

*Fedirko Pavlo, Krol Volodymyr, Hutsol Taras, Kiurchev Serhii,  
Mykhailova Liudmyla, Rud Anatolii, Kaiafa Oleksandr,  
Pantsyr Yuriy, Harasymchuk Ihor, Marchuk Nataliia, Liaska Oksana,  
Prokopova Olha, Komarnitskyi Serhii, Semenyshena Nataliia, Hrysiuk Oleh,  
Mudryk Krzysztof, Dziedzic Krzysztof, Jewiarz Marcin,  
Wróbel Marek, Knapczyk Adrian, Dziedzic Barbara*



**MATERIALS**  
**AND**  
**SCIENCE**  
**METALWORKING**

Kraków, Kamianets-Podilskyi 2017

# MATERIALS SCIENCE AND METALWORKING

## MONOGRAPH

### Reviewers:

*Sydorchuk Oleksadr* – doctor of engineering sciences, professor

*Voloshina Angela* - doctor of engineering sciences, professor

*Głowacki Szymon* – doctor of agricultural sciences

*Pedryc Norbert* – doctor of agricultura sciences

*Сидорчук Олександр* – доктор технічних наук, професор

*Волошина Анжела* - доктор технічних наук, професор

*Гловацький Шимон* - доктор сільськогосподарських наук

*Педрик Норберт* - доктор сільськогосподарських наук

**Fedirko Pavlo**  
**Krol Volodymyr**  
**Hutsol Taras**  
**Kiurchev Serhii**  
**Mykhailova Liudmyla**  
**Rud Anatolii**  
**Kaiafa Oleksandr**  
**Pantsyr Yurii**  
**Harasymchuk Ihor**  
**Marchuk Nataliia**  
**Liaska Oksana**  
**Prokopova Olha**  
**Komarnitskyi Serhii**  
**Semenyshena Nataliia**  
**Hrysiuk Oleh**  
**Mudryk Krzysztof**  
**Dziedzic Krzysztof**  
**Jewiarz Marcin**  
**Wrobel Marek**  
**Knapczyk Adrian**  
**Dziedzic Barbara**

The issue provides the basic information on Materials Technology and Metalwork. Intended for researchers and specialists in this area, for students who receive training in Education (01), Professional Education (015.18), Technology of Production and Agricultural Products Processing, Agrarian Sciences and Food Supplies (20), Agrarian Engineering (208)), Transport (27), Automobile Transport (274), Transport Technologies (in Automobile Transport) (275.03).

Publishing sheets: 21,3

Pulisher: Traicon

ISBN 978-83-65180-18-6

Kraków, Kamianets-Podilskyi, 2017

©Copyright by **Traicon S.C.**

# МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО І СЛЮСАРНА СПРАВА МОНОГРАФІЯ

Авторський колектив :	
<i>Федірко Павло</i>	<i>Розділ 1, Тлумачний термінологічний словник</i>
<i>Кріль Володимир</i>	<i>Розділ 2, Передмова</i>
<i>Гуцол Тарас</i>	<i>Розділ 3, Тлумачний термінологічний словник</i>
<i>Кюрчев Сергій</i>	<i>Розділ 4</i>
<i>Михайлова Людмила</i>	<i>Розділ 5, п.1</i>
<i>Рудь Анатолій</i>	<i>Розділ 5, п.2</i>
<i>Каяфа Олександр</i>	<i>Розділ 6, п.2-3</i>
<i>Панцир Юрій</i>	<i>Розділ 6, п.4-5</i>
<i>Гарасимчук Ігор</i>	<i>Розділ 8, п.1-2</i>
<i>Марчук Наталія</i>	<i>Розділ 8, п. 3</i>
<i>Ляска Оксана</i>	<i>Розділ 9, п.1-2</i>
<i>Проконова Ольга</i>	<i>Розділ 9, п.3</i>
<i>Комарніцький Сергій</i>	<i>Розділ 10, п.2-3</i>
<i>Семенішена Наталія</i>	<i>Предметно-тематичний покажчик, Тлумачний термінологічний словник</i>
<i>Грисяк Олег</i>	<i>Розділ 12, п.1, Розділ 13, п.1</i>
<i>Мудрик Киши́тоф</i>	<i>Розділ 5, п.3-5, розділ 7</i>
<i>Дзідзіц Киши́тоф</i>	<i>Розділ 6, п.1,6, розділ 11, п.1-2</i>
<i>Евяж Марцін</i>	<i>Розділ 12, п. 2-3</i>
<i>Врубель Марек</i>	<i>Розділ 10, п.1,п.4-5, Розділ 11, п.2-3</i>
<i>Кнапчик Адріан</i>	<i>Розділ 13, п.2-3</i>
<i>Дзідзіц Барбара</i>	<i>Розділ 14, п.2-3</i>

У виданні наведено основні відомості про будову, фізико-механічні і технологічні властивості матеріалів, викладено питання термічної обробки металів і сплавів, правила виконання основних видів слюсарної обробки металів, види інструменту для кожної слюсарної операції, прийоми їх виконання і методи організації робочого місця. Окрім того, наведено основи стандартизації, взаємозамінності і технічних вимірювань. Міститься інформація про полімерні, композиційні і неметалеві матеріали. Видання призначене науковцям та спеціалістам, які займаються дослідженнями в матеріалознавстві та слюсарній справі, може бути корисним для студентів, що навчаються за фахом 01 Освіта (015.18 Професійна освіта (Технологія виробництва і переробки продуктів сільського господарства), 20 Аграрні науки та продовольство (208 Агроінженерія), 27 Транспорт (274 Автомобільний транспорт, 275.03 Транспортні технології (на автомобільному транспорті)).

## ЗМІСТ

SUMMARY .....	5
ПЕРЕДМОВА .....	6
<b>ЧАСТИНА I</b>	
<b>МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО .....</b>	<b>7</b>
Розділ 1. БУДОВА, ВЛАСТИВОСТІ І СПОСОБИ ВИПРОБУВАННЯ МЕТАЛІВ .....	8
1.1. Поняття про метали і металеві сплави .....	8
1.2. Деформація та основні властивості металів і сплавів .....	12
Розділ 2. ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ .....	31
2.1. Основні відомості з теорії сплавів .....	31
2.2. Компоненти і фази в залізовуглецевих сплавах .....	33
2.3. Діаграма стану "залізо - вуглець" .....	35
2.4. Вплив вуглецю і домішок на структуру та властивості сталі .....	37
2.8. Основні вимоги до вуглецевих сталей .....	61
Розділ 3. КОЛЬОРОВІ МЕТАЛИ ТА ЇХ СПЛАВИ .....	65
3.1. Мідь та основні сплави на її основі .....	65
3.2. Алюміній та основні алюмінієві сплави .....	65
3.3. Сплави на основі магнію .....	66
3.4. Сплави на основі титану .....	66
3.5. Антифрикційні сплави і матеріали .....	67
3.6. Тугоплавкі метали і сплави .....	68
Розділ 4. СПЕЧЕНІ ПОРОШКОВІ МАТЕРІАЛИ .....	70
4.1. Конструкційні порошкові матеріали .....	70
4.2. Інструментальні порошкові матеріали .....	71
4.3. Електротехнічні порошкові матеріали .....	72
Розділ 5. НЕМЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ .....	73
5.1. Загальні відомості, класифікація і властивості полімерних матеріалів .....	73
5.2. Пластичні маси. Пластмаси .....	76
5.3. Композитні матеріали .....	85
5.4. Гумові матеріали .....	88
5.5. Клеї і герметики .....	90
Розділ 6. ОСНОВИ НАНОТЕХНОЛОГІЙ .....	95
6.1. Основні визначення .....	96
6.2. Класифікація наноматеріалів .....	99
6.3. Кластери .....	101
6.4. Фулерени і фулерити .....	103
6.5. Вуглецеві нанотрубки .....	104
6.6. Застосування нанотехнологій .....	106
Розділ 7. НАНОКРИСТАЛІЧНІ І КОНСОЛІДОВАНІ МАТЕРІАЛИ .....	109
7.1. Основні положення .....	109
7.2. Консолідовані матеріали. Класифікація .....	111
7.3. Інтенсивна пластична деформація. (Диспергування) .....	112
7.4. Основи отримання наноматеріалів компактуванням і спіканням порошків .....	114
7.5. Нанокристалічні структури на основі аморфних і швидкозагартованих сплавів .....	114
7.6. Формування наноструктури дисперсними виділеннями .....	1155
7.7. Наноконполіти .....	115
Розділ 8. ТЕРМІЧНА ТА ХІМІКО-ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СПЛАВІВ .....	117
8.1. Основи теорії термічної обробки сталі .....	117
8.2. Технологія термічної обробки сталі .....	123
8.3. Основи хіміко-термічної обробки сталі .....	133

<b>ЧАСТИНА II</b>	
<b>СЛЮСАРНА СПРАВА .....</b>	<b>146</b>
Розділ 9. ВСТУП ДО ПРОФЕСІЇ.....	146
9. 1. Роль і місце слюсарних робіт в промисловому виробництві .....	146
9. 2. Види слюсарних робіт. Робоче місце слюсаря .....	147
9.3. Техніка безпеки при виконанні слюсарних робіт.....	152
Розділ 10. СТАНДАРТИЗАЦІЯ, ВЗАЄМОЗАМІННІСТЬ І ТЕХНІЧНІ ВИМІРЮВАННЯ .....	161
10.1. Стандартизація і основи взаємозамінності .....	161
10.2. Єдина система допусків і посадок (ЄСДП).....	168
10.3. Шорсткість поверхні .....	174
10.4. Допуски форми і розміщення.....	176
10.5. Технічні вимірювання .....	182
Розділ 11. ПІДГОТОВЧІ ОПЕРАЦІЇ СЛЮСАРНОЇ ОБРОБКИ .....	194
11. 1. Розмітка .....	194
11. 2. Рубання металу .....	197
11. 3. Вирівнювання, рихтування і гнуття металу.....	201
11. 4. Різання металу.....	205
Розділ 12. РОЗМІРНА СЛЮСАРНА ОБРОБКА .....	210
12. 1. Обпилювання металу .....	210
12. 2. Обробка отворів .....	213
12.3. Обробка різьбових поверхонь .....	222
Розділ 13. ПРИПАСОВУВАЛЬНІ ОПЕРАЦІЇ СЛЮСАРНОЇ ОБРОБКИ.....	229
13. 1. Розпилювання і припасовування деталей.....	229
13. 2. Шабрування.....	231
13. 3. Притирання і доведення.....	237
Розділ 14. СКЛАДАННЯ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ.....	244
14. 1. Паяння металів .....	244
14. 2. Лудіння.....	252
14. 3. Клепання .....	254
СПИСОК .....	266
РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	266
ПРЕДМЕТНО-ТЕМАТИЧНИЙ ПОКАЖЧИК .....	268
Тлумачний термінологічний словник .....	
INTERPRETATIVE TERMINOLOGY DICTIONARY .....	276

## SUMMARY

A monograph consists of two interrelated parts. The first of them gives an idea of modern structural materials and their main properties, and the second one contains information necessary for the practical manufacture of parts and assembly operations.

Part One "Materials Science", consists of 8 sections:

Section 1. "Structure, properties and methods of testing of metals" forms the basic concepts of metals and metal alloys, species and strains basic technological properties of metals and alloys, their mechanical testing, physical and chemical methods of analysis.

Chapter 2. "Iron-Carbon alloys", containing basic information on the theory of alloys, the data on the components and phases in iron alloys, the most common in modern engineering, explains diagram class "iron - carbon" effect of carbon and impurities on the structure and properties of steel, describes classification, labeling and use of carbon and alloy steels and castings, the basic requirements for carbon steels.

Chapter 3. "Non-ferrous metals and their alloys," says alloys of copper, aluminium, magnesium, titanium alloys and antifriction materials, refractory metals and alloys.

Section 4. "Sucked Powder Materials", devoted to structural, instrumental and electrotechnical powder materials.

Chapter 5. "Nonmetallic construction materials" containing general information on the classification and properties of polymers, plastics, composite materials, rubber materials, adhesives and sealants.

Chapter 6. "Fundamentals of Nanotechnology", clarifies the basic concepts in the field of nanotechnology, says the classification of nanomaterials, gives an idea of clusters, fullerenes and fullerite, carbon nanotubes, the use of nanotechnology.

Chapter 7. "Nanocrystalline and Consolidated Materials," defines the basic concepts and tells about consolidated materials, the classification of methods for obtaining consolidated nanomaterials such as intense plastic deformation, compacting and sintering of powders, nanocrystalline structures on the basis of amorphous and rapidly-heated alloys, and the formation of nanostructure with dispersed secretions and nanocomposites.

Chapter 8. "Thermal and chemical-heat treatment of alloys", containing the basic theory of heat and chemical-heat treatment of steel, information about the technology of heat treatment.

The second part "Locksmith's right", consists of 6 sections:

Chapter 9. "Introduction to the profession" tells about the role of plumbing works in industrial production, types, workstation locksmith safety when performing plumbing work.

Chapter 10. "Standardization, interchangeability and technical measurements", forms the basic idea of standardization and foundations interchangeability, unified system of tolerances and landings ISO, surface roughness, tolerances of form and placement surfaces talks about methods of measurements and basic types of instrumentation, which is used by the locksmith.

Chapter 11. "Pre-treatment operations bench" contains information about marking, cutting, editing and bending metal.

Chapter 12. "Dimensional metalwork processing," says dusting of metal processing holes and threaded surfaces.

Chapter 13. "Transaction processing bench" describes the sawing and joining of parts, their shavering, clinging and proofing.

Section 14. "Drawing up of non-detachable joints", contains information on soldering, lamination, riveting of metals.

A monograph contains a list of recommended literature, a subject-matter index and a multilingual glossary of terminology.

## ПЕРЕДМОВА

Книга, яку Ви тримаєте в руках, є результатом спільної праці та багаторічного досвіду авторського колективу в дослідженні питань з матеріалознавства та слюсарної справи.

Як показало життя, така форма викладення матеріалу прийшлася до душі також і фахівцям інших напрямів, і не лише у вищій, а й у середній спеціальній освіті. Очевидно, опанувавши робітничу спеціальність і отримавши практичну підготовку, студент не тільки вирішує проблему підробітку у вільний від навчання час, а й, вже здобувши кваліфікацію інженера, краще розуміє проблеми виробництва, суть роботи підлеглих, технологію складання виробів і виготовлення деталей, їх проектування.

З моменту виходу в друк першого видання пройшло вже сім років. За два наступних роки були виявлені дрібні недоліки у оформленні, зібрані зауваження і побажання користувачів, які були враховані у другому виданні.

Втім, часи змінюються, змінюємось і ми. Набутий досвід підказує, що необхідно покращити, удосконалити, доповнити. На базі матеріалів посібника були створені дистанційні навчальні курси, що дозволило по-новому подивитись на деякі аспекти викладання. Внаслідок цього, був змінений розділ “Залізобуглецеві сплави”, додано розділи присвячені наноматеріалам і нанотехнологіям, допрацьовані ілюстрації.

Прагнення України приєднатися до європейського співтовариства цілком логічно викликає потребу в гармонізації нормативної бази з європейською, прийняття нових законів і підзаконних актів. Відтак, змінюються стандарти, методики, термінологія. В зв'язку з цим, матеріал викладено з врахуванням законодавчих та нормативних документів станом на 1 березня 2017 р. Перевірена актуальність зазначених стандартів, вимоги застарілих замінені на чинні, внесені поправки і доповнення у термінологічний словник і відповідні розділи книги.

Автори висловлюють щире вдячність рецензентам за пророблену ними роботу і цінні зауваження.

Якщо, читаючи книгу, Ви відчули потребу висловити свої зауваження, побажання і пропозиції просимо надсилати їх на адресу [rmeo.pdatu@gmail.com](mailto:rmeo.pdatu@gmail.com)

# ЧАСТИНА I

---

## МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

*Матеріалознавство* - галузь науки і техніки, яка вивчає склад, будову, фізичні, хімічні, споживчі й технологічні властивості матеріалів, методи їх оцінювання, розроблення нових і вдосконалення наявних матеріалів високої якості, технологічності, довговічності, безпеки та надійності в процесі експлуатації.

Матеріалознавство об'єднує методи фізики й хімії для розробки й впровадження новітніх матеріалів у промислове виробництво.

Матеріалознавство зародилося з металургії, але в сучасну еру область дослідження розширилася, включаючи сплави й композитні матеріали, кераміку, полімери, біоматеріали тощо.

Як самостійна наука металознавство виникло у Росії в XIX столітті під назвою "металографія".

Кристалами різних речовин вчені цікавилися ще в XVII і XVIII ст. М.В.Ломоносов у 1763 р. у своєму "Трактаті о слоях земных" встановлює закон постійності кутів для кристалів алмазу. У цьому питанні Михайло Васильович випередив своїх сучасників висунувши положення, які поділяються наукою і в наш час.

Розвиток металознавства нерозривно пов'язаний з іменами П.П.Аносова (вперше використав мікроскоп для дослідження структури металів), Д.К.Чернова (дослідив критичні точки сталі та кристалічну будову литої сталі).

Подальший розвиток металознавства пов'язаний з іменами М.С.Курнакова (розробив методи фізико-хімічного аналізу сплавів), О.О.Байкова (висвітлив фізико-хімічну суть ряду металургійних процесів), С.С.Штейнберга (узагальнив явище перетворень аустеніту), М.П.Чижевського (вивчив вплив азоту на властивості сталей).

У даний час наука "металознавство" пішла далеко вперед. Українськими вченими розроблено більше двох тисяч різних сплавів.

У НАН України працює декілька десятків науково-дослідних інститутів, які займаються металознавством (інститути: проблем металознавства; надтвердих матеріалів; проблем міцності; проблем лиття; зварювання ім. Е.О.Патона; фізико-технічний тощо).

Крім цього, є багато науково-дослідних галузевих інститутів, які займаються проблемами металознавства.

Слід відмітити, що великий внесок у розвиток металознавства дають вчені з вищих технічних навчальних закладів.

У даний час технічну науку творять не самотні вчені, а цілі колективи.



Серед сучасних вітчизняних вчених-металознавців можна назвати: Б.Е. Патона, Д.А. Дутка, Б.І. Медовара, Б.А. Мовчана, А.К. Лебедева, Н.Т. Францевича, Г.К. Писаренка та ін.

## **Розділ 1. БУДОВА, ВЛАСТИВОСТІ І СПОСОБИ ВИПРОБУВАННЯ МЕТАЛІВ**

### **1.1. Поняття про метали і металеві сплави**

У сучасному машинобудуванні застосовуються конструкційні матеріали, чільне місце серед яких займають метали та їх сплави. Головними перевагами цих матеріалів є висока міцність, твердість, жорсткість, пластичність; їх можна зміцнювати пластичною деформацією, термообробкою і надавати їм різних властивостей.

Металеві сплави за сучасними технологіями отримують сплавленням, спіканням, електролізом, конденсацією з пароподібного стану двох чи більше металів та неметалів.

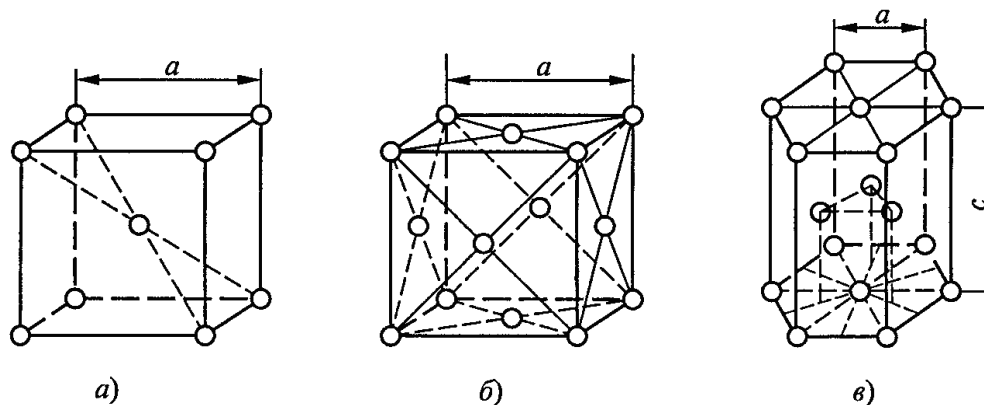
Майже 80 елементів періодичної системи належать до групи металів. Це кристалічні тіла з упорядкованим просторовим розташуванням атомів, яке періодично повторюється, утворюючи правильні геометричні фігури *просторові кристалічні решітки*.

***Кристалічна будова металів.*** Речовини у твердому стані мають кристалічну або аморфну будову. У кристалічній речовині атоми розташовані за геометрично правильною схемою і на певній відстані один від одного, а в аморфній - атоми розташовані хаотично.

*Метали та їх сплави* — це кристалічні тіла, атоми яких розміщені у певному геометричному порядку, що періодично повторюється у просторі, утворюючи кристалічні решітки. У вузлах цих решіток розміщуються позитивно заряджені іони, а між ними переміщуються вільні електрони. При затвердінні атоми металів утворюють кристали, які можна розглядати як геометрично правильні системи, побудовані у вигляді кристалічних решіток. Порядок розташування атомів у решітці може бути різним. Багато найважливіших металів утворюють решітки, розташування атомів в елементарних комірках яких має форму *центрованого куба* ( $\alpha$ - і  $\beta$ -залізо,  $\alpha$ -титан, хром, молібден, вольфрам, ванадій), *куба з центрованими гранями* ( $\gamma$ -залізо, алюміній, мідь, нікель, свинець,  $\beta$ -кобальт) або *гексагональну*, як у шестигранній призми, комірку (магній, цинк,  $\alpha$ -кобальт).

Більшість технічних металів мають кристалічні решітки: *об'ємноцентровану кубічну (ОЦК), гранецентровану кубічну (ГЦК) або гексагональну щільноупаковану (ГЦУ)*.

Щоб мати уявлення про кристалічну решітку, досить знати розташування атомів в елементарній комірці її. На *рис. 1.1,а* зображено елементарну комірку кубічної об'ємноцентрованої решітки; вона обмежується дев'ятьма атомами, вісім з яких розташовані по вершинах куба, а дев'ятий — у його центрі. Повторенням цієї комірки шляхом переносів утворюється вся структура кристала.



**Рис. 1.1.** Схема розміщення атомів у кристалічній решітці:

а) об'ємноцентрована кубічна; б) гранецентрована кубічна; в) гексагональна

Елементарна комірка кубічної гранецентрованої решітки (*рис. 1.1,б*) обмежується 14 атомами: 8 з них розташовані по вершинах куба і 6 — по гранях.

Елементарна комірка гексагональної решітки (*рис. 1.1,в*) обмежена 17 атомами, з них 12 атомів розташовані по вершинах шестигранної призми, 2 атоми — у центрі основи і 3 — усередині призми.

Параметр решіток (сторона куба або шестигранника) у міді 0,36 нм, в алюмінію 0,405 нм, у цинку 0,267 нм і т. д.

Кожний атом складається з позитивно зарядженого ядра і кількох шарів (оболонки) негативно заряджених електронів, які рухаються навколо ядра. Електрони зовнішніх оболонок атомів металів називають валентними. Вони легко відщеплюються, швидко рухаються між ядрами і називаються вільними. Внаслідок наявності вільних електронів атоми металів є позитивно зарядженими іонами.

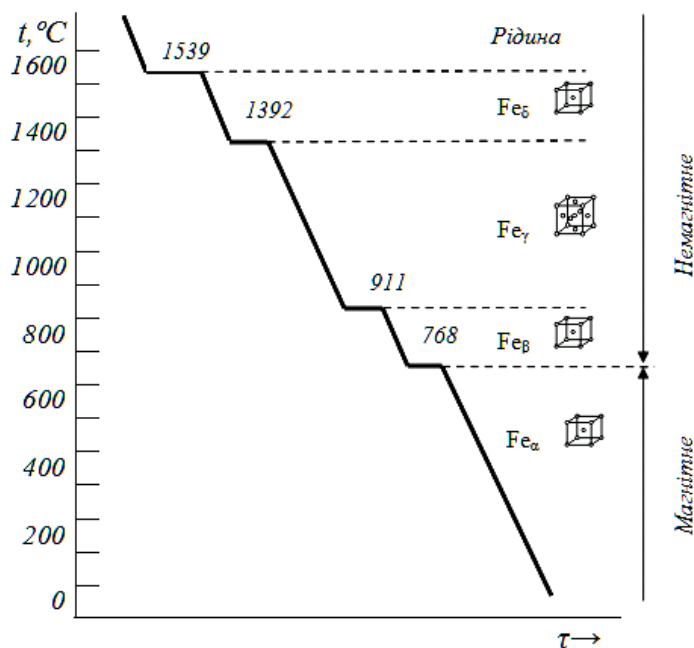
Отже, у вузлах решіток, позначених кружечками (*див. рис. 1.1а, б, в*) містяться позитивно заряджені іони. Іони, проте, не перебувають у спокої, а безперервно коливаються біля положення рівноваги. З підвищенням температури амплітуда коливань збільшується, що веде до розширення кристалів, а при температурі плавлення коливання частинок збільшується настільки, що кристалічна решітка руйнується.

Всі метали в твердому стані складаються з окремих кристалів неправильної геометричної форми, які ще називають зернами. Ці зерна можна побачити під мікроскопом, виготовивши мікро- або макрошліфи. На мікрошліфі спостерігають мікроструктуру, на макрошліфі - макроструктуру металу.

**Поліморфізм металів.** Деякі метали (залізо, кобальт, титан, олово та ін.) при зміні температури міняють тип кристалічних решіток. Ця властивість металів називається *алотропією*, або *поліморфізмом*. Одночасно зі зміною кристалічних ґрат змінюються також властивості металів. Температури, при яких відбуваються такі зміни, називаються *критичними точками*. Окремі модифікації металу позначаються грецькими літерами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  відповідно до зростання температури.

Зміна *алотропної модифікації металу*, як і зміна його агрегатного стану, супроводжується тепловим ефектом: при нагріванні металу теплота поглинається, а при охолодженні — виділяється. Тому на графіку залежності температури від часу (температурній кривій), записаному в процесі нагрівання (охолодження) металу, в момент зміни його будови помітними стають відповідні площадки (критичні точки).

Температурна крива охолодження чистого заліза зображено на *рис. 1.2*. З нього випливає, що кожна модифікація заліза має певну температуру переходу — *точку алотропного перетворення*.



**Рис. 1.2.** Температурна крива охолодження чистого заліза

До  $911\text{ }^{\circ}\text{C}$  залізо має об'ємноцентровану кубічну (ОЦК) решітку і позначається  $Fe_{\alpha}$ . В інтервалі температур  $911\text{...}1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  існує його модифікація  $Fe_{\gamma}$  з гранецентрованою кубічною (ГЦК) коміркою. При  $1392\text{ }^{\circ}\text{C}$  ця комірка заліза знову стає об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК), зберігаючись до температури плавлення заліза. Цю його модифікацію позначають  $Fe_{\delta}$ .

Найбільше значення в практиці термообробки сталі має перетворення  $Fe_{\alpha} \rightarrow Fe_{\gamma}$  і навпаки.

**Анізотропія властивостей кристалів.** Окремі кристали проявляють свої властивості у різних напрямках — неоднаково. Якщо вони

розташовані впорядковано, без будь-яких просторових викривлень, то таке тіло називається *монокристалом*. Тоді це тіло має неоднакові властивості в різних напрямках. Цю властивість кристалів називають *анізотропією*. У природних умовах кристалічні тіла складаються з множини дрібних по-різному орієнтованих кристалів і називаються *полікристалами*. В цьому випадку анізотропія відсутня, тому що середньостатистична відстань між атомами в усіх напрямках виявляється однаковою. У зв'язку з цим полікристалічні тіла вважаються уявно ізотропними.

**Будова реальних металів, дефекти кристалічних решіток.** Кристалізація реального металу супроводжується утворенням багатьох невеликих кристалів. Наприклад, в  $1\text{ см}^3$  сталевого виробу налічуються десятки тисяч кристалів. Вони не мають правильної геометричної форми і довільно орієнтовані в просторі. Такі кристали називаються *кристалітами*, або *зернами*. У свою чергу, кожне зерно складається із довільно орієнтованих у просторі менших об'ємів, які називаються *блоками*.

Блокова структура і неправильна форма поверхні кристаліта зумовлюють неупорядкованість (або дефекти) розташування атомів в окремих місцях кристалічних ґрат.

*Дефекти* (недосконалості) внутрішньої кристалічної будови металів поділяють на *точкові, лінійні та поверхневі*.

*Точкові дефекти* малі в усіх напрямках. Вони бувають кількох типів. Окремі атоми внаслідок теплового коливального руху можуть відхилитися настільки, що не повертаються назад. Порожній, не зайнятий атомом вузол кристалічних ґрат металу, називається *вакансією*. Зміщений з вузла атом деякий час не знаходить вільного вузла в кристалічних ґратах й опиняється між іншими атомами. Такий дефект будови металу називається *зміщенням*. При підвищенні температури кількість вакансій і зміщень збільшується. Вони відіграють важливу роль у руйнуванні металів при високих температурах.

У металі, навіть хімічно чистому, завжди є домішки сторонніх атомів. Внаслідок різниці в розмірах і властивостях атомів основного металу та стороннього в кристалічних ґратах утворюються *викривлення*.

*Лінійні дефекти* охоплюють по довжині багато рядів атомів, але їх протяжність поперек лінії поширення дефектів дуже мала. Вони називаються *дислокаціями* і бувають кількох типів: крайові, гвинтові, мішаного типу та ін. Дислокації утворюються в металі під час його кристалізації, при гартуванні, легуванні, пластичній деформації, термообробці та ін.

Суттєво впливають на механічні властивості металу недосконалості будови меж зерен — *поверхневі дефекти*. В перехідному шарі між сусідніми зернами, ґрати яких мають різну орієнтацію, порушується правильність розташування атомів, накопичуються дислокації,

підвищується концентрація домішок. Уздовж меж зерен найшвидше відбувається дифузія, особливо при нагріванні металу.

Дефекти кристалічної будови металів можуть взаємодіяти між собою, тому їх концентрація (щільність) може змінюватися.

Щільність дислокацій впливає на механічні й інші фізичні та хімічні властивості металів.

Максимальну міцність (теоретичну) має метал з ідеальною (бездефектною) будовою. Трохи меншу міцність мають майже досконалі кристали — «вуса», які кристалізуються з газової фази. Для реальних металів характерною є найменша міцність. Наприклад, теоретична (розрахункова) міцність чистого заліза становить приблизно 14 000 МПа, а міцність реального заліза досягає лише 200... 220 МПа, тобто в 70 разів менша. Ця розбіжність, обґрунтована з позицій теорії дислокацій, свідчить про недосконалість технологічних способів отримання та переробки металів, оскільки на практиці використовується лише 1...2 % їхньої можливої міцності. При подальшому нарощуванні щільності дислокацій (легуванням, термообробкою та ін.) міцність металу можна збільшити.

## 1.2. Деформація та основні властивості металів і сплавів

Під час експлуатації виробу, елементи споруд зазнають різноманітних силових навантажень. Дія навантаження викликає деформацію матеріалу, тобто зміну його розмірів і форми. Розрізняють два види деформації — пружну й пластичну.

**Пружна деформація** зумовлена дією нормальних (перпендикулярних до площини, на яку вони діють) зусиль, внаслідок чого відбувається зміщення атомів із положень рівноваги (ці положення визначаються зрівноважуванням сил протягування електронів атома з ядрами сусідніх атомів та сил відштовхування ядер сусідніх атомів). Атоми зміщуються без зміни сусідів на відстані, що не перевищують міжатомних відстаней. Тому пружна деформація має зворотний характер, тобто при усуненні навантаження атоми повертаються до початкових місць рівноваги, внаслідок чого пружна деформація зникає і виріб набуває попередньої форми й розмірів.

**Пластична деформація** зумовлена незворотним переміщенням атомів у певних площинах під впливом діючих у них дотичних сил. Вона не зникає після розвантаження матеріалу й тому її ще називають *незвотною* або *залишковою*. Зі зростанням навантаження деформування закінчується *руйнуванням*, тобто порушенням суцільності матеріалу.

Залежно від внеску пластичної деформації в загальний процес деформування аж до руйнування матеріалу розрізняють *пластичні* й *крихкі* матеріали. Разом з тим, залежно від умов навантаження (температура, швидкість деформування) один і той самий матеріал може перебувати в пластичному або крихкому стані. *Пластичному стану* матеріалу властива істотна пластична деформація перед руйнуванням. У *крихкому стані* матеріал руйнується без помітної пластичної деформації катастрофічно швидко,

у зв'язку з чим матеріали в такому стані не застосовують для виготовлення навантажених деталей машин чи елементів конструкцій.

**Властивості металів і сплавів.** Метали характеризуються *механічними, фізичними, хімічними і технологічними властивостями*.

До основних *механічних властивостей* матеріалів, які характеризують поведінку матеріалів у навантаженому стані відносять:

- *пружність* - здатність матеріалу відновлювати свою форму та розміри після припинення дії сил, що викликали його деформацію;
- *міцність* - здатність матеріалу чинити опір деформуванню й руйнуванню;
- *пластичність* - здатність матеріалу під дією навантаження пластично деформуватися без руйнування, зберігаючи змінену форму й розміри (залишкову деформацію) після припинення дії навантаження;
- *твердість* - здатність матеріалу опиратися місцевому пластичному деформуванню;
- *ударну в'язкість* - здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією динамічних навантажень;
- *утомну міцність* - здатність матеріалу опиратися втомному руйнуванню, яке викликає дія тривалого повторно-змінного навантаження.

Усі механічні властивості залежать від хімічного складу, структури (за винятком пружності, що є структурно малочутливою), стану поверхні виробів, масштабного чинника (розмірів та форми), умов зовнішньої дії, а саме: температури, характеру та величини прикладеного навантаження, швидкості деформування, агресивності середовища. Так, зокрема, підвищення температури сприяє пластичній деформації, а дія корозійного середовища зменшує не тільки міцність, а й пластичність металів.

Переважає більшість матеріалів застосовується завдяки певному рівню їх механічних властивостей. Так, матеріали з високою міцністю застосовують для виготовлення сильно статично навантажених відповідальних конструкцій, деталей машин. Матеріали ресор, пружин, мембран повинні мати високу пружність й утомну міцність. Металообробні різальні інструменти виготовляють з твердих матеріалів, а деталі, що працюють в умовах динамічних змінних навантажень, – з в'язких та достатньо втомоміцних матеріалів.

Значення механічних властивостей подаються у довідниках, стандартах як основні характеристики конструкційних та інструментальних матеріалів. Для визначення цих характеристик використовують різноманітні методи механічних випробувань.

*До фізичних* властивостей належать: колір, густина, температура плавлення, електропровідність, магнітні властивості, теплопровідність,

теплоємність, відносне видовження і зменшення по довжині при дії різних факторів.

*До хімічних* властивостей - окислюваність, розчинність, корозійна стійкість на повітрі та в інших агресивних середовищах, кислотостійкість, жаростійкість.

Найперша вимога до будь-якого металевого виробу — це його достатня міцність, тобто — здатність чинити опір деформаціям і руйнуванню під дією зовнішніх навантажень. Однак, багато які вироби мають забезпечувати ще й особливі властивості відповідно до умов роботи їх. Наприклад, різальні інструменти повинні мати високу твердість та зносостійкість, а пружини і ресори — високу пружність. Пластичність металів та їх сплавів можна віднести також до їхніх технологічних властивостей, оскільки вона характеризує можливості зміни форми металів і сплавів тиском (куванням, вальцюванням тощо). Тому для виготовлення деталей машин так важливо знати технологічні властивості металів.

*Технологічні властивості* характеризують можливість проводити ті чи інші технологічні операції з певним металом або застосовувати метал в тих чи інших умовах. До технологічних властивостей належать: *рідкоплинність, а також придатність до обробки куванням, зварюванням, різанням.*

*Рідкоплинність* — здатність металів у розплавленому стані утворювати рідкий струмінь і добре заповнювати форму. Вона залежить від хімічного складу, наявності домішок і температури нагрівання.

*Усадка* — зменшення об'єму і лінійних розмірів металів і сплавів при твердненні, охолодженні і кристалізації, а також внаслідок інших фізико-хімічних процесів.

*Ковкість* — властивість металів змінювати свою форму під дією удару або тиску. Їх можна кувати як в холодному, так і в гарячому стані. З підвищенням температури ковкість, як правило, збільшується.

*Зварюваність* — здатність металів утворювати міцне з'єднання за допомогою місцевого нагрівання до розплавленого стану без застосування або при застосуванні механічної дії за рахунок створення сил міжатомного зв'язку.

*Оброблюваність різанням* — властивість металів піддаватись механічній обробці різальними інструментами. Вона залежить від твердості, в'язкості та інших властивостей матеріалу.

Основні технологічні властивості конструкційних вуглецевих і легованих сталей, які найчастіше застосовуються в сільськогосподарському машинобудуванні, наведені в таблиці 1.1.

**Таблиця 1.1 - Технологічні властивості і область застосування конструкційних вуглецевих і легованих сталей**

<b>Марки металів і сплавів</b>	<b>Оброблюваність різанням</b>	<b>Зварюваність</b>	<b>Оброблюваність тиском (ковкість)</b>	<b>Область застосування</b>
<i>Вуглецеві сталі звичайної якості</i>				
БСт3кп	В	-	ДВ	Фасонні профілі для обода коліс
БСт3сп	В	-	ДВ	автомобілів і для с. г. машинобудування
Ст3сп	В	-	ДВ	Фасонні профілі для
Ст3пс	В	-	ДВ	тракторобудування (швелери для
ВСт4сп	В	В	ДВ	рами і кутик для корпусу трактора).
Ст5пс	В	-	ДВ	Деталі клепаних конструкцій, деталі
Ст5сп	В	-	ДВ	кріплення, ручки, тяги, важелі, пальці та інші деталі, які працюють в інтервалі температур від 0 до 425°C.
ВСт5пс	В	ДВ	ДВ	Арматура періодичного профілю
ВСт5сп	В	ДВ	ДВ	(Ø 10 - 40 мм)
<i>Вуглецеві якісні сталі</i>				
0,8кп	В	ДВ	ДВ	Деталі, виготовлені холодним
10	В	ДВ	ДВ	штампуванням, трубки, прокладки, втулки, валики, зубчаті колеса, фрикційні диски.
15	В	ДВ	ДВ	Малонавантажені деталі: втулки,
20	В	ДВ	В	пальці, шестерні, важелі, крюки,
25	В	ДВ	В	траверси, болти, стяжки.
30	В	В	В	Малонавантажені деталі: осі,
35	В	В	В	шпинделі, зірочки, тяги, важелі, диски, вали.
40	В	З	З	Деталі, що піддаються термічній
45	В	З	З	обробці: колінчаті і розподільчі вали, рейки, колеса, маховики, шпильки, храповики, плунжери, фрикційні диски, осі, муфти.
50	З	З	З	Зубчаті колеса, штоки, вали, ексцентрики, малонавантажені пружини і ресори.



Марки металів і сплавів	Оброблюваність різанням	Зварюваність	Оброблюваність тиском (ковкість)	Область застосування
65	З	Н	Н	Для пружин машин і механізмів: пружин клапанів двигунів, плоских пружин (ресор) прямокутного перетину товщиною 3...12 мм; пружин із дроту діаметром до 8 мм з холодним навиванням; пружин різних розмірів з послідуочим відпусканням при 300°С.
70	З	Н	Н	
75	З	Н	Н	
80	З	Н	Н	
<i>Вуглецеві інструментальні сталі</i>				
У7, У7А	-	-	-	Інструмент для обробки деревини (сокири, стамески, долота) та ударні інструменти (пуансони, молотки, викрутки).
У8А, У8А, У8Г, У8ГА, У9, У9А	-	-	-	Деревообробний інструмент (фрези, пили, свердла).
У10, У10А, У11, У11А, У12, У12А	-	-	-	Металообробний інструмент, що працює при невисоких температурах (мітчики, плашки тощо).
У13	-	-	-	Напилки, граверний інструмент тощо, а в деяких випадках - прості штампи холодного деформування.
<i>Леговані сталі</i>				
15Г	В	ДВ	ДВ	Без термічної обробки – зварні підмоторні рами, косинки, штуцера, втулки, шайби. <i>Після цементації або ціанування – поршневі пальці, фрикційні диски, пальці ресор, кулачкові валики, болти, гайки, гвинти, ключі, шестерні, черв'яки та інші деталі із твердою та зносостійкою поверхнею.</i>
20Г	В	ДВ	ДВ	
25Г	В	ДВ	В	
10Г2	В	В	В	Патрубки, штуцери, фланці.

Марки металів і сплавів	Оброблюваність різанням	Зварюваність	Оброблюваність тиском (ковкість)	Область застосування
30Г	В	З	З	Валики блоків перемикання передач, шпильки, вінці і ободи маховиків, пальці траків, болти, гайки та ін.
35Г	В	В	В	
30Г2	В	Н	Н	Колінчаті вали, напівосі, цапфи, важелі зчеплення, розподільчі вали, карданні вали, шестерні
35Г2	В	Н	Н	
40Г2	В	Н	Н	Карданні вали, напівосі, колінчаті і розподільчі вали та інші деталі, що працюють в умовах підвищених навантажень.
45Г2	В	Н	Н	
50Г2	В	Н	Н	
15Х	В	-	Н	Для цементованих деталей які працюють в умовах підвищеного тертя, що потребують більшої твердості серцевини у порівнянні з вуглецевою сталлю – поршневі пальці, розподільчі і черв'ячні вали, штовхачі клапанів, ролики штовхачів автотракторних двигунів.
15ХН	В	-	Н	
20Х	В	-	Н	
30Х	В	-	Н	Осі, валики, важелі, болти, гайки та інші мілкі деталі, а також зубчаті колеса, вали і відповідальні навантажені шпильки.
35Х	В	-	Н	
30ХРА	В	-	Н	
40Х	В	-	Н	Вали, осі, великі зубчаті колеса, пальці та інші деталі з робочими поверхнями тертя, що піддаються зносу без ударних навантажень.
45Х	В	-	Н	
50Х	В	-	Н	
18ХГ	З	Н	Н	Для цементованих деталей невеликих розмірів – поршневих пальців, шліцьових валів, зубчатих коліс та ін.
35ХГ2	З	Н	Н	
33ХС	З	Н	Н	Вали муфт зчеплення, важелі перемикання, балансири, випускні клапани тракторних двигунів.
38ХС	З	Н	Н	
40ХС	З	Н	Н	
30ХМ	З	З	В	Деталі автотракторного і загального машинобудування (вали, осі, цапфи, втулки, зубчаті колеса, деталі
30ХМА	З	З	В	
35ХМ	З	З	В	

Марки металів і сплавів	Оброблюваність різанням	Зварюваність	Оброблюваність тиском (ковкість)	Область застосування
38ХМ	З	З	В	рульового управління, деталі турбін і компресорів, що працюють при температурі до 400°С).
35ХГ2	З	Н	В	Вали, напівосі, пальці, зірочки, важелі і інші деталі автотракторного сільськогосподарського машинобудування, які працюють в умовах тертя і підвищених навантажень.
35ХГФ	З	Н	В	
40ХГТР	З	Н	В	
25Х2Н4МА	З	-	З	Муфти, великогабаритні шатуни і інші деталі для дизелебудування.
25Х2Н4ФА	З	-	З	
38Х2МЮА	З	-	Н	Азатована сталь застосовується в моторо- і автобудуванні (гільзи циліндрів ДВЗ, голки форсунок, стакани, вали, зубчаті колеса та ін.)

Примітки. Технологічні властивості металів і сплавів позначаються: ДВ - дуже висока; В - висока; З - задовільна; Н - низька.

**Класифікація механічних випробувань.** За характером зміни навантаження в часі розрізняють:

- *статичні випробування*, за яких одноразово прикладене навантаження плавно і порівняно повільно зростає від мінімальної до максимальної величини;

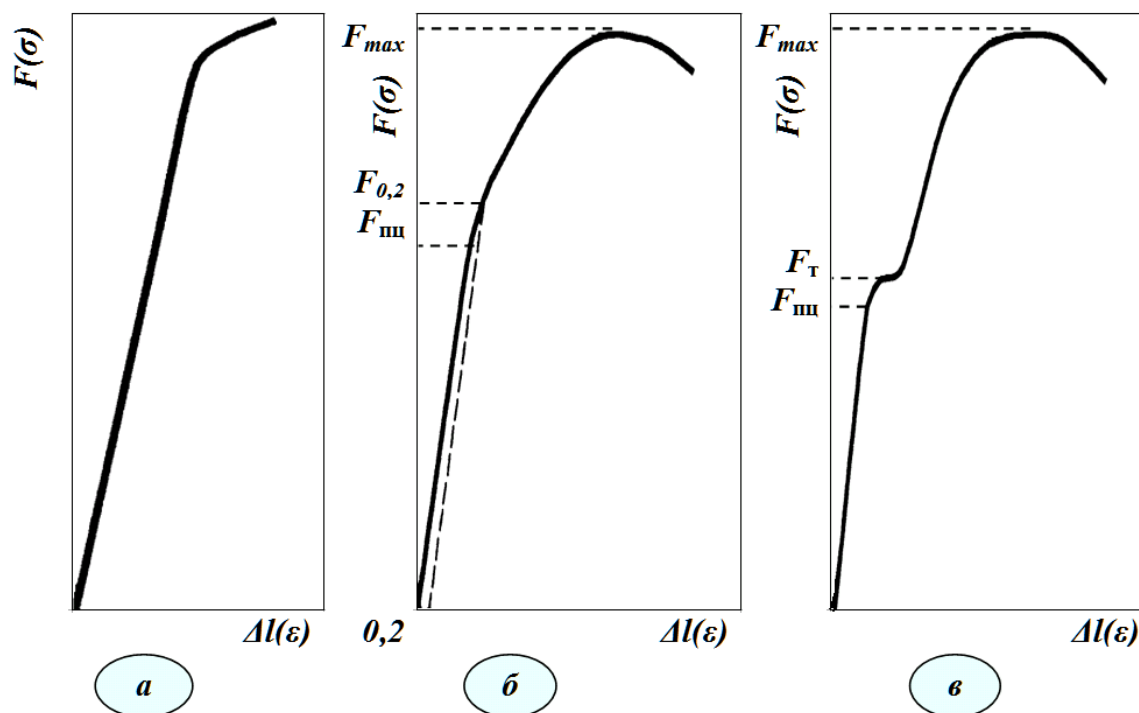
- *динамічні (ударні) випробування*, за яких навантаження прикладаються одноразово й з великою швидкістю зростають від найменшої до найбільшої величини;

- *утомні випробування*, за яких навантаження прикладаються багаторазово і можуть змінюватися не тільки за величиною, а й за напрямком, причому з різними швидкостями навантаження та розвантаження.

За способом прикладення навантаження розрізняють випробування *на розтягання, стискання, закручування, згинання.*

Випробування можуть бути *короткочасними й тривалими.* Вони можуть виконуватись при різних температурах та в середовищах, що імітують умови експлуатації.

*Статичні випробування на розтяг* полягають у поступовому розтяганні стандартних зразків аж до їх руйнування на розривних машинах, що мають прилад для запису *діаграми розтягання* в координатах "навантаження  $F$  — абсолютне видовження  $\Delta l$ " (рис. 1.3).



**Рис. 1.3.** Схеми діаграм розтягання матеріалів:  
 а - крихких; б - міцних; в - високопластичних

Усю гаму таких діаграм для різних металів та сплавів можна звести до кількох типів. Дуже крихкі матеріали руйнуються без помітної пластичної деформації (рис. 1.3, а).

Більшість конструкційних сплавів у пластичному стані деформується за діаграмою, показаною на рис. 1.3, б. З досягненням зусилля  $F_{\text{max}}$  у робочій частині зразка, яка до цього моменту зберігала початкову форму, настає локалізація деформації, переважно поблизу концентратора напружень. Вона виявляється в утворенні шийки — місцевого звуження поперечного перерізу зразка. Шийка розвивається аж до моменту руйнування зразка.

Діаграма розтягання зі *сходиною текучості* (рис. 1.3, в) властива високопластичним металам і сплавам з ОЦК кристалічною решіткою, наприклад, залізу й маловуглецевим сталям.

**Визначення характеристик міцності.** Щоб не залежати від розмірів та форми тіла (виробу), для характеристики міцності матеріалу використовуються *напруження* - питомі навантаження, що припадають на одиницю площі перерізу тіла. Вони визначаються відношенням сили (навантаження) до площі перерізу тіла, на який вона діє. Їх розмірність у

Міжнародній системі одиниць - паскаль ( $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$ ); для зручності користуються мегапаскалями ( $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$ ).

Напруження як функція не тільки сили, але й площі, в різних перерізах тіла буде різним. Переважно сила не перпендикулярна до площини, на яку вона діє. Тоді її, як будь-який вектор, можна розкласти на дві складові: нормальну та дотичну. Відповідно за цими складовими визначають:

- *нормальні напруження*  $\sigma$ , що діють перпендикулярно до площини перерізу тіла і викликають пружну деформацію;

- *дотичні напруження*  $\tau$ , що діють у площині перерізу тіла і викликають пластичну деформацію.

Залежно від способу визначення розрізняють *дійсні* та *умовні* напруження. Відомо, що внаслідок деформації зразка змінюється величина його перерізу. *Дійсні* напруження визначають відношенням сили до площі перерізу в момент деформації, *умовні* — відносять до початкової площі перерізу  $S_0$  (до початку навантаження), не враховуючи її зміни під час деформації. І хоча фізичний зміст мають тільки дійсні напруження, в практиці механічних випробувань частіше користуються умовними напруженнями завдяки зручності їх визначення.

Основні стандартні характеристики міцності подаються умовними нормальними напруженнями - відношеннями відповідних зусиль  $F$  (рис. 1.3) до початкової площі поперечного перерізу зразка  $S_0$ . Зусилля визначають розрахунковим способом за показами тензометрів, прикріплених до поверхні зразків, або графічним способом на діаграмі розтягання.

*Границю пропорційності*  $\sigma_{\text{пц}}$  - умовне напруження, до якого в матеріалі зберігається лінійна залежність між навантаженням і видовженням, вираховують за формулою:

$$\sigma_{\text{пц}} = \frac{F_{\text{пц}}}{S_0}. \quad (1.1)$$

При графічному визначенні границі пропорційності за розрахункову величину  $F_{\text{пц}}$  приймають зусилля, при якому відхилення від лінійної залежності між навантаженням і видовженням сягає певної величини. Переважно допуск при визначенні  $F_{\text{пц}}$  задають збільшенням тангенса кута між дотичною до кривої деформації й віссю навантажень на 50 % від його значення на лінійній пружній ділянці.

*Границю текучості фізичну*  $\sigma_{\text{т}}$  визначають як найменше напруження, за якого зразок деформується без помітного зростання навантаження і якому відповідає сходи́нка текучості на діаграмі розтягання (рис. 1.3, в):

$$\sigma_{\text{т}} = \frac{F_{\text{т}}}{S_0}. \quad (1.2)$$

Границю текучості умовну  $\sigma_{0,2}$  при якій величина пластичної (залишкової) деформації сягає 0,2 %, визначають за відсутності на кривій розтягання сходинок текучості (рис. 1.3, б) за формулою:

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0}. \quad (1.3)$$

Із залежності  $\Delta l = (0,2 \cdot l) / 100$  визначають абсолютне видовження зразка

на робочій довжині зразка  $l$ , яке відповідає залишковій деформації 0,2 %. Його значення відкладають вздовж осі абсолютного видовження діаграми розтягання (рис. 1.3, б). З точки, що відповідає 0,2 % деформації, проводять пряму, паралельну до прямолінійного відрізка кривої деформації. Точка її перетину з кривою деформації відповідає зусиллю  $F_{0,2}$ .

Границю міцності  $\sigma_B$  — напруження, яке відповідає найбільшому зусиллю  $F_{max}$  (рис. 1.3, б, в), що передує руйнуванню зразка, вираховують за формулою:

$$\sigma_B = \frac{F_{max}}{S_0}. \quad (1.4)$$

Для визначення границі міцності зразок плавно навантажують до руйнування.

**Визначення характеристик пластичності.** Пластичність матеріалу характеризують відносні видовження та звуження.

Відносне видовження зразка після руйнування  $\delta$  (%) визначають за формулою:

$$\delta = l_K - l_0 / l_0 \cdot 100\% \quad (1.5)$$

де  $l_K$  - довжина зразка після розриву, мм;  $l_0$  - довжина зразка до розриву, мм.

Відносне звуження (%) визначають за формулою:

$$\psi = S_0 - S_K / S_0 \cdot 100\% \quad (1.6)$$

де  $S_0$  - початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка, мм<sup>2</sup>;  $S_K$  - площа поперечного перерізу після розриву, мм<sup>2</sup>.

Відносне звуження визначають переважно на циліндричних зразках (площу поперечного перерізу в місці руйнування плоских зразків складніше визначити внаслідок спотворення його форми). Мінімальний

діаметр зразка в місці руйнування  $d_k$  визначають за результатами вимірювань штангенциркулем у двох взаємно перпендикулярних напрямках, попередньо склавши дві половинки зруйнованого зразка по поверхні зламу. За середнім арифметичним значенням  $d_k$  вираховують площу поперечного перерізу  $F_k$  в місці руйнування.

**Визначення твердості матеріалів** є найпоширенішим методом випробування сплавів, який не потребує виготовлення спеціальних зразків і може бути використаний на готових деталях. Твердість матеріалу безпосередньо пов'язана з границею міцності, тому, знаючи твердість сталі, можна визначити границю міцності:

$$\sigma_s = 0,36 HB \quad (1.7)$$

Методи вимірювання твердості відрізняються між собою умовами прикладання навантаження на індентор і його формою та твердістю матеріалу зразка (деталі), його розмірами, товщиною зміцненого шару покриття деталі тощо.

Найпоширенішими є такі методи визначення твердості: за статичним втискуванням (твердоміри *Брінелля*, *Роквелла*, *Віккерса*); за динамічним втискуванням — метод пружного відскакування бойка (твердомір *Шора*) і метод орієнтовного визначення твердості втискуванням кульки ударом (твердомір *Польді*); вимірюванням електроопору; коливанням маятника; дряпанням.

Вимірювання твердості *методом Віккерса* (за назвою англійського військово-промислового концерну «Віккерс») втискуванням у поверхню досліджуваного матеріалу чотиригранної алмазної піраміди. Навантаження на неї вибирають із таблиці. Число твердості визначається відношенням навантаження  $P$  ( $H$ ) до площі поверхні піраміди відбитка  $F$  ( $мм^2$ ). Для позначення твердості за методом Віккерса необхідно вказувати також тривалість навантаження, якщо вона більша чи менша ніж  $10...15$  с. Наприклад,  $1/30—500 HV$  означає число твердості за Віккерсом  $500$ , визначене вимірюванням при навантаженні  $1$  кН і його тривалості  $30$  с.

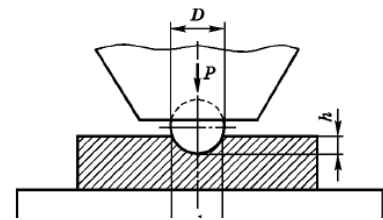
*Твердість за Шором* виражається в умовних одиницях, що відповідають висоті підйому бойка після удару у досліджувану поверхню з фіксованої висоти його падіння. Твердомір Шора використовують для вимірювання твердості великогабаритних виробів, які не можна встановити на стаціонарні твердоміри.

*Твердість на твердомірі Польді* визначається орієнтовно за відбитками кульки, одержаними одночасно на еталонному зразку і поверхні випробуваної деталі при ударі молотком по бойку твердоміра.

*Метод дряпання* виражається в нанесенні подряпин на поверхні зразків індентором, який не деформується. Цей метод не стандартизований.

*Спосіб Брінелля* (за іменем шведського інженера Ю. А. Брінелля) застосовують для порівняно м'яких металів (Рис. 1.4). Він ґрунтується на вимірюванні твердості за величиною відбитка, що залишає стальна загартована кулька під час її вдвлювання в метал при певних навантаженнях. Стальна кулька може бути діаметром 2,5; 5; 10 мм, навантаження 150...30000 Н. Позначають твердість за Брінеллем *НВ* і визначають за формулою:

$$НВ = P/F \quad (1.8)$$



**Рис. 1.4.** Схема визначення твердості металів на твердомірі Брінелля

де *P* — тиск, *H*; *F* — площа відбитку, залишеного кулькою на поверхні металу,  $m^2$ .

*Твердість за Роквеллом* (за іменем американського металурга С. П. Роквелла). У практиці вимірювання твердості технічних матеріалів найбільшого застосування набули методи втискання, зокрема метод Роквелла, який ґрунтується на втисканні в матеріал під дією статичного навантаження твердішого за нього наконечника (індентора) у формі кульки чи конуса. Визначена за цим методом твердість - *це здатність матеріалу чинити опір місцевому пластичному деформуванню*. Вона позначається великими літерами, перша з яких *H* (від першої літери англійського слова *hardness* - твердість), друга літера *R* - символізує метод Роквелла, третя (*A*, *B* чи *C*) - вказує на шкалу індикатора й умови вимірювання. Вимірюють твердість на твердомірах типу ТР, що забезпечують можливість регулювання параметрів (сили, часу) втискання в матеріал наконечника вздовж його осі перпендикулярно до поверхні матеріалу. Критерієм твердості є *глибина* відтиску наконечника, яка визначається на твердомірі автоматично, а значення твердості зчитується з його шкали.

Для вимірювання твердості використовуються стандартні наконечники двох типів:

- алмазний конус з кутом при вершині  $120^\circ$ ;
- відполірована кулька діаметром 1,5875 мм (1/16") із загартованої сталі.

Загальне навантаження *P* на наконечник прикладають у такій послідовності (рис. 1.5):

- наконечник втискається в матеріал під дією початкового навантаження  $P_0$  на глибину  $h_0$ , з якої здійснюватиметься відлік твердості,

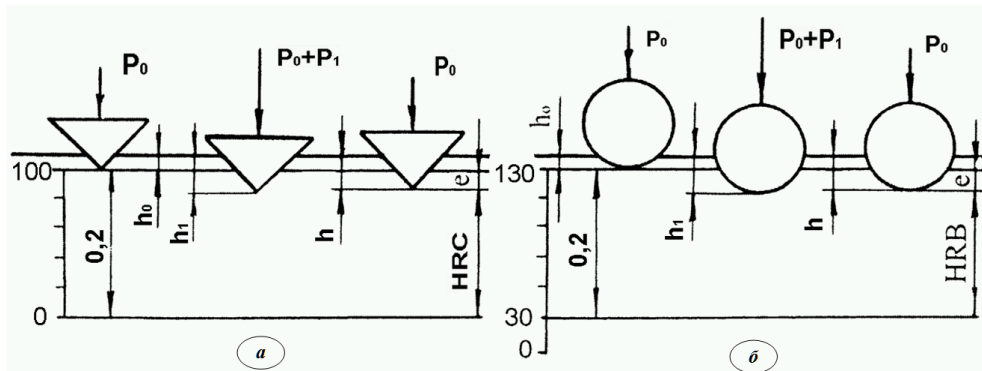


щоб усунути вплив шорсткості поверхні, неоднорідності хімічного складу та структурного стану поверхневого шару й вібрацій твердоміра;

- опісля плавно впродовж 2...8 с прикладається основне навантаження до свого номінального значення  $P_1$ ;

- наконечник певний час втискається в матеріал під дією загального навантаження  $P$  ( $P=P_0+P_1$ ) на глибину  $h_1$ . Тривалість витримки під загальним навантаженням залежить від повзучості матеріалу й становить 2 с для матеріалів з незалежною та 5...8 с для матеріалів з залежною від часу пластичною деформацією;

- після витримки знімається основне навантаження й наконечник, продовжуючи перебувати під дією початкового навантаження  $P_0$ , витісняється матеріалом у положення, що характеризується величиною заглиблення  $h$ .



**Рис. 1.5.** Схеми вимірювання твердості за методом Роквелла алмазним конусом (а) і сталеву кулькою (б)

Різниця  $h - h_0$ , яка характеризує твердість, визначається за допомогою індикатора годинникового типу. На циферблаті індикатора є три шкали, які мають 100 спільних поділок: суміщені ідентичні шкали А і С, позначені чорними цифрами, та зміщена відносно цих шкал на 30 поділок шкала В, позначена червоними цифрами. Ціна поділки с шкали відповідає заглибленню індентора на 0,002 мм, а повний оберт стрілки - на 0,2 мм.

Значення твердості за методом Роквелла визначається різницею значень  $K$  і  $e$ , виражених через кількість поділок шкали:

$$HR = K - e \quad (1.9)$$

де  $K=0,2 \text{ мм}/0,002 \text{ мм} = 100$  поділок шкали, якщо твердість визначають алмазним наконечником за шкалами А і С, або  $K= 0,26 \text{ мм}/0,002 \text{ мм} = 130$  поділок шкали, якщо твердість визначають сталеву кулькою за показами шкали В,  $e= (h-h_0)/0,002$  (рис. 1. 5).

Отже, твердість за Роквеллом подається в умовних одиницях (міра одиниці відповідає ціні поділки шкали - 0,002 мм) за відповідною шкалою індикатора твердоміра, наприклад 58 HRC. Таким чином,

твердість за Роквеллом виражається в умовних одиницях: *HRA*, *HRB* і *HRC*.

Між значеннями твердості, визначеними різними методами, існує кореляція. Для переведення чисел твердості з одних одиниць в інші користуються довідковими таблицями.

**Визначення в'язкості.** Однією з основних механічних властивостей конструкційних матеріалів є *в'язкість* — їхня здатність чинити опір руйнуванню під дією ударних навантажень. Її визначають найчастіше методом руйнування стандартних зразків з надрізом на маятниковому копрі. Ударна в'язкість *KC* дорівнює відношенню роботи *K* (Дж), витраченій на руйнування зразка, до площі його поперечного перерізу  $S_0$  (м<sup>2</sup>):

$$KC = K/S_0 \quad (1.10)$$

**Ударна в'язкість** є важливою характеристикою конструкційної міцності матеріалів. Вона залежить як від міцності, так і від пластичності матеріалу. Здебільшого, ударна в'язкість більш чутлива до зміни структурного стану матеріалу за характеристики твердості, міцності чи пластичності, визначені за статичними випробуваннями.

*Ударна в'язкість* характеризує здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією динамічних навантажень. Її визначають як питому роботу руйнування ударним згином надрізаних призматичних зразків.

З одного боку зразка посередині виконується концентратор напружень у вигляді U- чи V- подібного надрізу (карбу), а для особливо жорстких умов випробування - втомної тріщини (Т) на дні V-надрізу. Стандарт встановлює 20 типорозмірів зразків з різними видами концентраторів.

Зразок встановлюють на опори маятникового копра і руйнують з протилежного до надрізу боку ударом відпущеного з певної висоти важкого маятника. Метою випробування на копрі є визначення роботи руйнування зразка *K*.

Роботу удару позначають літерами *KU*, *KV* або *KT*, де *K* - символізує роботу удару (роботу руйнування зразка), а *U*, *V*, *T* - вид концентратора. Якщо параметри випробування відрізняються від максимальної енергії удару маятника 300 Дж, глибини U- і V-концентраторів 2 мм, T- концентратора 3 мм, ширини зразка 10 мм, то в позначенні роботи удару вказують значення використаних параметрів (наприклад *KU150/5/5* = 60 Дж). Допускається позначати роботу удару *A<sub>i</sub>*, де *A* - символ роботи удару, *i*- символ типу зразка (від 1 до 20).

Мале значення ударної в'язкості свідчить про крихкий стан матеріалу, тобто про його схильність до крихкого руйнування. Крихке руйнування належить до найнебезпечніших видів руйнування, тому що проходить катастрофічно швидко під дією відносно малих навантажень (менших за границю текучості) без помітних слідів пластичної деформації. Тріщина після досягнення критичного розміру починає рости дуже швидко (зі швидкістю, близькою до швидкості звуку в матеріалі) за рахунок накопиченої в матеріалі енергії пружного деформування, не потребуючи зростання зовнішнього навантаження.

У в'язкому стані матеріал має велику ударну в'язкість. В'язке руйнування супроводжується значною пластичною деформацією. Магістральна тріщина росте відносно повільно, оскільки на її поширення витрачається значна енергія у вигляді роботи, яку виконує зовнішнє навантаження, напруження від якого повинно перевищувати границю текучості матеріалу. Тому цей вид руйнування не є таким небезпечним, як крихке руйнування.

Для позначення ударної в'язкості до символу  $KC$  додається третя літера - $U$ ,  $V$  або  $T$ , яка характеризує тип концентратора напружень, наприклад  $KCU$ . Для визначення ударної в'язкості крихких матеріалів використовують гладкі зразки (без надрізу) і тоді ударну в'язкість позначають лише літерами  $KC$ . Після літер символу ударної в'язкості послідовно вказують максимальну енергію удару маятника, глибину концентратора і ширину зразка (за винятком параметрів, відзначених вище для роботи удару), наприклад  $KCV50/2/2 = 12 \text{ Дж/см}^2$ . Для позначення роботи удару та ударної в'язкості при підвищених або понижених температурах застосовується додатковий індекс, який позначає температуру випробування в  $^{\circ}\text{C}$ , наприклад  $KU^{+200}150/3/7,5 = 185 \text{ Дж/см}^2$ .

Для визначення придатності металу або сплаву до застосування тих чи інших способів обробки в заводській практиці часто використовують **технологічні проби**. Листові та штабові матеріали, дріт і прутки невеликого діаметра випробовують на *перегин*, виявляючи їхню здатність до багаторазового перегину. Здатність листового матеріалу до холодного штампування та витягування перевіряється *пробою на витискування лунки сферичною головкою пуансона*. Труби випробовують на *відбортровку*, *обтискування* та ін. Такі випробування виконують за допомогою спеціальних пристроїв.

#### 1.4. Фізико-хімічні методи аналізу металів

Як правило, вивчення властивостей металів та їх сплавів починається з визначення їхнього хімічного складу. Для цього найчастіше застосовують методи кількісного аналізу, а якщо надто висока точність непотрібна,

то використовують спектральний аналіз. Більш точні дані дає рентгеноспектральний аналіз, за допомогою якого можна встановити склад мікрообластей розміром  $100...0,01$  мкм (окремих фаз, зерен та ін. ).

Кристалічну будову (структуру) металу чи сплаву можна спостерігати навіть на поперечному зломі його зразка. Загальне поняття структури включає поняття *макро-, мікро- і тонкої структури*.

*Макроструктура* — будова металу чи сплаву, що спостерігається візуально або при 30...50-кратному збільшенні за допомогою лупи на натурних об'єктах (зломах) чи на спеціально підготовлених шліфованих зразках-макрошліфах. Щоб краще виявити структуру, макрошліфи протравлюють у хімічних реактивах — розчинах неорганічних кислот або солей. При травленні кристали розчиняються з різною швидкістю, тому що вони по-різному орієнтовані відносно поверхні шліфа (явище анізотропії). Межі між кристалами містять підвищену кількість домішок і розчиняються ще швидше. Іноді при травленні спостерігається різне забарвлення структурних складових сплаву. Протравлювач сильніше роз'їдає несущільності в металі: тріщини, пори тощо.

*Макроаналізом* виявляють макродефекти (тріщини, усадкові раковини, газові пухирі), хімічну неоднорідність у розподілі домішок (ліквацію), структурну неоднорідність, зумовлену обробкою тиском (волокнистість, смугастість) та ін.

Макроструктура може бути досліджена двома методами:

- а) *методом зломів*;
- б) *методом макрошліфа*.

За *методом зломів* вивчають зломи зразків, деталей, визначаючи характер злому (динамічний, втомний), розмір зерен, внутрішні дефекти (пори, тріщини), дендритну будову, структурну неоднорідність тощо.

У металах і сплавах залежно від їх попереднього оброблення зломи бувають кристалічні (зернисті) або волокнисті. Кристалічні зломи виникають у крихких сплавах і руйнування відбувається по межах зерен (між або через зерна (транскристалічний)).

Коли руйнування відбувається в процесі дії циклічних навантажень, то виникають втомні зломи.

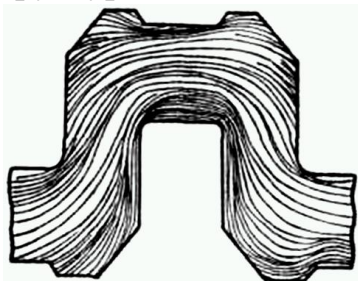
*Методом макрошліфа* структуру вивчають на зразку після його шліфування і травлення спеціальним реактивом. Цим методом виявляють волокнистість, ліквацію сірки, фосфору і вуглецю, дефекти зварних швів, усадкові та інші раковини, тріщини, глибину зміцненого шару тощо.

Для виготовлення макрошліфів деталей розрізують по осі симетрії або в площині, в якій бажано вивчити макроструктуру, напрям волокон, наявність дефектів тощо.

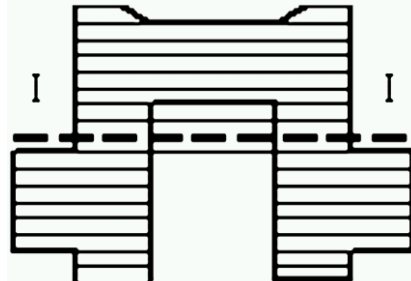
Поверхню розрізу шліфують на шліфувальному верстаті або на спеціальному приладі, а потім полірують на суконних або фетрових кругах із застосуванням пасти до утворення дзеркального блиску.

Після полірування поверхню макрошліфа протравлюють відповідними розчинами кислот, щоб виразніше виділити складові частини сплаву, тріщини, усадочні раковини у виливках, а також глибину поверхневого гартування і цементації.

*Макрошліфи* можна вивчати оглядом, або сфотографувати звичайним чи спеціальним фотоапаратом і одержати фотографію макроструктури з властивими особливостями і можливими дефектами.



**Рис. 1.6.** Схема макроструктури колінчастого вала, виготовленого з круглої заготовки гарячим



**Рис. 1.7.** Схема макроструктури колінчастого вала, виготовленого вирізуванням з плоскої заготовки

На *рис. 1.6* і *1.7* зображені схеми макроструктур матеріалу ко лінчастих валів, виготовлених різними способами. На *рис. 1.7* показаний вал, виготовлений способом вирізування із заготовки, яка мала форму штаби. Волокна матеріалу розміщені не раціонально, не вигідно: по лінії *I—I* буде небезпечний переріз, у якому міцність щік на зріз і на розтяг буде найменшою.

*Макроаналізом можна виявити такі важливі особливості будови металу:*

- грубі неметалеві включення;
- приховані дефекти металу (*тріщини, пористість, усадочна пухкість, зональна неоднорідність, газові бульбашки, центральна пористість, підкіркові пухирці, свищі, шлакові включення тощо*);
- вид зламу й особливості кристалічної будови матеріалу, причини руйнування деталі;
- характер кристалічної будови (*дендритна будова ділянки транскристалізації литого металу, зерниста будова прокатаного і відпаленого металу, волокниста структура деформованого металу, розміщення волокон у композиційному матеріалі тощо*);
- наявність включень у металі та характер їх розміщення (*наприклад, ліквіація в сталях сульфідів, фосфідів та інших включень*);
- структура металу, що формується при первинній кристалізації;
- ступінь хімічної неоднорідності та будова поверхневих шарів виробів після термічної, хіміко-термічної та термомеханічної обробок;
- неоднорідність будови сплавів, зумовлена обробкою тиском;
- структура та якість зварних з'єднань (*непровари, шаруватість*

наплавленого металу, шлакові включення, усадкова рихлість, ліквіація домішок тощо).

Необхідно зауважити, що макроаналіз не є завершальним методом дослідження. Він лише дає змогу зробити попередній висновок про структуру металу і не виявляє багатьох особливостей його будови.

**Мікроаналізом** установлюють природу фазових складових, розмір, форму й орієнтацію окремих зерен, зміну внутрішньої будови металів та їх сплавів залежно від умов здобуття, обробки та ін.

**Мікроструктура** — будова металу чи сплаву, що спостерігається за допомогою оптичного (при збільшенні до 2000 разів) й електронного (при збільшенні до 500 000 разів) мікроскопів. Мікроструктуру вивчають на спеціально виготовлених зразках-мікрошліфах. Для виявлення мікроструктури поверхню шліфа після ретельного полірування протравлюють спеціальними реактивами, склад яких залежить від складу металу. Різні фази протравлюються по-різному і набувають різного забарвлення.

За необхідності вивчення елементів структури за межами роздільної здатності оптичних мікроскопів ( $4 \cdot 10^{-1}$  мкм) застосовують електронний мікроскоп, в якому зображення формується за допомогою потоку електронів. Розрізняють *непрямі* та *безпосередні* (прямі) методи дослідження структури. Перші ґрунтуються на спеціальній техніці виготовлення тонких зліпків-плівок (реплік), які відображують рельєф протравленого шліфа. При цьому можна вивчати елементи структури, мінімальний розмір яких становить 2...3 нм. Прямими методами досліджують тонкі металеві фольги. Роздільна здатність таких мікроскопів сягає 0,3...0,5 нм, що дає можливість вивчати недосконалість кристалічної будови: дислокації, дефекти упаковки атомів, скупчення вакансій тощо.

**Тонка структура** — будова металу на атомно-кристалічному рівні — вивчається за допомогою **рентгено- та нейтронографії**. Роздільна здатність цих методів сягає 0,1 нм. Вони дають інформацію про форму і розміри елементарних кристалічних ґрат, ступінь досконалості кристалічної структури, значення мікронапружень, вплив легуючих елементів на параметри кристалічних ґрат та ін.

Суттєву додаткову інформацію про природу перетворень у металевих сплавах дістають при їх дослідженні за допомогою різних фізичних методів: термічного аналізу, дилатометричного методу тощо.

**Метод термічного аналізу** ґрунтується на явищі теплових ефектів, що виникають під час фазових перетворень у металах та їх сплавах, і зводиться до визначення критичних точок.

**Дилатометричний метод** ґрунтується на зміні об'єму металу чи сплаву при фазових перетвореннях. Він дає змогу визначити критичні точки металів та

їх сплавів, вивчити процеси розпаду твердих розчинів, установити температурні інтервали існування зміцнювальних фаз тощо. Перевага дилатометрів — висока чутливість і незалежність показів від швидкості зміни температури.

Високу чутливість *електричних методів вимірювання* (наприклад, опору) використовують для вивчення не тільки фазових перетворень, а й дефектів тонкої структури та інших явищ, які неможливо виявити іншими методами дослідження.

Різноманітні *методи магнітного аналізу* застосовують при дослідженні процесів, пов'язаних з переходом металу чи сплаву з парамагнітного стану у феромагнітний (або навпаки); при цьому можливим є кількісне оцінювання цих процесів. Магнітний аналіз часто використовують також для дослідження впливу на структуру металу чи сплаву режимів термообробки.

*Методом внутрішнього тертя* вивчають необоротні втрати енергії механічних коливань усередині твердого тіла. Використовуючи цей метод, можна розрахувати коефіцієнти дифузії з високою точністю, в тому числі при низьких температурах, коли ніякий інший метод непридатний. Методом внутрішнього тертя визначають зміну концентрації твердих розчинів, розподіл домішок, дістають інформацію про фазові перетворення і зміни дислокаційної структури.