

621.315
К 60

ДЕПОЗИТНЕ
ЗБЕРІГАННЯ

С. М. КОЛЕСОВ

Т. М. МІЩЕНКО, В. М. ЛЯШУК

**ОБРОБКА
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ
ТА МЕТАЛОЗНАВСТВО
НА ПІДПРИЄМСТВАХ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**



2017

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

С. М. КОЛЕСОВ,

Т. М. МІЩЕНКО, В. М. ЛЯШУК

Обробка
електротехнічних матеріалів
та металознавство на підприємствах
залізничного транспорту

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК ДЛЯ ВНЗ

ДНІПРО
2017

УДК 621.331:315.6:669
К 55

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. *І. О. Вакуленко* (ДНУЗТ),
д-р техн. наук, проф. *В. З. Куцова* (НМетАУ),
д-р техн. наук, проф. *В. О. Грінкевич* (НМетАУ)

Рекомендовано до друку
вченою радою університету як навчальний посібник
(*протокол № 5 від 15.06.2016*).
Зареєстровано НМВ ДНУЗТ
(*реєстр. № 281/16-11 від 09.08.2016*)

Колесов, С. М.

К 55 Обработка электротехнических материалов та металознавство на підприємствах залізничного транспорту [Текст]: навч. посіб. для ВНЗ / **С. М. Колесов**, Т. М. Міщенко, В. М. Ляшук; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпро, 2016. – 115 с.

ISBN 978-966-8471-79-7

В навчальному посібнику розглянуті основні положення, що дозволяють вивчати і використовувати навички проектування й обслуговування пристроїв електропостачання, з точки зору вдосконалення «пізнання» технології та обробки матеріалів.

Зміст навчального посібника відповідає програмі підготовки фахівців вищих навчальних закладів III і IV рівнів акредитації: галузь – 14 Електрична інженерія; спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, та доповнює такі розділи дисциплін як «Електротехнічні матеріали», «Електроматеріалознавство».

Навчальний посібник призначений для студентів електро- і електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів. Може бути також корисний аспірантам та інженерам, що працюють в галузі електро- і радіотехніки.

Іл. 40. Табл. 3. Бібліогр.: 27 назв.

УДК 621.331:315.6:669

© **Колесов С. М.**, Міщенко Т. М., Ляшук В. М., 2017

© Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, редагування, оригінал-макет, 2017

ISBN 978-966-8471-79-7

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ, ЯКІ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ПРИСТРОЯХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ТА ТЕХНОЛОГІЇ ІХ ОБРОБКИ	6
1.1. Загальні відомості про будову та властивості електротехнічних матеріалів	8
1.1.1. Класифікація електротехнічних матеріалів	8
1.1.2. Будова металів	10
1.2. Особливості використання властивостей металів при виготовленні опорних конструкцій контактної мережі	12
1.2.1. Дефекти будови кристалічних ґраток металів	15
1.2.2. Вплив дефектів будови металів на їх міцність	19
1.2.3. Методи зміцнення металів	21
1.2.4. Механічні властивості металів	21
1.3. Методи випробування електротехнічних матеріалів на твердість	26
1.4. Металеві сплави, їх будова і властивості	32
1.5. Будова і властивості залізовуглецевих сплавів	34
1.6. Поняття, сутність і призначення термічної обробки	36
1.7. Будова і властивості сталей	42
1.7.1. Вплив вуглецю і постійної домішки на властивості сталей	43
1.7.2. Загальні відомості, класифікація і маркування вуглецевих сталей	44
1.7.3. Загальні відомості, класифікація і маркування легованих сталей	47
ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЛИВАРНЕ ВИРОБНИЦТВО	57
2.1. Загальні відомості	57
2.2. Основні види лиття	61
2.2.1. Виробництво виливків з алюмінієвих сплавів	66
2.2.2. Виробництво виливків з магнієвих сплавів	66
2.2.3. Виробництво виливків з мідних сплавів	67

2.3. Вимоги до виготовлення арматури і підтримуючих елементів конструкції контактної мережі	68
ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ	72
3.1. Обробка металів тиском (ОМТ)	72
3.1.1. Вплив технології виготовлення феромагнітних сердечників трансформаторів на величину втрат у сталі	72
3.1.2. Загальні відомості	73
3.1.3. Основні види обробки металів тиском	76
3.2. Обробка металів різанням (ОМР)	83
3.2.1. Загальні відомості	83
3.2.2. Основні види обробки металу різанням	89
3.3. Зварювання та різання	95
3.3.1. Загальні відомості	96
3.3.2. Елементи технології виготовлення арматури для залізобетонних опор	98
3.3.3. Дугове зварювання	101
3.3.4. Контактне зварювання	103
3.3.5. Газове зварювання і вогняне різання	104
3.4. Паяння	105
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК	111
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК	113

ПЕРЕДМОВА

Під час виготовлення й ремонту електроустаткування потрібні деталі й вузли, виконані з конкретних матеріалів, що мають певні електричні, магнітні й інші фізико-хімічні властивості, а несучі деталі й конструкції – певні механічні властивості. Тому кожен фахівець, що працює в області конструювання, виробництва й експлуатації електроустаткування, повинен знати, що надійну й безаварійну роботу електроустаткування можна здійснити тільки при правильному виборі електротехнічних матеріалів (ЕТМ), ґрунтуючись на знанні їхніх експлуатаційних характеристик і поведінки в електромагнітному полі.

Цей навчальний посібник «Обробка електротехнічних матеріалів та металознавство на підприємствах залізничного транспорту» призначений для студентів електромеханічних спеціальностей вищих навчальних закладів, що вивчають дисципліни «Електротехнічні матеріали», «Електроматеріалознавство» (ЕМЗ).

Для кращого розуміння досліджуваного матеріалу авторами основна увага приділялася фізичним процесам, що протікають у матеріалах при внесенні їх в електромагнітні поля. Викладаючи відомості про будову й властивості електротехнічних матеріалів, автори використали сучасні фізико-хімічні й електрофізичні уявлення.

Конструкційні матеріали, які використовуються в пристроях електропостачання, та технології їх обробки

До конструкційних матеріалів відносять метали, сплави і неметалічні матеріали, у тому числі і полімерні (природні і синтетичні). Вони широко застосовуються в промисловості та на транспорті і мають великий спектр механічних, електричних та інших фізико-хімічних властивостей. Основним споживачем металів і сплавів є машинобудування. Їх також широко використовують в електро- і радіотехніці, під час виробництва різних за призначенням і конструкцією установок і апаратів; при цьому найбільший об'єм займають кольорові метали і сплави на їх основі. У цих галузях промисловості метали і сплави використовують в ролі як конструкційних, так і електротехнічних матеріалів. Перші застосовують для виготовлення корпусів приладів і апаратів, деталей та арматури контактної мережі і таке інше. Другі використовують як провідникові і магнітні матеріали, виготовлюючи з них дроти і кабелі, осердя трансформаторів, дроселів і таке інше.

У цьому розділі розглянуто будову і механічні властивості металів і сплавів, а також фазові перетворення і структурні зміни в різних типах металевих сплавів залежно від їх складу. Особливу увагу приділено таким поширеним конструкційним матеріалам, як вуглецеві і леговані сталі. Як приклад, розглядаються проблеми старіння і часткового руйнування залізобетонних опор. порушено питання про перспективні типи опор контактної мережі. Ці опори повинні бути, з одного боку, з низькою матеріаломісткістю, легкими, міцними, з іншого – протистояти ударним монтажним навантаженням, мати підвищену гнучкість під час роботи в аварійних режимах (при обриві дротів). У той же час опори повинні бути досить жорсткими під час роботи в нормальних режимах, тобто в напрямку поперек шляху.

Експлуатаційні витрати для металевих опор пов'язані в основному з періодичним фарбуванням. Для зменшення експлуатаційних витрат опори повинні виготовлятися з будь-якої атмосферостійкої сталі або мати довговічне покриття, наприклад цинкове, яке наносять методом гарячого цинкування. Зазначеним вимогам відповідають опори коробчастого типу, зварювані з двох швелерів (рис. 1.1).



Рис. 1.1. Опора коробчастого типу

Такі швелери виготовляються у промисловості як зі звичайної вуглецевої сталі, так і атмосферостійкої, наприклад, 14ХГНДЦ.

За умов цинкування опор зі звичайної вуглецевої сталі приварювання елементів решітки опор необхідно здійснювати встик, щоб між

елементами, що стикаються, не відкладались солі з травильних розчинів. Нові металеві опори мають первісну вартість більшу, ніж залізобетонні. Але вони не потребують експлуатаційних витрат, мають більший термін служби (60...70 років, а можливо, і більше), легко піддаються утилізації.

1.1. Загальні відомості про будову та властивості електротехнічних матеріалів

1.1.1. Класифікація електротехнічних матеріалів

Класифікація електротехнічних металів може здійснюватись за різними ознаками: за об'ємом і частотою використання, за фізико-хімічними властивостями та ін.

За об'ємом і частотою використання в техніці усі метали можна розподілити на технічні і рідкісні. *Технічні* метали – це найчастіше вживані; до них відносяться залізо Fe, мідь Cu, алюміній Al, магній Mg, нікель Ni, титан Ti, свинець Pb, цинк Zn, олово Sn. Решта металів – *рідкісні* (ртуть Hg, натрій Na, срібло Ag, золото Au, платина Pt, кобальт Co, хром Cr, молібден Mo, тантал Ta, вольфрам W та ін.).

Залізо в чистому вигляді використовують надзвичайно рідко. Зазвичай застосовують залізовуглецеві (Fe-C) сплави – сталі і чавуни¹, які утворюють групу *чорних* металів. Інші сплави становлять групу *кольорових* металів. На чорні метали припадає приблизно 85 % усіх вироблюваних металів, а на частку кольорових – 15 %.

За фізико-хімічними властивостями метали можна розподілити на шість таких основних груп.

Магнітні – Fe, Co, Ni; вони мають феромагнітні властивості. Сплави на основі Fe (сталі і чавуни) є головними конструкційними матеріалами; сплави на основі Fe, Co і Ni є основними магнітними матеріалами (феромагнетиками).

Тугоплавкі – метали, температура плавлення $T_{пл}$ яких вища, ніж у Fe (1 539 °C); це W (3 380 °C), Ta (2 970 °C), Mo (2 620 °C),

¹ Затверділі сплави, що містять вуглець від 2,14 до 6,67 % називають *чавунами*.

Cr (1 900 °C), Pt (1 770 °C), Ti (1 670 °C) та ін. Застосовують їх як самостійно, так і у вигляді домішок в сталі, що працюють, зокрема, при високих значеннях температури.

Легкоплавкі – мають $T_{пл}$ нижче 500 °C; до них відносять: Zn (419 °C), Pb (327 °C), кадмій Cd (321 °C), талій Tl (303 °C), вісмут Bi (271 °C), олово Sn (232 °C), індій In (156 °C), Na (98 °C), Hg (–39 °C) та ін. Призначення їх саме різне: антикорозійні покриття, антифрикційні сплави, провідникові матеріали.

З тугоплавких і легкоплавких металів вище названі найбільш поширені, хоча відомі і такі тугоплавкі метали, як, наприклад, реній Re ($T_{пл} = 3\,180$ °C), осмій Os (3 000 °C), ніобій Nb (2 470 °C), а з легкоплавких – літій Li (180 °C), калій K (68 °C), рубідій Rb (39 °C), цезій Cs (28 °C).

Легкі метали мають густину не більше 2,75 г/см³; до них відносять: Al, густина якого (у г/см³) – 2,7, Cs – 1,90, Be – 1,84, Mg – 1,74, Rb – 1,53; Na – 0,97, Li – 0,53 й ін. Ці метали застосовують у виробництві сплавів, які використовують в конструкціях з обмеженнями в масі.

Благородні – до них в електротехніці відносять: Au, Ag, Pt і паладій Pd, а також метали платинової групи: іридій Ir, родій Rh, осмій Os, рутеній Ru. Ці метали і сплави на їх основі мають високу хімічну стійкість, у тому числі і при підвищених температурах. Їх використовують у виробництві відповідальних контактів, виводів інтегральних мікросхем та інших напівпровідникових приладів, термометрів опору і термопар, нагрівальних елементів, що працюють в особливих умовах.

Рідкісноземельні – лантаноїди; їх застосовують як присадки в різних сплавах. Сплави (RM) металів групи заліза (М) з рідкісноземельними елементами (R) є перспективними магнітотвердими матеріалами.

Класифікують метали і за іншими ознаками. Наприклад, в електротехніці їх розподіляють за значенням електропровідності: на метали, що добре і погано проводять електричний струм. До перших відносять більшість металів, вони пластичні і добре проводять електричний струм; до других – елементи V групи періодичної системи Д. І. Менделєєва: вісмут Bi, сурма Sb, миш'як As, які погано проводять струм і крихкі, їх іноді називають *напівметалами*.

1.1.2. Будова металів

Метали зазвичай мають кристалічну будову. Елементом кристалічної ґратки металів, що повторюється, є елементарна комірка (рис. 1.2, *а–в*), вершини якої називають *вузлами*, а відстань між двома сусідніми вузлами – *періодом* або *постійною ґратки*.

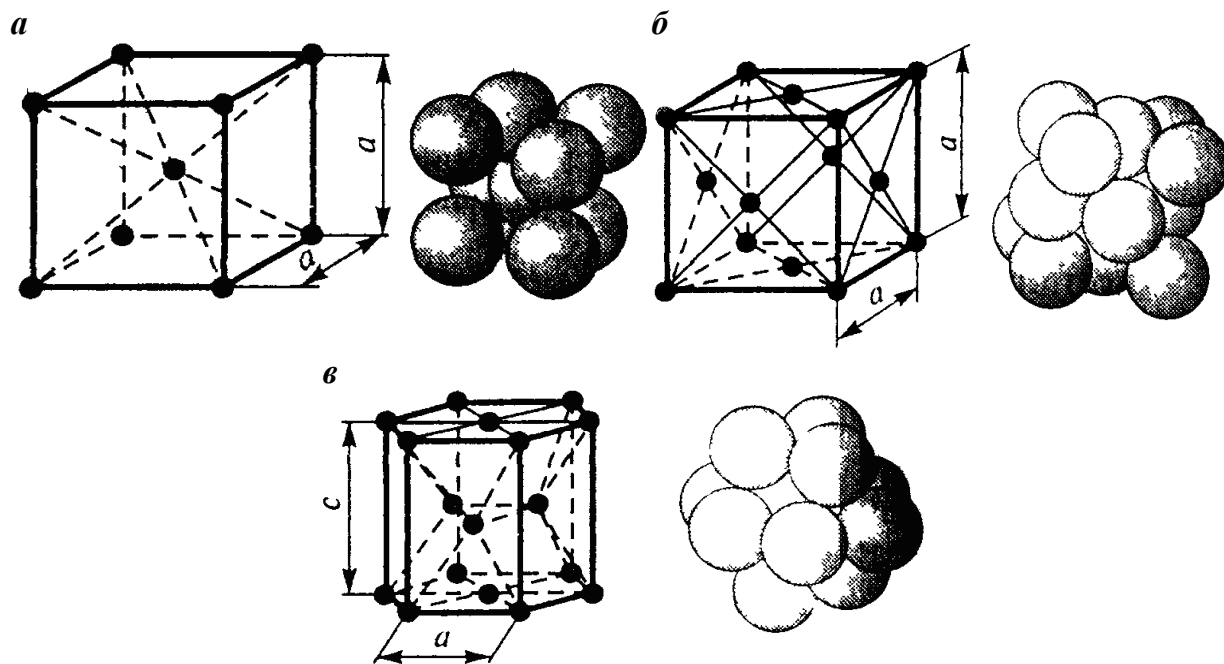


Рис. 1.2. Основні типи елементарних комірок кристалічних ґраток металів і схеми їх упаковки атомами:

а – об’ємноцентрована кубічна ґратка (о. ц. к.); *б* – гранецентрована кубічна ґратка (г. ц. к.);
в – гексагональна щільноупакована ґратка (г. щ. у.)

На рис. 1.2 позначено: *a* і *c* – періоди ґраток (відстані між центрами сусідніх атомів комірки).

У вузлах елементарних комірок знаходяться позитивні іони (атоми), що коливаються щодо свого рівноважного положення з деякою частотою і амплітудою. Із збільшенням температури спочатку частота, а потім амплітуда цих коливань зростають. У просторі між вузлами кристалічної ґратки знаходяться колективізовані електрони (електронний газ), що утворилися з частини одно- двовалентних електронів, які відчепилися від атомів. Іони утримуються у вузлах ґратки як під дією металевого зв’язку, зумовленого одночасною кулонівською взаємодією між колективізованими електронами і позитивни-

ми іонами, які знаходяться у вузлах кристалічної ґратки, так і звичайних ковалентних зв'язків. Під дією металевих зв'язків позитивні іони розташовуються в металах на деякій рівноважній відстані, відповідній мінімальному потенціалу енергії системи, утворюючи кристалічну ґратку. Завдяки колективізованим електронам метали і металеві сплави мають електро- і теплопровідність, характерний металевий блиск (блиск зумовлений віддзеркаленням світлових променів від колективізованих електронів) і деякі інші, суто металеві, властивості. У кожного металу елементарна комірка має певні геометричні форми і розміри, які і визначають тип ґратки.

У о. ц. к. ґратці атоми знаходяться у вершинах куба і один атом в центрі куба. Такі ґратки мають, наприклад, α -Fe, Cr, W, Мо-пермалой, β -Ti, Nb, Ta, Li. У г. ц. к. ґратці атоми розташовані у вершинах куба і в центрі кожної грані. Цей тип ґратки мають, наприклад, метали: γ -Fe, Ni, Ag, Au, Pb, Cu, β -Co. У г. щ. у. ґратці атоми розташовані у вершинах і центрі шестигранних основ призми і три атоми в середній площині призми, утворюючи рівносторонній трикутник. Такі ґратки, наприклад, мають: Zn, Cd, Be, Re, α -Co, α -Ti. Кристалічні ґратки металів незалежно від їх типу є щільно упакованими, тобто мають високу густину. Так в о. ц. к. ґратці атоми займають 68 % об'єму, а в г. ц. к. і г. щ. у. – 74 %.

З наведених прикладів бачимо, що деякі метали можуть мати різні типи ґратки, наприклад, Fe (α -Fe і γ -Fe), Co (α -Co і β -Co). Здатність металу змінювати тип ґратки називають *алотропією* (*поліморфізмом*). Механічні і багато інших властивостей металевих кристалів різні уздовж різних напрямків кристалографічних осей елементарних ґраток, тобто вони мають анізотропію властивостей. Наприклад, в монокристалі з о. ц. к. ґраткою властивості уздовж ребер кубів відрізняються від властивостей уздовж їх діагоналей, оскільки уздовж ребра в комірці знаходяться два атоми, а уздовж діагоналі – три. Проте реальні метали є *полікристалічними* тілами, що складаються з величезної кількості різноорієнтованих дрібних зрощених кристалів. Такі кристали називають *кристалічними зернами* або просто *зернами*, або *кристалітами*. За рахунок різної орієнтації анізотропних зерен властивості полікристалічного тіла у всіх напрямках усереднюються. В результаті реальні метали проявляють ізотропність фізичних, зокрема механічних, властивостей. Анізотропію властивостей можна частково відновити шляхом текстурування.

Текстурування – це деяка впорядкованість в орієнтації кристалічних зерен, яка досягається спеціальною обробкою (наприклад, плющенням з подальшим відпалом) металевих конструкцій в холодному стані. Наприклад, під час проектування конструкцій металевих опор для поліпшення магнітних властивостей осердів деякі марки сталі текстурують на ребро.

1.2. Особливості використання властивостей металів при виготовленні опорних конструкцій контактної мережі

Експлуатацію в умовах з несприятливими кліматичними особливостями (умовами) необхідно враховувати при визначенні прогнозованих термінів служби елементів конструкції контактної мережі. Оцінку доцільно виконувати окремо по основних групах виробів, складових контактної мережі.

До постійних компонентів слід відносити опорні й підтримуючі конструкції, проводи, які визначають термін служби контактної мережі в цілому. Їх загальна вартість становить близько 95 % загальної вартості контактної мережі рис. 1.3.

До змінних компонентів можна віднести струни, електричні з'єднання, струмоведучу арматуру, ізолятори, які за своєю конструкцією та умовами експлуатації поки не можуть забезпечити надійну роботу контактної мережі без обслуговування на повний термін служби.

Аналіз пошкоджуваності компонентів та обсягів їх заміни дозволяє ставити завдання щодо наближення термінів служби основних компонентів до 50 років, змінних компонентів – 25 років, тобто половинної кратності, а також необхідності підвищення їх надійності.

Вирішення цього завдання є технічно можливим, але потребує підвищення вартості контактної мережі. Збільшення вартості економічно виправдано, якщо її визначати з врахуванням витрат на обслуговування та ремонт на весь життєвий цикл.

У вартість слід включати такі витрати:

- початкову вартість;
- витрати на обслуговування протягом терміну експлуатації;



Рис. 1.3. Розподіл вартості і пошкоджень за елементами контактної мережі (%)

- витрати на заміну за результатами діагностики до досягнення терміну служби;
- витрати на заміну після закінчення терміну служби, тобто рециклінг.

Витрати на рециклінг будуть найменші, якщо термін служби основних компонентів буде єдиним. Оптимальною слід визнати конструкцію контактної мережі з найменшими сумарними витратами до наступного терміну модернізації.

Аналіз пошкоджень свідчить, що значна їх частина відбувається через недосконалість конструкції контактної мережі за діючими проектами.

Підвищення надійності КС-160 можна досягти за рахунок:

- задання розрахункових умов важчих, ніж у попередніх проектах, та відповідних умов, в яких працює понад 90 % експлуатаційної довжини контактної мережі;
- розрахунку конструкцій на діючі максимальні навантаження;
- урахування змін навантажень від усіх факторів, що впливають, та встановлення вимог щодо допустимих прирощень;
- уточнення інтервалу температур;
- обліку нагріву проводів струмами навантаження аж до гранично допустимої температури 95 °С. Відповідно до умов експлуатації контактна підвіска може виконуватися для інтервалів температур 105, 130 і 135 °С;
- використання таблиць і графіків поздовжнього і горизонтального регулювання, що враховують граничні температурні переміщення всіх вузлів підвіски, що виключає необхідність сезонного регулювання і можливість ушкоджень при крайніх значеннях температур повітря і нагрівання проводів;
- застосування розробленого порядку розрахунку довжин анкерних ділянок і встановлених вимог щодо допустимих відхилень натягу проводів;
- зниження натягу несучого троса за умови досягнення кращих показників нерівномірності еластичності, що дозволяє знизити і кількість обривів тросів;
- застосування підтримуючих конструкцій, розроблених за умови максимального робочого навантаження на ізолятор, що не перевищує 40 % нормованого руйнівного навантаження.

Основним напрямком подальшої роботи з підвищення надійності є розробка нових вузлів із застосуванням арматури сучасної конструкції, що забезпечує безвідмовну роботу без обслуговування на весь період експлуатації.

Більшість виробів арматури цим основним вимогам не відповідає. Тому питома вага пошкоджень по арматурі складає до 20...30 % від загальної кількості пошкоджень.

Необхідно враховувати особливості кристалічних ґраток конструкційних матеріалів.

1.2.1. Дефекти будови кристалічних ґраток металів

Реальні кристалічні тіла мають важливу особливість будови – наявність структурних неоднорідностей, так званих **дефектів**. До дефектів відносять будь-які порушення періодичності будови кристалічної ґратки: теплові коливання вузлів, наявність вакансій і атомів (іонів), домішок у вузлах і між вузлами ґратки, механічно напружені ділянки, тріщини, пори і таке інше (рис. 1.4).

Всі дефекти можна розподілити на: точкові, лінійні, поверхневі і об'ємні. Дефекти (наприклад, точкові і об'ємні) присутні також і в аморфних тілах.

Точкові (нульмірні) дефекти існують у вигляді:

- *вакансій* (вільні вузли) – дефекти Шотки (рис. 1.5, а, 1);
- *зсувів* (дислокацій) атома (іона) з вузла ґратки у простір між вузлами – дефекти Френкеля (рис. 1.5, а, 2);
- *проникнення* стороннього атома між вузлами ґратки (рис. 1.5, б);
- *заміщення* власного атома у вузлі ґратки атомом домішки (рис. 1.5, в).

Вакансії (і дислокації) утворюються під дією теплової енергії і пластичної деформації.

Тому, чим вище температура і ступінь деформації металу, тим більше вакансій і тим частіше вони переміщаються від одного вузла до іншого. При цьому атом, що йде з вузла ґратки, переміщається естафетно від вузла до вузла, поки не вийде на поверхню кристалу (наприклад, поверхня кристалічного зерна) або навіть випарується з його поверхні. Тому біля поверхні зерен дефектів більше, ніж в їхньому об'ємі.

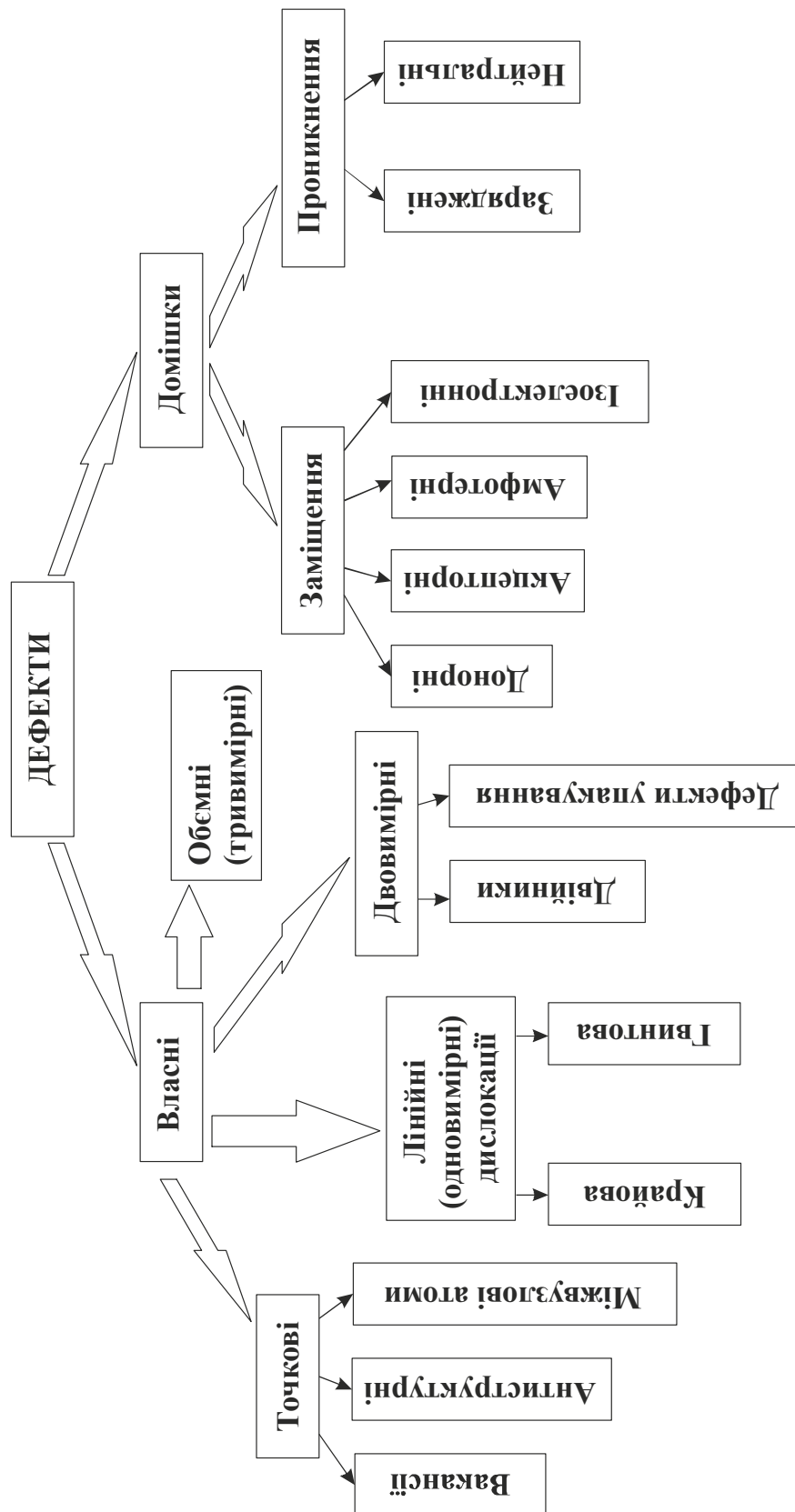


Рис. 1.4. Класифікація дефектів металів

Кристалічна ґратка в місцях розташування вакансій і особливо сторонніх атомів, прониклих у вузли або міжвузловини ґратки, деформована (спотворена), що призводить до виникнення місцевих внутрішніх напружень і істотної зміни всього комплексу фізико-хімічних властивостей: електричних, магнітних і механічних. При проникненні атомів, особливо сторонніх, в міжвузловину ґратки деформуються сильніше, ніж за наявності вакансій. І чим більша різниця між розмірами атома проникнення та атома цієї ґратки, тим сильніше.

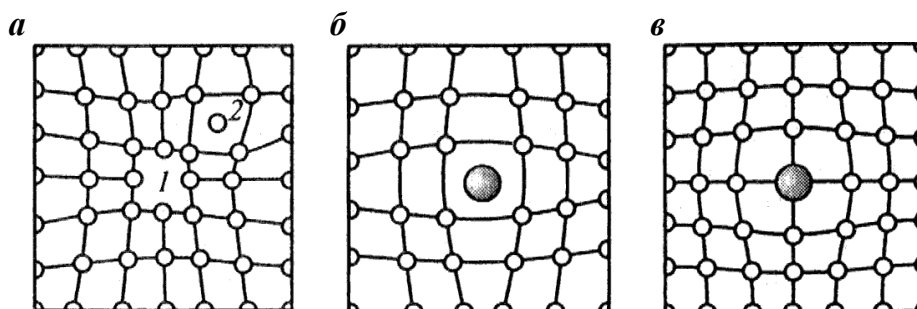


Рис. 1.5. Точкові дефекти

Точкові дефекти у металевих провідниках впливають на їх питомий електроопір, у діелектриків фактично зумовлюючи величину, а у напівпровідників – не тільки величину, але й, що дуже важливо, її тип. Кількість дефектів, як вже зазначалося, з підвищенням температури і ступеня пластичної деформації різко зростає. Наприклад, концентрація вакансій n/N (де n і N – кількість вакансій і атомів в одиниці об'єму ґратки відповідно) в кристалі при кімнатній температурі дорівнює 10^{14} , при $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ – до 10^5 , при $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ – до 10^2 .

Лінійні (одновимірні) дефекти кристалічної ґратки називаються дислокаціями (dislocation – зсув). Як показують електронно-мікроскопічні дослідження, навіть монокристал складається з великої кількості дрібних блоків, що мають розміри $10^{-8} \dots 10^{-6}$ м, тобто на 3–4 порядки менше, ніж у кристалічного зерна. Кристалічні ґратки в кожному блоці достатньо досконалі, але дезорієнтовані одна відносно іншої – повернені (зміщені) на невеликі кути, вимірювані мінутами або навіть секундами. Оскільки зсуви блоків малі за величиною і хаотичні за напрямком, тому кристалографічна орієнтація всього монокристалу не зазнає істотних змін. Найбільш простими видами дислокацій є крайові і гвинтові дислокації. Їх можна уявити: надріжемо ідеальний кристал і всередину щілини, що утворилася,

вставимо (або видалимо з неї) «зайву» атомну площину (екстраплощину). Це приведе до утворення крайової дислокації (рис. 1.6, *а*). Якщо краї надрізу перемістимо паралельно площині надрізу на величину, кратну періоду ґратки, то отримаємо гвинтову дислокацію (рис. 1.6, *б*). Важливою характеристикою дислокацій є їх густина – кількість виходів дислокацій на одиницю площі. У реальному металі густина дислокацій величезна і складає від 10^4 до 10^{12} см⁻².

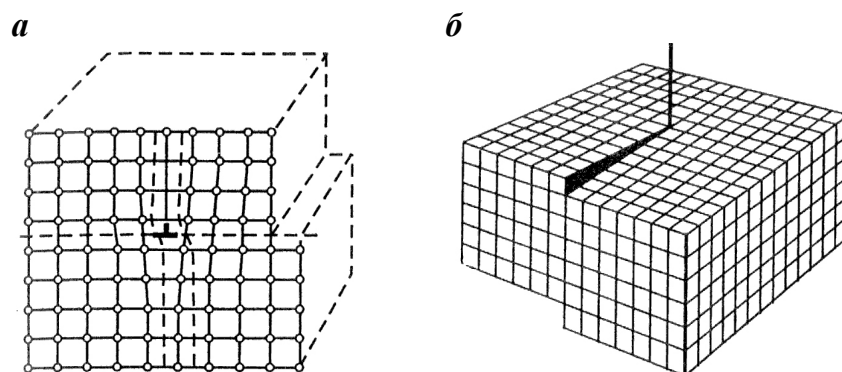


Рис. 1.6. Лінійні дефекти:

а – крайова дислокація; *б* – гвинтова дислокація

Можна вважати, що, якщо точкові дефекти здійснюють переважно вплив на питому електропровідність, то від лінійних дефектів залежать переважно механічні характеристики металу.

Кристалічне зерно

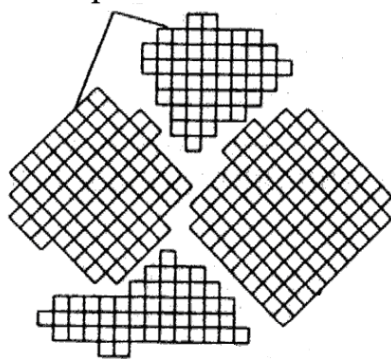


Рис. 1.7. Схематична будова полікристалічних тіл

чуються також різні

Поверхневі (двовимірні) дефекти
дислоковані на межі (у поверхневому шарі) кристалічних зерен із створюючих їх блоків. На межі зерен атоми розташовані менш правильно, ніж в об'ємі зерна. Межа має ширину 5...10 міжатомних одиниць і є перехідною областю з однієї кристалографічної орієнтації в іншу. Кристалічні зерна дезорієнтовані і повернені одне щодо іншого на декілька градусів (рис. 1.7).

На межі зерен скупчується велика кількість дислокацій і вакансій. Такі ж дефекти, але в меншій кількості, скупчуються і на межі блоків в зерні. На межі зерен скупчуються також різні оксиди, дрібні пори і таке інше, різко погіршуючи механічні властивості металів. Тугоплавкі включення,

навпаки, знаходяться усередині кристалічних зерен; вони є центрами кристалізації, і при цьому утворюється дрібнозерниста структура, при якій істотно покращуються механічні характеристики.

Легкоплавкі і тугоплавкі включення фактично є тривимірними дефектами.

Об'ємні (тривимірні) дефекти мають порівняно великі розміри у всіх трьох вимірах. До цього виду дефектів відносять порожнечі (пори і тріщини), сторонні включення (наприклад, легкоплавкі неметалічні домішки), включення іншої кристалографічної модифікації і таке інше.

Механічна міцність металів залежить від величини сумарної питомої поверхні зерен, яка, у свою чергу, залежить від розміру кристалічного зерна і його форми. Із збільшенням сумарної питомої поверхні зерен зростає густина дислокацій і концентрація точкових дефектів, що призводить до зміни механічних, електричних і магнітних властивостей металевих провідників і феромагнетиків.

1.2.2. Вплив дефектів будови металів на їх міцність

На механічні властивості металів значно впливають лінійні і поверхневі дефекти. На межах зерен металів скупчуються легкоплавкі неметалічні домішки (наприклад, сульфід FeS і фосфід Fe_3P , оксиди, дрібні пори), які різко погіршують механічні властивості. Тугоплавкі включення, наприклад MnS ($T_{\text{пл}} = 1620^\circ\text{C}$), Al_2O_3 ($T_{\text{пл}} = 2050^\circ\text{C}$), навпаки дифундують усередину зерна, стають центрами кристалізації, в результаті чого утворюється дрібнозерниста структура, яка призводить до істотного поліпшення механічної міцності $\sigma_{\text{в}}$.

Наявність в реальних кристалах великої концентрації дислокацій і вакансій призводить до значного зниження механічної міцності $\sigma_{\text{в}}$. Наприклад, межа міцності на зсув у реальних кристалах на 3–4 порядки нижче за розрахункову міцність ідеальних кристалів. Або інший приклад – у технічно чистого відпаленого зразка заліза, що містить 0,1...0,2 % домішки, межа міцності на розрив $\sigma_{\text{в}} = 280 \text{ МПа}$, а у ниткоподібних кристалах («вусів») чистого Fe із змістом домішки 0,001 %, у яких дефекти зведені до мінімуму (практично немає) – $\sigma_{\text{в}} = 13\,360 \text{ МПа}$; тобто у «вусів» більше приблизно у 48 разів, ніж

у технічно чистого Fe. Проте у сталі (залізо «зіпсоване» вуглецем і іншими присадками, і тому має високу концентрацію дефектів) σ_v більше, ніж у чистого заліза в 6...8 разів і має величину 1 800...2 200 МПа.

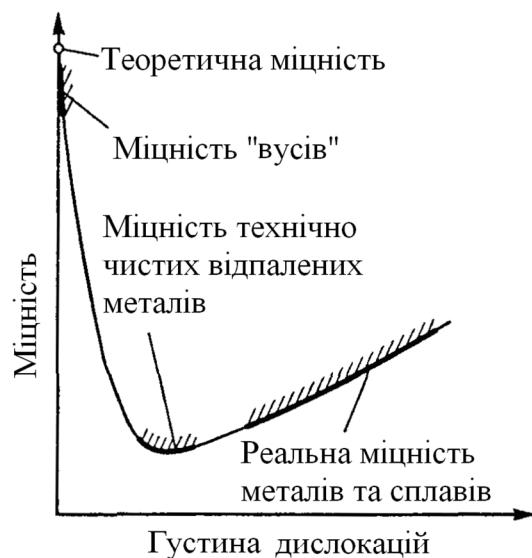


Рис. 1.8. Залежність механічної міцності металів від концентрації дефектів (густина дислокацій)

Наведені цифри показують, що найвищу міцність має залізо, яке містить мінімальну або максимальну концентрацію дефектів. Отже, із збільшенням концентрації дефектів (густини дислокацій) механічна міцність спочатку знижується до якогось значення, а далі зростає (рис. 1.8). Це явище пояснюється **дислокаційною теорією пластичної деформації**. Розглянемо її стисло.

Найважливішою властивістю дислокацій є їх легка рухливість і активна взаємодія між собою й іншими дефектами ґратки. Рух дислокацій в кристалі ускладнює цю взаємодію і тим самим зміцнює її. Із збільшенням пластичної деформації кристалу густина дислокацій зростає в тисячі, а іноді — в мільйони разів (у недеформованих металевих кристалах в 1 см^2 міститься $10^6 \dots 10^8$ дислокацій). При цьому зростає також концентрація інших дефектів, які ускладнюють переміщення дислокацій, що зумовлює вищу напруженість. В результаті — кристал зміцнюється. Особливо сильне гальмування руху дислокацій надає поверхня зерен і блоків в них.

Таким чином, дефекти кристалічної ґратки металу є тією перешкодою, яка ускладнює рух дислокацій і приводить до зміцнення металу. Тому, щоб підвищити міцність металів необхідно або зменшувати концентрацію дефектів в них, отримуючи бездефектні кристали, наприклад ниткоподібні кристали («вуса»), або створювати полікристалічні однорідні тіла з підвищеною густиною дислокацій і концентрацією інших дефектів, рухливість яких обмежують шляхом легування, загартування або наклепу металу. При цьому густина дислокацій не повинна перевищувати $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$, оскільки при більшій її густині метал стає дуже твердим і крихким.

1.2.3. Методи зміцнення металів

Легування – це процес уведення в метал невеликої кількості спеціальних домішок, які призводять до значних його структурних змін. Легуючі домішки взаємодіють з дислокаціями і ускладнюють їх рух, в результаті метал зміцнюється, тобто значення межі міцності на розрив σ_b , твердості і зносостійкості зростають, але одночасно відносні подовження δ і звуження перед розривом і питома електропровідність γ знижуються (див. п. п. 1.6.3).

Загартування – це процес термічної обробки, який полягає в нагріванні металу вище температури фазового перетворення в твердому стані, витримці при цій температурі і контрольованому прискореному охолодженні. В результаті цих операцій в металі збільшується концентрація дефектів, зокрема густина дислокацій, а також утворюється дрібнозерниста структура, тому протяжність межі між зернами різко зростає (збільшується сумарна питома поверхня зерен). Сама ж границя ускладнює прохід для дислокацій, що спільно із збільшенням концентрації дефектів призводить до ускладнення їх руху і, отже, до зміцнення металу.

Наклеп – це процес пластичної деформації металу в холодному стані, в результаті якого збільшуються густина дислокацій і концентрація інших дефектів, що призводить до ускладнення їх руху і, отже, до зміцнення металу. Якщо при цій обробці дислокації переплітаються між собою, то виникають додаткові причини, які ускладнюють їх рух. На цьому явищі і було засновано виробництво дамаської сталі. Наклеп виникає в процесі обробки металевих заготовок шляхом їх плющення, кування або волочіння в холодному стані.

Вказані технологічні операції (легування, загартування, наклеп) створюють оптимальну концентрацію дислокацій. Відомо, що найбільше зміцнення металів досягається при густині дислокацій порядку $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-2}$ на 1 см^2 , у той час як у недеформованих металевих кристалах вона складає $10^6 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$ на 1 см^2 .

1.2.4. Механічні властивості металів

Металам властиві *висока пластичність, тепло- і електропровідність*, вони також мають характерний металевий блиск. Властивостями металів володіють близько 80 елементів періодичної системи

Д. І. Менделєєва. Для металів і металевих сплавів, особливо конструкційних, важливе значення мають механічні властивості, основними з яких є міцність, пластичність, твердість та ударна в'язкість.

Під дією зовнішнього навантаження в твердому тілі виникають напруження і деформація.

Напруження σ , Па – це навантаження (сила) P , віднесене до первинної площі поперечного перерізу S_0 зразка:

$$\sigma = P/S_0.$$

В одиницях вимірювання СІ навантаження P вимірюють в Н, а площу S_0 в м^2 , тоді σ буде в Па.

Деформація – це зміна форми і розмірів твердого тіла під дією зовнішніх сил або в результаті фізичних процесів, що виникають в тілі при фазових перетвореннях, усадці і таке інше. Деформація може бути *пружна* (зникає після зняття навантаження) і *пластична* (зберігається після зняття навантаження). При навантаженні, яке зростає, пружна деформація, як правило, переходить в пластичну і далі зразок руйнується.

Залежно від способу зміни навантаження методи випробувань механічних властивостей металів, сплавів та інших матеріалів розподіляють на статичні, динамічні і знакозмінні.

Однією з найважливіших характеристик металевих виробів є їх міцність. **Міцність** – здатність металів чинити опір деформації або руйнуванню при статичному, динамічному або знакозмінному навантаженнях. Міцність металів при статичних навантаженнях випробовують на розтягання, стиск, згин і крутіння. Випробування на розрив є обов'язковим. Міцність при динамічних навантаженнях оцінюють *питомою ударною в'язкістю*, а при знакозмінних навантаженнях – *міцністю від утомленості*.

Міцність при випробуванні на *розтягання* оцінюють такими характеристиками (рис. 1.9):

- межею міцності на розрив $\sigma_{\text{в}}$;
- межею пропорційності $\sigma_{\text{пц}}$;
- межею текучості $\sigma_{\text{т}}$.

На рис. 1.9 позначено: P – навантаження (сила), Н; Δl – абсолютне подовження, мм.

ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК

- А**
- Алотропія 12
Аустеніт 38
- В**
- В'язкість 24
 питома ударна 22, 24
Верстат
 – поздовжньо-стругальний 87
 – поперечно-стругальний 87
Випор 58
Відпал 36
 другого роду 36
 першого роду 36
Відпуск 40
 високий 40
 мартенситом 40
 низький 40
 середній 40
 сорбітом 41
 троситом 40
Вільне кування 79
Включення неметалічне (НМВ) 43
Волочіння 77
- Г**
- Глибина різання 85
- Г**
- Гратка 10
- період 10
постійна 10
- Д**
- Дефект 15
Дефекти
 – лінійні (одновимірні) 16
 – об'ємні (тривимірні) 18
 – поверхневі (двовимірні) 17
 – точкові (нульмірні) 15
 – – вакансія 15
 – – заміщення 15
 – – зсув 15
 проникнення 15
Деформація 21
 пластична 22
 пружна 22
Дислокація 16
 гвинтова 17
 крайова 17
Довбання 80, 87
Додаток 58
Дуга зварювальна 98
- Е**
- Електрод 98
- З**
- З'єднання зварювальне
 – внапуск 96
 – кутове 96

- стикове 96
- таврове 96
- Загартування 20, 38
 - поверхнєве 41
- Залізо 34
- Зварюваність 96
- Зварювання 92
 - газове 100
 - механічне 96
 - плавленням 92
 - стикове 100
 - термічне 96
 - термомеханічна 96
 - тиском 95
 - точкове 100
 - шовне 100
- Зенкерування 80, 87
- Зенкування 80, 88
- Зерно кристалічне 12
- Зносостійкість 25

К

Кристаліти 12

Л

Легування 20

Ледебурит 38

Ливарне виробництво 55

Лиття

- в металеві форми (кокели) 62
- в оболонкові форми 60
- в піщано-глинисті форми 59
- відцентрове 63
- під тиском 63
- по виплавлених моделях 61

М

Мартенсит 39

Межа

- міцності на розрив 22
- пропорційності 23
- текучості 23

Метал

- благородний 10
- кольоровий 9
- легкий 10
- легкоплавкий 9
- магнітний 9
- рідкісний 9
- рідкісноземельний 10
- технічний 9
- тугоплавкий 9
- чорний 9

Метизи 77

Міцність 22

- від утомленості 22, 25
- границя витривалості 25
- на розтягування 22

Н

Навантаження статичне 23

Наклеп 21, 70

Напівметали 10

Напруження 21

Нормалізація 37

О

Обробка

- термічна 35
- термомеханічна 41
- хіміко-термічна 41

Обробка металів різанням (ОМР) 80

Обробка металів тиском (ОМТ) 69

- горяча 73
- холодна 70

П

Паяння 101

- бесфлюсове 106

Перліт 38

Пластичність 23

- відносне звуження 23
- відносне подовження 23

Подача 85

Покриття електрода

- газотвірне 98

- зв’язувальне 98
- легуюче та стабілізуюче 98
- стабілізуюче 98
- шлакотвірне 98

Поліморфізм 12

Полірування 91

Пресування 77

Припої 102

м’які 102

тверді 105

Прокат

– листовий 76

– періодичний 77

– спеціальний 77

– трубний 77

Прокатка 74

Профіль 74

простий 76

фасонний 76

Пружність 23

Р

Рідкоплинність 55

Різець 81

Розгортання 80, 88

Розчин

– твердий 32

– заміщення 32

– з необмеженою розчинністю 32

– з обмеженою розчинністю 33

– проникнення 33

Рух

– головний 84

– подачі 84

С

Свердлення 80, 87

Сорбіт 38

Сортамент 74

Сплав 32

Сталь 41

високовуглецева 44

вуглецева 42

– інструментальна 45

– конструкційна 44

– – групи А 44

– – групи Б 44

– – групи В 45

– – звичайної якості 44

– – якісна 45

– спеціального призначення 45

– – для мостобудування 45

– – для сильнотягнутих коліс 46

– – рейкова 46

загартовувана 39

кипляча 43

легована 42, 46

– високолегована 47

– інструментальна 48

– – високолегована (швидкорізальна) 49

– – корозійностійка 49

– – – хромиста 50

– – – хромоникелева 50

– – твердосплавна 49

– конструкційна 47

– – поліпшена 48

– низьколегована 47

– середньовуглецева, поліпшена

– – крем’яниста 48

– – марганцева 48

– – хромиста 48

– – хромокремниста 48

– – хромомарганцева 48

– – хромомарганцевокремниста 48

– середньолегована 47

леговані

– середньовуглецева, поліпшена

– – хромонікелева 48

напівспокійна 43

низьковуглецева 44

поліпшена 41

прожарюваність 40

середньовуглецева 44

спокійна 43

Стругання 80, 87

Стружка 83

зливна 84

надлому (відриву) 84
суставчаста 84
Суміш
– стрижнева 59
– формувальна 59

Т

Твердість 23
метод Брінелля 26
метод Віккерса 30
метод Польді 31
метод Роквелла 28
Тексткрування 12
Теорія дислокаційної пластичної
деформації 19
Тіла полікристалічні 12
Точіння 80, 85
Тростит 39

У

Усадка ливарна 57
Утома металу 25
Утомний злам 25

Ф

Фаза сплаву 32
розчин
– рідкий 32
– твердий(хімічні сполуки) 32
Ферит 38
Флюси 105
активні (кислотні) 105
антикорозійні 106
безкислотні 105
Форма
– ливарна 57
– оболонкова (напівформа) 60

– піщано-глиниста 59
– постійна 58
– разова 58

Фреза

– двокутова 90
– дискова 90
– кінцева 90
– модульна дискова 90
– однокутова 90
– пазова 90
– пальцева 90
– торцева 90
– фасонна 90
– циліндрична 90

Фрезерування 80, 89

Х

Холодноламкість 24, 42
критична температура крихкості 24
порогом 24

Ц

Цементит 38

Ч

Чавун 9
сірий 66
Червоноламкість 42

Ш

Швидкість різання 85
Шліфування 80, 91
Штамп 79
Штамування 79
листова 80
об'ємне 79

Для нотаток

Для нотаток

Для нотаток

Навчальне видання

Колесов Святослав Миколайович

Міщенко Тетяна Миколаївна

Ляшук Віталій Михайлович

Обробка електротехнічних матеріалів та металознавство на підприємствах залізничного транспорту

Навчальний посібник

Редактор *О. М. Врублевська*

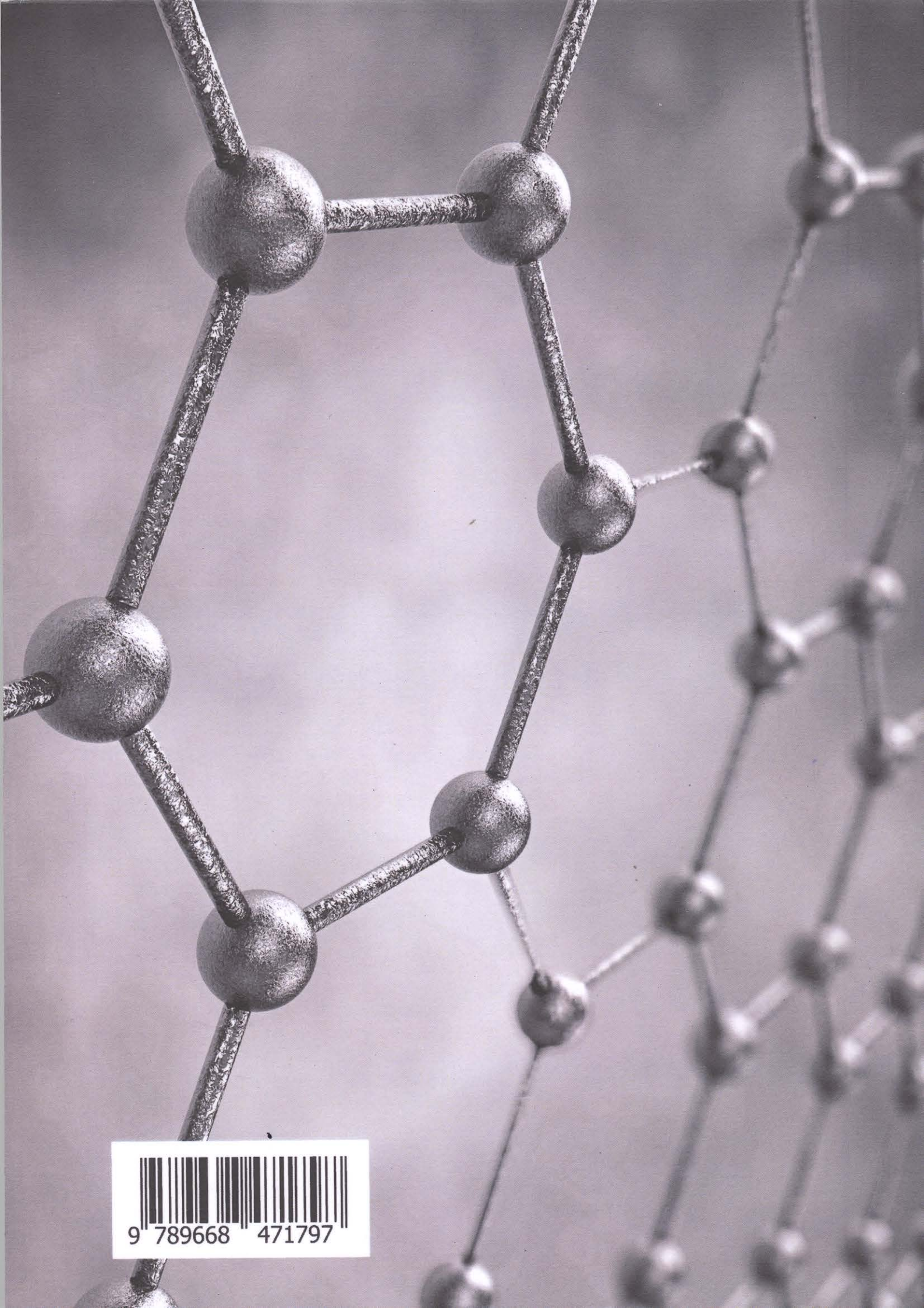
Комп'ютерна верстка *О. М. Гончаренко*

Формат 60×84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 6,98. Обл.-вид. арк. 7,53.

Тираж 300 пр. Зам. №

Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
Дніпропетровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010



9 789668 471797