, Ю. М.* Материаловедение : учебник для машиностроительных вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Альянс, 2009.
2. *Сильман, Г. И.* Материаловедение : учеб. пособие для вузов / Г. И. Сильман. — М. : Издательский центр «Академия», 2008.
3. *Фетисов, Г. П.* Материаловедение и технология металлов : учебник для студентов машиностроительных спец. вузов / Г. П. Фетисов [и др.] ; под ред. Г. П. Фетисова. — М. : Высшая школа, 2001.
4. *Гусев, А. И.* Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. — 2-е изд. — М. : Физматлит, 2009.
5. *Либенсон, Г. А.* Процессы порошковой металлургии : учебник для вузов / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. — М. : Издательство МИСИС, 2002.
6. *Власов, С. В.* Основы технологии переработки пластмасс / С. В. Власов [и др.]. — М. : Химия, 2004.
7. *Дурнев, В. Д.* Экспертиза и управление качеством промышленных материалов / В. Д. Дурнев, С. В. Сапунов, В. К. Федюкин. — СПб. : Питер, 2004.

Дополнительная

1. *Марочник сталей и сплавов* / под общ. ред. А. С. Зубченко. — 2-е изд. — М. : Машиностроение, 2003.
2. *Арзамасов, Б. Н.* Материаловедение / Б. Н. Арзамасов [и др.]. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.

Новые издания по дисциплине «Материаловедение» и смежным дисциплинам

1. *Бондаренко, Г. Г.* *Материаловедение : учебник для вузов / Г. Г. Бондаренко, Т. А. Кабанова, В. В. Рыбалко. — 2-е изд. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 327 с.*
2. *Гаршин, А. П.* *Материаловедение в 3 т. Том 1. Абразивные материалы : учебник для вузов / А. П. Гаршин, С. М. Федотова ; под общей редакцией А. П. Гаршина. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 214 с.*
3. *Гаршин, А. П.* *Материаловедение в 3 т. Том 2. Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты : учебник для вузов / А. П. Гаршин, С. М. Федотова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 426 с.*
4. *Гаршин, А. П.* *Материаловедение в 3 т. Том 3. Технология конструкционных материалов: абразивные инструменты : учебник для вузов / А. П. Гаршин, С. М. Федотова. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 385 с.*
5. *Гаршин, А. П.* *Материаловедение. Техническая керамика в машиностроении : учебник для вузов / А. П. Гаршин. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 296 с.*
6. *Гладков, С. О.* *Физика композитов : учебник для вузов / С. О. Гладков. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 332 с.*
7. *Дедюх, Р. И.* *Материаловедение и технологии конструкционных материалов. Технология сварки плавлением : учебное пособие для вузов / Р. И. Дедюх. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 169 с.*
8. *Малинин, Н. Н.* *Технологические задачи пластичности и ползучести : учебное пособие для вузов / Н. Н. Малинин. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 121 с.*
9. *Материаловедение в машиностроении в 2 ч. Часть 2. : учебник для вузов / А. М. Адашкин, Ю. Е. Седов, А. К. Онегина, В. Н. Климов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 291 с.*
10. *Материаловедение в машиностроении. В 2 ч. Часть 1 : учебник для вузов / А. М. Адашкин, Ю. Е. Седов, А. К. Онегина, В. Н. Климов. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 258 с.*
11. *Материаловедение и технология материалов в 2 ч. Часть 1 : учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.] ; под редакцией Г. П. Фетисова. — 8-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 406 с.*

12. *Материаловедение и технология материалов в 2 ч. Часть 2 : учебник для вузов / Г. П. Фетисов [и др.] ; ответственный редактор Г. П. Фетисов. — 8-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 410 с.*

13. *Материаловедение: монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы : учебное пособие для вузов / В. П. Кузнецов, В. П. Лесников, Н. А. Попов. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 161 с.*

14. *Плошкин, В. В. Материаловедение : учебник для прикладного бакалавриата / В. В. Плошкин. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 463 с.*

15. *Рогов, В. А. Материаловедение и технология конструкционных материалов. Штамповочное и литейное производство : учебник для вузов / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 319 с.*

16. *Рогов, В. А. Технология конструкционных материалов. Нанотехнологии : учебник для вузов / В. А. Рогов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 190 с.*

17. *Суворов, Э. В. Материаловедение: методы исследования структуры и состава материалов : учебное пособие для академического бакалавриата / Э. В. Суворов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 180 с.*

18. *Технология конструкционных материалов : учебное пособие для вузов / М. С. Кoryтов [и др.] ; под редакцией М. С. Кoryтова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2020. — 234 с.*

Словарь-справочник основных терминов и понятий

А

Абляция — коррозионно-эрозионное разрушение под действием высокоэнтальпийного, высокотемпературного и высокоскоростного газового потока, сопровождающегося расплавлением, сублимацией и выносом частиц.

Абразивные материалы, абразивы — естественные или искусственные материалы преимущественно высокой твердости для обработки металлов резанием или их очистки.

Абсорбция — поглощение газообразных или растворенных веществ (абсорбатов) жидким или твердым телом (абсорбентом), происходящее во всем его объеме.

Автофорж-процесс (литье-штамповка) — процесс получения заготовок литьем и последующей штамповкой с использованием теплоты отливки.

Агломерат — спеченные в куски мелкие частицы материалов, главным образом концентратов обогащения руд и пылевидных руд.

Агрегатные состояния — состояния одного и того же вещества (твердое, жидкое, газообразное, плазменное), переходы между которыми сопровождаются скачкообразными изменениями основных физико-химических свойств.

Адгезия — возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных (твердых или жидких) тел, приведенных в соприкосновение.

Адсорбция — поглощение веществ (адсорбатов) из газов или жидкостей, происходящее на поверхности твердых тел (адсорбентов).

Азотирование, нитрирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) азотом:

вакуумное — газовое азотирование при давлении среды ниже атмосферного;

в тлеющем разряде (ионное) — азотирование в условиях сильноточного тлеющего разряда между изделием (катодом) и анодом в газовой среде при давлении ниже атмосферного;

высокотемпературное — азотирование сплава (изделия) в аустенитной области;

жидкостное — азотирование в жидкой среде;

местное — азотирование одного или нескольких участков поверхности изделия;

под давлением — газовое азотирование при давлении выше атмосферного;

ступенчатое — азотирование, выполняемое непрерывно при двух (или более) тепловых режимах.

Азотонауглероживание (нитроцементация, цианирование) — химико-термическая обработка, заключающаяся в комбинированном насыщении углеродом и азотом поверхностного слоя сплава железа (изделия), находящегося в аустенитном состоянии:

в тлеющем разряде (ионное) — азотонауглероживание в условиях сильноточного тлеющего разряда между изделием (катодом) и анодом в газовой среде при давлении ниже атмосферного.

Активация — переход системы в активное реакционноспособное состояние:

термическая — активация системы под воздействием тепловой энергии.

Активная:

атмосфера — атмосфера, которая реагирует с металлом (изделием) в данных условиях;

среда — твердая, жидкая, газовая или плазменная среда, применяемая при химико-термической обработке, которая реагирует с металлом (изделием) в данных условиях.

Активность углерода — способность углерода принимать участие в физико-химических реакциях при определенных условиях (температуре, давлении и концентрации).

Алитирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) алюминием.

Аллотропические модификации, аллотропические формы — различные кристаллические формы одного вещества.

Аллотропическое (полиморфное) превращение — превращение в твердом состоянии одной аллотропической формы металла или гомогенной фазы в другую.

Аллотропия, полиморфизм — способность некоторых металлов существовать в двух или нескольких кристаллических формах.

Ални — общее название группы литых магнитотвердых сплавов на основе системы Fe—Ni—Al.

Алюмель — сплав никеля с 1,8—2,75 % Al, 1,8—2,2 % Mn и 0,85—2,0 % Si, иногда с добавкой 0,06—1,0 % Zr; применяют в паре с хромелем для термопар, измеряющих температуру в интервале 20—1000 °С.

Алюминотермия — процессы, основанные на восстановлении порошкообразным алюминием кислородных соединений металлов.

Амальгама — сплав, одним из компонентов которого является ртуть.

Аморфное состояние — состояние, характеризующееся ближним порядком в расположении частиц (атомов, молекул) при отсутствии дальнего порядка. При повышении температуры аморфное вещество,

размягчаясь, переходит в жидкое состояние постепенно, т. е. у него отсутствует определенная температура плавления.

Аморфный металл, металлическое стекло — сильно переохлажденный металл, который при охлаждении не претерпевает кристаллизации.

Амплитуда напряжений цикла — наибольшее числовое положительное значение переменной составляющей цикла напряжений.

Анизотропия — различие свойств металлов и сплавов в разных кристаллографических направлениях.

Антиферромагнетизм — явление упорядочения магнитных моментов атомов в твердом теле, приводящее к тому, что твердое тело в отсутствие внешнего магнитного поля оказывается немагнитным.

Антифрикционные (подшипниковые) материалы — материалы, предназначенные для деталей, работающих в условиях трения (главным образом трения скольжения).

АРМКО-железо (ARMCO — сокращенное название американской фирмы American Rolling Mill Corporation) — технически чистое железо, содержащее не менее 99,8 % Fe.

Асимметричный цикл напряжений — цикл, у которого максимальное и минимальное напряжения имеют разные абсолютные значения.

Атмосфера — газообразная среда, в которой проводится (термическая) обработка металла (изделия):

защитная — атмосфера, предохраняющая при термической обработке металл (изделие) от химического взаимодействия с газами;

инертная — атмосфера, которая не реагирует с металлом (изделием) в данных условиях;

контролируемая — атмосфера, состав которой регулируется;

науглероживающая — атмосфера, способная обеспечить науглероживание металла (изделия) в данных условиях;

нейтральная — атмосфера, которая не реагирует с металлом (изделием) в данных условиях.

Атом внедрения (междоузельный атом) — атом, расположенный между узлами кристаллической решетки.

Аустемперинг — см. изотермическая закалка.

Аустенит — твердый раствор внедрения углерода в γ -железе с границентрированной кубической решеткой:

легированный — твердый раствор углерода и одного или нескольких легирующих элементов в γ -железе;

метастабильный (переохлажденный) — аустенит, существующий при температуре ниже эвтектоидной;

остаточный — аустенит, не претерпевший превращения после закалки.

Аустенизация — процесс образования в сплавах на основе железа аустенитной структуры при их нагреве до определенной температуры:

неполная (частичная) — аустенитизация, при которой не происходит полного превращения исходной структуры в аустенит;

полная — аустенитизация, при которой происходит полное превращение исходной структуры в аустенит.

Аустенитостабилизирующий элемент, гамма-стабилизатор — легирующий элемент, повышающий устойчивость аустенита.

Аульфферрит — структурная составляющая чугуна, состоящая из игольчатого феррита и аустенита, обогащенного углеродом; получается после термической обработки — аустемперинга.

Б

Баббиты — антифрикционные сплавы на основе олова или свинца с добавками сурьмы, меди и других элементов.

Балл (номер) зерна — условный индекс стандартной шкалы микроструктур, характеризующий величину зерна.

Бездиффузионное превращение — фазовое превращение, протекающее без изменения состава исходной и образующейся фаз, при котором не происходит перераспределения атомов разного сорта.

Безокислительный нагрев — нагрев металла с минимальным образованием окислов.

Бейнит — метастабильная структура, сложенная ферридисперсными карбидами, образующаяся при распаде аустенита в температурном интервале между температурой образования перлита и температурой начала образования мартенсита:

верхний — бейнит, образующийся в верхней части бейнитной области, выявляющийся в виде относительно крупных феррита и пластинок или реек карбидов;

нижний — бейнит, образующийся в нижней части бейнитной области изотермической диаграммы и имеющий игольчатое строение с дисперсными карбидами, находящимися внутри пластин феррита.

Бейнитная область — интервал температур, в пределах которого происходит бейнитное превращение.

Благородные металлы — металлы и сплавы, обладающие высокой химической стойкостью и красивым внешним видом в изделиях.

Большеугловая граница — граница между двумя зёрнами или фазами с большим углом кристаллографической разориентации.

Борид — химическое соединение бора с одним или несколькими элементами (металлами).

Борирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) бором:

в тлеющем разряде (ионное) — борирование в условиях сильноточного тлеющего разряда между изделием (катодом) и анодом в газовой среде при давлении ниже атмосферного;

в электролитах — борирование при электролизе в расплавах солей бора;

жидкостное — борирование в расплавах солей бора.

Бороалитирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в комбинированном диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) алюминием и бором.

Борованадирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в комбинированном диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) ванадием и бором.

Борохромирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в комбинированном диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) хромом и бором.

Брак — продукция, применение которой не допускается из-за наличия дефектов.

Браунит — эвтектоид в системе железо — азот.

Бронза — сплав на основе меди с различными химическими элементами (Sn, Al, Be, Pb и др.):

алюминиевая — безоловянистая бронза, содержащая 5—12 % алюминия;

безоловянистая — бронза, не содержащая олово и применяемая для литых полуфабрикатов и изделий;

колокольная — бронза, содержащая 20—22 % олова, менее 2 % примесей, остальное — медь.

Бронзографит — спеченный антифрикционный материал, содержащий 1—10 % углерода (графита), остальное — бронза (оловянистая, свинцовистая и др.); пористость 20—25 %.

В

Вакансия — точечный дефект, образующийся в результате ухода атома из узла кристаллической решетки.

Вакуум — состояние газа, имеющего давление значительно ниже атмосферного.

Вершина трещины — область трещины, имеющая минимальный радиус кривизны (закругления).

Возврат:

после старения — процесс растворения зон Гинье — Престона, возникших при естественном старении, во время кратковременного нагрева сплава выше температуры ограниченной растворимости в твердом состоянии в условиях, когда не успевают образоваться метастабильные и стабильные фазы; приводящий к образованию при быстром охлаждении пересыщенного твердого раствора и восстановлению свойств естественно состаренных сплавов до исходных (перед естественным старением) значений;

после холодной пластической деформации — совокупность любых, в том числе и самопроизвольных, процессов изменения плотности и распределения дефектов в деформированных кристаллах до начала рекристаллизации.

Воронение — один из способов оксидирования; проводится с целью получения темно-синей оксидной пленки на сплавах железа (изделиях) путем выдержки их в перегретом водяном паре.

Восстановительная среда — газовая среда, парциальное давление кислорода в которой недостаточно для образования оксидов и ниже давления диссоциации оксидов, что приводит к их восстановлению.

Вторичное твердение — повышение твердости закаленных сплавов железа после однократного или многократного отпуска в результате выделения фаз и (или) превращения остаточного аустенита в мартенсит или бейнит.

Выделение, распад — образование новой фазы в твердом растворе, вызванное уменьшением содержания растворенного элемента при понижении температуры, при нагреве или выдержке в условиях пересыщенных твердых растворов:

некогерентное — выделение, имеющее некогерентные границы с матричной фазой;

непрерывное — выделение новой фазы из пересыщенного твердого раствора, происходящее одновременно во всех участках матричной фазы, хотя скорость этого выделения в различных участках может быть неодинаковой;

прерывистое (ячеистый распад) — выделение новой фазы из пересыщенного твердого раствора, приводящее к разделению матричной фазы на области, которые полностью превратились в равновесные фазы, и области непревращенной матричной фазы.

Выдержка — время, в течение которого параметры процесса поддерживаются постоянными.

Выносливость — способность материалов и конструкций сопротивляться действию повторных (циклических) нагрузок.

Вязкость (твердого тела) — свойство твердых тел необратимо поглощать энергию при их пластическом деформировании вплоть до разрушения:

разрушения — критическое значение коэффициента интенсивности напряжений (K_{Ic}) при максимальном упруго-пластическом стеснении пластической деформацией (K_{Ic}) в условиях разрушения отрывом при статической нагрузке или критическое значение энергии на единицу длины трещины при тех же условиях.

Вязкохрупкий переход — переход от вязкого механизма разрушения к хрупкому.

Г

Газовый пузырь — дефект, возникающий в отливке при кристаллизации (затвердевании) металла в результате выделения растворенных в расплавленном металле газов.

Гетерогенизация — создание в металлическом сплаве структуры, состоящей из двух или нескольких фаз.

Гомогенизация — процесс выравнивания состава и устранения концентрационных неоднородностей.

Горячая трещина — трещина, возникающая при высоких температурах.

Градиент:

концентрации — изменение концентрации вдоль заданного направления, определяемое по первому закону Фика;

температуры — изменение температуры вдоль заданного направления, выражающееся в виде вектора, направленного перпендикулярно изотермической поверхности, который при повышении температуры является положительным, а при понижении — отрицательным.

Граница:

зерен — поверхность раздела смежных зерен с большим углом кристаллографической разориентировки;

когерентная — граница между двумя фазами или участками зерен, характеризующаяся неразорванной межатомной связью;

малоугловая — граница между субзернами, разориентированными на малые углы (менее 10°);

некогерентная — граница между двумя фазами или участками зерен, характеризующаяся разорванной межатомной связью;

субграница — граница, разделяющая соседние субзерна и характеризующаяся малым углом их разориентировки.

Графит — одна из полиморфных модификаций углерода с гексагональной кристаллической решеткой. Микроструктурная составляющая серого, ковкого, высокопрочного, половинчатого чугунов и графитизированных сталей:

вермикулярный — графит, имеющий волокнистую (червеобразную) форму; присутствует в структуре чугунов повышенной прочности (высокопрочных чугунов с вермикулярным графитом);

хлопьевидный (углерод отжига) — графит, имеющий компактную форму (в виде хлопьев), образуется при графитизации цементита в процессе отжига отливок на ковкий чугун;

шаровидный (сфероидальный) — графит в виде включений, обладающих примерно одинаковыми размерами во всех измерениях и в идеальном случае имеющих форму шара; присутствует в структуре высокопрочного чугуна;

чешуйчатый (пластинчатый) — графит, наблюдаемый на поверхности шлифа в структуре серого чугуна в виде мелких пластинок — чешуек.

Графитизатор — легирующий элемент, способствующий выделению углерода в виде графита.

Графитизация — процесс выделения углерода в виде графита.

Д

Двойник — несовершенство кристаллического строения, характеризующееся зеркально-симметричным расположением одной части кристалла относительно другой:

деформации — двойник, образующийся при пластической деформации металлов и сплавов;

отжига — двойник, образующийся в процессе рекристаллизационного отжига металлов и сплавов с низкой энергией дефектов упаковки.

Двойникование — процесс образования двойников в кристаллической решетке.

Деазотирование — химико-термическая обработка металла (изделия), заключающаяся в удалении избыточного азота из поверхностных слоев.

Дендрит — кристалл древовидной формы, состоящий из ствола (ось нулевого порядка), от которого идут ветви (оси второго и последующих порядков).

Дестабилизация остаточного аустенита — явление, имеющее место в процессе отпуска, суть которого состоит в приобретении остаточным аустенитом способности к мартенситному превращению в определенном температурном интервале, в котором он при предшествующей закалке не претерпевал превращения.

Дефект:

материала — отклонение от предусмотренного техническими условиями качества материала по химическому составу, структуре, сплошности, состоянию поверхности и др.;

поверхностный — дефект, возникающий на поверхности металлов (изделий) в процессе их изготовления или в результате последующей обработки;

решетки — несовершенство кристаллического строения — нарушение периодического расположения атомов в узлах кристаллической решетки;

упаковки — дефект кристаллической решетки, заключающийся в нарушении чередования плотноупакованных слоев и имеющий двойниковую природу.

Дефектоскопия — контроль качества материалов и изделий физическими методами (рентгеновскими, ультразвуковыми, магнитными, термическими и др.) без их разрушения.

Деформация — величина (остаточное удлинение, сдвиг), характеризующая процесс деформирования металла (изделия):

на пределе текучести (Людерса — Чернова) — величина удлинения на площадке текучести (0,1—1 %), при котором рабочая длина образца покрывается полосами Людерса — Чернова;

упругая — деформация, исчезающая одновременно со снятием вызвавшей ее нагрузки;

пластическая — деформация, не исчезающая после снятия вызвавшей ее нагрузки.

Деформирование — процесс изменения размеров и формы образца (тела) без изменения его массы:

горячее — обработка металлов давлением (ковка, прокатка и т. д.) после нагрева заготовки до температуры выше $(0,5—0,6)T_{пл}$;

холодное — процесс изменения формы тела под действием внешних сил при температурах ниже температурного порога рекристаллизации.

Диаграмма — совокупность графиков, характеризующих состояние системы в зависимости от различных факторов:

изотермического превращения — диаграмма в координатах «температура — время», определяющая для каждого значения температуры начало и конец превращения исходной (переохлажденной) фазы в изотермических условиях;

превращения при непрерывном охлаждении (термокинетическая) — диаграмма в координатах «температура — время», определяющая для каждой кривой охлаждения начало и конец превращения исходной (переохлажденной) фазы при непрерывном охлаждении;

состояния — диаграмма, показывающая равновесное фазовое состояние сплавов при разных температурах (давлениях) в зависимости от их химического состава (концентрации компонентов);

структурная (чугуна) — диаграмма, характеризующая структуру чугуна в зависимости от химического состава и условий охлаждения отливки (толщины стенки).

Диамagnetизм — явление возникновения в веществе намагниченности в направлении, противоположном направлению внешнего магнитного поля.

Динамическое нагружение — непродолжительное нагружение, при котором существенную роль играют инерционное сопротивление, а в определенных условиях — и волновые процессы.

Дислокация — линейное несовершенство кристаллического строения, являющееся границей зоны сдвига внутри кристалла:

винтовая — дислокация с вектором Бюргерса, параллельным линии дислокации;

декорированная — дислокация, расположение которой выявляется вследствие ее декорирования атомами примеси;

закрепленная — дислокация, утратившая способность к перемещению;

краевая — дислокация с вектором Бюргерса, перпендикулярным к линии дислокации;

скользящая — дислокация, перемещающаяся в плоскости скольжения под действием касательных сил.

Диффузионная металлизация, диффузионное насыщение металлами — процесс насыщения поверхностного слоя металла (изделия) одним или несколькими металлическими элементами, происходящий при химико-термической обработке.

Диффузионное насыщение неметаллами — процесс насыщения поверхностного слоя металла (изделия) одним или несколькими неметаллическими элементами, происходящий при химико-термической обработке.

Диффузионный слой — поверхностный слой в металле (изделии), возникший в результате химико-термической обработки и отличающийся по химическому составу от насыщаемого материала.

Диффузия — процесс перехода вещества из одной части системы в другую, в результате которого устанавливается равновесная концентрация внутри фаз:

восходящая — перемещение диффундирующего вещества в сторону большей концентрации;

зернограничная (межзеренная) — диффузия по границам зерен;

квантовая — диффузия точечных дефектов (типа вакансий или примесей), происходящая путем квантового туннелирования дефекта из одного равновесного положения в другое;

объемная — диффузия внутри зерна;

поверхностная — диффузия по свободной поверхности, ограничивающей кристалл;

по междоузлиям — перемещение диффундирующего вещества по междоузлиям;

самодиффузия — диффузия атомов металла в собственной решетке под действием теплового или других видов возбуждения.

Диэлектрик — твердое тело с низкой электропроводностью, концентрация электронов проводимости в котором мала при всех температурах, что обусловлено большой шириной запрещенной зоны.

Длительная прочность — способность материала, находящегося под действием напряжений, сопротивляться разрушению при данной (повышенной) температуре в течение заданного промежутка времени.

Долговечность — способность металла (изделия) перед окончательным разрушением выдерживать многократные нагружения при определенных напряжениях.

Долом — часть излома, возникающая в завершающей стадии разрушения из-за недостатка прочности сечения.

Дюралюминий, дюралюмин, дуралюмин — алюминиевый сплав, содержащий 2,2—5,2 % Cu, 0,2—2,7 % Mg, 0,2—1 % Mn.

Ж

Жаропрочность — способность металлов и сплавов при высоких температурах выдерживать без разрушения механические нагрузки.

Жаростойкость — способность металлов и сплавов при высоких температурах сопротивляться химическому взаимодействию с газами.

Железо — серебристо-белый металл с атомным номером 26, атомной массой 55,85; способность железа растворять углерод и другие элементы служит основой для получения разнообразных сплавов:

техническое — сплавы железа, содержащие до 0,03 % C и не имеющие в своей структуре участков эвтектоида (перлита);

электролитическое — железо, получаемое в результате электролиза при прохождении через электролит постоянного электрического тока.

Железографит — спеченный антифрикционный материал, содержащий 95—98 % Fe и 2—5 % C; пористость 15—30 %.

Жесткость — свойство материала сопротивляться упругому деформированию.

З

Заготовка — предмет производства, из которого дальнейшей обработкой получают готовое изделие.

Закаленный слой — поверхностный слой металла (изделия), в котором осуществилась закалка.

Закаливаемость — способность металла приобретать максимальную твердость при закалке.

Закалка — термическая обработка, заключающаяся в нагреве, выдержке и быстром охлаждении, после которой сплав находится в неравновесном структурном состоянии:

в воде — охлаждение (закалка) металла (изделия) путем погружения в воду или струями воды;

в жидкости — охлаждение (закалка) металла (изделия) путем погружения в жидкую среду;

в масле — охлаждение (закалка) металла (изделия) путем погружения в масло;

воздушная — закалка с охлаждением на спокойном воздухе;

двойная — термическая обработка, состоящая из двух последовательных закалок, обычно проводимых от разных температур, и применяемая в основном к науглероженным (цементованным) изделиям;

изотермическая (аустемперинг) — закалка, включающая аустенитизацию стали или чугуна, подстуживание в области устойчивости переохлажденного аустенита, выдержку до частичного или полного превращения аустенита в бейнит;

индукционная — закалка с индукционным нагревом;

местная — закалка одного или нескольких участков изделия;

на аустенит — термическая обработка аустенитных сталей, заключающаяся в нагреве до высоких температур с последующим охлаждением со скоростями, достаточными для сохранения при комнатной температуре структуры однородного пересыщенного аустенита;

на бейнит — закалка стали, приводящая к образованию бейнита (в частности, изотермическая закалка);

на мартенсит — закалка стали или сплавов, приводящая к образованию мартенсита;

на твердый раствор — термическая обработка сплавов, заключающаяся в нагреве до температур существования стабильных растворов с последующим охлаждением со скоростями, достаточными для сохранения при комнатной температуре структуры однородных (пересыщенных) твердых растворов;

неполная (стали) — закалка с частичной фазовой перекристаллизацией;

непрерывно-последовательная (последовательная) — закалка с непрерывно-последовательным нагревом и немедленным охлаждением струями;

обдувкой воздухом — закалка с охлаждением в потоке воздуха;

от температуры деформации — закалка после горячей обработки металла давлением без промежуточного охлаждения и повторного нагрева;

пламенная — закалка с пламенным нагревом, обычно применяемая для местной или поверхностной обработки;

поверхностная — закалка только поверхностного слоя металла (изделия);

полная (стали) — закалка, обеспечивающая полную фазовую перекристаллизацию стали;

прерывистая — закалка, при которой процесс охлаждения прерывается до того, как температура металла (изделия) сравняется с температурой закалочной среды, а окончательное охлаждение проводится во второй среде с меньшей скоростью охлаждения;

с импульсным нагревом (импульсная) — самозакалка с кратковременной аустенитизацией при более высокой температуре, чем обычная температура аустенитизации, достигаемой путем кратковременно-го подвода энергии высокой плотности;

с нагревом лазерным лучом (лазерная) — закалка, при которой нагрев металла (изделия) осуществляется непрерывным или импульсным лазерным лучом;

стали — термическая обработка, заключающаяся в аустенитизации и последующем охлаждении со скоростью выше критической (т. е. в условиях, обеспечивающих полное или частичное превращение аустенита в мартенсит и, возможно, в бейнит);

струйная — закалка с охлаждением в струях жидкости, обычно — воды;

ступенчатая — закалка, при которой охлаждение прерывается на некоторое время посредством выдержки металла (изделия) при определенной температуре;

ступенчатая на мартенсит — закалка, включающая аустенитизацию стали, подстуживание в область устойчивости переохлажденного аустенита перед мартенситной точкой M_{H} , выдержку, исключаящую распад переохлажденного аустенита, охлаждение;

электронно-лучевая — закалка с использованием в качестве источника нагрева электронного луча.

Закалочная вакансия — избыточная вакансия, возникающая при закалке.

Зародыш — центр кристаллизации новой (или перекристаллизовавшейся прежней) фазы, имеющий собственное строение, состав и свойства:

некогерентный — зародыш, отделенный от матричной фазы некогерентной границей.

Затвердевание — процесс образования твердой фазы из расплава, когда необходимым условием фазового превращения является отвод тепла из расплава.

Защитные покрытия — поверхностные покрытия, защищающие металл от коррозии на воздухе или в более агрессивных средах; применяют также для увеличения сопротивления деталей истиранию, высоким температурам и т. д.

Зерно — кристаллит в поликристаллическом теле, отделенный от других кристаллитов большеугловой границей и обладающий определенной кристаллографической ориентировкой.

Зернограничная сегрегация, межзеренная сегрегация — обогащение растворенным компонентом границ зерен.

Зоны Гинье — Престона — скопления (кластеры) растворенных элементов, образующиеся по определенным кристаллографическим плоскостям пересыщенного твердого раствора и предшествующие началу выделения новой фазы.

И

Изгиб — вид деформации, приводящий к искривлению деформируемого материала в направлении под углом к продольной оси образца.

Излом — поверхность, образующаяся при разрушении образца или изделия:

волоконистый — излом, характеризующийся наличием волокон, обусловленных пластической деформацией зерен в процессе разрушения;

кристаллический (хрупкий) — поверхность разрушения, образованная кристаллитами в виде блестящих плоских участков — фасеток скола;

межзеренный — излом, образующийся при разрушении по границам зерна;

нафталинистый — внутризеренный излом перегретой стали, характеризующийся избирательным блеском, присущим кристаллографически упорядоченным областям, соответствующим исходным крупным зернам аустенита;

усталостный — поверхность металла (изделия) в приусталостном разрушении.

Изнашивание — процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы тела.

Износ — изменение размеров, формы, массы или состояния поверхности материала (изделия) при трении, являющееся результатом изнашивания.

Износостойкость — способность материала сопротивляться изнашиванию.

Изотермическое превращение — превращение, происходящее при постоянной температуре.

Изотропия — равнозначность свойств материала (среды) по всем направлениям.

Изоформинг — термомеханическая обработка стали, проводимая во время превращения аустенита в перлит.

Инкубационный период — интервал времени, необходимый для образования минимального количества продуктов превращения, доступных обнаружению данным методом исследования.

Интерметаллид, интерметаллическое соединение — соединение металлов, характеризующееся определенным стехиометрическим соотношением и собственной кристаллической решеткой.

Испытание механическое — испытание, заключающееся в определении механических свойств материалов:

динамическое — метод определения механических свойств при скоростях деформации более 10^{-1} с^{-1} ;

взрывом — механическое испытание, заключающееся в деформации материала (образца) взрывом;

на изгиб — механическое испытание, заключающееся в деформации материала в направлении под углом к продольной оси образца;

на кручение — механическое испытание материала, заключающееся в том, что в конечных сечениях рабочей части цилиндрического образца прикладывают два равных по величине и противоположно направленных крутящих момента, действующих в плоскостях, перпендикулярных оси образца;

на растяжение — механическое испытание, заключающееся в деформации материала (образца) растягивающими нагрузками;

на сжатие — механическое испытание, заключающееся в деформации материала (образца) сжимающими нагрузками;

на срез — механическое испытание материала (образца) путем его деформации сдвигом;

на ударную вязкость — механическое испытание материала (образца) на разрушение методом ударного изгиба;

на усталость — механическое испытание, заключающееся в приложении к материалу (образцу) определенного числа циклов повторно-переменных напряжений;

статическое — испытание при скоростях деформации менее 10^{-1} с^{-1} ;

ускоренное — испытание, методы и условия проведения которого обеспечивают получение необходимой информации о характеристиках свойств металла (изделия) в более короткий срок, чем при нормальных испытаниях.

Истирание — удаление слоев материала за счет его изнашивания при внешнем трении скольжения.

Источник:

вакансий — источник, генерирующий вакансии в кристаллической решетке;

дислокаций — источник, генерирующий дислокации в одной или нескольких атомных плоскостях.

К

Карбид — химическое соединение углерода с одним или несколькими элементами:

железа — цементит Fe_3C ; возможны и другие карбиды железа, например Fe_7C_3 , Fe_2C и др.;

металлический — химическое соединение углерода с одним или несколькими металлическими элементами;

сложный — химическое соединение углерода с несколькими элементами;

специальный — химическое соединение углерода с одним или несколькими легирующими элементами.

Карбидная полосчатость, карбидная строчечность — неоднородность структуры, выражающаяся в распределении карбидов в виде строчек (цепочек) вдоль направления деформации металла.

Карбидная сетка — непрерывное (в виде сетки) расположение карбидов (цементита) по границам зерен.

Карбидный анализ — метод определения в многофазном сплаве состава карбидов, основанный на электрохимическом растворении всех фаз сплава, кроме карбидов.

Карбидообразующий элемент — легирующий элемент, способный образовывать карбиды.

Карбонитрид — химическое соединение углерода и азота с одним или несколькими металлическими элементами.

Карбюризатор — среда, способная обеспечить науглероживание (цементацию) металла (изделия) в данных условиях.

Квазиэвтектика — структура, похожая на эвтектику, но образовавшаяся из сильно переохлажденного расплава и имеющая состав, который может отличаться от эвтектического.

Квазиэвтектоид — структура, похожая на эвтектоид, но образовавшаяся из сильно переохлажденного твердого раствора (переохлажденного аустенита в сталях и чутунах) и имеющая состав, который может отличаться от эвтектоидного.

Квантометр — прибор для определения химического состава металла, фотоэлектрический спектрограф прямого отсчета.

Кермет — порошковый материал, состоящий из тугоплавких соединений (оксидов и карбидов) и металлов (Ni, Co, Cr, Fe, W, Mo, Nb, Ta и др.); получают методом порошковой металлургии.

Кипящий слой, псевдооживленный слой — среда для нагрева (охлаждения) в виде твердых частиц, взвешенных в потоке газа.

Коагуляция — укрупнение частиц в дисперсных системах.

Коалесценция — увеличение размеров выделившихся частиц или зерен посредством диффузии соответствующих элементов через матрицу от мелких растворяющихся частиц к крупным или посредством слияния зерен за счет рассыпания границ.

Ковкость — способность металла пластически деформироваться при ковке и загибке без появления надрывов на углах и гранях пробы.

Комбинированное насыщение — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) несколькими элементами.

Композит, композиционный материал — конструкционный (металлический или неметаллический) материал, в котором имеются

усиливающие его элементы в виде дисперсных частиц, нитевидных кристаллов, волокон, пластин или других включений более прочной составляющей структуры; может быть искусственным (например, металло- и стеклопластики, железобетон и др.) и естественным (сплавы с композиционной структурой, например булатная сталь, белый ванадиевый чугун и др.).

Компонент (сплава) — химический элемент, образующий однокомпонентную систему или входящий в состав сплава (многокомпонентной системы); иногда в качестве компонента используют химическое соединение стехиометрического состава:

растворенный — вещество, атомы которого растворены в кристаллической решетке растворителя.

Концентрация — содержание данного компонента в сплаве (физико-химической системе).

Концентрация напряжений — повышение напряжений в местах изменений формы или нарушений сплошности материала.

Коробление — нежелательное изменение формы изделия (несимметричная деформация).

Коррозионная среда — среда, которая взаимодействует с металлом (изделием) в данных условиях, переводя его в окисленное состояние.

Коррозионная стойкость, сопротивление коррозии — способность металла сопротивляться коррозионному воздействию среды.

Коррозионное растрескивание, коррозия под напряжением — коррозионное разрушение, проявляющееся в появлении тонких трещин, проходящих по телу зерна; наиболее склонны к нему аустенитные стали.

Коррозия — разрушение материалов вследствие химического или электрохимического взаимодействия их с коррозионной средой:

контактная — коррозия в местах контакта металлов и сплавов, разнородных в электрохимическом отношении;

межзеренная (межкристаллитная) — коррозия по границам кристаллитов (зерен) металла (сплава);

местная или неравномерная — подразделяется по степени избирательности и локализации на точечную (питтинги), язвенную (пятна), подповерхностную и др. и имеет в основе межкристаллитную коррозию;

общая или сплошная — коррозия, поражающая более или менее равномерно всю поверхность изделия из черных и цветных металлов и их сплавов;

под напряжением — коррозия металла при одновременном воздействии коррозионной среды и постоянных или переменных механических напряжений.

Коэрцитивная сила — напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного ферромагнетика.

Коэффициент:

активности углерода — величина, равная отношению давления пара углерода в рассматриваемом фазовом состоянии (например, над ау-стенитом с определенным содержанием углерода) к давлению пара над графитом, принятому за условное состояние, при одинаковой температуре;

диффузии — величина, равная количеству вещества, продиффундировавшему через поверхность площадью 1 см^2 в течение одной секунды при перепаде концентраций, равном единице; характеризует скорость перемещения диффундирующего элемента;

интенсивности напряжений — величина, определяющая напряженно-деформированное состояние и смещения вблизи вершины трещины для упругого тела, независимо от схемы нагружения, формы и размеров тела и трещины;

концентрации напряжений — величина, характеризующая концентрацию напряжений при упругопластическом деформировании;

теоретический — коэффициент концентрации напряжений в материале при упругом деформировании;

эффективный — отношение предела выносливости образцов без концентраторов напряжений к пределу выносливости образцов с концентраторами напряжений, имеющих такие же абсолютные размеры сечения, как и гладкие образцы;

линейного расширения — величина, характеризующая изменение длины твердого тела при изменении температуры на один градус;

массопереноса углерода — величина, равная количеству углерода, проходящего в единицу времени через единицу площади поверхности науглероживаемой стали, деленному на разность между углеродным потенциалом и истинным содержанием углерода в поверхностном слое;

Пуассона — величина, равная абсолютному значению отношения относительной поперечной деформации к относительной продольной деформации прямого стержня при его продольном растяжении или сжатии в области действия закона Гука;

снижения предела выносливости — величина, равная отношению предела выносливости стандартных образцов к пределу выносливости объекта при одинаковой асимметрии цикла;

теплового расширения — величина, характеризующая изменение объема (длины) твердого тела при изменении температуры на один градус.

Кривая:

нагрева — график, характеризующий увеличение температуры от времени;

нагружения — график, характеризующий изменение нагрузок во времени;

охлаждения — график, характеризующий изменение температуры от времени в процессе охлаждения; в зависимости от характера и условий фазовых превращений при охлаждении кривые охлаждения могут

быть трех видов: с постоянной температурой превращения, с превращением в интервале температур, с повышением температуры в процессе превращения (с рекалесценцией);

усталости — график, характеризующий зависимость между максимальными напряжениями (деформациями или амплитудами) цикла и циклической долговечностью.

Кристалл — совокупность атомов (ионов), расположенных в определенной последовательности, повторяющаяся периодически в пространстве и имеющая правильную геометрическую форму:

нитевидный — монокристаллы в форме иголок и волокон, имеющие диаметр от десятков ангстрем до нескольких сотен микрометров и большое отношение длины к диаметру (> 100);

Чернова — дендрит, образовавшийся в усадочной раковине крупной стальной отливки.

Кристаллизация — процесс образования кристаллов из жидкого, газообразного и твердого состояний.

Кристаллическая решетка — расположение атомов (ионов), характеризующееся периодической повторяемостью в пространстве, присущее твердым кристаллическим телам:

гексагональная плотноупакованная (ГПУ) — кристаллическая решетка, в которой атомы расположены в узлах и центре шестигранных оснований призмы и три атома в средней плоскости призмы, представляющей собой элементарную ячейку;

гранецентрированная кубическая (ГЦК) — кристаллическая решетка, в которой атомы расположены в узлах кубической ячейки и в центре каждой ее грани;

кубическая — кристаллическая решетка, состоящая из элементарных кубических ячеек;

объемноцентрированная кубическая (ОЦК) — кристаллическая решетка, в которой атомы расположены в узлах кубической ячейки и в центре ее объема.

Кристаллографическая:

ориентировка — ориентировка семейства направлений и плоскостей в решетке;

плоскость — плоскость в кристаллической решетке, обозначаемая с помощью кристаллографических индексов;

система — совокупность кристаллографических плоскостей и направлений.

Кристаллографические индексы — индексы в кристаллографии, с помощью которых обозначаются плоскости, направления и точки в кристаллической решетке.

Кристаллографическое направление — линия, проходящая через начало координатной системы под углом к данной кристаллографической плоскости.

Кристаллография — наука о кристаллах и кристаллическом состоянии вещества.

Критическая скорость:

закалки стали — минимальная скорость охлаждения, необходимая для переохлаждения аустенита до мартенситного превращения;

нагрева — график, характеризующий увеличение температуры от времени;

охлаждения — наименьшая скорость охлаждения, при которой не происходит нежелательное фазовое превращение.

Критическая степень деформации — степень деформации, приводящая после рекристаллизационного нагрева к возникновению аномально больших зерен.

Критический диаметр прокаливаемости — максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь:

идеальный — критический диаметр прокаливаемости при охлаждении с бесконечно большой скоростью; определяется расчетным путем;

реальный — критический диаметр прокаливаемости при охлаждении в реальной охлаждающей среде (в воде, в масле, на воздухе).

Критический размер зародыша — минимальный размер зародыша, обеспечивающий его устойчивый рост.

Критическое напряжение разрушения — номинальное разрушающее напряжение (по неослабленному сечению или по сечению, ослабленному трещиной).

Критическое приведенное напряжение сдвига, критическое скалывающее напряжение — касательное напряжение, которое вызывает начало пластической деформации в какой-либо системе скольжения монокристалла.

Кручение — вид деформации, характеризующийся взаимным поворотом поперечных сечений (стержня, вала и т. д.) под влиянием моментов (пар) сил, действующих в этих сечениях.

Л

Латунь — сплав меди с цинком.

Легирование — введение в состав металлических сплавов дополнительных элементов для целенаправленного изменения их структуры и придания им определенных свойств:

микролегирование — введение в металл небольших количеств (обычно до 0,1 %) некоторых элементов, влияющих на структуру и свойства металла.

Легировующий элемент — элемент, вводимый в сплав для получения заданных свойств.

Ледебурит — структура, состоящая из смеси аустенита и цемента, образующаяся при эвтектическом превращении в системе железо—углерод (железо—цементит); при температурах ниже эвтектоидной структура ледебурита состоит из цементита и перлита.

Лигатура — вспомогательный сплав, вводимый в жидкий металл для получения кондиционных сплавов, когда введение некоторых элементов в чистом виде затруднено.

Ликвация — неоднородность химического состава материала;
дендритная (внутрикристаллическая) — неоднородность химического состава, возникающая при кристаллизации в пределах кристаллита (дендрита); различают прямую (обогащение периферийных участков кристаллита) и обратную (обогащение осевой зоны кристаллита);
зональная — ликвация, наблюдаемая во всем объеме изделия (заготовки).

Ликвидус — линия на диаграмме состояния, выше которой все сплавы находятся в жидкой фазе.

Литье — получение изделий (отливок) непосредственно из жидких металлов и сплавов.

М

Магнитная:

восприимчивость — свойство, определяющее способность материала намагничиваться в магнитном поле, т. е. менять свою намагниченность при изменении напряженности этого поля;

индукция — характеристика вещества, определяющая результирующее магнитное поле в нем, представляющая собой сумму напряженности и внешнего приложенного магнитного поля;

проницаемость — характеристика вещества, показывающая, во сколько раз магнитная индукция в нем больше магнитной индукции в вакууме.

Магнитное превращение — изменение магнитной структуры вещества под влиянием внешних факторов (температуры, давления и т. д.).

Магнитный гистерезис — запаздывание изменения магнитной индукции или намагниченности вещества по отношению к изменению магнитного поля.

Макроскопическое исследование, макроскопический анализ, макроскопия — метод исследования строения металла путем просмотра его поверхности невооруженным глазом или под лупой с увеличением до 30 крат.

Макроструктура — строение металла или сплава, выявляемое невооруженным глазом или под лупой с увеличением до 30 крат.

Мартенсит — метастабильный твердый раствор, образующийся в результате бездиффузионного (мартенситного) превращения:

в сталях и чугунах — пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе;

вторичный — мартенсит, образующийся из остаточного аустенита;

деформации — мартенсит, образующийся в результате пластической деформации;

игольчатый (пластинчатый, низкотемпературный, двойникованный) — мартенсит, кристаллы которого имеют форму тонких линзообразных пластин;

низкоуглеродистый (кубический) — мартенсит с низким содержанием углерода, образующийся при закалке малоуглеродистой стали или

при отпуске средне- и высокоуглеродистой стали, вследствие выделения ϵ -карбида;

пакетный (*реечный, массивный, высокотемпературный, недвойникованный*) — мартенсит, кристаллы которого имеют форму одинаково ориентированных тонких пластин, присоединенных одна к другой и разделенных малоугловыми границами, образующими более или менее равноосный пакет;

тетрагональный — мартенсит, в решетке которого соотношение осей $c/a > 1$.

Мартенситная область — интервал температур, в пределах которого происходит мартенситное превращение.

Мартенситное превращение — бездиффузионное превращение аустенита в мартенсит.

Мгновенная скорость нагрева (охлаждения) — скорость нагрева (охлаждения) к моменту достижения заданной температуры.

Межатомное расстояние — расстояние между атомами в кристаллической решетке.

Международная система единиц — единая универсальная система единиц физических величин для всех отраслей науки и техники, принятая XI Генеральной конференцией по мерам и весам (1960 г., Париж).

Межпластиночное расстояние — расстояние между пластинами одной и той же фазы (например, между пластинами цементита в перлите).

Металл — вещество, основные физические свойства которого определяются электронами проводимости с концентрацией порядка одного электрона на атом; обладающее высокими электро- и теплопроводностью, деформируемостью и блеском.

Металлизация — покрытие изделий из различных материалов тонким слоем металла путем его распыления в расплавленном виде.

Металловедение — наука, изучающая связь между составом, строением и свойствами металлов и сплавов, а также их изменение при различных внешних воздействиях.

Металлографический анализ, металлографическое исследование — метод исследования микро- и макроструктуры металлов и сплавов.

Металлография — наука, изучающая структуру металлов и сплавов:

количественная — металлография, занимающаяся изучением количественных характеристик микроструктуры;

цветная — область металлографии, применяющая методы выявления структуры путем окрашивания ее составляющих в различные цвета.

Металлотермия — отрасль металлургии, использующая процессы восстановления металлов из оксидов и других соединений более активными металлами с выделением большого количества теплоты.

Металлургия — область науки и техники и отрасль промышленности, охватывающие процессы получения металлов из руд или других материалов, а также процессы, при которых сплавам придаются свойства, соответствующие их назначению:

порошковая — область металлургии, осуществляющая последовательно в едином цикле операции получения порошка и превращения его в изделия.

Метамagnetизм — ферромагнитное состояние, образующееся из антиферромагнитного в результате воздействия внешнего магнитного поля.

Миграция границ зерен — диффузионное перемещение границ зерен в результате движения ступенек и зернограничных дислокаций.

Микроскоп — оптический прибор для наблюдения малых объектов, невидимых невооруженным глазом.

Микроскопия (микроскопическое исследование, микроскопический анализ) — метод исследования малых объектов, невидимых невооруженным глазом, с помощью микроскопа:

высокотемпературная — метод изучения микроструктуры при высокой температуре;

световая — микроскопия в диапазоне видимого света;

электронная — метод исследования невидимых невооруженным глазом объектов с помощью электронного микроскопа.

Модификатор — вещество, специально вводимое в расплав в малых дозах для целенаправленного изменения структуры и свойств обработанного металла.

Модифицирование — введение в расплавленные металлы и сплавы модификаторов с целью резкого изменения (например, измельчения) структуры и улучшения свойств.

Модуль:

сдвига — отношение касательного напряжения к вызванной им условной деформации;

упругости, Юнга — отношение нормального напряжения к вызванной им упругой (линейной) деформации.

Монель-металл — высокопрочный коррозионностойкий никелевый сплав, содержащий 27—29 % Cu, 2—3 % Fe, 1,2—1,8 % Mn.

Монокристалл — одиночный кристалл, имеющий единую кристаллическую решетку.

Мягкие пятна — небольшие зоны с низкой твердостью на поверхности закаленного металла (изделия).

Н

Нагрев — процесс подвода энергии, в результате которого происходит повышение температуры металла (изделия):

безокислительный — нагрев металла с минимальным образованием окалины, который проводят в газовых печах скоростного нагрева, пе-

чах с атмосферой продуктов неполного сгорания газа, токами высокой частоты;

в кипящем слое (в псевдооживленном слое) — повышение температуры изделия в среде твердых частиц, взвешенных в потоке газа;

импульсный — нагрев посредством воздействия кратковременными повторными дозами энергии;

индукционный — нагрев наведенными в изделии вихревыми токами;

косвенный — нагрев, при котором тепло передается от источника к изделию через промежуточную среду;

местный, локальный — нагрев одного или нескольких участков изделия;

непрерывно-последовательный — нагрев при непрерывном относительном перемещении источника тепла и изделия;

пламенный — прямой нагрев пламенем, обычно отдельных участков изделия;

поверхностный — нагрев только поверхностного слоя металла (изделия);

при вращении — нагрев при относительном вращении изделия и источника тепла;

программированный — нагрев, выполняемый по заданному режиму;

прямой — нагрев, при котором изделие подвергается непосредственному воздействию источника тепла;

сквозной (прогрев) — нагрев до достижения заданной температуры во всем объеме изделия;

стационарный — нагрев, осуществляемый без относительного перемещения изделия и источника тепла;

электрическим током — нагрев изделия пропусканием электрического тока.

Нагружение — процесс действия нагрузки на материал:

статическое — продолжительное нагружение, при котором изменение нагрузки во времени не учитывается;

стационарное случайное — случайное нагружение с постоянными характеристиками процесса.

Нагрузка — сила, действующая на материал и приводящая к возникновению в нем напряжений или деформаций.

Надежность — способность изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки.

Надрез — резкое локальное изменение размеров и формы объекта, приводящее к уменьшению поперечного сечения и вызывающее концентрацию напряжений.

Наклеп, нагартовка — обработка, приводящая к упрочнению металла в результате холодной пластической деформации.

Намагниченность — характеристика состояния металла (изделия), помещенного в магнитное поле, определяемая как отношение суммы магнитных моментов атомов, находящихся в изделии, к его объему.

Намагничивание — воздействие на металл (изделие) магнитного поля, приводящее к увеличению магнитной индукции и магнитного потока.

Напряжения (механические) — величины, равные пределу отношения равнодействующих внутренних сил, действующих на элементарной площадке, к площади этой площадки при ее стремлении к нулю:

закалочные — термические и фазовые напряжения, возникающие в изделии при закалке;

касательные — напряжения, направленные по касательной к элементарной площадке;

макронапряжения (напряжения I рода) — остаточные напряжения, действующие в различных частях изделия и уравнивающиеся в его объеме;

микронапряжения (напряжения II рода) — остаточные напряжения, действующие внутри одного зерна или нескольких соседних зерен;

нормальные — напряжения, направленные по нормали к элементарной площадке;

остаточные — напряжения, остающиеся в металле (изделии) после устранения внешнего воздействия (механического, термического, физико-химического и др.);

термические — напряжения, возникающие в металле (изделии) в результате изменения температуры;

усадочные — напряжения, возникающие в отливке в результате механического торможения усадки литейной формой при высоких температурах;

фазовые — напряжения, возникающие в металле (изделии) в результате фазовых превращений;

сдвига — напряжения, при которых происходит сдвиг.

Напыление — нанесение покрытий с особыми свойствами распылением жидкого или измельченного твердого вещества струей сжатого воздуха.

Науглероженный слой, цементованный слой — поверхностный слой металла (изделия), в котором в результате науглероживания увеличено содержание углерода.

Науглероживание (процесс) — увеличение содержания углерода в поверхностном слое металла (изделия).

Науглероживающая:

способность атмосферы — способность атмосферы насыщать углеродом металл (изделие), определяемая количеством углерода в граммах, которое при данной температуре может быть доставлено к поверхности металла (изделия) одним кубическим метром углеродсодержащего газа;

среда — среда, способная обеспечить науглероживание металла (изделия) в данных условиях.

Нейзильбер — декоративный медный сплав, содержащий 18—22 % Zn, 13,5—16,5 % Ni.

Неметаллическое включение — неметаллическая частица (оксид, сульфид, силикат и др.) в металлах и сплавах.

Несущий газ — основной газ в составе контролируемой атмосферы.

Неупругость — отклонение поведения материала от поведения совершенно упругого тела, характеризующееся запаздыванием упругой деформации относительно напряжения, что графически изображается петлей гистерезиса.

Нирезист — никелевый аустенитный чугун, немагнитный, жаропрочный, ростоустойчивый, коррозионно- и хладостойкий.

Нитинол — сплав из интерметаллида NiTi, обладающий склонностью к термоупругому мартенситному превращению, известному как эффект запоминания формы.

Нитрид — химическое соединение азота с одним или несколькими элементами.

Нитридный слой — слой химических соединений (нитридов), образующийся в процессе азотирования.

Нитридообразующий элемент — легирующий элемент, способный образовывать нитриды.

Нитроцементация (цианирование) — см. азотонауглероживание.

Нихард — ледебуритный белый чугун, легированный хромом и никелем; имеет аустенитно-мартенситно-карбидную структуру и обладает высокой твердостью (не менее 55 HRC) и износостойкостью.

Нихром — хромо-никелевый сплав, содержащий 65—80 % Ni, 15—30 % Cr и небольшие добавки Si, Al и других элементов; обладает высокой жаростойкостью и электросопротивлением.

Нормализация — термическая обработка сплавов железа, состоящая из аустенитизации и охлаждения на спокойном воздухе.

О

Обезводороживание — удаление водорода из сплавов на основе железа (изделия) без изменения структуры.

Обезуглероживание (операция) — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном удалении из поверхностного слоя металла (изделия) углерода.

Обезуглероживание (процесс) — уменьшение содержания углерода в поверхностном слое металла (изделия).

Обезуглероживающая среда — среда, способная обеспечить обезуглероживание металла (изделия) в данных условиях.

Область несмешиваемости — область на диаграмме состояния, в которой происходит расслаивание растворов металлических сплавов.

Обрабатываемость резанием — способность металла (изделия) подвергаться механической обработке резанием.

Обработка холодом — термическая обработка, выполняемая после закалки с целью превращения остаточного аустенита в мартенсит, состоящая в охлаждении стали (сплава) до отрицательных температур и необходимой выдержке.

Образование зародышей — зарождение частиц новой фазы.

Окалина — продукт окисления, образующийся на поверхности стали и сплавов при нагреве на воздухе или в других средах, содержащих кислород.

Окалинообразование — образование на поверхности металла (сплава) продукта газовой коррозии — окалины.

Окалиностойкость — способность металла (сплава) сопротивляться образованию на его поверхности окалины.

Окисление — процесс взаимодействия металла (изделия) с кислородом, приводящий к возникновению оксидов:

внутреннее — окисление, приводящее к образованию дисперсных оксидов в металле (изделии) в результате диффузионного проникновения кислорода от поверхности.

Окислительная среда — среда, способная обеспечить взаимодействие кислорода с металлом (изделием) в данных условиях.

Окисная пленка, оксидная пленка — пленка, состоящая преимущественно из оксидов металла.

Окрашивание при нагреве — реакция металлов с газами, приводящая к образованию тонкой пленки, придающей разную окраску (цвета побежалости) в зависимости от ее толщины.

Оксиазотирование — азотирование с дополнительным диффузионным насыщением металла (изделия) кислородом.

Оксиуглеродоазотирование — углеродоазотирование с дополнительным диффузионным насыщением металла (изделия) кислородом.

Операция (термической обработки) — каждая отдельная стадия, из совокупности которых складывается технологический процесс термической обработки.

Основа (сплава) — основная фаза или структура, составляющие металл или сплав.

Остаточная магнитная индукция — магнитная индукция, которая остается в предварительно намагниченном образце после снятия внешнего магнитного поля.

Отбел — образование участков со структурой белого чугуна в отливках из графитизированных (серых и высокопрочных) чугунов:

обратный — отбел во внутренних частях отливок из графитизированных чугунов;

поверхностный — отбел в поверхностном слое отливок из графитизированных чугунов.

Отжиг — термическая обработка, заключающаяся в нагреве металла (изделия) до определенной температуры, выдержке и последующем охлаждении, проводимая с целью получения структуры, наиболее близкой к равновесной:

вакуумный — отжиг при давлении среды ниже атмосферного;

в защитной атмосфере — отжиг, проводимый в специально выбранной газовой среде, предотвращающей изменение состава поверхности изделия;

в поточной линии — непрерывный отжиг стальной полосы перед ее намоткой в рулон;

в ящиках — отжиг, выполняемый в закрытых металлических ящиках (контейнерах), иногда в защитной среде, с целью предохранения поверхности изделия от окисления;

гомогенизационный — отжиг при высокой температуре и длительной выдержке с целью уменьшения химической неоднородности, обусловленной ликвацией;

графитизирующий — отжиг чугунов или заэвтектоидных сталей, приводящий к выделению углерода в виде графита;

двойной — два последовательных отжига без промежуточного охлаждения изделия до комнатной температуры;

для снятия напряжений (релаксационный) — отжиг, полностью или частично уменьшающий зональные остаточные напряжения;

дорекристаллизационный — отжиг холоднодеформированного металла при температуре ниже температуры рекристаллизации;

изотермический — отжиг, заключающийся в нагреве выше верхней критической точки, выдержке, охлаждении до температуры перлитного распада, изотермической выдержке до полного распада метастабильной высокотемпературной фазы, охлаждении до комнатной температуры;

маятниковый (циклический) — отжиг, проводимый при переменном изменении температуры в заданном интервале с целью получения глобулярных структур;

на белосердечный ковкий чугун — отжиг на ковкий чугун, приводящий к получению перлитной основы с распределенным в ней графитом компактной формы разной степени дисперсности и белому излому;

на ковкий чугун — термическая обработка отливок из белого доэвтектического чугуна, проводимая с целью получения ковкого чугуна, при которой происходит выделение углерода в виде хлопьевидного графита;

на крупное зерно — отжиг металла (изделия) при температурах и выдержках, обеспечивающих получение крупнозернистой структуры;

на мелкое зерно — отжиг металла (изделия) при температурах и выдержках, обеспечивающих получение мелкозернистой структуры;

на черносердечный ковкий чугун — отжиг на ковкий чугун в нейтральной среде, приводящий к получению ферритной основы с распределенным в ней хлопьевидным графитом разной степени дисперсности и черному бархатистому излому;

непрерывный — отжиг, при котором изделия перемещаются через нагревательный агрегат непрерывно или непрерывно-последовательно;

обезуглероживающий — отжиг ковкого чугуна в руде, окалине, окислительных газовых средах; проводится с целью создания в отливке обезуглероженного поверхностного слоя;

полный — отжиг сплавов железа, заключающийся в полной аустенизации с медленным охлаждением вместе с печью;

промежуточный (межоперационный) — отжиг металла, выполняемый один или несколько раз между операциями механической обработки изделия;

рекристаллизационный — отжиг упрочненного пластической деформацией (наклепанного) металла при температуре, равной температуре порога рекристаллизации или выше нее;

светлый — отжиг, проводимый в среде, обеспечивающей сохранение первоначальной поверхности металла благодаря предотвращению его окисления;

смягчающий — отжиг, проводимый с целью понижения твердости металла (изделия) до определенного значения;

стабилизирующий — отжиг, обеспечивающий выделение или коагуляцию мелкодисперсных структурных составляющих, проводимый с целью предотвращения изменения структуры во времени;

субкритический — отжиг, который проводится при температуре ниже эвтектоидной;

сфероидизирующий (стали) — отжиг стали при температуре несколько выше A_{C1} (или попеременно выше и ниже A_{C1}) с выдержкой, обеспечивающей сфероидизацию карбидов.

Отливка — заготовка (или литая деталь), получаемая заливкой расплавленного металла в литейную форму.

Относительное сужение при разрыве — отношение уменьшения площади поперечного сечения образца в месте разрыва, вызванного действием приложенной силы, к исходной площади поперечного сечения.

Отпуск — термическая обработка закаленного на мартенсит сплава (стали), заключающаяся в одно- или многократном нагреве до температуры (не выше A_1) от 150—260 °С до 370—650 °С, выдержке и охлаждении, при котором происходит распад и (или) возврат и рекристаллизация мартенсита:

высокий (высокотемпературный) — отпуск стали при температурах 500—680 °С; обеспечивает повышение пластичности и ударной вязкости закаленной стали при сохранении ее повышенной прочности;

двойной — термическая обработка, при которой закаленная сталь подвергается двукратному нагреву не выше A_1 в основном одинаковой температуры;

низкий (низкотемпературный) — отпуск стали при температурах 150—250 °С; обеспечивает снижение внутренних напряжений в закаленной стали при сохранении ее высокой твердости;

средний (среднетемпературный) — отпуск стали при температурах 350—450 °С; обеспечивает повышение пределов упругости и текучести закаленной стали.

Отпускная хрупкость — переход стали в хрупкое состояние в результате отпуска в определенном интервале температур:

I рода (*необратимая отпускная хрупкость*) — хрупкость, проявляющаяся в снижении ударной вязкости у некоторых закаленных сталей после отпуска при температурах 523—673 К, степень развития которой не зависит от скорости охлаждения, от температур отпуска;

II рода (*обратимая отпускная хрупкость*) — хрупкость, проявляющаяся в снижении ударной вязкости у некоторых закаленных сталей в результате нагрева до 723—873 К (независимо от скорости последующего охлаждения) и в результате отпуска при температурах выше 873 К с последующим медленным охлаждением в интервале температур 873—723 К.

Отпущенный мартенсит — мартенсит, в котором углерод частично выделился при отпуске из твердого раствора в виде ϵ -карбидов.

Отрыв — разрушение под действием нормальных напряжений.

Охлаждающая способность среды — свойство охлаждающей среды обеспечивать в определенных условиях заданный режим охлаждения.

Охлаждение — процесс отвода энергии, в результате которого происходит понижение температуры металла (изделия):

непрерывное — охлаждение, не прерывающееся с понижением температуры;

прерывистое — охлаждение, прерывающееся с понижением температуры;

принудительное воздушное, обдувкой воздухом — охлаждение металла (изделия) в потоке воздуха;

программированное — охлаждение, выполняемое по заданному режиму.

Охрупчивание — изменение в структурном состоянии, приводящее к возникновению хрупкости металла (изделия).

П

Парамагнетизм — явление возникновения в веществе в отсутствие магнитной упорядоченности слабой намагниченности в направлении магнитного поля.

Парциальное давление — давление газа, входящего в состав газовой смеси, которое он оказывал бы, занимая один весь объем смеси и находясь при температуре смеси.

Патентирование — термическая обработка, состоящая из аустенизации и охлаждения с контролируемой скоростью для получения квазиэвтектоидной структуры (сорбит или троостит патентирования):

в ванне — патентирование, при котором контролируемое охлаждение производят в жидкой среде;

в бунтах — патентирование проволоки или ленты в смотанном виде;

в кипящем слое — патентирование в среде, представляющей собой твердые частицы, взвешенные в потоке газа;

в свинцовой ванне — патентирование, при котором контролируемое охлаждение производят в расплавленном свинце;

в соляной ванне — патентирование, при котором контролируемое охлаждение производят в расплаве солей;

на воздухе — патентирование, при котором контролируемое охлаждение производят в потоке воздуха;

непрерывное — патентирование, при котором процессы нагрева и охлаждения разматывающейся проволоки или ленты осуществляются непрерывно.

Пауза — временное прерывание процесса.

Перегрев — нагрев металла (изделия) до высокой температуры, при которой во время выдержки возникают крупное зерно и структурные изменения, которые могут быть устранены последующей термической обработкой.

Перегрузка — воздействие нагрузок выше установленных пределов.

Передержка — превышение заданной продолжительности выдержки.

Пережог — нагрев металла (изделия) до высокой температуры, при которой во время выдержки возникают крупное зерно и структурные изменения, которые не могут быть устранены последующей термической обработкой.

Персохлаждение — охлаждение ниже равновесной температуры превращения.

Пересыщенный твердый раствор — твердый раствор, в котором растворенные атомы находятся в количестве, превышающем их содержание в равновесном состоянии при данных условиях.

Переходный металл — металл, атомы которого имеют частично заполненные электронами *d*- и *f*-оболочки.

Перитектика — твердый раствор, образовавшийся в результате взаимодействия жидкой и твердой фаз.

Перитектическая температура, температура перитектики — температура, которой соответствует перитектическое равновесие.

Перитектическое превращение, перитектическая реакция — процесс взаимодействия кристаллов твердого раствора с жидкостью, происходящий изотермически при постоянной концентрации фаз и приводящий к образованию кристаллов другого твердого раствора.

Перлит — структура, представляющая собой смесь феррита и цементита, образующаяся при эвтектоидном превращении аустенита:

зернистый — перлит с округлой формой цементита;

пластинчатый — обычный перлит с цементитом пластинчатой формы.

Перлитная область — интервал температур, в пределах которого происходит образование структур перлитного типа.

Перлитное превращение — превращение аустенита в перлит.

Плавление — процесс перехода вещества из кристаллического (твердого) состояния в жидкое, происходящий с поглощением тепла.

Пластичность — свойство твердых тел, не разрушаясь, изменять под действием внешних сил свои размеры и форму.

Платинородий — сплав из 90 % Pt и 10 % Rh, используемый в термодарах.

Плоское скопление дислокаций — локальное повышение плотности дислокаций в определенных плоскостях скольжения.

Плоскость:

габитуса — плоскость или система плоскостей кристаллической фазы, на которой (которых) происходят фазовые превращения или двойникование;

двойникования — кристаллографическая плоскость, по которой происходит двойникование кристалла;

плотноупакованная — плоскость в кристаллической решетке с максимальным количеством расположенных на ней атомов;

скольжения — кристаллографическая плоскость, по которой происходит перемещение одной части кристалла по отношению к другой.

Плотность — физическая характеристика тела, численно равная массе единицы его объема.

Плотность дислокаций — суммарная длина дислокаций, отнесенная к единице объема.

Поверхностное натяжение — натяжение поверхностного слоя, характеризующее работу перехода атомов из внутренней части материала на поверхность при образовании 1 см^2 новой поверхности.

Подогрев — нагрев металла (изделия) до промежуточной температуры и выдержка при ней перед нагревом до заданной температуры.

Ползучесть — пластическая деформация, происходящая при постоянной температуре и постоянном напряжении (постоянной нагрузке) в зависимости от времени.

Полигонизация — процесс перераспределения дислокаций, приводящий к образованию в кристалле (зерне) областей произвольной формы, свободных от дислокаций и разделенных малоугловыми границами.

Полирование (механическое) — полирование, как правило, на вращающемся круге с натянутым или наклеенным полировальным материалом (фетр, бархат или тонкое сукно), на который наносят абразивное вещество с частицами очень малых размеров.

Полуметалл — твердое тело, концентрация электронов проводимости в котором определяется перекрытием энергетических зон и имеет порядок 10^{-3} — 10^{-5} электронов на атом.

Полупроводник — твердое тело, электропроводность в котором мала при температуре абсолютного нуля, но существенно увеличивается с ростом температуры, из-за малой ширины запрещенной зоны и появления электронов в зоне проводимости (дырок в валентной зоне).

Пора — один из видов объемных дефектов кристаллического строения — несплошность металла (изделия), формирующаяся в объеме компактного материала.

Пористость — несплошность материала в виде пор, определяемая отношением измеренного объема пор к полному объему пористого тела.

Превращение при непрерывном охлаждении, анизотермическое охлаждение — превращение, происходящее при непрерывном понижении температуры.

Предвыделение — процесс, происходящий в решетке пересыщенного твердого раствора при старении и предшествующий началу выделения новой фазы.

Предел выносливости — максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, при котором еще не происходит усталостное разрушение до базы испытания:

при симметричном цикле — предел выносливости, определенный по результатам испытаний на усталость при симметричном цикле напряжений;

ограниченный — максимальное по абсолютному значению напряжение цикла, соответствующее задаваемой циклической долговечности.

Предел ползучести — наибольшее условное растягивающее напряжение, при котором скорость или деформация ползучести за определенное время достигает заданной величины.

Предел прочности:

при кручении — касательное напряжение, равное отношению наибольшего момента при кручении, предшествующего разрушению, к полярному моменту сопротивления сечения образца;

при растяжении, временное сопротивление разрыву — условное напряжение, равное отношению максимальной нагрузки при растяжении, предшествующей разрушению, к начальной площади поперечного сечения образца;

при сжатии — условное напряжение, равное отношению максимальной нагрузки при сжатии, предшествующей разрушению, к начальной площади поперечного сечения образца.

Предел растворимости — максимально возможное содержание растворенного элемента в растворителе при данных условиях.

Предел текучести:

условный — наименьшее условное напряжение, при котором остаточная деформация достигает определенной величины (чаще всего 0,2 %);

физический — наименьшее условное напряжение, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки.

Предел упругости — условное напряжение, при котором появляются первые признаки пластической деформации и остаточная деформация достигает заданной величины, обычно 0,05 % и меньше.

Продолжительность испытаний — время, в течение которого образец (изделие) находится в режиме испытаний.

Прокаливаемость — способность стали воспринимать закалку на глубину.

Прочность — свойство металлов (изделий) сопротивляться деформации.

Прямое восстановление железа — получение железа и стали непосредственно из железорудных материалов.

Псевдосплавы — сплавы, полученные методами, отличными от сплавления разных металлов (спеканием, электролизом, возгонкой).

Р

Размер зерна — величина зерна, характеризуемая условным номером (баллом) стандартной шкалы микроструктур.

Разрушение — процесс возникновения, развития и накопления повреждений материала (например, пор и трещин), приводящий к нарушению его сплошности и разделению его на части:

внутризеренное — разрушение, которое проходит через тело зерна;

вязкое — разрушение, сопровождающееся пластической деформацией;

замедленное (задержанное) — разрушение под действием напряжения ниже предела текучести, но выше некоторого порогового значения, без заметной предшествующей макропластической деформации при температурах, близких к комнатной;

межзеренное — разрушение, которое происходит по границам зерен;

сдвигом (косой излом) — излом, происходящий под острым (часто 45°) углом по отношению к направлению действующей нагрузки;

усталостное — разрушение металла (изделия) вследствие развития усталостных повреждений (трещин);

хрупкое — разрушение, не сопровождающееся макроскопически выраженной остаточной деформацией и происходящее по механизму отрыва.

Разупрочнение — уменьшение прочности материала.

Раствор — однородная система двух или более веществ.

Растворимость — способность вещества образовывать с другими веществами однородные системы — растворы, в которых вещество находится в виде отдельных атомов, ионов или молекул:

в твердом состоянии — способность твердых веществ образовывать с другими веществами твердые растворы.

Растворитель (в твердом растворе) — вещество, на основе кристаллической решетки которого формируется твердый раствор.

Растрескивание, образование трещин — процесс возникновения и развития трещин, приводящий к разрушению металла (изделия):

под напряжением — процесс возникновения и развития трещин в условиях действующего напряжения.

Растровая электронная микроскопия — микроскопия с помощью перемещающегося электронного зонда.

Растяжение — увеличение длины и уменьшение поперечного сечения образца в процессе действия приложенной к нему нагрузки.

Рекалесценция — повышение температуры металлов и сплавов в процессе кристаллизации с большим переохлаждением (или при большой скорости охлаждения); происходит за счет быстрого выделения скрытой теплоты кристаллизации, превышающего теплоотвод в процессе охлаждения.

Рекристаллизация — процесс образования и роста (или только роста) одних кристаллических зерен (кристаллитов) поликристалла за счет других той же фазы. Скорость рекристаллизации резко (экспоненциально) возрастает с повышением температуры. Р. протекает особенно интенсивно в пластически деформированных материалах. Различают три стадии рекристаллизации:

первичную — в деформированном материале образуются новые неискаженные кристаллиты, которые растут, замещая зерна, искаженные деформацией, однородной мелкозернистой структурой;

собирательную — неискаженные новые зерна растут за счет друг друга, вследствие чего средняя величина зерна увеличивается;

вторичную — отличается от собирательной тем, что способностью к росту обладают только немногие из неискаженных зерен. В ходе вторичной рекристаллизации структура характеризуется различными размерами зерен (*разнозернистость*).

Релаксация напряжений — процесс уменьшения напряжений в упругонапряженном твердом теле (металл, сплав и др.) в условиях сохранения неизменными линейных размеров тела.

Рост зерна — увеличение размеров зерна при нагреве или выдержке при температуре.

С

Самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС-процесс) — самопроизвольный процесс горения (кислородного или бескислородного) специально подобранных компонентов смеси с образованием продуктов горения, содержащих, как правило, металлические фазы.

Свариваемость — способность металлов образовывать качественное сварное соединение с другими материалами, свойства которых, как правило, близки к свойствам основного металла.

Сверхпластичность — способность материала к значительной равномерной деформации без деформационного упрочнения (наклепа) и разрушения.

Сверхпроводимость — явление исчезновения электросопротивления некоторых металлов, сплавов и химических соединений при характерных для каждого из них критических температурах.

Свойства — совокупность характеристик, отражающих внутреннее строение материала и определяемых условиями и способом испытаний металла (изделия):

механические — свойства, отражающие способность металлических тел сопротивляться действию нагрузок в различных условиях;

физические — свойства материалов, в основе описания которых лежит теория динамики решетки и взаимодействия электронов между собой и с полем решетки и изменение которых не вызывает остаточной деформации материала;

электрические — свойства металлов, определяемые электронами, их движением и взаимодействием.

Сегрегация, ликвация — неоднородность химического состава материала, возникающая при кристаллизации или термообработке в твердом состоянии.

Сенсибилизация — процессы выделения карбидов хрома по границам зерен в нержавеющей аустенитной стали при соответствующей температуре и выдержке, приводящие к появлению чувствительности к межкристаллитной коррозии.

Сероуглеродоазотирование — углеродоазотирование с дополнительным диффузионным насыщением поверхностного слоя металла (изделия) серой.

Сжатие — уменьшение длины и увеличение поперечного сечения образца в процессе действия приложенной к нему нагрузки.

Силицид — химическое соединение кремния с одним или несколькими элементами (обычно — металлами).

Силицирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) кремнием:

в порошках — силицирование в порошкообразной среде;

в тлеющем разряде (ионное) — силицирование в условиях сильного тлеющего разряда между изделием (катодом) и анодом в газовой среде при давлении ниже атмосферного.

Силумин — литейный сплав на основе алюминия, содержащий 10—13 % Si и некоторые примеси.

Синтез — получение сложных соединений или веществ из более простых.

Система (физико-химическая):

гетерогенная — неоднородная система, состоящая из двух или нескольких фаз, имеющих различные свойства;

гомогенная — однородная система, состоящая из одной фазы, все свойства которой одинаковы во всех частях системы или непрерывно изменяются от точки к точке;

равновесная — система, которая при данных условиях обладает минимальной свободной энергией.

Скольжение — перемещение одной части кристалла по отношению к другой, происходящее по определенным кристаллографическим плоскостям и направлениям:

межзеренное (зернограничное) — скольжение, происходящее при определенных температурно-скоростных условиях деформирования и заключающееся в смещении одного зерна относительно другого;

поперечное — движение винтовой дислокации скольжением в другую атомную плоскость.

Скорость:

деформации — изменение относительного удлинения в единицу времени;

диффузии — скорость переноса диффундирующего вещества, характеризуемая коэффициентом диффузии;

нагрева — повышение температуры в единицу времени;

нагрузки — изменение нагрузки в единицу времени;

образования зародышей — число зародышей, возникающих в единицу времени в единице объема;

охлаждения — понижение температуры в единицу времени;

роста кристалла — скорость перемещения грани растущего кристалла от центра зарождения;

роста трещины — отношение приращения длины трещины к интервалу времени, в течение которого оно произошло.

Слой карбида хрома — слой химического соединения, образующийся в процессе хромирования металла (изделия).

Слой химических соединений — внешняя часть поверхностного слоя металла (изделия), возникшего при химико-термической обработке, состоящая из химических соединений, образованных из одного или нескольких диффундирующих элементов и элементов основы.

Солидус — линия на диаграмме состояния, ниже которой все сплавы находятся в твердом состоянии.

Сольвус — линия ограниченной растворимости в твердой фазе на диаграмме состояния.

Сопротивление:

ползучести — способность материалов противостоять ползучести;

разрыву — истинное напряжение, равное отношению нагрузки в момент разрыва образца к площади его поперечного сечения в месте разрыва;

усталости — способность материалов противостоять усталости.

Сорбит — структурная составляющая стали и чугуна, представляющая собой смесь феррита и цементита, образующуюся из аустенита в результате диффузионного превращения при ускоренном охлаждении; по сравнению с перлитом имеет меньшее межпластиночное расстояние и содержание углерода, которое может отличаться от эвтектоидного.

Сормайт — твердый наплавочный материал, представляющий собой сплав железа, углерода, хрома, никеля и кремния.

Состояние:

лабильное — неустойчивое состояние, в котором система может находиться только в процессе превращения или движения;

метастабильное — относительно устойчивое состояние системы (метастабильное равновесие), из которого она может перейти в более

устойчивое состояние (стабильного равновесия) самопроизвольно или под влиянием внешних воздействий;

стабильное — самое устойчивое состояние системы, из которого она не может выйти самопроизвольно.

Спинодальный распад — изотермический распад термодинамически неустойчивого твердого раствора, переохлажденного до температуры ниже спинодали, заключающийся в расслаивании по составу твердого раствора, приводящем к уменьшению энергии Гиббса.

Сплав — сложное вещество, состоящее из двух или нескольких простых веществ (металлов или металлов с неметаллами):

двухкомпонентный (двойной, бинарный) — сплав, состоящий из двух компонентов (в составе сплава один растворенный компонент);

деформируемый — сплав, способный к деформации и обрабатываемый давлением;

дисперсионно-упрочняемый (дисперсионно-твердеющий) — сплав, упрочняемый дисперсными частицами новой фазы, выделяющимися из пересыщенного раствора в результате его распада;

жаропрочный — сплав, обладающий повышенными механическими свойствами при высоких температурах;

жаростойкий — сплав, обладающий при высоких температурах повышенным сопротивлением химическому взаимодействию с газами;

железный (черный) — сплав, в котором основным компонентом является железо;

зеркальный — бронза, содержащая 32—33 % олова; из-за высокой хрупкости применяется только для изготовления малых колокольчиков;

износостойкий — сплав, обладающий высоким сопротивлением изнашиванию;

коррозионно-стойкий — сплав, обладающий высокой стойкостью против коррозии;

литейный — сплав с высокими литейными свойствами, обеспечивающими высокое качество отливок: отсутствие раковин, трещин, пористости и других дефектов;

магнитный — сплав, относительная магнитная восприимчивость которого значительно больше единицы;

магнитомягкий — магнитный сплав, который намагничивается до насыщения, перемагничивается в относительно слабых магнитных полях и характеризуется высокими значениями магнитной проницаемости и небольшой коэрцитивной силой;

магнитотвердый — магнитный сплав, который намагничивается до насыщения, перемагничивается в сравнительно сильных магнитных полях и характеризуется высокими значениями коэрцитивной силы и магнитной индукции;

твердый — сплав, состоящий из карбидов тугоплавких металлов и пластичной металлической связки;

тугоплавкий — сплав, температура плавления которого выше, чем железа;

ферромагнитный — сплав, для которого характерно явление самопроизвольной намагниченности;

цветной (нежелезный) — промышленное название сплавов на основе всех металлов за исключением железа.

Сплавы:

алюминиевые — сплавы на основе алюминия с добавками Cu, Mg, Zn, Si, Mn, Li, Cd, Zr, Cr и других элементов; обладают высокой электро- и теплопроводностью, хорошей коррозионной стойкостью; по способу производства подразделяются на деформируемые, литейные и спеченные;

бериллиевые — сплавы на основе бериллия; обладают высокой удельной прочностью и высокой теплоемкостью; изделия и полуфабрикаты изготовляют методами порошковой металлургии, реже — литьем;

кобальтовые — сплавы на основе кобальта с добавками Cr, Ni, Mo, W и других элементов; наиболее известны жаропрочные и магнито-твердые сплавы;

магниевые — сплавы магния с Al, Mn, Zn и другими элементами; различают сплавы в чушках (для переплавки при производстве фасонного литья и слитков), литейные и деформируемые сплавы;

медно-никелевые — сплавы на основе меди с преобладающим легирующим элементом — никелем; подразделяют на конструкционные (коррозионно-стойкие: куниль, мельхиор, нейзильбер) и электротехнические (константан, капель);

медные — сплавы на основе меди с добавками Sn, Zn, Al, Pb, Ni, Fe, P, Si и др. элементов; подразделяют на бронзы, латуни и медно-никелевые сплавы;

молибденовые — сплавы на основе молибдена с добавками W, Re, Zr, Ti, Nb, C и других элементов; отличаются высокой жаропрочностью;

никелевые — сплавы на основе никеля с добавками Cr, Fe, Cu, Mn, Mo, Co и других элементов (алюмель, монельметалл, пермаллой, хромель); подразделяют на жаропрочные, коррозионно-стойкие, магнитомягкие;

оловянные — сплавы на основе олова с добавками Sb, Cu и других элементов; применяют в качестве подшипниковых материалов (см. баббиты);

свинцовые — сплавы на основе свинца с добавками Sn, Sb, Cu и других элементов; применяют в качестве подшипниковых материалов (см. баббиты);

танталовые — сплавы на основе тантала с добавками Nb, W, Mo, V и других элементов; отличаются высокой жаропрочностью и коррозионной стойкостью в различных средах;

титановые — сплавы на основе титана с добавками Al, V, Mo, Cr, Si, Fe и других элементов; отличаются высокой удельной прочностью;

хромовые — жаропрочные сплавы на основе систем Cr—Ni, Cr—Ni—W, Cr—Ni—Co—Ti, содержащие 35—45 % Cr; рабочая температура этих

сплавов до 1300 °С; обладают высокими механическими свойствами, стойкостью к термическим напряжениям при циклических изменениях температуры, технологичностью при горячей и холодной штамповке и фасонном литье; высокохромистые сплавы хорошо свариваются, не охрупчиваются в процессе длительной работы, изделия из них не нуждаются в защитных покрытиях;

цинковые — сплавы на основе цинка с добавками Al, Cu и Mg; применяют для отливки корпусов карбюраторов и насосов, вкладышей подшипников скольжения, декоративных изделий;

циркониевые — коррозионно-стойкие сплавы на основе циркония с добавками Sn, Fe, Cr, Ni и других элементов.

Среда — твердое, жидкое или газовое окружение, которое при определенных изобарно-термических условиях изменяет или сохраняет неизменным химический состав, структуру и свойства поверхностного слоя металла или сплава.

Средняя скорость нагрева (охлаждения) — среднее значение изменения температуры за единицу времени в выбранном интервале температур.

Стабилизация остаточного аустенита — уменьшение или потеря способности остаточного аустенита к превращению в мартенсит при охлаждении до температуры ниже температуры закалочной среды.

Стабилизирующая обработка — термическая обработка металла (изделия), проводимая с целью предотвращения изменения структуры (размеров изделий) во времени.

Сталь — сплав железа с углеродом (обычно до 2 % С) и другими элементами; содержит в своей структуре эвтектоид при отсутствии углерододержащей эвтектики:

автоматная (легкообрабатываемая) — сталь, при обработке которой на металлорежущих станках-автоматах образуется легко отделяющаяся стружка;

аустенитная — сталь, имеющая после нормализации структуру аустенита;

бейнитная — сталь, имеющая после нормализации бейнитную структуру;

булатная (булат) — углеродистая сталь, которая благодаря особому способу изготовления отличается композиционной структурой поверхности («узором»), высокой твердостью и упругостью;

быстрорежущая — сталь, предназначенная для изготовления инструмента, работающего, как правило, при повышенных скоростях резания, и отличающаяся повышенной теплостойкостью;

высоколегированная — сталь, содержащая более 10 % легирующих элементов;

высокопрочная — сталь с временным сопротивлением разрыву более 1500 МПа;

высокоуглеродистая — углеродистая сталь с содержанием углерода более 0,6 %;

Гадфильда сталь — аустенитная сталь 110Г13Л, содержащая 11—14 % Mn и 0,9—1,3 % С, отличается высоким сопротивлением истиранию при больших давлениях или ударных нагрузках;

графитизированная — сталь с высоким содержанием углерода и кремния, в структуре которой содержится графит;

деформируемая — сталь, способная к деформации и обрабатываемая давлением;

для холодной штамповки и высадки — сталь, обладающая повышенной пластичностью, с улучшенной отделкой поверхности и с соблюдением размерной точности, в виде листов и прутков;

дозвтектоидная — сталь, имеющая в структуре эвтектоид (перлит) и избыточный феррит; содержит менее 0,8 % С;

жаропрочная — сталь, способная сохранять повышенные механические свойства при высоких температурах;

жаростойкая — сталь, обладающая при высоких температурах повышенным сопротивлением химическому взаимодействию с газами;

заэвтектоидная — сталь, имеющая в структуре эвтектоид (перлит) и избыточные карбиды (вторичные), обычно содержит более 0,8 % С;

износостойкая — сталь, обладающая высоким сопротивлением изнашиванию;

инструментальная — сталь, предназначенная для изготовления инструмента или его рабочих частей;

инструментальная высококачественная — сталь марок У7А, У8А — У13А; в составе сталей всех этих марок допускается содержание до 0,025 % S и до 0,025 % P;

инструментальная качественная — сталь марок У7, У8 — У13; в составе сталей всех этих марок допускается содержание до 0,04 % S и до 0,035 % P;

кипящая — низкоуглеродистая сталь, выпускаемая из печи слабо раскисленной; при ее затвердевании в изложницах продолжается окисление углерода с выделением пузырьков газа;

конструкционная — сталь, применяемая для изготовления деталей машин, строительных конструкций и т. д. и обладающая высокой прочностью, надежностью и долговечностью;

конструкционная качественная — сталь марок 05, 08, 10, 15—80, 85; в составе сталей всех этих марок допускается содержание до 0,04 % S и до 0,035 % P;

конструкционная обыкновенного качества — сталь марок Ст0, Ст1, Ст2, Ст6; в составе сталей всех этих марок допускается содержание до 0,06 % S и до 0,085 % P;

легирующая — сталь, содержащая легирующие элементы;

ледебуритная (карбидного класса) — сталь, содержащая эвтектическую смесь (обычно квазиэвтектику) легированного аустенита и карбидов легирующих элементов; некоторые из ледебуритных сталей больше подходят под определение белых малоуглеродистых легированных чугунов;

литейная — сталь с высокими литейными свойствами, обеспечивающими высокое качество отливок: отсутствие раковин, трещин, пористости и других дефектов;

магнитная — сталь, относительная магнитная восприимчивость которой значительно больше единицы;

мартенситная — сталь, имеющая после охлаждения на воздухе структуру мартенсита (воздушнозакаливаемая);

мартенситно-старенная — высоколегированная безуглеродистая (менее 0,03 % C) мартенситная дисперсионно-твердеющая (при старении) высокопрочная сталь с интерметаллидным упрочнением;

нержавеющая — сталь коррозионно-стойкая в воздушной атмосфере, морской и речной воде, а также в некоторых агрессивных средах;

нестаренная — сталь низкоуглеродистая (до 0,15 % C) со стабилизированными механическими свойствами;

низколегированная — легированная сталь, в которой суммарное содержание легирующих элементов менее 2,5 %;

низкоуглеродистая — сталь с содержанием углерода менее 0,25 %;

нормализованная — сталь, подвергнутая нормализации;

перлитная — сталь, имеющая после нормализации структуру перлита;

переходных классов — стали полуперлитного и полуферритного классов;

подшипниковая — сталь, предназначенная для изготовления подшипников качения;

полуспокойная — сталь, полученная при менее полном раскислении, чем при выплавке спокойной стали; такая сталь затвердевает без кипения, но с выделением газов;

пружинная — сталь, предназначенная для изготовления упругих элементов (пружин, рессор и т. д.);

свариваемая — сталь, предназначенная для изготовления сварных конструкций;

специальная — сталь, предназначенная для изготовления изделий ответственного назначения, обладающая особыми свойствами;

спокойная — сталь, полученная при полном раскислении в печи и в ковше, затвердевает спокойно, без выделения газов и искр;

среднеуглеродистая — сталь, содержащая 0,3—0,5 % C;

углеродистая — сталь, не содержащая легирующих элементов;

цементируемая (цементуемая) — сталь (обычно низкоуглеродистая), предназначенная для изготовления цементируемых изделий;

эвтектоидная — сталь, имеющая в структуре только эвтектоид (перлит), обычно содержит около 0,8 % C.

Старение (операция) — термическая обработка, проводимая после закалки без полиморфного превращения (на твердый раствор), заключающаяся в выдержке металла (изделия) при одной или нескольких температурах для дисперсионного упрочнения (твердение):

естественное — старение, проводимое при комнатной температуре;

искусственное — старение, проводимое при температуре выше комнатной.

Старение (процесс) — распад пересыщенных твердых растворов при комнатной или повышенных температурах:

деформационное — старение после (при) пластической деформации;

мартенсита — распад безуглеродистого мартенсита в сплавах железа при повышенных температурах;

перестаривание — укрупнение включений дисперсных фаз при неправильном проведении операции старения (при слишком высокой температуре или длительной выдержке изделий при искусственном старении).

Стеллиты — литые твердые сплавы на кобальтовой основе, содержащие Cr, W, Si и другие элементы.

Структура — строение металлов и сплавов, характеризующееся наличием фаз (и дефектов, в случае их возникновения в процессе получения металла-изделия), их количеством, взаиморасположением и формой:

видманштеттова — структура, формирующаяся в результате выделения новой фазы в виде пластин (игл), кристаллографически связанных с исходным матричным зерном и расположенных параллельно друг другу или под определенным углом;

глобулярная — структура, состоящая из микрочастиц (фаз), обладающих примерно одинаковыми размерами во всех измерениях и в идеальном случае имеющих форму шара;

дендритная — структура, состоящая из кристаллов древовидной формы (дендритов);

микроструктура — структура металла (сплава) в виде зерен с определенными формой и ориентировкой и (или) в виде одной или нескольких фаз, выявляемая при увеличении более 30 крат;

пластинчатая — структура, состоящая из микрочастиц (фаз), имеющих в двух измерениях размеры, значительно превышающие размер в третьем измерении (толщину);

полигональная — структура, состоящая из элементов (неправильных многоугольников) субструктуры кристалла;

полиэдрическая, зернистая — структура металла, состоящая из кристаллитов (зерен), имеющих форму многогранников;

полосчатая (строчечная) — структура, составляющие (фазы) которой отличаются полосчатым (строчечным) расположением;

столбчатая — структура в виде зерен, вытянутых нормально к поверхности охлаждения, сформировавшаяся из небольшого числа центров кристаллизации при низкой степени переохлаждения сплава;

субструктура — структура отдельных зерен металлов и сплавов, представляющая собой совокупность субзерен;

ячеистая — структура, в которой участки с повышенной плотностью дислокаций (стенки ячеек) разделяют области, практически свободные от дислокаций.

Сульфидирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) серой.

Сульфазотирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном комбинированном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) азотом и серой.

Сурьмирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) сурьмой.

Т

Твердость — сопротивление материала пластической деформации при внедрении в него более твердого тела (индентора):

микротвердость — твердость очень малых (микроскопических) объемов материалов, как правило, отдельных фаз или структурных составляющих, выявляемая специальными методами;

по Бринеллю HB — твердость, определяемая на прессе Бринелля методом вдавливания в поверхность испытуемого материала стального закаленного шарика диаметром 2,5, 5 или 10 мм при нагрузке от 625 Н до 30 кН; измеряется диаметр отпечатка и по таблице находится число твердости;

по Виккерсу HV — твердость, определяемая вдавливанием в поверхность испытуемого материала алмазного индентора, имеющего форму правильной четырехгранной пирамиды с двугранным углом при вершине 136° ; измерение проводится каждой из диагоналей отпечатка и по среднему значению с помощью таблицы находится число твердости;

по Роквеллу HRA, HRB, HRC — твердость, определяемая вдавливанием в поверхность испытуемого материала алмазного индентора, имеющего форму конуса с углом при вершине 120° (определение проводится по шкалам *A* и *C* при нагрузках на индентор 60 и 150 кгс соответственно), или стального закаленного шарика диаметром 1/16 дюйма или 1,588 мм (определение проводится по шкале *B* при нагрузке на индентор 100 кгс).

Твердый раствор — однородное твердое вещество (фаза), состоящее из двух или большего числа компонентов, причем растворенные компоненты размещаются в кристаллической решетке компонента-растворителя:

внедрения — твердый раствор, в котором атомы растворенных элементов находятся в междоузлиях кристаллической решетки растворителя;

замещения — твердый раствор, в котором атомы растворенных элементов замещают атомы растворителя в его кристаллической решетке.

Текстура — структура с преимущественной ориентацией зерен в поликристаллах или молекул в аморфных твердых телах, а также в жидких кристаллах.

Температура:

затвердевания — температура, при которой появляются зародыши твердой фазы;

Кюри — температура, при которой в любом ферромагнетике во время нагрева (охлаждения) полностью исчезает (возникает) ферромагнетизм;

конца мартенситного превращения M_K — температура, при которой полностью заканчивается превращение аустенита в мартенсит;

кристаллизации — температура, при которой начинается процесс кристаллизации. Для технически чистых металлов и некоторых сплавов (например, эвтектических) в условиях небольших переохлаждений кристаллизация протекает при постоянной температуре, для большинства сплавов — в интервале температур. При больших переохлаждениях из-за интенсивного выделения скрытой теплоты температура в процессе кристаллизации повышается, приближаясь к равновесной; это явление называют рекалесценцией;

начала мартенситного превращения M_H — температура, при которой аустенит начинает превращаться в мартенсит;

Нееля — температура, при которой в процессе нагревания (охлаждения) исчезает (появляется) антиферромагнетизм;

плавления — температура, при которой происходит превращение твердой кристаллической фазы в жидкую;

превращения (критическая) — температура, при которой происходит превращение одной фазы в другую;

рекристаллизации — температура, при которой начинают развиваться рекристаллизационные процессы.

Температурный режим, термический цикл — изменение температуры во времени от начала нагрева до полного охлаждения.

Теплоемкость — количество теплоты, поглощаемое телом (металлом) при повышении его температуры на один градус:

удельная — количество теплоты, необходимое для нагревания одного грамма вещества на один градус.

Теплопередача — теплообмен между двумя теплоносителями через поверхность раздела между ними.

Теплопроводность — способность тела передавать тепловую энергию от одной его точки к другой, если между ними возникает разница температур.

Теплота — количество энергии, получаемой или отдаваемой системой в процессе теплообмена при неизменных внешних параметрах системы (объеме и др.):

превращения — теплота, которая необходима для осуществления превращения.

Термическая обработка (термообработка) — тепловое воздействие на металл (изделие), приводящее к изменению его структуры и свойств:

вакуумная — термическая обработка при давлении среды ниже атмосферного;

в защитной атмосфере — термическая обработка в специально подобранной газовой среде, позволяющей избежать изменения химического состава в поверхностных слоях металла (изделия);

в кипящем слое — термическая обработка в среде, представляющей собой твердые частицы, взвешенные в потоке газа;

в контролируемой атмосфере — термическая обработка в газовой среде с регулируемым химическим составом;

в соляной ванне — термическая обработка в расплаве солей;

в тлеющем разряде (ионная) — термическая обработка в условиях сильноточного тлеющего разряда между изделием (катодом) и анодом в газовой среде при давлении ниже атмосферного;

местная — термическая обработка одного или нескольких участков изделий;

объемная — термическая обработка изделия во всем его объеме;

поверхностная — термическая обработка поверхностного слоя металла (изделия);

предварительная — термическая обработка, проводимая перед окончательной термической обработкой;

собственно термическая обработка — обработка путем теплового воздействия без каких-либо дополнительных химических и физических воздействий.

Термический анализ — один из основных методов физико-химического анализа, заключающийся в определении температур фазовых превращений по экспериментально построенным кривым охлаждения или нагревания.

Термомагнитная обработка — термическая обработка некоторых ферромагнитных материалов в магнитном поле.

Термомеханическая обработка (ТМО) — обработка, заключающаяся в термическом и деформационном воздействии на металл (изделие) в таком сочетании, когда пластическая деформация влияет на формирование структуры при фазовых превращениях, происходящих во время термического воздействия:

низкотемпературная (НТМО) (аусформинг) — термомеханическая обработка стали, заключающаяся в пластической деформации в области метастабильного аустенита ниже температуры рекристаллизации;

высокотемпературная (ВТМО) — термомеханическая обработка, пластическая деформация при которой осуществляется в области существования стабильного твердого раствора в условиях, исключающих развитие рекристаллизационных процессов, с последующей закалкой.

Термостойкость — способность материалов противостоять, не разрушаясь, термическим напряжениям, обусловленным изменениями температуры при нагревании и охлаждении.

Термоэлектродвижущая сила (термоЭДС) — электродвижущая сила, возникающая в замкнутой электрической цепи, составленной

из последовательно соединенных различных металлов или полупроводников, в связи с тем, что их спаи находятся при разных температурах.

Титанирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) титаном.

Толщина слоя:

азотированного (глубина азотирования) — расстояние от поверхности азотированного металла (изделия) до условной границы, определяемой заданным параметром, характеризующим слой, обогащенный азотом;

закаленного (глубина закалки) — расстояние от поверхности закаленного изделия до зоны, определяемой конкретным значением твердости или микроструктурой закалки;

цементованного (глубина науглероживания) — расстояние от поверхности науглероженного металла (изделия) до условной границы, определяемой заданным параметром, характеризующим слой, обогащенный углеродом;

обезуглероженного — расстояние от поверхности обезуглероженного металла (изделия) до условной границы, определяемой заданным параметром, характеризующим слой, обедненный углеродом.

Томпак — однофазная латунь с содержанием меди более 80 %.

Точка росы — температура, при которой давление водяного пара, содержащегося в атмосфере, равно давлению насыщенного пара.

Травление, декапирование — химическая обработка, обычно растворами кислот, твердых материалов для изменения вида их поверхности или удаления примесей, а также для доведения металлических заготовок до нужных размеров и формы.

Травление шлифов — обработка металлографических шлифов с целью выявления границ зерен и различных структурных составляющих:
вакуумное — травление металлографических шлифов при заданной температуре путем воздействия вакуума;

глубокое — травление, как правило, макрошлифов, в результате которого образуется рельефная поверхность с отчетливо видимыми осями дендритов, ликвационной зоной и трещинами;

комплексное — сочетание нескольких методов травления микрошлифов;

тепловое — тепловое воздействие на поверхность микрошлифов с целью выявления различных структурных составляющих путем их теплового окрашивания;

химическое — химическая обработка металлографических шлифов, обычно растворами кислот;

цветное — травление, в результате которого структурные составляющие металла окрашиваются в различные цвета.

Трение — механическое сопротивление, возникающее при относительном перемещении двух соприкасающихся тел в плоскости их касания:

внутреннее — проявление неупругости в металлах и сплавах, заключающееся в рассеянии энергии механических колебаний.

Тренировка — периодическое нагружение металла (изделия) с целью повышения предела выносливости.

Трещина — нарушение сплошности металла (изделия) в виде заметного разрыва;

закалочная — трещина, возникающая при закалке под действием закалочных напряжений;

микротрещина — трещина, размер которой измеряется тысячными долями миллиметра;

поверхностная — трещина, образующаяся в поверхностном слое металла (изделия) и не распространяющаяся вглубь;

усталостная — трещина, возникающая под действием переменных напряжений;

холодная — трещина, возникающая в материале при низких температурах;

шлифовочная — трещина, возникающая при шлифовании металла с высокой твердостью и малой теплопроводностью.

Трещиностойкость — способность металла (изделия) сопротивляться развитию трещин при механических и других воздействиях.

У

Углерод — химический элемент, атомный номер 6, атомная масса 12,0; существует в нескольких аллотропных формах: графит, алмаз, карбин; углерод входит в состав чугунов, сталей, твердых и специальных сплавов.

Углеродный потенциал — содержание углерода в образце чистого железа, находящегося в равновесии с науглероживающей средой в данных условиях.

Углеродный эквивалент C_3 — величина, характеризующая влияние на структуру и свойства серого чугуна важнейших элементов по отношению к влиянию углерода.

Углерозотирование, карбонитрирование — см. азотонауглероживание (нитроцементация, цианирование).

Ударная вязкость — удельная работа разрушения образца при ударном изгибе.

Удлинение — приращение длины образца под действием приложенной силы:

относительное при разрыве — отношение приращения (расчетной) длины образца после разрыва, вызванного действием приложенной силы, к его исходной (расчетной) длине.

Узел решетки — положение атома в вершинах элементарной ячейки и других ее точках, являющееся концом соответствующего трансляционного вектора.

Укрупнение — увеличение размеров элементов структуры металла (величины зерен, субзерен, фаз и т. д.).

Улучшение, термическое улучшение — двойная термическая обработка сталей и чугунов, заключающаяся в закалке на мартенсит с последующим высокотемпературным отпуском; обеспечивает повышение всего комплекса механических свойств сплавов.

Упрочнение — повышение сопротивляемости материала (изделия) пластической деформации или разрушению:

взрывом (ударно-волновое) — упрочнение металла (изделия) в результате воздействия на него ударных волн;

деформационное (наклеп) — упрочнение металла в результате холодной пластической деформации;

дисперсионное — упрочнение, вызываемое выделением дисперсных включений новой фазы из пересыщенного твердого раствора;

зернограничное — упрочнение, вызываемое измельчением структуры (повышением плотности границ зерен);

композиционное — упрочнение, вызываемое элементами структуры в виде дисперсных частиц, нитевидных кристаллов, волокон, пластин или других включений более прочной составляющей, армирующей основную составляющую (матрицу) структуры;

мартенситное — упрочнение, вызываемое мартенситным превращением;

поверхностное — повышение прочности поверхностного слоя металла (изделия);

твердорастворное — упрочнение, вызываемое искажением кристаллической решетки при образовании твердых растворов.

Упругость — свойство материала деформироваться с упругой деформацией.

Усталость — процесс постепенного накопления повреждений металла (изделия) под действием переменных напряжений, приводящий к изменению структуры, свойств и к разрушению:

вибрационная — усталость, возникающая при нагружении посредством вибрации;

контактная — усталость поверхностного слоя материала при переменных контактных напряжениях;

коррозионная — усталость, возникающая при одновременном воздействии коррозионных сред и переменных напряжений;

малоцикловая — усталость материала при упругопластическом деформировании под действием высоких напряжений и малой частоты циклов (3—5 Гц);

многоцикловая — усталость материала при упругом деформировании под действием высоких напряжений и большой частоты циклов (от 10 до 300 Гц);

термическая — разрушение материала, постепенно развивающееся под действием многократно повторяющихся температурных напряжений.

Усталостное повреждение — необратимое изменение структуры металла (изделия) под действием переменных напряжений.

Усталостные линии (бороздки) — линии (бороздки) на усталостном изломе, образующиеся в процессе роста усталостной трещины.

Ф

Фаза — однородная часть гетерогенной системы, имеющая собственный химический состав, строение, свойства и отделенная от других частей системы поверхностью раздела:

газовая — состояние вещества, в котором его частицы (атомы) не связаны или весьма слабо связаны силами взаимодействия и движутся свободно, заполняя весь предоставленный им объем;

дисперсная — фаза, существующая в сплаве в виде мелких частиц;

матричная — исходная фаза, из которой выделяется новая фаза;

метастабильная — относительно устойчивая фаза, которая может перейти в более устойчивую под действием внешнего воздействия или самопроизвольно;

промежуточная — твердая фаза, образующаяся в интервале концентраций между граничными твердыми растворами на основе исходных компонентов;

равновесная — фаза, которая при данных условиях обладает минимальной свободной энергией;

стабильная — фаза, устойчивая в данных условиях.

Фазовое превращение — превращение в сплавах, в результате которого образуются и растут зародыши новой фазы, устойчивой при данных условиях.

Ферромагнетизм — явление антипараллельной ориентации различных по величине магнитных моментов соседних атомов в твердом теле, приводящее в отдельных макроскопических областях твердого тела (доменах) к возникновению самопроизвольной намагниченности.

Феррит — твердый раствор внедрения углерода в α -железе с объемно-центрированной кубической решеткой:

высокотемпературный (дельта-феррит) — твердый раствор углерода и (или) легирующих элементов в δ -железе;

легируемый — твердый раствор углерода и одного или нескольких легирующих элементов в α -железе с объемно-центрированной кубической решеткой.

Ферритостабилизирующий элемент, альфа-стабилизатор — легирующий элемент, увеличивающий устойчивость феррита.

Ферромагнетизм — явление, заключающееся в том, что макроскопические области твердого тела (домены) обладают самопроизвольной (спонтанной) намагниченностью вследствие параллельной ориентации атомных магнитных моментов в отсутствие внешнего магнитного поля.

Ферросплавы — сплавы железа с другими элементами (ферросилиций, ферромарганец, феррохром, феррованадий, ферромolibден и др.), используемые при производстве легируемых сталей и чугунов.

Фигуры травления — фигуры, образующиеся при травлении на поверхности кристалла в местах выхода дислокаций.

Физика металлов — наука, изучающая физические явления, протекающие в металлах и сплавах, лежащие в основе современного технического использования металлов и открывающие перспективы их применения в технике.

Флокены — внутренние трещины, заполненные водородом в молекулярной форме под значительным давлением.

Флуктуации — беспорядочные отклонения физических величин от их средних значений, обусловленные тепловым движением частиц; в жидком сплаве непрерывно возникают и разрушаются некоторые группировки с упорядоченной структурой, соответствующей твердому телу; их называют также кластерами, дозародышами; флуктуационной моделью пользуются и при объяснении образования зародышей новых фаз в твердых растворах.

Фольга — тонкие листы или ленты (толщиной 2—100 мкм) разных металлов и металлических сплавов.

Фрактография — наука, занимающаяся изучением строения изломов методами визуального рассмотрения, оптической и электронной микроскопии.

Фреттинг-процесс — изнашивание в контакте в результате колебательного процесса при малой амплитуде.

Фронт усталостной трещины — граничная линия, разделяющая в процессе образования и роста усталостной трещины область трещины и монолитного металла.

Фуллерены — гигантские молекулы углерода, содержащие доатомов; в металлических сплавах они образуют металлофуллерены, приближающиеся по прочности к монокристаллам.

Х

Химико-термическая обработка — комплексная обработка, при которой в результате диффузии происходит изменение химического состава основного металла в поверхностном слое изделия или во всем его объеме, проводимая, как правило, в контролируемых средах при повышенных температурах.

Химическая связь:

вандерваальсовская (межмолекулярная) — связь, обусловленная взаимодействием молекул, представляющих собой постоянные или временные электрические диполи;

ионная — связь, обусловленная взаимодействием противоположно заряженных ионов;

ковалентная — связь в твердом теле, обусловленная электромагнитным притяжением (обобществлением) валентных электронов ближайших соседних атомов и характеризующаяся выраженной направленностью;

металлическая — связь, обусловленная взаимодействием электронов проводимости и ионов решетки металла;

промежуточная — взаимодействие, в котором сочетаются несколько видов первичных связей.

Химическое соединение — химически индивидуальное вещество, в котором атомы одного или различных элементов соединены между собой тем или иным видом химической связи.

Хладноломкость — способность материалов хрупко разрушаться при низких температурах.

Хладостойкость — способность материалов сохранять свои свойства при отрицательных температурах.

Хромель — сплав Ni с 9—10 % Cr; применяется в термопарах хромель-алюмель и хромель-копель.

Хромирование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) хромом.

Хрупкость — способность твердых тел разрушаться при механических воздействиях без макроскопически выраженной остаточной деформации:

водородная — понижение пластичности металлов в результате наводороживания;

горячая — хрупкость при механических воздействиях, проводимых при повышенных температурах.

Ц

Цвета каления — цвета металла, нагретого до температуры свечения.

Цвета побежалости при отпуске — окраска, приобретаемая поверхностью металла (изделия) при отпуске.

Цементация (науглероживание) — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) углеродом:

вакуумная — газовое науглероживание в аустенитном состоянии при давлении среды ниже атмосферного;

в жидком карбюризаторе — науглероживание в жидкой среде;

в кипящем слое — газовое науглероживание в среде, представляющей собой взвешенные в потоке газа твердые частицы;

восстановительная — науглероживание, выполняемое с целью восстановления содержания углерода в обезуглероженном при предшествующем тепловом воздействии поверхностном слое металла (изделия);

в пастах — науглероживание в среде в виде паст (обмазок), наносимых на обрабатываемые поверхности;

в твердом карбюризаторе (порошках) — науглероживание в порошкообразной среде;

в расплавах солей — науглероживание в жидких средах, представляющих собой расплавы солей;

в тлеющем разряде (ионное науглероживание) — науглероживание в сильноточном тлеющем разряде между катодом (изделием) и анодом в газовой среде при давлении ниже атмосферного;

капельным способом — газовое науглероживание в среде, образующейся из жидких углеводородов, подаваемых по каплям в рабочее пространство печи.

Цементит — химическое соединение железа с углеродом (карбид железа Fe_3C):

вторичный — цементит, выделившийся из пересыщенного углеродом аустенита;

зернистый (глобулярный) — цементит, зерна которого имеют примерно одинаковые размеры во всех измерениях;

легируемый — цементит, содержащий в составе легирующие элементы (хром, марганец и др.);

первичный — цементит, кристаллизующийся из расплава в белом эвтектическом чугуна;

третичный — цементит, выделяющийся из пересыщенного углеродом феррита;

эвтектический — цементит, кристаллизующийся из расплава в белых и половинчатых чугунах в составе эвтектики (ледебурита);

эвтектоидный (перлитный) — цементит, находящийся в сталях и чугунах в составе эвтектоида (перлита).

Цементитная сетка — выделения цементита по границам аустенитных зерен.

Цианирование — азотонауглероживание металла (изделия) в цианидсодержащих расплавах солей.

Цинкование — химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя металла (изделия) цинком.

Ч

Чернение — создание на поверхности металла черной оксидной пленки для повышения коррозионной стойкости или в декоративных целях.

Чугун — сплав железа с углеродом, содержит обычно более 2 % С, имеет в структуре эвтектику (с карбидами или графитом), обладает хорошими литейными свойствами:

алюминиевый — жаростойкий и износостойкий чугун с содержанием алюминия от 0,6 до 31 %; химический состав чугунов, %: 1,0—3,8 С; 0,5—6,0 Si; до 31 Al; 0,7—4,0 Mn; до 0,2 P; до 0,15 S;

антифрикционный — чугун для деталей, работающих в узлах трения; подразделяется на несколько видов: серые (АЧС), ковкие (АЧК) и высокопрочные (АЧВ);

аустенитный — высоколегируемый чугун с аустенитной структурой (основой);

белый — чугу́н с матово-белым цветом поверхности излома, содержащий углерод в виде карбидов; по структуре подразделяется на эвтектический, доэвтектический и заэвтектический;

ванадиевый — белый чугу́н, легированный 3,5—12 % ванадия, структура которого имеет композиционный характер и соответствует принципу Шарпи;

высокопрочный с вермикулярным графитом — чугу́н, имеющий в структуре графитные включения волокнистой (червеобразной) формы; обладает повышенными прочностными свойствами по сравнению с серым чугуном;

высокопрочный с шаровидным графитом — чугу́н, имеющий в структуре шаровидные графитные включения; обладает повышенными прочностными свойствами, пластичностью и ударной вязкостью;

доменный — чугу́н, выплавленный в доменных печах: первичный продукт металлургического производства, используемый для передела на сталь (передельный чугу́н) и как компонент шихты в чугунолитейном производстве (литейный чугу́н);

жаростойкий (окалиностойкий) — чугу́н для деталей, эксплуатируемых до 1100 °С;

зеркальный — чугу́н, содержащий 10—25 % Mn, применяется в производстве легированной стали;

износостойкий — чугу́н, обладающий высоким сопротивлением изнашиванию; обычно это легированный белый или половинчатый чугу́н;

ковкий — чугу́н, получаемый в результате отжига белого доэвтектического чугуна и содержащий в структуре хлопьевидный графит; обладает повышенной прочностью и пластичностью;

белосердечный — перлитный ковкий чугу́н со светлой поверхностью излома;

черносердечный — ковкий чугу́н, имеющий ферритную основу с распределенным в ней хлопьевидным графитом разной степени дисперсности и черный бархатистый излом при разрушении;

легированный — чугу́н, содержащий легирующие элементы;

литейный — чушковый чугу́н, выплавляемый в доменных печах и предназначенный для переплавки при производстве чугунных отливок;

отбеленный — серый или высокопрочный чугу́н со структурой белого чугуна в периферийных частях отливки;

передельный — чушковый чугу́н, выплавляемый в доменных печах и предназначенный для передела на сталь, а также для использования в литейном производстве;

перлитный — серый и высокопрочный чугу́н, основной структурной составляющей которого является перлит;

половинчатый — чугу́н, в структуре которого наряду с графитной эвтектикой присутствует эвтектика с карбидами;

серый — чугу́н, в котором углерод в значительной степени или полностью находится в свободном состоянии в форме пластинчатого графита;

синтетический — чугу́н, выплавленный из стальных отходов или продуктов прямого восстановления железных руд (окатышей, железорудного концентрата);

ферритный — чугу́н с ферритной структурой основы (твердость 100—180 НВ).

Ш

Шаровидная частица, сфероид — частица, обладающая примерно одинаковыми размерами во всех измерениях и в идеальном случае имеющая форму шара.

Шарпи принцип — правило обеспечения высоких антифрикционных свойств сплава, согласно которому на поверхности трения структура должна состоять из сравнительно мягкой, пластичной и вязкой основы и твердых изолированных друг от друга включений.

Шлиф — образец металла, имеющий шлифованную гладкую поверхность:

макрошлиф — шлиф, специально подготовленный для макроскопического исследования;

микрошлиф — образец металла, имеющий шлифованную и полированную гладкую поверхность, специально подготовленную для микроскопического исследования.

Шлифование — обработка поверхности заготовки (изделия) при помощи абразивного инструмента (шлифовального круга, шлифовальной бумаги, шкурки и др.); является основной операцией приготовления металлографических шлифов.

Э

Эвтектика — механическая смесь двух или более фаз, одновременно образующихся из расплава при его эвтектической кристаллизации.

Эвтектическая температура — температура эвтектического равновесия.

Эвтектическое превращение — превращение, в результате которого происходит образование эвтектики; обычно протекает при постоянной температуре и неизменных составах участвующих фаз, одной из которых является жидкость.

Эвтектоид — механическая смесь двух или нескольких фаз, образующихся одновременно в результате распада твердого раствора.

Эвтектоидная температура — температура эвтектоидного равновесия.

Эвтектоидное превращение — превращение, в результате которого происходит образование эвтектоида; обычно протекает при постоянной температуре и неизменных составах участвующих фаз, находящихся в твердом состоянии.

Экзотермическая атмосфера — контролируемая атмосфера, получаемая путем неполного сжигания углеводородных газов без дополнительного подвода тепла.

Электрон проводимости — электрон в твердом теле, энергия которого находится в зоне проводимости.

Элемент внедрения — растворенный в твердом растворе компонент, который располагается в междоузлиях кристаллической решетки растворителя.

Элементарная ячейка — наименьший объем кристалла, который дает полное представление о его кристаллическом строении.

Эндотермическая атмосфера — контролируемая атмосфера, получаемая путем каталитического разложения углеводородных газов в подогреваемых ретортах.

Энергия — общая количественная мера, связывающая воедино все формы движения материи:

активации — максимальная энергия, необходимая для перехода физико-химической системы из одного состояния в другое путем преодоления разделяющего их потенциального барьера;

внутренняя — энергия системы, зависящая от ее внутреннего состояния (энергия хаотического теплового движения всех микрочастиц, энергия взаимодействия этих частиц, внутриядерная энергия и др.);

поверхностная — избыток энергии поверхностного слоя на границе раздела фаз по сравнению с соответствующей объемной энергией самих фаз;

свободная — часть полной энергии, которая может обратимо менять свою величину при изменении температуры, полиморфных превращениях и изменениях состояния системы.

Энтальпия, теплосодержание — функция состояния термодинамической системы, равная сумме внутренней энергии системы и произведения давления на объем системы.

Энтропия — функция состояния термодинамической системы, характеризующая направление протекания процесса теплообмена между системой и внешней средой, а также направление протекания самопроизвольных процессов в замкнутой системе.

Эффект запоминания формы — способность материала вспоминать заданную в определенных условиях форму после последующего механического (изменяющего его форму) и термического воздействий.

Я

Явление структурной наследственности — совокупность закономерностей, объясняющих последовательность и механизм закладки, передачи и проявления структурной информации в системе «шихта — расплавленный металл — заготовка — деталь».

Наши книги можно приобрести:

Учебным заведениям и библиотекам:
в отделе по работе с вузами
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: vuz@urait.ru

Частным лицам:
список магазинов смотрите на сайте urait.ru
в разделе «Частным лицам»

Магазинам и корпоративным клиентам:
в отделе продаж
тел.: (495) 744-00-12, e-mail: sales@urait.ru

Отзывы об издании присылайте в редакцию
e-mail: gred@urait.ru

**Новые издания и дополнительные материалы доступны
на образовательной платформе «Юрайт» urait.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Учебное издание

Плошкин Всеволод Викторович

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Учебник для вузов

Формат 70×100¹/₁₆.
Гарнитура «Charter». Печать цифровая.
Усл. печ. л. 31,66.

ООО «Издательство Юрайт»
111123, г. Москва, ул. Плеханова, д. 4а.
Тел.: (495) 744-00-12. E-mail: izdat@urait.ru, www.urait.ru



Юрайт.Библиотека

Установите мобильное приложение и читайте книги даже без доступа к интернету



Медиаучебники

Интерактивные курсы с использованием видео и аудиоматериалов позволяют успешнее освоить дисциплину



Умное тестирование

Проверьте, усвоен ли материал учебника с помощью онлайн-тестирования. Система сама предложит материалы для повторения



Шаблоны рабочих программ

Генерируйте и скачивайте рабочие программы к самым популярным и востребованным учебникам

Получите доступ к подписке вашего учебного заведения

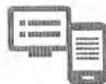
1 Зарегистрируйтесь на urait.ru



2 Подтвердите свою принадлежность к организации



3 Читайте книги из коллекции организации с компьютера и мобильного телефона!



Подробнее на <https://urait.ru/info/how-to-read>

Нет подписки? Отправьте заявку!

Авторизуйтесь на urait.ru и перейдите в каталог

Выберите нужную книгу и нажмите «В заявку»

В разделе «Заявка» укажите количество книг или электронных доступов

Выберите ваше учебное заведение и отправьте заявку в библиотеку

