

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



## **АТЛАС СТРУКТУР МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ**

Навчальний наочний посібник

Дніпро  
НТУ «ДП»  
2024

УДК 620.22(075)  
А92

*Рекомендовано вченою радою НТУ «Дніпровська політехніка»  
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра  
спеціальності 132 Матеріалознавство  
(протокол № 8 від 27.06.2024 )*

Рецензенти:

В.С. Вахрушева – д-р техн. наук, проф. (Український державний університет науки і технологій);

М.Д. Мельничук – канд. техн. наук, доцент (Луцький національний технічний університет).

Автори: В.І. Большаков, Г.Д. Сухомлин, Д.В. Лаухін, О.В. Бекетов

А92 **Атлас** структур металів і сплавів [Електронний ресурс] : навч. наоч. посіб. / В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухін, О. В. Бекетов ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 183 с.

Зміст видання відповідає освітньо-професійній програмі підготовки магістрів спеціальності 132 «Матеріалознавство» та робочим програмам навчальних дисциплін «Експертна оцінка матеріалів і виробів» і «Наноматеріали та нанотехнології».

Навчальний посібник містить фотографії мікроструктур різноманітних металів і сплавів, які часто застосовуються в машинобудуванні, транспорті, будівництві та інших галузях промисловості. Переважно це знімки, виконані методами світлової та електронної мікроскопії, за допомогою яких ведуться дослідження в наукових, навчальних, заводських та експертних лабораторіях.

Для здобувачів вищої освіти технічних спеціальностей як джерело самостійного поглиблення знань з курсу «Матеріалознавство».

Сформульовано навчальні цілі змістових модулів, що окреслюють навички та вміння майбутнього магістра з матеріалознавства.

**УДК 620.22(075)**

© В.І. Большаков, Г.Д. Сухомлин, Д.В. Лаухін, О.В. Бекетов, 2024

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2024

## ВСТУП

Сучасне матеріалознавство неможливо уявити без оптичних і електронномікроскопічних методів кількісної та якісної оцінки макро- і мікроструктур виробів із різноманітних матеріалів на кожному з етапів їхнього існування – від контролю технологічних операцій під час виготовлення до кінцевих стадій експлуатації, а найчастіше й після виходу їх з ладу. Основні методи та інструменти при цьому можуть бути такі:

**Вивчення макроструктури:** зламів, поверхонь тертя і руйнування, великогабаритних протравлених перерізів у невеликому (до 10 крат) збільшенні.

**Мікроструктурні дослідження методами світлової мікроскопії** коли збільшення 10...2000 кратне за допомогою світлооптичних приладів різних типів. Можливості цього методу обмежені граничною роздільною здатністю (тобто, мінімальною відстанню, що розрізняється між двома точками) близько 0,2 мкм. Це пов'язано з хвильовою природою видимого світлового випромінювання: через дифракційні явища деталі структури, що мають розміри, менші за довжину світлової хвилі (500 нм), стають невиразними.

**Растрова електронна мікроскопія** дає змогу виконати 30000 кратне збільшення, а роздільну здатність довести до 5,0 нм. Перевагою методу є відносна простота підготовки зразків, а також можливість поєднання з локальним рентгеновським і енергодисперсійним аналізом. Деякі растрові мікроскопи забезпечені спеціальними пристроями для візуалізації картин каналювання відбитих електронів, що дає змогу визначати орієнтацію кристалічної ґратки окремих зерен або частинок інших фаз.

**Просвічувальна електронна мікроскопія** – високороздільна (не менше за 0,1 нм) і унікальний за різноманітністю одержуваних відомостей метод. Граничне інструментальне збільшення

800 000 кратне. Є суттєве обмеження: зразки мають бути прозорими для електронів, енергія яких становить 50...500 кеВ, тобто мати товщину 2,0...200 нм. І тут потрібні особливі методи приготування та дослідження зразків (див. розділ 1).

**Зондова сканувальна мікроскопія** виникла у 80-х роках минулого століття у зв'язку з появою нанорозмірних матеріалів і технологій, має роздільну здатність на атомному рівні – близько 0,1 нм. У методі задіяно – тунельний, атомно-силовий, магнітно-силовий та інші мікроскопи.

Атлас містить фотографії мікроструктур різноманітних металів і сплавів, які широко застосовуються в машинобудуванні, транспорті, будівництві та інших галузях промисловості. Переважно це знімки, виконані за допомогою світлової та електронної мікроскопії, як найпоширеніших методів в наукових, навчальних, заводських та експертних лабораторіях.

Безперервне вдосконалення й розвиток нових технологій отримання матеріалів з різноманітними властивостями вимагає більш поглибленого вивчення його структурних змін, що відбуваються на різних стадіях створення конкретного виробу, так і в процесі його експлуатації. Часто ці зміни відбуваються на атомному та субструктурному рівнях, тому до атласу включено окремий розділ, присвячений структурним перетворенням у будівельних сталях, що були досліджені із застосуванням дифракційної електронної мікроскопії тонкої фольги.

На відміну від попередніх, це видання доповнене розділом, у якому наведено структуру та фізико-хімічні властивості меж зерен з позицій нової теорії атомної будови великокутових меж полікристалів у концепції решіток вузлів, що збігаються. Наведені знімки, дифракційні картини,

їхній стереографічний аналіз свідчать про те, що спеціальні низькоенергетичні границі між кристалами формуються не тільки у високочистих матеріалах, але й у таких структурах і структурних складових як мартенсит, бейніт, голчастий ферит, доєвтектоїдний ферит ( $\alpha$ -залізо), а також спеціальні міжфазні границі ферит-цементит у перліті. Ці матеріали отримано в ННІ ПДАБА (В.І. Большаковим із співроб.) за тісної співпраці з Ліонським національним технічним університетом (проф. К. Еснурф).

Крім того, видання містить відомості про наноструктурні матеріали й технології, а також короткий опис приладів надвисокої роздільної здатності: тунельний, атомно-силовий та інші зондові аналізатори, що з'явилися за останні двадцять років. Вони здатні формувати зображення атомної структури на поверхнях металевих, органічних, полімерних та інших матеріалів природного або штучного походження. До опису додані фотознімки, що ілюструють стан металів і сплавів на дислокаційному та наноструктурному рівнях.

Для полегшення пошуку тієї чи іншої ілюстрації, номери рисунків складаються з двох груп цифр – перша з яких відповідає номеру сторінки, а друга – порядковому номеру рисунка на сторінці.

Посібник адресовано студентам технічних спеціальностей як матеріал для самостійного поглиблення знань з курсу "Матеріалознавство".

Автори висловлюють вдячність провідним ученим-металознавцям і металофізикам: академіку НАН України Ю.М. Тарану, проф. Л.Г. Орлову, проф. д-ру техн. наук Е.Н. Погрібному, проф. д-ру техн. наук Я.В. Гречному, які надали свого часу знімки низки структур, що ввійшли до цього посібника.

**РОЗДІЛ 1**

**МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ  
СТРУКТУРИ ТА СУБСТРУКТУРИ  
МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ**

*В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухін*

- ТЕХНІКА СВІТЛОВОЇ МІКРОСКОПІЇ
- ПІДГОТОВКА ЗРАЗКІВ
- ФОТОГРАФУВАННЯ
- ТЕХНІКА ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ



**РОЗДІЛ 2**

**СТРУКТУРА  
МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ**

***В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин,  
Д. В. Лаухін, Н. Э. Погребна***

- КРИСТАЛІЧНА РЕШІТКА. ТИПИ МІЖАТОМНИХ ЗВ'ЯЗКІВ
- АТОМНА БУДОВА МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ
- ДЕФЕКТИ КРИСТАЛІЧНОЇ РЕШІТКИ
- СТРУКТУРА КОЛЬОРОВИХ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ
- СТРУКТУРА ТВЕРДИХ РОЗЧИНІВ
- СТРУКТУРА СПЛАВІВ З ЕВТЕКТИЧНОЮ ТА ПЕРИТЕКТИЧНОЮ КРИСТАЛІЗАЦІЯМИ

РОЗДІЛ 3

# СТРУКТУРА ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

*В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин,  
Д. В. Лаухін, Н. Э. Погребна*

- ХІМІЧНІ ЕЛЕМЕНТИ
- ДІАГРАМА СТАНУ Fe-C СПЛАВІВ
- СТРУКТУРНІ СКЛАДОВІ ЧАВУНІВ І СТАЛЕЙ
- ХОЛОДНА ДЕФОРМАЦІЯ СТАЛЕЙ
- ГАРЯЧА ДЕФОРМАЦІЯ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ
- ДЕФЕКТИ СТРУКТУРИ СТАЛІ
- СТРУКТУРА ЧАВУНІВ. СІРІ ЧАВУНИ
- БІЛІ ЧУГУНИ
- ПОЛОВИНЧАСТІ ЧАВУНИ

РОЗДІЛ 4

# СТРУКТУРА ТЕРМІЧНО ОБРОБЛЕНИХ І ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ І ЧАВУНІВ

*В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухін, Н. Е. Погребна,  
Ю. І. Гезенцевей*

- РОЗПАД АУСТЕНІТУ. ІЗОТЕРМІЧНІ ТА ТЕРМОКІНЕТИЧНІ ДІАГРАМИ
- ПЕРЛІТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ. БУДОВА ПЕРЛІТУ
- СТРУКТУРА ДООБТЕКТОЇДНИХ СТАЛЕЙ
- МАРТЕНСИТНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ
- ПРОМІЖНЕ (БЕЙНІТНЕ) ПЕРЕТВОРЕННЯ
- ВИДИ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ: ВІДПАЛ, НОРМАЛІЗАЦІЯ, ЗАГАРТУВАННЯ
- ТЕРМІЧНА ОБРОБКА КОНСТРУКЦІЙНИХ ТА ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ;  
СТРУКТУРА ЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ
- ЗАГАРТУВАННЯ З МІЖКРИТИЧНОГО ІНТЕРВАЛУ ТЕМПЕРАТУР
- ДЕФЕКТИ СТРУКТУРИ ТЕРМІЧНО ОБРОБЛЕНОЇ СТАЛІ



- ТЕРМІЧНА ОБРОБКА ЧАВУНУ
- ФРАКТОГРАФІЯ
- ЕНЕРГОДИСПЕРСІЙНИЙ РЕНТГЕНІВСЬКИЙ МІКРОАНАЛІЗ

РОЗДІЛ 5

# ТОНКА СТРУКТУРА БУДІВЕЛЬНИХ СТАЛЕЙ

*В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухін,  
В. І. Куксенко, О. В. Маковська*

- ДИФРАКЦІЙНА ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ ТОНКИХ ФОЛЬГ
- БУДІВЕЛЬНІ СТАЛІ
- НИЗКОВУГЛЕЦЕВИЙ МАРТЕНСИТ
- ВІДПУСКАННЯ НИЗКОВУГЛЕЦЕВОГО МАРТЕНСИТУ
- ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНА ТЕРМОМЕХАНІЧНА ОБРОБКА СТАЛЕЙ
- НОРМАЛІЗАЦІЯ
- СТРУКТУРА СТАЛІ 09Г2ФБ
- ТОНКА СТРУКТУРА ПЕРЛІТУ
- ТОНКА СТРУКТУРА ФЕРИТУ
- СУБЗЕРЕННА СТРУКТУРА ФЕРИТУ
- СТРУКТУРА СТАЛІ 09Г2ФБ. ГОЛЧАСТИЙ ФЕРИТ
- ЗАЛИШКОВИЙ АУСТЕНІТ

РОЗДІЛ 6

# СТРУКТУРА ВЕЛИКОКУТОВИХ ГРАНИЦЬ ЗЕРЕН

*В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухін,  
В. І. Куксенко, А. В. Бекетов*

- РОЛЬ ГРАНИЦЬ ЗЕРЕН У ФОРМУВАННІ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІКРИСТАЛІВ
- АТОМНА СТРУКТУРА ГРАНИЦЬ
- КОНЦЕПЦІЯ РЕШІТОК ВУЗЛІВ, ЩО ЗБІГАЮТЬСЯ
- РЕШІТКИ ВУЗЛІВ, ЩО ЗБІГАЮТЬСЯ ТА МАТИЦІ
- ЗЕРНОГРАНИЧНЕ КОНСТРУЮВАННЯ
- СПЕЦІАЛЬНІ ГРАНИЦІ В МАРТЕНСІТІ ТА ГОЛЧАСТОМУ ФЕРИТІ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ
- СПЕЦІАЛЬНІ МІЖФАЗНІ ГРАНИЦІ ФЕРИТ – ЦЕМЕНТИТ У ПЕРЛІТІ
- СПЕЦІАЛЬНІ ГРАНИЦІ ТА БАГАТОЧИСЕЛЬНІ СТИКИ У ФЕРИТІ

РОЗДІЛ 7

# НАНОКРИСТАЛІЧНІ МАТЕРІАЛИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ

*В. І. Большаков, Г. Д. Сухомлин, Д. В. Лаухін*

- ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ. ПОХОДЖЕННЯ І РОЗМІРИ
- БУДОВА ТА ВЛАСТИВОСТІ
- КЛАСИФІКАЦІЯ
- ОСНОВНІ МЕТОДИ ОТРИМАННЯ НАНОСТРУКТУРНИХ МАТЕРІАЛІВ
- ФУЛЕРЕНИ
- ГРАФЕН, ТРУБОЧНІ ТА ЦИБУЛЬНІ ФУЛЕРЕНИ
- ФУЛЕРЕНОВІ КРИСТАЛИ
- ЕЛЕМЕНТИ НАНОСТРУКТУРИ У ПРОМИСЛОВИХ СТАЛЯХ І СПЛАВАХ
- МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАНОКРИСТАЛІЧНИХ  
КОНСОЛІДОВАНИХ МАТЕРІАЛІВ
- ЗАСТОСУВАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ У НАУЦІ І ТЕХНІЦІ
- СКАНУЮЧІ ЗОНДОВІ МІКРОСКОПИ

**ДОДАТОК**

# **ТИПОВІ СТРУКТУРИ МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ**

# АТЛАС СТРУКТУР МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ

Нижче наведені структури, що найчастіше зустрічаються в поширених металах і сплавах. Оскільки знімки дано без написів пояснення, їх можна використовувати для самоперевірки, а також як базисні при самостійному вивченні різних структурних станів того чи іншого сплаву. На сторінках 167 та 168 наведено еталонні структури для визначення бала зерна у феритних та аустенітних сталях за ГОСТ 5639-82.

- 162.1. Доевтектоїдна сталь з 0,7%С. Перліт та надлишковий ферит по границях вихідного аустеніту.
- 162.2. Доевтектоїдна сталь з 0,2%С після нормалізації. Суміш фериту та перліту.
- 162.3. Пластинчастий перліт сталі з 0,8%С.
- 162.4. Мартенсит (темні голки) та залишковий аустеніт (світлий).
- 162.5. Ферит дрібнозернистий. Технічне залізо.
- 162.6. Чавун з кулястим графітом на ферито-перлітній основі.
- 162.7. Грубопластинчастий перліт та надлишковий цементит.
- 162.8. Ферит. Рівноважна зеренна структура.
- 162.9. Крупнозернистий аустеніт. Х18Н10Т. Границі зерен та двійників відпау.
- 162.10. Ферито-перлітна смугастість гарячекатаної сталі 09Г2ФБ.
- 163.1. Однофазна аустенітна сталь, деформована на 50%.
- 163.2. Заевтектичний білий чавун. Ледебурит та пластини (білі) надлишкового цементиту.
- 163.3. Сірий чавун із перліто-цементитною основою та пластинчастим графітом.
- 163.4. Чавун з кулястим графітом на феритній основі.
- 163.5. Доевтектоїдний сплав Pb-Sb. Чорні дендрити — надлишковий свинець.
- 163.6. Голчастий ферит (бейніт) у сталі 09Г2ФБ.
- 163.7. Видманштеттов надлишковий цементит в заевтектоїдній сталі. Травлення пікратом натрію.
- 163.8. Ковкий чавун на ферито-перлітній основі.
- 163.9. Сірий чавун із пластинчастим графітом.
- 163.10. Латунь двофазна, лита.
- 164.1. Ледебурит. Евтектичний чавун.
- 164.2. Твердий розчин, альфа-латунь.
- 164.3. Зернистий перліт із глобулярним цементитом.
- 164.4. Олов'яниста бронза, двофазна, лита.
- 164.5. Ковкий чавун на перлітній основі з пластівцевим графітом.
- 164.6. Видманштеттов ферит у доевтектоїдній сталі 45.
- 164.7. Евтектичний білий чавун.
- 164.8. Латунь двофазна, відпалена.
- 164.9. Сірий чавун, перлітна основа, пластинчастий графіт (чорний).
- 164.10. Сірий чавун, ферито-перлітна основа.
- 165.1. Звичайні та спеціальні границі зерен, нержавіюча сталь.
- 165.2. Скупчення дислокацій у карбідних частинок у нержавіючій сталі.
- 165.3. Голчастий ферит (бейніт) у сталі 09Г2ФБ.
- 165.4. Деформований на 12% аустеніт, Гадфільда сталь, дислокації, дефекти упаковки.
- 165.5. Гаряча деформація аустеніту, сталь Х18Н10Т. Сузерні границі (полігональні).
- 165.6. Крихкий транскристалітний злам. Ручковий візерунок.
- 165.7. Рейковий пакетний мартенсит у загартованій будівельній сталі 14Х2ГМР.
- 165.8. Початок сфероїдизації цементиту у перліті.
- 165.1. Пластинчастий цементит у перліті.
- 165.2. В'язкий злам стали 14Х2ГМР після загартування та відпуску.
- 166.3. Самовідпуск мартенситу, сталь 14Х2ГМР. Частинки карбідів заліза розташовуються по трьох кристалографічних площинах.
- 166.4. Дуплексна ферито-мартенситна структура сталі 45.
- 166.5. Нижній бейніт у сталі 14Х2ГМР.
- 166.6. Холодна деформація стали Х18Н10Т. Дислокації, дефекти пакування.
- 166.7. Границі зерен та дислокації в міді.
- 166.8. Дислокаційна субзеренна границя нахилу з кутом розорієнтації 0,65° сталі 09Г2ФБ, прокатаної при температурі міжкритичного інтервалу (нижче Ar3).

## ІСТОРИЧНІ ДАТИ В МІКРОСКОПІЇ

**1981 – Скануюча тунельна мікроскопія.** G. Binnig, H. Rohrer.

Атомарний дозвіл на зразках, що проводять.

**1982 – Скануючий близькопольний оптичний мікроскоп.** D. W. Pohl.

Роздільна здатність 50 нм в оптичному зображенні поверхні.

**1984 – Скануючий ємнісний мікроскоп.** J. R. Matey, J. Blanc.

Реалізовано роздільну здатність 500 нм у ємнісному зображенні.

**1985 – Скануючий тепловий мікроскоп.** C. C. Williams, H. K. Wickramasinghe.

Роздільна здатність 50 нм в тепловому зображенні поверхні.

**1986 – Атомно-силовий мікроскоп.** G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber.

Атомарний дозвіл на непровідних (та провідних) зразках.

**1987 – Магнітно-силовий мікроскоп.** Y. Martin, H. K. Wickramasinghe.

Роздільна здатність 100 нм у магнітному зображенні поверхні.

– **Мікроскоп на силах тертя.** C.M. Mate, G.M. McClelland,

S. Chiang. Зображення латеральних сил атомних масштабах.

– **Електросиловий мікроскоп.** Y. Martin, D. W. Abraham, H.K.

Wickrama-singhe. Детектування поодиноких зарядів на поверхні зразків.

– **Непружна тунельна СТМ спектроскопія.** D.P.E. Smith,

D. Kirk, C.F. Quare. Реєстрація фонових спектрів молекул у СТМ.

**1988 – Мікроскоп на основі балістичної емісії електронів.**

W.J. Кайсер. Дослідження бар'єрів Шоттки з нанометровою роздільною здатністю.

– **Інвертований фотоemisійний мікроскоп.** J.H. Coombs,

J.K. Gimzewski, B. Reihl, J.K. Sass, R.R. Schlittler. Реєстрація спектрів люмінесценції у нанометровому діапазоні.

**1989 – Близькопольний акустичний мікроскоп.** K. Takata,

T. Hasegawa, S. Hosaka, S. Hosoki. T. Komoda.

Низькочастотні акустичні вимірювання

з роздільною здатністю 10 нм.

– **Скануючий шумовий мікроскоп.** R.Moller A.Esslinger,

B.Koslowski.

Реєстрація тунельного струму без застосування напруги.

– **Скануючий мікроскоп, що реєструє прецесію спина.**

Y.Manassen, R.Hamers, J.Demuth, A.Castellano.

Візуалізація спинів у парамагнетиці з роздільною здатністю 1 нм.

– **Скануючий мікроскоп на іонній провідності.** P. Hansma,

B. Drake, O. Marti, S. Gould, C. Prater. Отримання зображення

поверхні в електроліті з роздільною здатністю 500 нм.

– **Скануючий електрохімічний мікроскоп.** O. E. Husser,

D. H. Craston, A. J. Bard.

**1990 – Мікроскоп-реєстратор зміни хімічного потенціалу.** C.C. Williams,

H.K. Wickramasinghe

– **СТМ, що реєструє фото-Е.Д.С.** R.J.Hamers, K.Markert.

Реєстрація розподілу фото-Е.Д.С з нанометровим дозволом.

**1991 – Скануючий зондовий мікроскоп на методі Кельвіна.**

N. Nonnenmacher, M. P. O'Boyle, H. K. Wickramasinghe.

Вимірювання поверхневого потенціалу

з роздільною здатністю 10 нм.

**1994 – Безпертурний близькопольний оптичний мікроскоп.**

F. Zenhausern, M. P. O'Boyle, H. K. Wickramasinghe.

Оптична мікроскопія з роздільною здатністю 1 нм.

## ЛІТЕРАТУРА

1. José Ignacio Verdeja González, Daniel Fernández González, Luis Felipe Verdeja. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Steels*. Springer. 2022. P. 332.
2. Beketov O., Laukhin D., Rott N., Babenko E., Kozechko V. Use of the Processing Arrays Theory of Experimental Data for the Analysis of the Technological Scheme in the Rolled Metal Production – Controlled Rolling. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. P. 152-163.
3. Abdelkhalick Mohammad, Danwei Wang. Electrochemical mechanical polishing technology: recent developments and future research and industrial needs. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86. №. 5-8. P. 1-16.
4. Guang Yang, B. Wang, Kamal Tawfiq, Houzhen Wei. Electropolishing of surfaces: theory and applications. *Surface Engineering*. 2016. Vol. 33. №. 2 P. 1-18.
5. Doru M. Stefanescu. *Metallography and Microstructures of Cast Iron*. ASM International. 2017.
6. Hamish L. Fraser, David W. McComb, Robert E.A. Williams. 12 – Transmission Electron Microscopy for Physical Metallurgists. *Physical Metallurgy*. 2014. P. 1143-1226.
7. Li Jian, Junliang Sun. Application of X-ray Diffraction and Electron Crystallography for Solving Complex Structure Problems. *Accounts of Chemical Research*. 2017. Vol. 50. №. 11.
8. Jien-Wei Yeh. *Physical Metallurgy*. Springer. 2016.
9. Natasha Dropka, Kevin-Peter Gradwohl. *Crystal growth, bulk: Theory and models*. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*. 2024. Vol. 5. P. 231-247.
10. Hull D., Bacon D.J. Chapter 9 – Dislocation Arrays and Crystal Boundaries. *Introduction to Dislocations (Fifth Edition)*. 2011. P. 171-204.
11. Rengin Peköz, Hüseyin Oymak, Şakir Erkoç. Binary Alloy Clusters: Structures and Electronic Properties. *Reviews in Theoretical Science*. 2014. Vol. 2. №. 4. P. 19.
12. Isaac Chang, Qing Cai. From simple binary to complex multicomponent eutectic alloys. *Progress in Materials Science*. 2022. Vol. 123.
13. Lundmark Robert, Wetterlund Elisabeth, Olofsson Elias. On the green transformation of the iron and steel industry: Market and competition aspects of hydrogen and biomass options. *Biomass and Bioenergy*. 2024. Vol. 182.
14. Zeinab S., Mousavi MD, Shohreh Nafisi, Howard I. Maibach. Fullerene nanoparticle in dermatological and cosmetic applications. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine*. 2017. Vol. 13. №. 3. P. 1071-1087.
15. Larionova N.S., Nikonova R.M., Ul'yanov A.L., Lad'yanov V.I., Kamaeva L.V. Structural-phase composition of iron-containing high carbon composites with fullerite and graphite obtained by mechanosynthesis. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022. Vol. 909.
16. Burchfielda Larry A, Fahima Mohamed Al, Wittmanb Richard S, Delodovicic Francesco, Novamene Nicola Manini.: A new class of carbon allotropes. *AIR Universita degli studi di Milano*. 2017. P. 15.
17. Parusov Eduard, Chuiko Ihor. Influence of thermal strengthening technology on variability of mechanical properties of rolled metal product. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2020. P. 202-218.
18. Carlos A. Paredes-Orta, Jorge D. Mendiola-Santibañez, Federico Manriquez-Guerrero, Iván R. Terol-Villalobos. Method for grain size determination in carbon steels based on the ultimate opening. *Measurement*. 2019. Vol. 133. P. 193-207.
19. Большаков В.И., Сухомлін Г.Д., Погрібна Н. Е. Атлас структур металів та сплавів. 2001. Дніпропетровськ: GAYDEAMUS, 114 с.
20. Gogayev K. O., Podrezov Yu. M., Voloshchenko S. M., Minakov M. V. Effect of isothermal quenching temperature on strain hardening of ADI. *The Scientific Technical journal Metal Science and Treatment of Metals* 2020. Vol. 26.
21. Loder Denise, Michelic Susanne K., Bernhard Christian. Acicular Ferrite Formation and Its Influencing Factors-A Review. *Journal of Materials Science Research*. 2016. Vol. 6. №. 1. P. 24-43.
22. Li F.C., Liu T., Zhang J.Y., Shuang S., Wang Q., Wang A.D., Wang J.G., Yang Y. Amorphous–nanocrystalline alloys: fabrication, properties, and applications. *Materials Today Advances*. 2019. Vol. 4.
23. Hassan Nosrati, Seyed Hadi, Tabaian Hamid, Hamid Reza Baharvandi, Mohammad Nemati, Ahmad Samariha. Pulse Electroplating of Nickel on Spring Steel. *Middle East Journal of Scientific Research*. 2012. Vol. 12. №. 9. P. 1288-1291.
24. Amel Boukhouiete, Saliha Boumendjel, Nour-el-Houda Sobhi, Juan Creus. Microstructural investigation of nickel deposits obtained by pulsed current. *Journal of the Indian Chemical Society*. 2022. Vol. 99. №. 3.



## ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

---

25. Dhinakaran V., Lavanya M., Vigneswari K., Ravichandran M., Vijayakumar M.D. Review on exploration of graphene in diverse applications and its future horizon. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 27. P. 824-828.

# ЗМІСТ

---

Вступ.....	3
РОЗДІЛ 1. Методи дослідження структури та субструктури металів та сплавів.....	5
Питання до розділу .....	13
РОЗДІЛ 2. Структура металів і сплавів.....	15
Питання до розділу .....	33
РОЗДІЛ 3. Структура залізовуглецевих сплавів .....	35
Питання до розділу .....	67
РОЗДІЛ 4. Структура термічно оброблених та легованих сталей та чавунів .....	69
Питання до розділу .....	96
РОЗДІЛ 5. Тонка структура будівельних сталей .....	97
Питання до розділу .....	5
РОЗДІЛ 6. Структура великокутних кордонів зерен .....	113
Питання до розділу .....	141
РОЗДІЛ 7. Нанокристалічні матеріали та технології.....	143
Питання до розділу .....	168
ДОДАТОК. Типові структури металів і сплавів .....	169
ЛІТЕРАТУРА.....	180

---

Навчальне видання

**Большаков** Володимир Іванович  
**Сухомлин** Георгій Дмитрович  
**Лаухін** Дмитро Вячеславович  
**Бекетов** Олександр Вадимович

**АТЛАС СТРУКТУР МЕТАЛІВ І СПЛАВІВ**

Навчальний наочний посібник

Видано в авторській редакції.

Електронний ресурс.  
Підписано до видання 27.06.2024. Авт. арк. 20,7.

Підготовлено до видання  
в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка»  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК №1842 від 11.06.2004 р.  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.