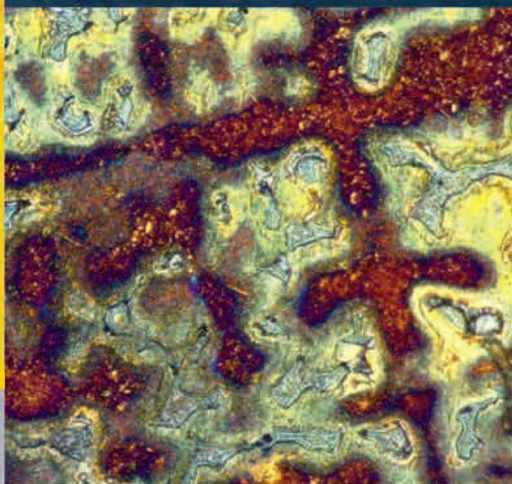


**А. Г. Анисович**  
**А. А. Андрушевич**

# **СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ МАШИНОСТРОЕНИЯ**



УДК 669.1/8:539.24

**Анисович, А. Г.** Структуры металлов и сплавов в технологических процессах машиностроения / А. Г. Анисович, А. А. Андрушевич. – Минск : Беларуская навука, 2018. – 134 с. – ISBN 978-985-08-2363-2.

Представлены структуры металлических материалов после различных видов обработки – литья, обработки давлением, термической обработки, поверхностного упрочнения, структуры компактных, порошковых и гранулированных материалов, а также наплавленных и гальванических покрытий. Дано принципиальное описание процессов обработки металлов применительно к технологическим процессам, применяемым на производстве. Издание может быть использовано в качестве учебного пособия для студентов технических специальностей высших учебных заведений Республики Беларусь при прохождении теоретического курса и проведении лабораторных занятий по материаловедению и металлографии.

Данное издание предназначено для студентов и магистрантов, изучающих технологические процессы изготовления деталей различными методами металлообработки, а также инженерно-технических специалистов, совершенствующихся в данной области.

Табл. 5. Ил. 152. Библиогр.: 28 назв.

**Р е ц е н з е н т ы:**

доктор технических наук, профессор С. М. Ушеренко;  
доктор технических наук, профессор М. Л. Хейфец

**ISBN 978-985-08-2363-2**

© Анисович А. Г., Андрушевич А. А., 2018

© Оформление. РУП «Издательский дом  
«Беларуская навука», 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                  |           |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Введение.....</b>                                                             | <b>3</b>  |
| <b>1. Способы управления структурой и свойствами металлов и сплавов .....</b>    | <b>5</b>  |
| 1.1. Роль микроструктурных исследований в анализе технологических процессов..... | 5         |
| 1.2. Основные методы воздействия на структуру металлов и сплавов.....            | 9         |
| <b>2. Литье черных и цветных металлов .....</b>                                  | <b>13</b> |
| 2.1. Общие сведения об основных способах литья.....                              | 13        |
| 2.2. Чугуны .....                                                                | 19        |
| 2.3. Цветные металлы и сплавы.....                                               | 24        |
| <b>3. Обработка давлением .....</b>                                              | <b>40</b> |
| 3.1. Общие сведения об обработке металлов давлением .....                        | 40        |
| 3.2. Холодная обработка давлением .....                                          | 42        |
| 3.3. Влияние нагрева.....                                                        | 53        |
| 3.4. Горячая обработка давлением .....                                           | 58        |
| <b>4. Термическая обработка .....</b>                                            | <b>66</b> |
| 4.1. Общие сведения о термической обработке.....                                 | 66        |
| 4.2. Углеродистые и легированные стали.....                                      | 67        |
| 4.3. Сплавы цветных металлов .....                                               | 82        |

|                                                              |            |
|--------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5. Порошковая металлургия.....</b>                        | <b>86</b>  |
| 5.1. Общие сведения о порошковой металлургии.....            | 86         |
| 5.2. Порошковые материалы.....                               | 91         |
| 5.3. Гранулированные материалы .....                         | 100        |
| <b>6. Поверхностное упрочнение .....</b>                     | <b>108</b> |
| 6.1. Общие сведения о методах поверхностного упрочнения..... | 108        |
| 6.2. Наплавка .....                                          | 109        |
| 6.3. Напыление .....                                         | 116        |
| 6.4. Термодиффузионные и гальванические покрытия .....       | 118        |
| <b>Литература.....</b>                                       | <b>131</b> |

## **СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ СТРУКТУРОЙ И СВОЙСТВАМИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

### **1.1. Роль микроструктурных исследований в анализе технологических процессов**

Современное машиностроение немислимо без применения разнообразных металлических материалов. Номенклатура деталей, изготавливаемых из сплавов черных и цветных металлов, весьма значительна, причем большинство приходится на долю автотракторного, сельскохозяйственного и тяжелого машиностроения. Условия работы деталей машин зачастую связаны с высокими механическими и тепловыми нагрузками, наличием абразивных или химически агрессивных сред, что обуславливает необходимость применения особых конструкционных материалов, а также прогрессивных методов поверхностного упрочнения.

Для обеспечения необходимого уровня машиностроения и других отраслей промышленности требуется как создание новых, так и улучшение технологии производства традиционных металлических материалов, снижение брака и количества отходов.

Качество металлических изделий определяется известной триадой «состав–структура–свойства». Наиболее важным элементом здесь является структура, возможности трансформации которой не ограничиваются изменением химического состава. Структура материала формируется в процессе его обработки. В связи с этим необходимо наличие глубоких знаний в области металлографии, широких представлений об общих закономерностях изменения физико-механических свойств важнейших металлов и их сплавов в зависимости от состава и структуры, а также владение современными методами анализа металлов.

Информация о современных методах исследования и их широкое применение позволяют осуществлять не только анализ структуры и свойств промышленных металлов и сплавов, но и разработку и анализ деталей, получаемых в результате сложных технологических процессов.

Наиболее востребованным и распространенным методом исследования строения промышленных металлов и сплавов является микроскопический анализ структуры. Способы его реализации – оптическая и растровая микроскопия. *Микроструктурный анализ* (микроанализ) заключается в исследовании структуры материалов при больших увеличениях с помощью оптических и электронных микроскопов. Основным и наиболее распространенным методом такого анализа является именно оптическая микроскопия, в основе которой лежит анализ видимого света, отраженного от поверхности образца. Без современного оборудования, обеспечивающего качественную и количественную оценку микроструктуры, невозможно представить себе современное материаловедение. Востребованность микроструктурного анализа в равной степени подтверждается как при решении исследовательских задач, так и на производстве при контроле технологических операций изготовления изделий.

В задачи микроструктурного анализа входит исследование микроструктуры как при разработке новых материалов, так и при создании новых технологических процессов обработки, а также для контроля качества металлической продукции. В качестве примеров можно привести следующие.

Структура литых материалов определяется, в первую очередь, условиями теплоотвода при кристаллизации. На рис. 1.1 показаны структуры образцов алюминиевого сплава АК12, взятые из различных частей отливки. Разница в структурах краевой и центральной зоны показывает различия в условиях теплоотвода. Край отливки охлаждался быстрее; центр – медленнее, поэтому в нем успела сформироваться крупнокристаллическая структура.

Модифицирование является одним из основных способов управления структурой литых материалов. Результаты процесса

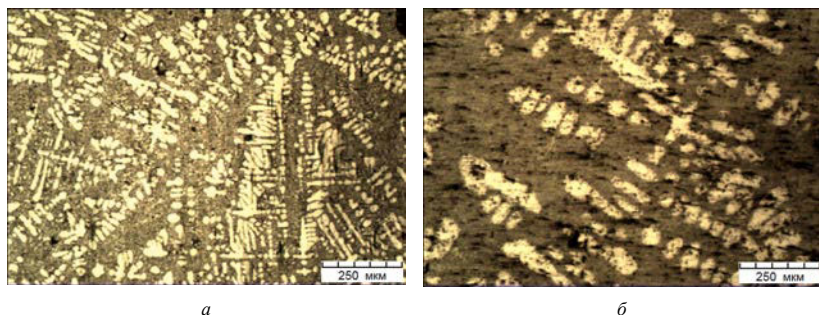


Рис. 1.1. Структура литого сплава АК12: край отливки (а), центр отливки (б)

модифицирования определяются в том числе характером вводимого модификатора, временем его введения, скоростью охлаждения отливки при кристаллизации. Влияние состава модификатора на характер получаемой структуры показано на рис. 1.2.

Пережог относится к достаточно распространенным ошибкам термической обработки и связан с превышением температуры нагрева. При закалке такого сплава в нем образуются трещины (рис. 1.3).

Пережог легко идентифицируется металлографически по оплавленным границам зерен, а также по резкому снижению механических свойств. Пережог возможен, прежде всего, в сплавах

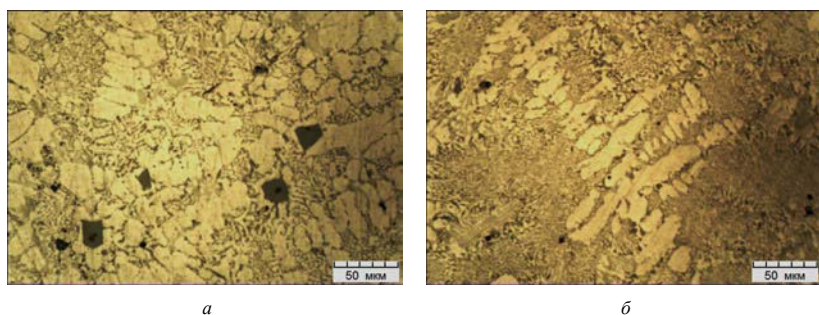


Рис. 1.2. Влияние состава модификатора на структуру силумина: а – модифицирование  $\text{NaPO}_3$ ; б – модифицирование  $\text{NaF}$



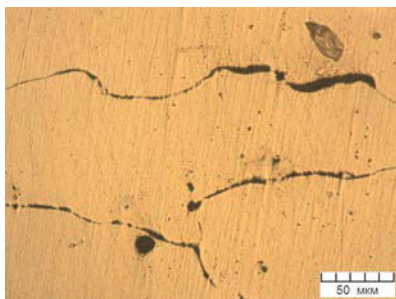


Рис. 1.3. Закалочные трещины в образце сплава Д16

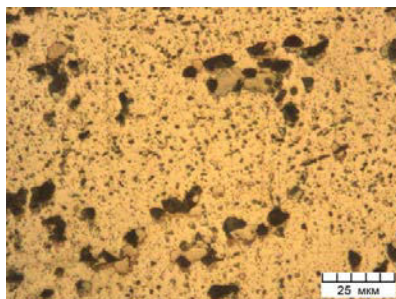


Рис. 1.4. Структура сплава Д16 в состоянии поставки

с узкой зоной гомогенности. К таким относится дюралюмин Д16, принадлежащий к системе Al–Cu–Mg. В состоянии поставки сплав Д16 имеет типичную структуру горячекатаного листа. В структуре сплава присутствуют включения упрочняющих и примесных фаз, распределенные как по телу зерна, так и сконцентрированные в границах зерен (рис. 1.4). Это интерметаллидные соединения типа  $\text{CuAl}_2$  ( $\theta$ -фаза),  $\text{Mg}_2\text{Si}$ ,  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  (S-фаза), включения железистых фаз ( $\text{FeAl}_3$  и тройных фаз состава Fe–Si–Al, Fe–Cu–Al, Fe–Mn–Al), которые характерны для сплава Д16 после изготовления полуфабриката. Матрица сплава – твердый раствор легирующих элементов в алюминии.

Термической обработкой сплава является закалка и старение (естественное или искусственное). Закалке предшествует гомогенизация. После гомогенизации с превышением температуры структура сплава представляет собой типичную структуру пережога. При этом оплавление происходит по границам зерен, при этом формируется эвтектика (рис. 1.5, а). Крупные включения эвтектики фиксируются также в теле зерна (рис. 1.5, б).

В зависимости от назначения деталей металлы и сплавы, из которых они изготавливаются, должны обладать определенным комплексом свойств. Все физико-механические, технологические и эксплуатационные свойства металлов и их сплавов определяются химическим составом сплавов и внутренней



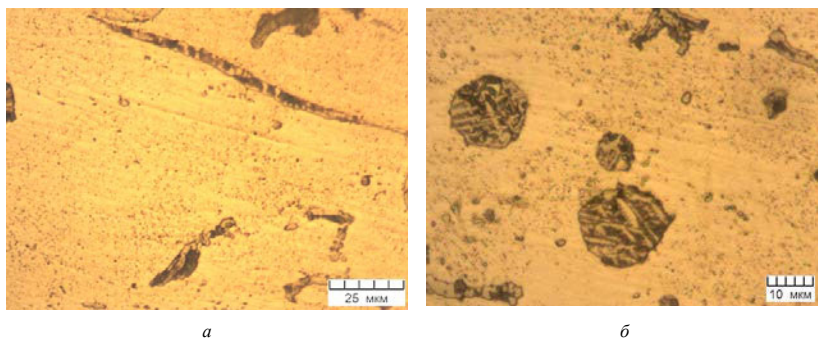


Рис. 1.5. Структура сплава Д16 после пережога: эвтектика по границам зерен (а) и в теле зерна (б)

структурой. Структуру сплавов можно изменить различными внешними воздействиями (давлением, температурой, средой и т. д.). Все методы воздействия на структуру и свойства металлических деталей можно подразделить на три основных вида: механические, тепловые, химические (изменение состава), а также их сочетания – термомеханическая, химико-термическая обработки и т. п. Управляя структурой металла под действием одного из этих факторов или их совокупности, можно обеспечить требуемую надежность и долговечность металлических деталей машин и конструкций. Структуры металлов и сплавов, формирующиеся при внешних воздействиях, легко различаются металлографически.

## 1.2. Основные методы воздействия на структуру металлов и сплавов

При *механическом воздействии* внешнее напряжение вызывает деформацию металлического материала, т. е. изменение размеров и форм тела. Деформация может быть упругой и пластической. При упругой деформации под действием внешних сил изменяются расстояния между атомами в кристаллической решетке. После снятия нагрузки эта деформация исчезает. При микроструктурном исследовании результат воздействия

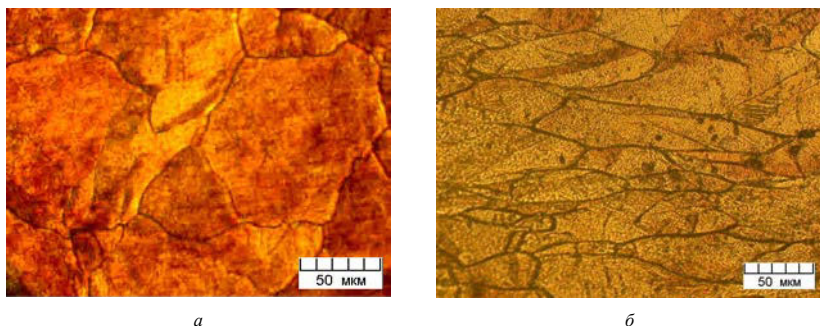


Рис. 1.6. Микроструктура меди: литье (а), литье и деформация (б)

механических сил заметен только в случае пластической деформации. На рис. 1.6, а показана микроструктура литой меди, на рис. 1.6, б – та же медь после горячей пластической деформации. Признаком того, что металл пластически деформирован, является вытянутая форма зерен.

*Методы термического воздействия* на металлическое изделие в процессе производства подразделяются на две большие группы:

1. Воздействие непосредственно на металл, из которого производят изделие, в жидком состоянии или в процессе затвердевания; это, как правило, литейные технологии;

2. Воздействие на металлическую деталь определенной формы и размеров в твердом состоянии. Сюда относят методы термической обработки, приводящие к изменениям структуры в металлических изделиях, сформированных в результате осуществления различных технологических процессов.

На рис. 1.7 показан результат влияния термического воздействия на структуру. В исходном состоянии сталь 20 имеет феррито-перлитную структуру (рис. 1.7, а), после закалки в стали сформировался мартенсит (рис. 1.7, б).

Влияние *методов химического воздействия*, в частности, изменение состава стали по углероду легко обнаруживается металлографически и позволяет определить количество углерода

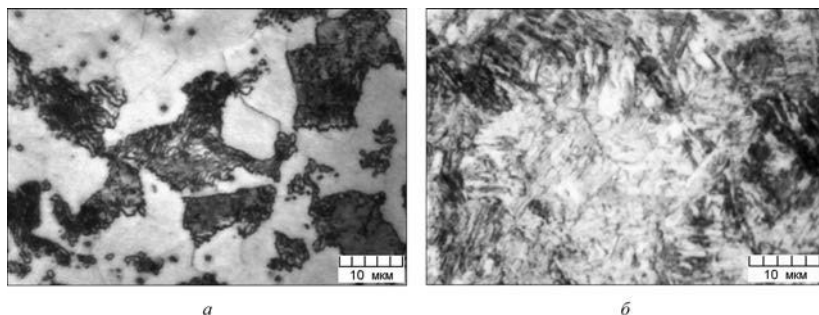


Рис. 1.7. Структура углеродистой стали 20: состояние поставки (нормализация) (а), после закалки (б)

по виду микроструктуры. На рис. 1.8 показаны микроструктуры стали 10 и стали 60 в состоянии нормализации. С повышением содержания углерода в структуре повышается количество перлита; при этом существенно изменяется комплекс физико-механических свойств.

Процессы насыщения поверхностных слоев металлоизделий для изменения химического состава и структуры поверхностных зон относят к *химико-термическим методам* обработки (азотирование, цементация, диффузионная металлизация, гальваническое осаждение и др.). Для повышения твердости и износостойкости клапанов, шестерен, гильз из легированных

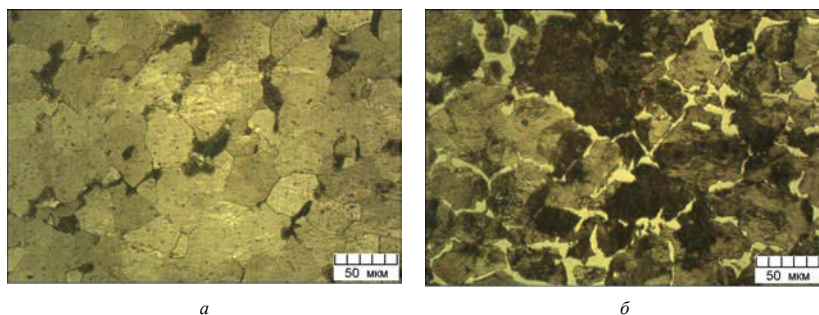


Рис. 1.8. Структура углеродистых конструкционных сталей: сталь 10 (а), сталь 60 (б)

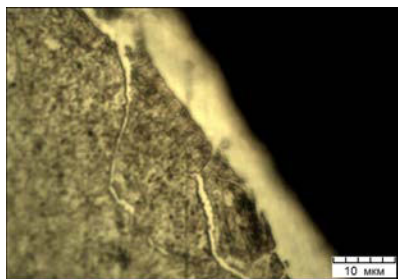


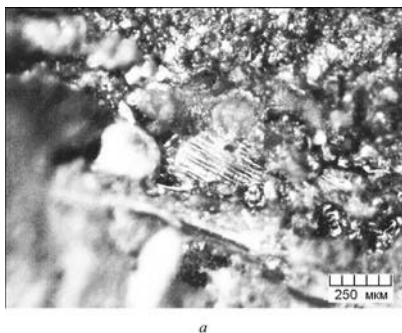
Рис. 1.9. Азотированный слой на стали 40ХГНМ

сталей применяют газовое азотирование. Микроструктура стали 40ХГНМ после азотирования представлена на рис. 1.9. Поверхностный (белый) слой представляет собой соединение  $\text{Fe}_4\text{N}$ .

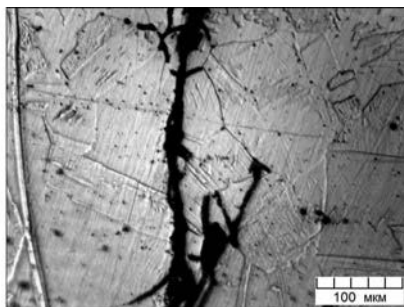
К влиянию внешней среды (в атмосфере, воде, других средах) относится также разрушение металлической детали под воздействием *коррозии*.

На поверхности она проявляется в виде окислов, для железных изделий – ржавчины (рис. 1.10, *а*). Изменения в структуре металла можно наблюдать по границам зерен (рис. 1.10, *б*).

Таким образом, способы обработки металлических изделий формируют их микроструктуру. Металлографическим анализом можно определить, каким образом получена данная деталь, какой предварительной или окончательной обработке подвергалась. Во многих случаях микроструктурный анализ проводят одновременно с макроструктурным анализом. Микроанализ выявляет подробности изучаемой структуры, а макроанализ характеризует строение сплава на больших участках.



*а*



*б*

Рис. 1.10. Коррозия: ржавчина на поверхности стального изделия (*а*), межкристаллитная коррозия в аустенитной стали (*б*)

## ЛИТЬЕ ЧЕРНЫХ И ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

### 2.1. Общие сведения об основных способах литья

*Литейное производство* – отрасль машиностроения, занимающаяся изготовлением фасонных литых заготовок с последующей механической обработкой или готовых деталей. Оно является основной заготовительной базой машиностроения. В современных машинах масса отливок достигает 50–60 % от их общей массы и может быть от нескольких граммов до 300 тонн. Стоимость литой заготовки или детали, как правило, минимальна.

*Литье* – технологический процесс получения металлических изделий (отливок) путем заливки расплавленного металла в полость специально приготовленной литейной формы, повторяющей конфигурацию детали. В процессе кристаллизации и последующего охлаждения литейного сплава формируются механические, физические и эксплуатационные свойства отливок.

Основные операции технологического процесса литья:

1. Формовка или изготовление литейной формы;
2. Плавка металла и заливка формы;
3. Выбивка, очистка и обрубка литой заготовки.

Современное литейное производство позволяет получать отливки самыми разнообразными способами, отличающимися материалом литейной формы, методом заливки жидкого металла, условиями кристаллизации и охлаждения затвердевшего металла, степенью механизации и автоматизации процесса, определяющими структуру и свойства литого материала. Выделяют более пятидесяти принципиально отличающихся способов литья, широко применяемых в производстве.