



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Центральноукраїнський національний
технічний університет

Кафедра матеріалознавства та
ливарного виробництва

В.М. КРОПВНИЙ, О.В. КУЗИК,
А.В. КРОПВНА, Д.О. МІТЕВ

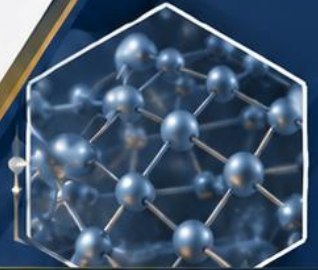
ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

За редакцією професора Кропівного В.М.

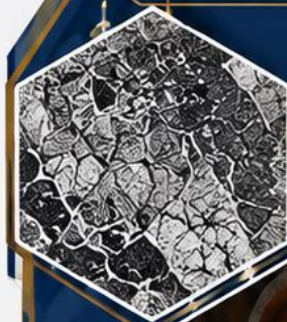


Кропивницький
2026



1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ



2

МЕТОДОЛОГІЯ ТА МЕТОДИ
ДОСЛІДЖЕНЬ



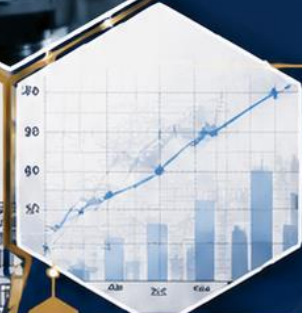
3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ
ДОСЛІДЖЕННЯ У
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ



4

ОБРОБКА ТА АНАЛІЗ
РЕЗУЛЬТАТІВ



5

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДОСЛІДЖЕНЬ У НАУКОВИЙ ОБІГ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Центральноукраїнський національний технічний університет

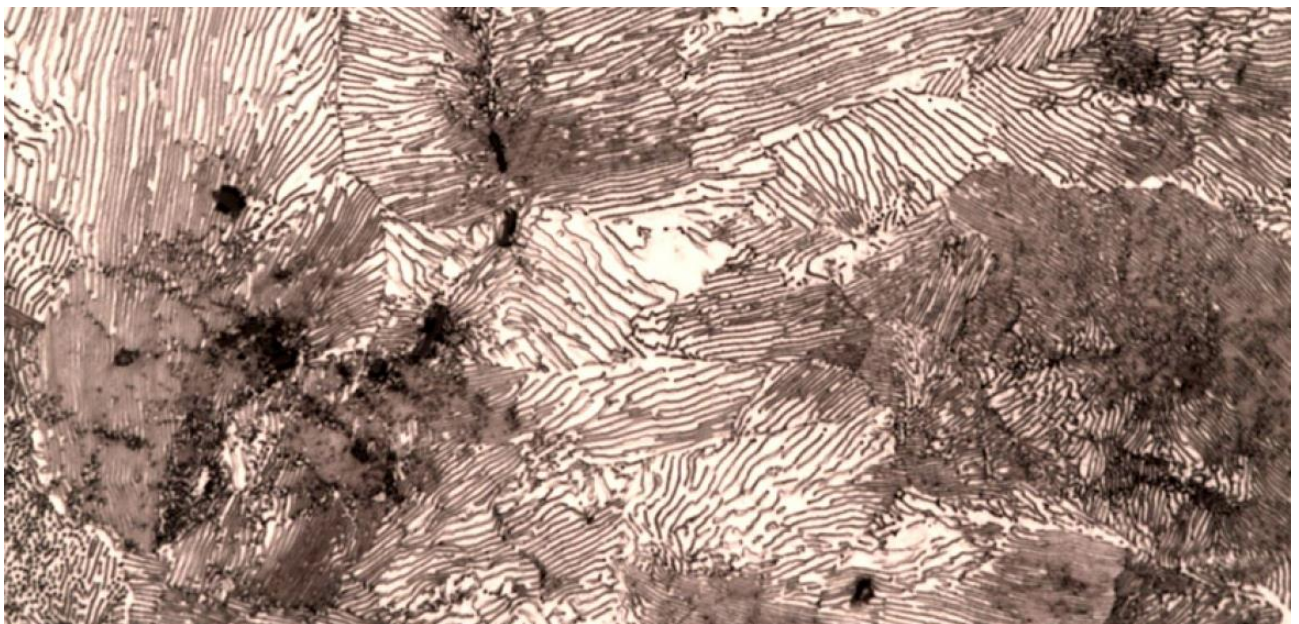
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

В.М. КРОПІВНИЙ, О.В. КУЗИК, А.В. КРОПІВНА, Д.О.МІТЄВ

ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

Навчальний посібник

За редакцією професора Кропивного В.М.



Кропивницький 2026

Основи наукових досліджень у матеріалознавстві. Навчальний посібник / В.М. Кропівний, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, Д.О.Мітєв // Загальна редакція В.М. Кропівного. – Кропивницький: ЦНТУ, Електронне видання, 2026. – с. 339

У навчальному посібнику розглянуто розвиток науки і техніки, зокрема у галузі матеріалознавства. Розглянуто основні методи теоретичних та експериментальних досліджень. Висвітлено відомості про наукові установи, наукові кадри, а також види та порядок організації й виконання науково-дослідних робіт.

Навчальний посібник призначений для опанування курсу «Основи наукових досліджень у матеріалознавстві» студентами спеціальності «Матеріалознавство», а також для методичного забезпечення їхньої науково-дослідної роботи.

Укладачі:

Кропівний В. М. – к.т.н., проф., каф. "МЛВ" ЦНТУ;

Кузик О. В. – к.т.н., доц. завідувач каф. "МЛВ" ЦНТУ;

Кропівна А. В. – к.т.н., доц. каф. "МЛВ" ЦНТУ;

Мітєв Д.О. – аспірант каф. "МЛВ" ЦНТУ.

*Друкується згідно рішення Вченої ради Центральноукраїнського
національного технічного університету
(Протокол № 10 від 25.05.26р.)*

Рецензенти: Філімоніхін Г.Б. – д.т.н., проф., завідувач кафедри деталей машин та прикладної механіки ЦНТУ;

Глушкова Д.Б. – д.т.н., проф., завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства імені О. М. Петриченка Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

© Центральноукраїнський національний
технічний університет, 2026

© Кропівний В.М., Кузик О.В.,
Кропівна А.В., Мітєв Д.О 2026

ЗМІСТ

Тема	стор.
ВСТУП.....	5
1. НАУКА: ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ОСНОВНІ КАТЕГОРІЇ.....	10
1.1. Характеристика науки.....	10
1.2. Пізнавальна діяльність у процесі наукового пізнання.....	14
1.3. Еволюція розвитку людства та промислового виробництва.....	18
1.4. Становлення та сучасний розвиток матеріалознавства.....	27
1.5. Понятійно - категоріальний апарат науки.....	39
1.6. Основні наукові поняття в матеріалознавстві.....	54
2. ОРГАНІЗАЦІЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКОЇ РОБОТИ В УКРАЇНІ.....	57
2.1. Управління у сфері науки.....	57
2.2. Національна академія наук України.....	70
2.3. Суб'єкти наукової діяльності.....	77
2.4. Підготовка наукових кадрів в Україні.....	80
3. Методологія наукових досліджень.....	88
3.1. Методи наукового дослідження.....	90
3.2. Визначення проблеми наукового дослідження.....	95
3.3. Формулювання об'єкта та предмета дослідження.....	100
3.4. Формулювання мети й завдань дослідження.....	102
3.5. Евристична функція науки.....	104
3.6. Загальнонаукові методи теоретичних досліджень.....	106
3.7. Застосування методів теоретичних досліджень.....	111
3.8. Проведення експериментальних досліджень.....	113
3.9. Експериментальні методи дослідження.....	116
3.10. Моделювання у наукових дослідженнях.....	120
3.11. Системний аналіз.....	126
3.12. Методи технічного прогнозування.....	129
3.13. Застосування технологій штучного інтелекту в матеріалознавстві.....	132
3.14. Планування наукових досліджень.....	138
4. ВИМІРЮВАННЯ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	142
4.1. Статистичні методи обробки результатів експериментальних досліджень.....	147
4.1.1. Кореляційний і дисперсійний аналіз.....	153
4.1.2. Регресійний аналіз.....	165
5. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ.....	173
5.1. Етапи планування та реалізації повного факторного експерименту.....	181
5.2. Планування дробового факторного експерименту.....	189
5.3. Методи оптимізації експерименту.....	193
6. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ.....	196
6.1. Спектрометричні методи аналізу хімічного складу речовин.....	204
6.1.1. Метод атомно-емісійного спектрального аналізу.....	205
6.1.2. Спектроскопія комбінаційного розсіювання.....	213

6.1.3. Рентгеноструктурний аналіз.....	216
6.2. Термічні методи аналізу.....	223
6.3. Дослідження структури металів і сплавів	231
6.3.1. Дослідження мікроструктури металевих матеріалів	232
6.3.2. Металографічні дослідження у поляризованому світлі.....	246
6.4. Електронна мікроскопія.....	249
6.4.1. Просвічувальна електронна мікроскопія	250
6.4.2. Сканувальна електронна мікроскопія.....	254
6.5. Визначення властивостей металів і сплавів	261
6.6. Аналіз акустичної емісії при випробовуванні матеріалів	272
7.ВВЕДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У НАУКОВИЙ ОБІГ ...	281
8.ЗБИРАННЯ ТА ВІДБІР НАУКОВО - ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ....	296
9. ВІДКРИТА НАУКА.....	303
10. АКАДЕМІЧНА ДОБРОЧЕСНІСТЬ У НАУКОВІЙ ДІЯЛЬНОСТІ	309
11.НАУКОВА КОМУНІКАЦІЯ, БІБЛІОМЕТРІЯ ТА НАУКОМЕТ- РИЧНІ РЕСУРСИ В СУЧАСНІЙ НАУКОВІЙ ДІЯЛЬНОСТІ.....	318
12.НАУКОВО - ДОСЛІДНИЦЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ СТУДЕНТІВ.....	329
Список використаної та рекомендованої літератури.....	334

ВСТУП

Наука є одним із ключових чинників розвитку цивілізації, що забезпечує науково-технічний прогрес суспільства. Починаючи з другої половини ХХ століття, стрімкий розвиток науки і техніки сприяв значним досягненням у різних галузях, зокрема у сфері створення та дослідження матеріалів, які становлять основу сучасної цивілізації.

Матеріали - це речовини, з яких виготовляють вироби, конструкції, компоненти машин, приладів та елементи інфраструктури. Жодна сучасна технологія - від мікроелектроніки до аерокосмічної техніки - не може функціонувати без застосування матеріалів із наперед заданими властивостями.

Матеріалознавство - це прикладна наука, що вивчає будову, склад і властивості матеріалів, встановлює взаємозв'язок між їхнім складом, структурою та властивостями, а також досліджує вплив технологій виробництва, оброблення й зовнішніх чинників (механічних, теплових, радіаційних тощо) на їх характеристики. Як самостійна галузь знань матеріалознавство сформувалося внаслідок інтеграції досягнень фізики твердого тіла, металургії, хімії та технології. Розроблення нових матеріалів і методів їх оброблення є основою сучасного виробництва та важливим чинником формування науково-технічного й економічного потенціалу держави. Інтегруючи досягнення фізики, хімії, математики, біології та інших наук, матеріалознавство забезпечує розвиток енергетики, оборонної промисловості, зв'язку, комп'ютерної та лазерної техніки, аерокосмічної галузі, транспорту й медицини.

Зокрема, розвиток матеріалознавства сприяв створенню композитних матеріалів для протезування та високотемпературної кераміки для газових турбін. Наприклад, упровадження композитних матеріалів у конструкцію літаків типу Boeing Dreamliner дало змогу суттєво зменшити їхню масу та знизити споживання палива приблизно на 25 % у розрахунку на одного пасажира. Поширення електромобілів стало можливим завдяки розробленню й удосконаленню електродних матеріалів для літій-іонних акумуляторів.

Подальший розвиток цивілізації значною мірою буде залежати від створення та ефективного використання нових матеріалів. У майбутньому значення матеріалознавства лише зростатиме у зв'язку з глобальними викликами, зокрема зміною клімату, екологічними проблемами та виснаженням природних ресурсів. Сучасний розвиток матеріалознавства тісно пов'язаний із застосуванням інформатики та комп'ютерного моделювання для аналізу й прогнозування взаємозв'язку між структурою і властивостями матеріалів. Це відкриває широкі можливості для створення нових матеріалів із прогнозованими характеристиками та заданою поведінкою в умовах експлуатації.

В умовах інтенсивного розвитку нових класів матеріалів і стрімкого зростання обсягів наукової інформації особливого значення набуває підготовка висококваліфікованих фахівців у галузі матеріалознавства у закладах вищої освіти. Сучасний фахівець повинен володіти не лише фундаментальними та спеціальними знаннями, а й навичками творчого вирішення практичних завдань, умінням застосовувати новітні наукові досягнення у професійній діяльності, постійно вдосконалювати кваліфікацію та швидко адаптуватися до умов сучасного виробництва.

Фахівці з матеріалознавства повинні володіти критичним і творчим мисленням, уміти проводити наукові дослідження, аналізувати та узагальнювати результати експериментальних і теоретичних робіт.

Трансформаційні процеси в економіці України, пов'язані з переходом до ринкових механізмів і розвитком інноваційної економіки в умовах воєнного стану, зумовлюють необхідність ефективного використання наукового потенціалу держави. Фахівці нового покоління повинні мати високий рівень професійної компетентності, здатність до безперервного навчання та вміння застосовувати сучасні комп'ютерні технології, математичні методи й моделі. Вони мають бути готовими до самостійної науково-дослідної діяльності, розроблення та впровадження інновацій. Формування таких компетентностей значною мірою забезпечується активною участю студентів у науково-дослідній роботі.

Метою вивчення дисципліни «Основи наукових досліджень у матеріалознавстві» є формування у студентів системних знань про теоретичні, методологічні та методичні засади наукової діяльності в галузі матеріалознавства, а також набуття практичних навичок проведення досліджень і застосування отриманих результатів у професійній діяльності.

Предметом вивчення дисципліни є організація та проведення наукових досліджень у матеріалознавстві із застосуванням загальнонаукових теоретичних та емпіричних методів. Дисципліна належить до циклу загальної підготовки здобувачів освіти спеціальності G8 «Матеріалознавство» та базується на положеннях фізико-математичних і технічних наук.

Курс «Основи наукових досліджень у матеріалознавстві» спрямований на засвоєння основ наукової діяльності, формування навичок розв'язання наукових завдань із використанням сучасних методів дослідження та підготовку до самостійного отримання нових наукових результатів. Для досягнення цієї мети передбачено такі завдання:

- ознайомлення з організацією наукових досліджень в Україні;
- оволодіння сучасною методологією досліджень у матеріалознавстві;
- формування основ для участі у фахових дослідженнях;
- ознайомлення з вибором напрямів досліджень та етапами науково-дослідної роботи;
- вивчення методів теоретичних і експериментальних досліджень;
- опанування методів оптимізації складу та властивостей матеріалів;
- розвиток навичок формулювання й презентації результатів досліджень.

У результаті вивчення дисципліни «Основи наукових досліджень у матеріалознавстві» студенти повинні знати:

- основні поняття й термінологію наукової діяльності;
- систему підготовки наукових кадрів;
- методологію наукової творчості;
- особливості науково-дослідної діяльності;
- порядок проведення досліджень у матеріалознавстві;

– сучасні підходи до аналізу структури матеріалів і технологічних процесів.

Студенти повинні набути таких умінь:

- обирати напрями наукових досліджень у матеріалознавстві;
- здійснювати пошук і критичний аналіз інформації;
- складати програму та план дослідження;
- готувати наукові доповіді;
- обирати адекватні методи дослідження у матеріалознавстві;
- оформлювати результати відповідно до вимог академічного письма.

У навчальному посібнику висвітлено сучасні методологічні та організаційні засади наукових досліджень, зокрема особливості виконання науково-дослідних робіт в галузі матеріалознавства. Матеріал посібника структуровано у десяти розділах. У першому розділі розглянуто загальні питання творчої діяльності людини, подано історичний екскурс щодо становлення та розвитку матеріалознавства, а також окреслено перспективні напрями розвитку наукового знання в цій галузі. Другий розділ присвячено основам організації науково-дослідної роботи в Україні. У третьому розділі висвітлено питання методології наукових досліджень, її складових і принципів, наведено етапи та послідовність виконання наукових досліджень, описано окремі методи наукового пізнання, розглянуто побудову наукової теорії на основі гіпотези, обґрунтовано роль експерименту та можливості застосування штучного інтелекту в науковій діяльності. У четвертому розділі охарактеризовано основні методи експериментальних досліджень у матеріалознавстві та наведено приклади їх практичного застосування. П'ятий розділ присвячено питанням упровадження результатів досліджень у науковий обіг. У шостому розділі наведено методiku пошуку, відбору та опрацювання наукової і науково-технічної літератури з використанням бібліотечних каталогів і сучасних комп'ютерних технологій. Сьомий розділ розкриває актуальні питання відкритої науки. У восьмому розділі розглянуто питання академічної доброчесності під час виконання та представлення результатів наукових досліджень. Дев'ятий розділ присвячено ролі та особливостям наукової комунікації. У десятому розділі

висвітлено особливості студентської науково-дослідної роботи, а також підготовки кваліфікаційних робіт освітньо - наукових ступенів доктора філософії та доктора наук. Наведено основні вимоги до структури й оформлення цих наукових праць.

Розділ 4 навчального посібника підготовлено кандидатом технічних наук, професором Кропівним В.М.; розділи 1, 2, 3, 6, 8, 9 - кандидатом технічних наук, доцентом Кропівною А.В.; розділи 5 і 10 - кандидатом технічних наук Кузиком О.В., підрозділ 6.6 – аспірантом Мітевим Д.О. У процесі підготовки даного навчального посібника для наукового редагування тексту було використано інструменти штучного інтелекту.

Автори висловлюють щирю вдячність рецензентам за цінні зауваження та рекомендації й будуть вдячні всім читачам за відгуки та пропозиції, спрямовані на вдосконалення змісту навчального посібника.

1. НАУКА: ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ ТА ОСНОВНІ КАТЕГОРІЇ

Наука - це сфера пізнавальної діяльності людини, спрямована на здобуття нових об'єктивних знань про природу, суспільство та мислення. Вона ґрунтується на теоретичних дослідженнях, спостереженнях і експериментах та є однією з провідних рушійних сил розвитку цивілізації, забезпечуючи науково-технічний прогрес, підвищення якості життя й сприяючи розв'язанню глобальних проблем людства.

Знання - це перевірений практикою результат пізнання дійсності, її адекватне відображення у свідомості людини. Накопичення та передавання знань стало можливим завдяки виникненню писемності.

1.1. Характеристика науки

Термін «наука» є багатозначним і вживається в кількох аспектах:

- процес пізнання закономірностей об'єктивного світу;
- процес здобуття, систематизації та використання нових знань;
- форма суспільної свідомості, що базується на системі накопичених знань;
- особлива сфера суспільного поділу праці.

Метою науки є пізнання законів природи на основі фактів і доказів, відкриття закономірностей розвитку природи, суспільства та мислення, які існують незалежно від волі й свідомості людини. Пізнання є процесом переходу від незнання до знання, що ґрунтується на відтворенні об'єктивної дійсності у свідомості людини в ході практичної, виробничої, інтелектуальної та наукової діяльності.

Основою наукового пізнання є практика, яка забезпечує науку фактичним матеріалом, що потребує теоретичного осмислення. Наука виникла як відповідь на потребу людства у формуванні достовірного та об'єктивного знання про навколишній світ. Необхідність у науковому знанні постає тоді, коли уявлення, сформовані в межах повсякденного досвіду та чуттєвого сприйняття,

виявляються недостатніми для пояснення явищ і процесів. Поштовхом до наукового дослідження є наявність наукової проблеми - суперечності між наявними знаннями та новими фактами.

Наукове пізнання у процесі дослідження поділяється на дві основні стадії:

- емпіричну - спостереження, збирання фактів, проведення експериментальних досліджень;
- теоретичну - систематизацію отриманих фактів, їх критичний аналіз і формування теоретичних узагальнень.

Емпіричний і теоретичний рівні дослідження є взаємопов'язаними та взаємодоповнювальними складовими наукового пізнання, які відрізняються за метою, методами та характером результатів. Емпіричний рівень передбачає безпосереднє вивчення реально існуючих об'єктів і явищ, що сприймаються органами чуття. Він базується на спостереженні, експерименті та практичному досвіді. У процесі спостереження накопичуються факти, які стають підґрунтям для подальших теоретичних узагальнень. Результати емпіричних досліджень слугують основою для формулювання гіпотез і побудови теорій.

Теоретичний рівень дослідження передбачає опрацювання емпіричних даних, виявлення суттєвих зв'язків і закономірностей, притаманних досліджуваним об'єктам та явищам, а також формулювання понять, гіпотез, теорій і законів. Теоретичні дослідження спрямовують подальший пошук нових фактів і вдосконалення методів наукового дослідження.

У матеріалознавстві емпіричні методи мають особливе значення, оскільки забезпечують отримання більшості первинних наукових даних. Прикладами таких методів є лабораторні випробування міцності матеріалів, визначення твердості, пластичності та інших фізико-механічних характеристик.

Наука характеризується такими ознаками:

- наявністю систематизованих знань (ідей, теорій, концепцій, законів, принципів, гіпотез, понять і фактів);
- наявністю наукової проблеми, об'єкта та предмета дослідження;
- практичною значущістю досліджуваних процесів і явищ;

- відкритістю до критичного перегляду та визнання можливості помилки як необхідної умови розвитку наукового знання.

До основних функцій науки належать:

- світоглядна - формування цілісного уявлення про світ;
- пізнавальна - здобуття та систематизація знань;
- евристична - відкриття нового, формування гіпотез і теорій;
- практична - застосування наукових знань у різних сферах діяльності;
- прогностична - прогнозування результатів і наслідків наукового розвитку;
- продуктивна - розгляд знань як важливого ресурсу виробництва;
- соціальна - вплив науки на розвиток суспільства;
- культурно-виховна - формування наукового мислення та загальнолюдських цінностей;
- освітня - передавання знань і наукових навичок у процесі підготовки фахівців.

Предметний та об'єктивний підхід до пізнання дійсності відрізняє науку від інших форм осмислення світу, зокрема мистецтва, релігії та міфології. Наука і релігія є важливими сферами людського пізнання, однак використовують різні способи пояснення світу. Наука базується на доказах, логіці та експериментальній перевірці, тоді як релігія ґрунтується на вірі в надприродне та морально-етичних цінностях. Мистецтво поєднує об'єктивне відображення реальності із суб'єктивним авторським сприйняттям та емоційною оцінкою.

До основних критеріїв науковості належать:

- об'єктивність - незалежність результатів дослідження від суб'єктивних впливів і упереджень;
- новизна - отримання раніше невідомих знань;
- розвиток - постійне оновлення, уточнення та поглиблення знань;
- доказовість - обґрунтованість і достовірність наукових тверджень;
- відтворюваність - можливість повторного отримання аналогічних результатів за однакових умов;

- системність - логічна взаємопов'язаність знань, наявність власного понятійно-категоріального апарату та методології;
- практична спрямованість - орієнтація на застосування знань, прогнозування та передбачення.

Наукове знання поділяється на відносне та абсолютне.

Відносне знання - це неповне, але достатньо адекватне відображення дійсності, яке потребує подальшого уточнення та розвитку. Воно може існувати у формі спостережень, описів, гіпотез, концепцій, моделей, теорій, результатів моделювання та експертних оцінок.

Абсолютне знання - це максимально повне, вичерпне та об'єктивне відображення реальної дійсності. Воно представлено системою наукових фактів, законів, закономірностей, теоретичних положень і понять, достовірність яких підтверджена практикою. Складність природних явищ, постійний розвиток методів дослідження, а також поява нових матеріалів і технологій зумовлюють неможливість досягнення абсолютно завершеного знання.

Псевдонаука - це діяльність, що імітує наукову, але не відповідає критеріям науковості. Для псевдонаукових концепцій характерні ігнорування або спотворення фактів, використання неперевіраних даних, відсутність експериментального підтвердження та неможливість незалежного відтворення результатів. Такі концепції часто спираються на догматичні, політичні або релігійні твердження.

Науковий скептицизм є базовим принципом наукового мислення, який полягає у критичному ставленні до будь-яких тверджень, гіпотез, результатів досліджень і висновків доти, доки вони не будуть підтверджені достатніми доказами, перевірені надійними методами та узгоджені з наявними науковими даними. Необхідність наукового скептицизму є необхідною умовою розвитку науки, оскільки він підвищує якість наукових досліджень. Його сутність полягає не в запереченні, а в обґрунтованому сумніві, який спонукає до пошуку доказів, уточнення фактів і вдосконалення наукових уявлень. Науковий скептицизм передбачає вимогу до доказовості, логічної обґрунтованості та можливості перевірки отриманих результатів. Будь-яке наукове твердження має

розглядатися не як остаточна істина, а як положення, яке може бути уточнене, переглянute або спростоване внаслідок подальших досліджень.

Науковий скептицизм сприяє виявленню помилкових та псевдонаукових уявлень і є важливою умовою розвитку науки. Саме завдяки скептичному підходу наука захищає себе від псевдонаукових тверджень, необґрунтованих висновків і маніпулятивного використання наукової термінології.

1.2. Пізнавальна діяльність у процесі наукової діяльності

З перших етапів свого розвитку людина перебувала у тісній залежності від рослинного і тваринного світу, його ресурсів, тому була змушена щоденно враховувати особливості поведінки тварин, риб і птахів. Протягом тривалого часу основними джерелами знань під час створення знарядь праці були практичний досвід і спостереження. Уявлення первісної людини про навколишній світ не мали наукового характеру. Наука виникла внаслідок суспільного поділу праці, відокремлення розумової праці від фізичної та перетворення пізнавальної діяльності на окрему сферу професійної діяльності людини.

Із відкриттям фундаментальних законів природи та розвитком базових наук - фізики, хімії, механіки й математики - стало можливим широке впровадження теоретичних знань у практичну діяльність. Зародившись у стародавньому світі відповідно до потреб суспільства, наука починаючи з XVI–XVII століть поступово перетворилася на продуктивну силу, яка забезпечує технологічний прогрес, сприяє раціональному використанню сировини та енергетичних ресурсів, а також поліпшенню стану довкілля. Економічний розвиток і технічний прогрес безпосередньо пов'язані з розвитком матеріалознавства та створенням нових штучних матеріалів для різних галузей виробництва.

Кожна наука постійно змінюється, розвивається й удосконалюється завдяки результатам нових досліджень. У процесі розвитку науки періодично відбуваються революційні зміни - наукові революції, які трансформують її

структуру, принципи пізнання, категоріальний апарат, методи та форми організації. Прикладами таких змін є відкриття клітини, антибіотиків, електрики, атомної енергії, розвиток комп'ютерної техніки, створення нержавіючих сталей та зміцнення алюмінієвих сплавів у процесі старіння. Революційні етапи розвитку науки змінюються еволюційними періодами, під час яких результати наукових відкриттів упроваджуються у суспільне виробництво.

Залежно від рівня розвитку суспільства, його потреб і проблем змінювалися науки-лідери: у XVI–XVIII століттях провідне місце посідала механіка, у XIX столітті - фізика, у XX столітті - хімія та ядерна фізика. Роль науки як основи розвитку цивілізації зумовлює її випереджальний розвиток порівняно з іншими сферами людської діяльності. Сучасна наука охоплює широкий спектр знань і включає близько 15 тисяч наукових дисциплін, які дедалі активніше інтегруються між собою.

Наукові знання - це перевірений практикою результат пізнання дійсності та її адекватного відображення у свідомості людини, який здобуто у процесі наукової діяльності. Починаючи з XVII століття, обсяг наукової інформації подвоюється приблизно кожні 10–15 років, що проявляється у зростанні кількості відкриттів, обсягу наукових публікацій та чисельності науковців. Це зумовлює необхідність безперервного навчання, самоосвіти, постійного оновлення знань і здатності орієнтуватися у стрімкому потоці науково-технічної, економічної та соціальної інформації.

Наукова діяльність - це інтелектуальна творча діяльність, спрямована на здобуття нових знань, уточнення наявних наукових уявлень та пошук шляхів їх практичного застосування.

Наукова діяльність передбачає:

- спрямованість на вдосконалення наявних знань;
- відкритість до нових ідей та готовність до їх сприйняття;
- високий рівень розвитку логічного мислення;
- належну фахову підготовку дослідників;
- сформовану культуру наукового мислення.

Ефективність наукової діяльності забезпечується науковим мисленням, для якого характерні:

- доказовість;
- логічна обґрунтованість результатів;
- достовірність сформульованих висновків;
- об'єктивність отриманих даних.

Поштовхом до проведення наукового дослідження є виникнення проблемної ситуації та наукових завдань, що формуються на основі пізнавальних суперечностей. Розрізняють такі типи суперечностей:

- між двома або кількома експериментальними результатами;
- між результатами експериментів і наявною теорією;
- між старими та новими науковими теоріями.

Отримання, систематизація та пояснення нових знань, інтерпретація явищ, формування наукових теорій і встановлення об'єктивних закономірностей природи належать до пізнавальної функції науки, яка є основою наукової діяльності. Наукова діяльність має творчий характер, тому пов'язана з пошуком нових рішень та елементами наукової імпровізації. Водночас її результативність значною мірою визначається систематичною, послідовною та ретельно спланованою працею.

Наукове пізнання - це дослідницький процес, спрямований на генерування нових знань. Воно забезпечує розуміння сутності явищ, розкриває закономірності їх існування та розвитку, визначає можливості й способи впливу на них. Сутність наукового пізнання полягає у відображенні дійсності та встановленні закономірностей об'єктивного світу. Практична перевірка знань є найвищим етапом пізнання, оскільки практика виступає його початком, основою та критерієм істинності отриманих результатів.

До основних аспектів пізнавальної функції науки належать:

- виявлення нових фактів, явищ і закономірностей;
- встановлення причинно-наслідкових зв'язків між природними явищами;
- систематизація знань у вигляді теорій і концепцій;

- інтерпретація отриманої інформації;
- прогнозування можливих наслідків і майбутніх подій.

До основних принципів наукового пізнання належать:

- принцип детермінізму - визнання причинно-наслідкової зумовленості всіх явищ і процесів;
- принцип істинності - необхідність підтвердження наукових знань практикою;
- принцип відносності - розуміння того, що будь-яке наукове знання є неповним і в процесі розвитку науки відбувається його уточнення.

Сучасна наука характеризується стрімким зростанням обсягу знань, що зумовлює необхідність безперервної освіти та адаптації до нової інформації. Сучасна інженерія оперує десятками тисяч матеріалів із різноманітними властивостями та сферами застосування. Інтеграція різних наук сприяє створенню нових матеріалів і технологій їх обробки.

Металознавство сформувалося в результаті інтеграції фізики твердого тіла, металургії та хімії, оскільки різноманіття властивостей матеріалів неможливо повністю пояснити в межах однієї класичної науки. Такий міждисциплінарний підхід дав змогу створювати нові матеріали, технології їх виробництва та методи дослідження, а також суттєво збагатив матеріалознавство фундаментальними знаннями.

На сучасному етапі розширення номенклатури матеріалів відбувається переважно за рахунок полімерних та керамічних матеріалів. Незважаючи на постійні повідомлення про відкриття нових матеріалів, лише незначна їх частина знаходить широке промислове застосування. Вибір матеріалів здійснюється на основі аналізу їхніх властивостей і придатності до конкретних умов використання. Попри значне різноманіття матеріалів, у кожній галузі переважає обмежена кількість їх класів: у будівництві - скло, бетон і сталь; в автомобільній промисловості - сталь, алюмінієві сплави та полімерні композити; у мікроелектроніці - кремній як основний напівпровідниковий матеріал.

Матеріалознавство як технічна наука має низку особливостей:

1. Своєрідність предметної області. Якщо природничі науки вивчають природні об'єкти, то матеріалознавство переважно досліджує штучно створені людиною матеріали.

2. Матеріалознавство спрямоване на вивчення структури матеріалів і технологічних процесів їх виробництва, що визначають їх властивості. Основним завданням матеріалознавства є встановлення закономірностей формування структури та властивостей матеріалів.

3. Матеріалознавство орієнтоване не лише на дослідження наявних матеріалів і технологій їх виготовлення, а й на створення принципово нових матеріалів.

1.3 Еволюція розвитку людства і промислового виробництва

Історія матеріалознавства відображає еволюцію наукових уявлень про природу, структуру, властивості, способи отримання та технології оброблення матеріалів - від первинного емпіричного використання природної сировини до розроблення теоретично обґрунтованих підходів до створення матеріалів із наперед заданими характеристиками.

У різні історичні періоди переважали певні типи матеріалів, що зумовило умовний поділ розвитку цивілізації на відповідні «доби». Історична наука дає назви епохам розвитку людської цивілізації виходячи з базових матеріалів, які служили основною сировиною для виготовлення знарядь праці та зброї.

Початок кам'яної доби на різних територіях історики датують від 2,5 мільйона років тому до 100–150 тисяч років тому і характеризувався домінуванням каменю як основного конструкційного матеріалу. В цей період предки людини стали оббивати каміння, щоб виготовити загострені знаряддя праці та зброю з кременю, обсидіану та інших гірських порід. Відбулося вдосконалення технологій механічної обробки (ударне розщеплення, шліфування, свердління). Наприкінці періоду з'являється кераміка як результат термічної обробки глиняних виробів, що можна розглядати як один із перших прикладів керованої зміни структури матеріалу шляхом теплового впливу.

Керамічний посуд свідомо формували із глиняної маси, висушували, нагрівали та випалювали. Виготовлення скляних артефактів, які були створені в Месопотамії, датується періодом до 4000 року до нашої ери.

Першими металами, з якими познайомилися люди, були самородні срібло, золото та мідь. Ці метали мали яскравий колір і блиск, були пластичними, легко піддавалися куванню. Початок плавки міді датується археологами приблизно за 5000 до нової ери, коли в багаття випадково потрапили шматочки мідної руди. Було помічено, що в ході горіння дров утворилася блискуча відносно м'яка речовина. Це започаткувало перехід від кам'яних знарядь руди до металевих.

Відкриття металів мало визначальний вплив на життя людської цивілізації. Видобуток руд забезпечив людство принципово новими матеріалами, які мали невідомі раніше властивості (ковкість, плавкість) та важливі переваги (здатність до зміни форми, висока міцність, довговічність, естетичність). Це дозволило вдосконалити знаряддя праці та створити нові зразки предметів побуту, інструментів та озброєнь.

У період між 4000 і 3000 роками до нової ери в Європі тривала «мідна доба», коли широко використовували чисту мідь без додавання інших компонентів. Поширення міді для виготовлення побутових предметів та інструментів було зумовлене її пластичними властивостями й можливістю плавлення, що давало змогу створювати вироби різної форми.

Низька міцність міді привела стародавніх металургів до освоєння виробництва більш міцної і технологічної бронзи. Бронзова доба в період приблизно 3300–1200 років до нової ери пов'язана з розвитком металургії сплавів міді, насамперед бронзи (сплавів міді з оловом, арсеном чи свинцем). Освоєння процесів плавлення та лиття сплавів стало принципово новим технологічним етапом, оскільки дало змогу цілеспрямовано змінювати склад матеріалу та, відповідно, його механічні властивості. Бронза відзначалася вищою твердістю та зносостійкістю, нижчою температурою плавлення порівняно з міддю, що зумовило розширення її застосування у виробництві знарядь праці, зброї та предметів побуту.

Залізна доба розпочалася приблизно з I тисячоліття до нової ери з освоєнням технологій відновлення заліза з руд. Використання заліза та його сплавів стало визначальним чинником технічного прогресу завдяки поєднанню міцності, відносної доступності сировини та можливості регулювання властивостей шляхом зміни вмісту вуглецю. Температура плавлення заліза майже на 500°C вища, ніж у міді, тому знадобилася розробка нових плавильних технологій. У сиродутних печах за рахунок горіння деревного вугілля нагріта руда перетворювалася на губчасте залізо, що складається з відновленого заліза та шлаку. Шляхом подальшого кування із розігрітого заліза видаляли шлакові включення та формували заготовки потрібної форми з кричного заліза. Цей метал додатково піддавався гартуванню та куванню, дозволяв виготовляти міцніші вироби за рахунок насичення вуглецем. Однак, металургія заліза розвивалася до сучасного рівня досить тривалий час: від примітивних знарядь праці до високотехнологічних сплавів.

Протягом століть у різних регіонах світу (Європа, Індія, Японія) удосконалювалися технології виплавки та кування сталі, що сприяло формуванню передумов для подальшого наукового осмислення зв'язку між структурою і властивостями матеріалів.

У Середні віки відбувся створення більш ефективних металургійних печей. Сиродутні горни замінили на штюкофени - шахтні печі висотою до 3-5 метрів. За рахунок цього вдалося досягти вищих температур в робочій зоні печі і збільшити продуктивність за один цикл плавки. Це призвело до виробництва нового дешевого і технологічного металургійного матеріалу - чавуну (сплаву заліза з вмістом вуглецю понад 2,14%), що дозволило почати випускати більш складні та габаритні вироби.

В епоху Середньовіччя поряд з розвитком технологій обробки сплавів заліза стала розвиватися технологія виробництва скла і кераміки. Скло стало широко застосовуватися для виготовлення побутового та лабораторного посуду.

Протягом останніх 500 років глибинні зміни продуктивних сил суспільства, принципів виробництва, наукової діяльності та повсякденного життя людей значною мірою відбувалися під впливом промислових революцій.

Вони забезпечили якісний стрибок у розвитку виробництва, за якого новітні технології докорінно змінювали економіку, характер праці та умови життя населення.

Перша промислова (індустріальна) революція, що розпочалася в Англії у другій половині XVIII століття, була спричинена переходом від ручної праці до машинного виробництва, упровадженням парових двигунів, розвитком текстильної та вугільної промисловості, будівництвом залізниць. У період від середини XVIII до початку XIX століття відбувся занепад мануфактурного виробництва й утвердження фабричної системи господарства, а також покриття значної частини Європи густою мережею залізниць. Починаючи зі створення парового двигуна, людство поступово перейшло від ручної праці до машинного й масового виробництва, широкого впровадження автоматизації та інтелектуальних технологій. Промислові революції спричинили не лише радикальні зміни технічної та технологічної основи господарства держав, а й трансформацію суспільних відносин, зокрема перехід від феодального до капіталістичного суспільного устрою.

Цей етап індустріалізації став поштовхом до поєднання науки з виробництвом і впровадження наукових відкриттів у техніку та виробничі технології. Відмова від філософської системи Арістотеля і геоцентричного вчення Клавдія Птолемея, подолання середньовічної схоластики та праці Миколая Коперника, Йоганна Кеплера, Галілео Галілея, Рене Декарта, Ісаака Ньютона та інших учених заклали наукові основи математики, астрономії, механіки й сформували природознавство як цілісну систему знань. Наука дедалі більше привертала увагу підприємців, а технічні науки стали відігравати все помітнішу роль у матеріальному виробництві.

Донауковий етап (до XIX ст.) характеризується відсутністю систематизованих знань про внутрішню будову речовини та фізико-хімічні механізми формування властивостей матеріалів. Удосконалення матеріалів здійснювалося переважно шляхом практичного відбору, спостереження та поступового вдосконалення технологічних прийомів обробки. Лише наприкінці

XVIII століття розпочався процес системного накопичення наукових знань про метали й сплави.

Винайдення книгодрукування Й. Гутенбергом у 1440 році сприяло швидкому поширенню наукових праць. У країнах Європи стрімко зростала кількість університетів і створювалися академії наук. У 1650 році було видано перший науковий журнал.

У XVI столітті з'явилася перша праця, що детально описувала металургійне виробництво. Фундаментальним дослідженням доби Відродження стала книга «De Re Metallica» (1556), автором якої був німецький учений Георг Аґрікола - засновник наукової металургії. Це видання стало першою енциклопедією з гірництва й металургії, в якій описано відомості про методи пошуку корисних копалин і подано характеристики відомих на той час мінералів. Г. Аґрікола детально описав способи видобутку та плавлення металів, дослідив мідні, срібні та свинцеві сплави.

У XVIII столітті було створено доменні печі. Використання коксу замість деревного вугілля як паливо зробило доменний процес більш ефективним і менш залежним від деревних ресурсів. Освоєння доменного виробництва допомогло зробити ривок у збільшенні кількості чавуну, що випускається.

Період від другої половини XIX до другої половини XX століття називають другою промисловою (технологічною) революцією. Саме тоді розпочалося масове виробництво завдяки впровадженню електричного приводу й конвеєрних ліній. Поширення набули двигуни внутрішнього згорання, телеграф, телефон, автомобіль і літак, з'явилися нові види озброєння. З високими темпами розвивалися сталеливарна та хімічна промисловість. Дев'ятнадцяте століття історики розглядають як сталевий вік. Освоєння виробництва сталі та чавуну дозволила людям того часу використовувати ці матеріали для будівництва мостів, кораблів, поїздів, а пізніше й автомобілів.

На цей період припадає науково-технічна революція, що розпочалася наприкінці XIX століття у фізиці з руйнування концепції неподільності атома та створення квантово-механічної теорії. Згодом її досягнення поширилися на хімію, теоретичну й технічну кібернетику, матеріалознавство та інші галузі.

Зміст «науково – технічної революції» будь-якого періоду полягає в тому, що вчені роблять наукові відкриття, що вносять корінні зміни в рівень пізнання.

Друга промислова революція ознаменувалась впровадженням в чорну металургію методів промислового виробництва сталі. Набуло поширення виробництво високоякісних сталей у бессемерівських конвертерах і мартенівських печах. Винаходи Г. Бессемера, К. Сіменса, С. Томаса, П. Мартена забезпечили перехід до принципово нових металургійних процесів, що розвинулися у ХХ столітті в багатьох країнах світу. Г. Бессемер у 1860 році винайшов новаторський спосіб конверторного одержання сталі, запропонувавши продувати розплавлений чавун повітрям. Через 8 років П. Мартен розробив спосіб виробництва якісних сталей із залізного брухту у полумєневих печах. Мартен прийняв за основу принцип регенерації теплової енергії в подвійній полум'яній печі, що забезпечило досягнення високих температур для плавлення сталі за рахунок нагріву повітря, що подається до печі. Мартенівський процес став основним способом виробництва сталі до 70-х років ХХ століття.

Накопичення емпіричних знань упродовж тисячоліть забезпечувало поступове розширення використання дедалі складніших пристроїв. Досягнувши певної межі складності, емпіричні підходи вичерпали свої можливості. Це привело до розвитку технічних наук, що відкрило шлях до впровадження прогресивних виробничих технологій. Наука поступово перетворилася на самостійну галузь суспільного виробництва, яка продукує нові знання, і почала бурхливо розвиватися. Якщо в середині ХVІІІ століття у світі налічувалося близько 10 тисяч осіб, які займалися наукою, то до кінця ХІХ століття кількість учених зросла до 100 тисяч.

У ХХ столітті активно розвивалися прикладні технічні дисципліни: будівельна механіка, опір матеріалів, технічна гідродинаміка, металургія тощо. Завдяки матеріалознавству металурги стали виробляти нові матеріали з поліпшеними властивостями.

Незважаючи на те, що вивчати властивості матеріалів люди почали здавна, наука «матеріалознавство» була повноцінно сформована лише в середині ХХ

століття, коли було завершено створення сучасного базису фізики, хімії та механіки в широкому діапазоні - від атомного до макроскопічного рівня.

Третя промислова (цифрова) революція, що розпочалася у другій половині ХХ століття, пов'язана з активним упровадженням інформаційно-комунікаційних технологій в автоматизоване та роботизоване виробництво. Розвиток інформаційних технологій дав змогу інтегрувати виробничі системи та вдосконалити управління виробничими процесами. У промислових масштабах почали застосовувати 3D-принтери для виготовлення широкого спектра продукції. Активізувалися розробки щодо використання альтернативних відновлюваних джерел енергії. Цифровізація всіх сфер життєдіяльності суспільства (винайдення Інтернету, вдосконалення комп'ютерної техніки та електроніки) стала визначальним чинником переходу до постіндустріальної ери.

Науковий прогрес став головною рушійною силою розвитку виробництва. У світі на кінець ХХ століття налічувалося понад 6 мільйонів вчених. У розвинених країнах чисельність науковців стала досягати до 10 % працездатного населення.

Інновації у сфері створення та дослідження матеріалів стали фундаментом сучасного технологічного розвитку. Вони вдосконалюють існуючі матеріали та відкривають можливості для створення принципово нових рішень у промисловості, будівництві, медицині, енергетиці та транспорті. Матеріалознавча наука стала визначати інноваційні зміни в таких галузях, як машинобудування, аерокосмічна галузь, ядерна енергетика, енергетика та електроніка, тощо. Одним із провідних напрямів стала розробка нових композитних матеріалів шляхом поєднання різних компонентів для досягнення синергічного ефекту. Наприклад, вуглепластики забезпечують високу міцність при малій масі, що особливо важливо в авіаційній та автомобільній галузях. Наноматеріали, завдяки унікальним властивостям на рівні наноструктури, демонструють підвищену міцність, електропровідність та хімічну активність, що відкриває перспективи для електроніки та енергозбереження. Біоматеріали активно застосовуються у медицині для створення імплантів, протезів і тканинної інженерії, забезпечуючи біосумісність та мінімізацію ризику

відторгнення. Інтелектуальні (сма́рт) матеріали здатні змінювати свої властивості під впливом зовнішніх факторів (температури, світла, механічного навантаження), що дозволяє створювати адаптивні конструкції та системи. Завдяки впровадженню нових матеріалів виробництво стає більш ефективним і екологічно орієнтованим: зменшується споживання сировини та енергії, підвищується довговічність продукції, знижується кількість відходів. Відповідно, інновації у матеріалознавстві не лише підвищують технічні характеристики виробів, а й сприяють сталому розвитку промисловості та суспільства загалом.

Науково-технічна революція, що розпочалася наприкінці ХХ століття, охопила насамперед інтелектуальну сферу - від створення систем штучного інтелекту до розвитку біотехнологій, нанотехнологій та інформатизації суспільства. У цей період зростання рівня науки й техніки пов'язаний з ускладненням методів і форм досліджень, використанням складної апаратури (атомних реакторів, прискорювачів елементарних частинок, електронних мікроскопів, сучасних аналізаторів). Масштабні наукові проєкти стали реалізовуватися великими колективами, що свідчить про індустріалізацію науки.

Сьогодні світ перебуває на етапі завершення третьої промислової революції та переходу до четвертої, яка передбачає ще глибшу інтеграцію фізичного, цифрового й біологічного світів.

Четверта промислова революція («Індустрія 4.0»), концепцію якої було презентовано у 2011 році, супроводжується розвитком смарт-промисловості, промислового інтернету, інтернету речей та персоналізованого виробництва. Її основою стали досягнення у сфері штучного інтелекту, розвиток кібернетики, екологізація виробничих процесів і посилення ролі цифрових технологій. У сучасних технологічних процесах дедалі більше стираються межі між матеріальним, цифровим і біологічним світами.

Характерними рисами Індустрії 4.0 є повністю автоматизовані виробництва, у яких управління всіма процесами здійснюється в режимі реального часу з оперативним урахуванням змін зовнішніх умов. Кіберфізичні системи створюють віртуальні моделі об'єктів, контролюють фізичні процеси та

ухвалюють децентралізовані рішення. Вони здатні до самоналагодження й самонавчання, можуть об'єднуватися в єдину мережу та взаємодіяти в режимі реального часу. Важливу роль відіграють інтернет-технології, які забезпечують комунікацію між персоналом і машинами. На ринок виходять легші та міцніші нові матеріали, придатні для вторинної переробки та адаптивні до умов експлуатації. Зараз знаходять застосування інтелектуальні матеріали, які здатні самовідновлюватися або самоочищатися, металів з пам'яттю, які повертаються до своїх початкових форм, кераміки та кристалів, які перетворюють тиск на енергію, тощо.

Сучасне матеріалознавство переживає глибоку трансформацію під впливом цифрових технологій. Цифрове моделювання, хмарні обчислення та аналіз великих даних стали ключовими інструментами цієї галузі. У контексті Індустрії 4.0 змінюється логіка наукового пошуку - від ізольованих експериментів до комплексних інтегрованих систем, що поєднують великі дані, цифрове моделювання, хмарні обчислення та алгоритми машинного навчання.

Провідні дослідницькі центри різних країн дедалі активніше застосовують алгоритми машинного навчання для прогнозування фізико-хімічних властивостей матеріалів, оптимізації їх складу та структури, а також автоматизованого проєктування нових функціональних матеріалів. Під впливом цифровізації та розвитку високих технологій у матеріалознавстві активно створюються нові покоління матеріалів із покращеними функціональними властивостями.

Очікується, що революційні зміни Індустрії 4.0 включатимуть впровадження чотирьох базових технологій:

1. **Інтернет речей.** У межах цієї технології Інтернет використовується для обміну інформацією не лише між працівниками, а й між машинами, пристроями, виконавчими механізмами, контролерами та датчиками, здатними передавати й обробляти дані без безпосередньої участі людини. Це створює передумови для формування повністю автоматизованих виробництв. При цьому роль персоналу полягає переважно у контролі роботи обладнання та реагуванні на позаштатні ситуації.

2. **Цифрові екосистеми.** Це системи, що об'єднують фізичні об'єкти, програмне забезпечення та контролери й забезпечують підтримання об'єкта у стабільному заданому стані (температура, вологість, освітлення тощо). У таких екосистемах фізичні та обчислювальні ресурси тісно інтегровані, а моніторинг і управління фізичними процесами здійснюються із застосуванням технологій штучного інтелекту.

3. **Аналітика великих даних.** Значні обсяги інформації, що накопичуються внаслідок цифровізації фізичного світу, можуть ефективно оброблятися лише за допомогою сучасних комп'ютерних систем із використанням хмарних обчислень і технологій штучного інтелекту. У результаті фахівець, який контролює певний процес або ситуацію, отримує структуровані та зручні для сприйняття дані, необхідні для ухвалення обґрунтованих рішень.

4. **Створення складних інформаційних систем (цифрових платформ), відкритих для клієнтів і партнерів.** До таких систем належать цифрові платформи для управління бізнес-процесами, а також системи аналізу й прогнозування технічного стану обладнання.

1.4 Становлення та сучасний розвиток матеріалознавства

Сучасні тенденції розвитку матеріалознавства характеризуються накопиченням значного обсягу кількісної та якісної інформації щодо структури, складу та властивостей як традиційних, так і новітніх матеріалів, створених завдяки досягненням науки й промисловості. На сучасному етапі матеріалознавство сформувалося як високотехнологічна міждисциплінарна галузь, що динамічно розвивається та відіграє важливу роль у науково-технічному прогресі.

Значний поступ у цій сфері зумовлений поглибленням фундаментальних уявлень про природу матеріалів, їхню внутрішню будову та механізми формування властивостей. Удосконалення механічних, теплових, електричних, магнітних, корозійних, напівпровідникових, надпровідних та інших

експлуатаційних характеристик матеріалів здійснюється на основі впровадження інноваційних технологій синтезу, обробки та модифікації.

На початку ХХ століття розвиток науки сприяв появі принципово нового класу матеріалів - органічних синтетичних полімерів, зокрема полібутадієну, фенолоформальдегідних смол та інших полімерних систем, а також композиційних матеріалів на їх основі. Їх застосування суттєво розширило можливості техніки та промислового виробництва.

Водночас у сучасному матеріалознавстві спостерігається інтенсивне зростання ролі керамічних матеріалів. Це обумовлено практично невичерпною сировинною базою, відносно низькою енергоємністю виробництва та унікальним комплексом властивостей таких матеріалів.

Сучасні керамічні матеріали можуть характеризуватися жаростійкістю, надтвердістю, електропровідністю, надпровідністю, хімічною стійкістю та іншими цінними експлуатаційними характеристиками, що забезпечує широкі перспективи їх практичного використання.

Новітні досягнення матеріалознавчої науки стали основою створення матеріалів нового покоління - наноматеріалів, металевих скла, полімерних і керамічних провідників та надпровідників, а також багатофункціональних композиційних систем. Такі матеріали характеризуються комплексом властивостей, які не притаманні традиційним матеріалам, що відкриває нові можливості для розвитку сучасної техніки, електроніки, енергетики, медицини та інших високотехнологічних галузей.

Матеріалознавство є одним із провідних напрямів сучасної науки в Україні та важливою складовою національного науково-технічного потенціалу, що має значні перспективи подальшого розвитку. До пріоритетних напрямів у галузі матеріалознавства належать: організація промислового виробництва конкурентоспроможних матеріалів і виробів із них; створення та впровадження технологій переробки й утилізації відходів, а також виробництва матеріалів із вторинної сировини; розробка й освоєння виробництва наноструктурних компонентів для альтернативної енергетики; створення новітніх матеріалів і

технологій захисту деталей та вузлів від зношування і корозії в екстремальних умовах експлуатації.

Суттєвий вплив на розвиток матеріалознавства мають досягнення хімії, фізики, математики та інших фундаментальних наук, а також створення сучасних високоточних засобів вимірювальної техніки. Їх застосування забезпечує поглиблене вивчення структури, складу та властивостей матеріалів, сприяє відкриттю нових закономірностей їхньої поведінки та формуванню науково обґрунтованих підходів до раціонального використання наявних і створення нових матеріалів із наперед заданими властивостями.

Відкриття та освоєння металів стало одним із ключових етапів розвитку людської цивілізації, що ознаменував перехід від кам'яної доби до історичної епохи розвитку суспільства. Видобуток і обробка руд надали людству принципово нові матеріали, які характеризувалися раніше невідомими властивостями - ковкістю, плавкістю, високою міцністю та довговічністю. Завдяки здатності металів до пластичної деформації стало можливим удосконалення наявних знарядь праці та створення нових типів технічних засобів, що сприяло прискоренню технічного прогресу.

Наукові основи металургії, яка стала базою розвитку матеріалознавства, почали формуватися ще у XVIII столітті. На початковому етапі вони ґрунтувалися переважно на узагальненні емпіричних знань про метали та сплави, способи їх отримання, обробки й практичного застосування. Формування уявлень про атомну будову матеріалів відбувалося поступово протягом багатьох століть і було тісно пов'язане з дослідженням природи кристалічних тіл. У подальшому емпіричні знання про матеріали почали інтегруватися із законами фізики, хімії та інших природничих наук. Проте до кінця XIX століття металургія переважно залишалася ремісничою діяльністю і ще не набула статусу самостійної науки чи високорозвиненої технологічної галузі у сучасному розумінні. Передумови становлення матеріалознавства пов'язані з формуванням фундаментальних уявлень про будову та властивості матеріалів. Основними фізичними положеннями, що стали підґрунтям розвитку цієї науки, є такі:

—матеріали складаються з атомів і кристалічних структур;

- фазова рівновага є термодинамічним станом гетерогенної системи, за якого одночасно співіснують дві або більше фаз;
- внутрішня будова твердих тіл відображається у їхній мікроструктурі, яку можливо досліджувати лише за допомогою мікроскопічних методів при значному збільшенні.

Важливим етапом у розвитку матеріалознавства стало впровадження мікроскопічних досліджень. Уперше оптичний мікроскоп для наукових спостережень застосував англійський учений Р. Гук, що було описано у його праці «Мікрографія», опублікованій у 1665 році. Надалі, у 1702 році, голландський дослідник А. ван Левенгук почав використовувати оптичний мікроскоп для вивчення металів і вперше графічно зобразив дендритні структури у сталевих злитках.

Значний внесок у дослідження природи металів зробив французький учений Р. Реомюр. У 1722 році він дослідив зернисту будову металів та описав такі характеристики, як зернистість, твердість після кування і пластичність. Англійський інженер Гріггон у 1775 році звернув увагу на формування стовпчастої структури під час затвердіння заліза. Йому також належить один із перших відомих рисунків дендритної структури литого заліза, отриманої в умовах повільного охолодження.

У 1774 році шведський хімік С. Рінман виокремив у складі сталі компонент, який згодом отримав назву «карбон» (вуглець). Подальші дослідження вуглецевих сталей, проведені у 1865 році, показали, що за однакового вмісту вуглецю властивості сталі суттєво змінюються залежно від температурних режимів обробки. Це стало одним із ключових підтверджень взаємозв'язку між структурою матеріалу, технологією його обробки та експлуатаційними властивостями.

Рішучий крок у розвитку металографії було зроблено у 1864–1865 роках англійським ученим Г. Сорбі, який застосував метод «перпендикулярного освітлення» у металографічному мікроскопі. Це дало змогу досліджувати поліровані поверхні металів і сплавів. Використання хімічного травлення дозволило виявити окремі фази у мікроструктурі металів. Важливе значення

мали також дослідження структур залізних метеоритів, виконані А Відманштеттенем та Г. Сорбі. Було встановлено, що структура метеоритного заліза подібна до структури сплавів заліза з нікелем і формується під впливом високотемпературного нагрівання під час проходження метеорита крізь атмосферу Землі. Наприкінці ХІХ століття мікрографічний метод Сорбі став основою для побудови фазових діаграм металевих систем.

Теоретичні основи вчення про метали були закладені працями Р. Реомюра, М. Ломоносова, Аю Лавуазьє та інших учених того часу. Вагомий внесок у розвиток теорії металургійних процесів у ХІХ столітті зробили Ж. Пруст, І. Ріхтер, Дж. Дальтон, а також К. Бертолле і Й. Берцеліус. Їхні наукові праці стали підґрунтям для формування сучасних уявлень про склад, структуру та властивості металів і сплавів. Ґрунтуючись на результатах власних досліджень і працях попередників, французькі хіміки Жозеф Луї Гей-Люссак та Луї Жак Тенар встановили існування трьох основних оксидів заліза.

Кристалографія та матеріалознавство є взаємопов'язаними науковими дисциплінами, що вивчають будову твердих тіл і їхні властивості з метою створення нових матеріалів із заданими характеристиками. Кристалографія охоплює методи визначення кристалічної структури речовин, фізику кристалів, кристалохімію та дослідження фазових перетворень у твердому стані. Формування кристалографії як науки розпочалося у ХVІІІ столітті із систематичного опису та графічного відтворення кристалів і закономірностей їхньої геометричної будови. У подальшому методи кристалографії були широко впроваджені у матеріалознавство, насамперед для дослідження структури інтерметалевих сполук.

Вагомий внесок у розвиток наукової металургії зробило відкриття німецьким ученим Е. Мітчерліхом у 1819 році явища ізоморфізму. Значний вплив на становлення теоретичної металургії мали також праці фізиків С. Карно, Дж. Джоуля та Ю. Маєра, які розробили методичні підходи до дослідження ендотермічних і екзотермічних реакцій. Їхні роботи стали теоретичною основою для розрахунку енергетичного балансу металургійних процесів.

На початку 1870-х років Дж. Гіббс звернув увагу на зростання ентропії, що супроводжує зміни в ізольованих матеріальних системах. У своїх працях він особливу увагу приділяв умовам рівноваги, які стали основою для побудови фазових, або рівноважних, діаграм. У 1878 році Гіббс сформулював правило фаз:

$$\delta = n + 2 - r$$

де δ - число ступенів свободи системи, n - кількість незалежних компонентів, r - число співіснуючих фаз.

Це правило дало змогу пояснити закономірності побудови фазових діаграм, які відображають області існування фаз, їхній склад і межі стійкості залежно від температури та хімічного складу сплаву.

Важливу роль у розвитку фізичної хімії та хімічної термодинаміки відіграв німецький учений В. Оствальд. Він зробив значний внесок у формування та популяризацію концепції вільної енергії. Учений встановив, що кожному стану речовини відповідає певний рівень вільної енергії: нестабільному стану відповідає локальний максимум, а метастабільному - локальний мінімум вільної енергії. За умов підвищення рухливості атомів, наприклад під час нагрівання, система може тривалий час залишатися у метастабільному стані. Перехід до термодинамічно стабільного стану можливий лише за наявності достатніх рушійних сил, здатних забезпечити подолання енергетичного бар'єра.

Вперше існування зв'язку між структурою сталі та її властивостями було доведено П. Аносовим. Його вважають одним із перших металургів, які систематично досліджували вплив легувальних елементів на фізико-хімічні та механічні властивості сталі. Учений довів, що введення легувальних домішок дає змогу суттєво змінювати та покращувати характеристики сталей. На початку 1840-х років П. Аносов отримав литу булатну сталь, з якої було виготовлено клинки, що за своїми властивостями не поступалися зразкам класичної зброї Стародавньої Індії.

Основи наукового матеріалознавства були закладені працями Д. Чернова та розвинуті М. Курнаковим. У 1866–1868 роках, досліджуючи причини браку під час виготовлення гарматних поковок, Д. К. Чернов установив залежність структури та властивостей сталі від режимів гарячої механічної й термічної

обробки. Учений візуально спостерігав зміну кольору розжарення металу при досягненні певних температурних меж, що дозволило припустити наявність фазових перетворень у твердому стані під час нагрівання та охолодження сталі. Було встановлено, що ці перетворення істотно впливають на структуру і властивості металу. Визначення критичних температур дало можливість раціонально обирати режими загартування, відпуску та пластичної деформації сталі у виробничих умовах. Праці Д. Чернова фактично заклали фундамент сучасної теорії термічної обробки сталі.

У 1888 році французький учений Ф. Осмонд, використовуючи термоелектричний термометр, визначив температури початку поліморфних перетворень у сталі. Надалі він описав характер цих перетворень і запропонував назви основних структур залізовуглецевих сплавів, що стало важливим етапом розвитку металографії та теорії сплавів.

Подальший розвиток матеріалознавства був пов'язаний із формуванням термоаналітичних методів дослідження. До них належать методи, засновані на вимірюванні змін фізичних або механічних властивостей зразка під час його нагрівання чи охолодження. Найбільшого поширення набули диференціальний термічний аналіз і дилатометрія. Серед температурних методів, які застосовуються для побудови фазових діаграм стану, провідне місце займає диференціальний термічний аналіз. Цей метод був запропонований Ле Шательє у 1887 році у Франції та згодом удосконалений Робертсом-Аустеном. Суть методу полягає у спостереженні за характером охолодження нагрітого зразка: при проходженні через критичні температури фіксуються аномалії швидкості охолодження, пов'язані з виділенням або поглинанням теплоти. Метод дозволяє визначати температури початку затвердіння та інших фазових перетворень у сплавах.

Найважливіші дослідження з побудови діаграми стану системи Fe – C були виконані в останній чверті XIX століття. Ф. Осмонд, використовуючи пірметр Ле Шательє, визначив положення критичних точок, описав зміни в мікроструктурі під час проходження через них і ввів назви основних структур залізовуглецевих сплавів. У 1900 році голландський фізик Г. Розебом застосував

до побудови діаграми правило фаз Дж. Гіббса, що перетворило сукупність емпіричних спостережень на науково обґрунтовану фізико-хімічну систему. У результаті діаграма стану Fe–C набула вигляду, близького до сучасного. Подальші дослідження М. Курнакова, виконані на основі аналізу великої кількості металевих систем, дозволили встановити закономірності взаємозв'язку між складом, структурою та властивостями сплавів, що значно спростило прогнозування їхніх характеристик.

Важливим етапом розвитку металургії стало впровадження електричних дугових печей у перші роки ХХ століття. Використання таких печей забезпечило підвищення якості та експлуатаційних характеристик сталей. Електричні дугові печі відзначалися компактністю, точністю ведення технологічних процесів, можливістю роботи з різними металами та сплавами, а також відносно кращими екологічними показниками порівняно з традиційними методами плавлення.

Значний вплив на розвиток машинобудування мала розробка у 1902 році американськими вченими Ф. Тейлором і М. Уайтом швидкорізальної інструментальної сталі, яка містила близько 4 % Cr та 18 % W. Створення цього матеріалу забезпечило суттєве підвищення продуктивності механічної обробки металів. Подальшим важливим досягненням стало отримання у 1912 році німецькими металургами Е. Мауером і Б. Штраусом патенту на хромонікелеву аустенітну нержавіючу сталь, яка стала основою для розвитку корозійностійких конструкційних матеріалів.

Німецький дослідник А. Вільм у 1903 році створив високоміцний алюмінієвий сплав на основі алюмінію та міді - дюралюміній. Унаслідок природного старіння його міцність у кілька разів перевищувала міцність технічного алюмінію та інших алюмінієвих сплавів за одночасного збереження достатньої пластичності. Використання дюралюмінію стало одним із ключових чинників розвитку сучасного літакобудування та авіаційної техніки.

У 1925 році німецька компанія Krupp розробила високоміцний кермет на основі карбиду вольфраму з кобальтовою зв'язувальною матрицею. Цей матеріал швидко набув важливого значення як інструментальний. Спочатку його використовували для виготовлення філь'єр при волочінні дроту, що дозволило

замінити дорогі алмазні волокни, а згодом - для виробництва ріжучих елементів металорізальних інструментів.

У цей же період почали формуватися наукові основи хімії високомолекулярних сполук і полімерних матеріалів, що ґрунтувалися на теорії хімічної будови речовини, розробленій О. Бутлеровим. На основі досліджень С. Лебедеєв вперше у світі було організовано промислове виробництво синтетичного каучуку. Одночасно значно розширилося використання нафти як основної сировини для органічного синтезу та хімічної промисловості.

Американський металознавець Едгар Бейн у 1924 році детально описав структуру аустеніту та процес його перетворення на мартенсит під час гартування сталі. Учений запропонував механізм мартенситного перетворення, відповідно до якого гранецентрована кубічна кристалічна гратка аустеніту миттєво перебудовується в об'ємноцентровану тетрагональну гратку мартенситу. Також було встановлено, що зі зменшенням швидкості охолодження зростає кількість залишкового аустеніту в загартованій сталі. Дослідження Е. Бейна сприяли усвідомленню вирішальної ролі температури та часу ізотермічної витримки переохолодженого аустеніту в процесах термічної обробки сталей. На основі цих робіт уперше було описано перетворення аустеніту за допомогою ТТТ-діаграм (temperature–time–transformation). Отримані результати дозволили пояснити кінетику фазових перетворень та значно спростили ідентифікацію структурних складових сталі - перліту, сорбіту й трооститу. Важливим досягненням стало також відкриття проміжного продукту перетворення аустеніту, який у 1934 році отримав назву «бейніт» на честь Е. Бейна.

Використання рентгеноструктурного аналізу на початку ХХ століття забезпечило можливість детального дослідження кристалічної будови металів і сплавів. Це стало можливим після того, як Макс фон Лауе у 1912 році довів, що атоми у кристалах утворюють просторові дифракційні ґратки. Дифракція рентгенівських променів на таких ґратках відкрила нові можливості для дослідження внутрішньої будови кристалічних матеріалів.

Вагомий внесок у розвиток металознавства зробив англійський учений Вільям Юм-Розері, який встановив, що кристалічна структура сплавів

визначається співвідношенням атомних радіусів компонентів, кількістю валентних електронів та різницею електронегативностей хімічних елементів. У 1920-х роках В. Юм-Розері відкрив низку електронних сполук, у яких зміна кристалічної структури зумовлюється середнім числом валентних електронів. Ці сполуки отримали назву фаз Юма–Розері.

В історії розвитку матеріалознавства важливим етапом стало формування уявлень про дислокації. Спочатку їх існування було не експериментально встановлене, а теоретично передбачене. Це було зумовлено значною невідповідністю між розрахунковими значеннями напруги, необхідної для пластичної деформації ідеального кристала, та значно меншими величинами напруги, які спостерігалися під час реальних механічних випробувань матеріалів. Додатковим підтвердженням необхідності введення поняття дислокацій стало явище деформаційного зміцнення - підвищення міцності кристалічних матеріалів унаслідок пластичної деформації.

Математичний опис дислокацій у суцільному середовищі вперше запропонував у 1907 році італійський математик і механік В. Вольтерра. У його працях дислокації розглядалися як особливий тип напруженого стану деформованого тіла. Вирішальне значення для розвитку дислокаційної теорії та формування сучасних уявлень про механізми пластичної деформації кристалічних матеріалів мали праці Дж. Тейлора, Ег. Орована та М. Поляні, які були опубліковані у 1934 році.

Важливий внесок у розвиток матеріалознавства зробило створення електронної мікроскопії. У 1937 році фірма Siemens оголосила про випуск першого електронного мікроскопа з роздільною здатністю близько 7 нм. Розвиток електронної мікроскопії дав змогу отримати експериментальні підтвердження існування точкових дефектів у кристалах, що було продемонстровано американським ученим Ер. Мюллером.

Серійне виробництво електронних мікроскопів компанією Siemens розпочалося вже у 1955 році. У подальшому просвічуючі електронні мікроскопи стали одним із найважливіших інструментів дослідження структури матеріалів, забезпечуючи збільшення до 100 000 разів. За допомогою електронної

мікроскопії вивчають різноманітні дефекти кристалічної структури, радіаційні пошкодження, стадії фазових перетворень, взаємну орієнтацію фаз, процеси рекристалізації, локальні текстури та фазовий склад матеріалів. Електронна мікроскопія підтвердила, що реальні матеріали - від природних мінералів до феромагнітних керамік і квазікристалів - характеризуються недосконалою атомною будовою. Одні з найбільш інформативних зображень дислокацій були отримані у 1956 році П. Хіршем - одним із засновників методики електронної мікроскопії дефектів кристалічної структури.

До теперішнього часу основою матеріально-технічної бази машинобудування залишалася чорна металургія, яка забезпечувала виробництво сталей і чавунів із високими показниками конструкційної міцності. Проте традиційні металеві матеріали мають низку суттєвих недоліків, зокрема значну щільність і недостатню корозійну стійкість. Розвиток космічної техніки, електроніки, атомної енергетики, оборонної промисловості та нафтогазовидобувної галузі зумовив потребу у створенні нових матеріалів із покращеними експлуатаційними характеристиками, що стало потужним стимулом для розвитку матеріалознавства.

У результаті наукових досліджень і технологічних розробок промисловість поступово переорієнтовувалася на ширше застосування сплавів на основі титану, магнію та алюмінію, які поєднують високу міцність із малою густиною та підвищеною корозійною стійкістю. Одним із головних завдань сучасного матеріалознавства стало створення матеріалів із наперед заданими властивостями відповідно до конкретних умов експлуатації та розрахункових параметрів роботи. Значна увага при цьому приділяється дослідженню поведінки матеріалів в екстремальних умовах - за високих і низьких температур, підвищеного тиску, агресивних середовищ та інтенсивних механічних навантажень.

Наприкінці 1960-х років керамічні матеріали здійснили вагомий прорив у розвитку матеріалознавства, за короткий час перетворившись на третій за значенням промисловий клас матеріалів після металів і полімерів. Завдяки високій жаростійкості, твердості та хімічній інертності кераміка стала

конкурентоспроможною альтернативою металам для роботи в умовах високих температур. Особливого розвитку набули напрями створення спеціалізованої кераміки, зокрема надпровідної кераміки, матеріалів броньового захисту військової техніки, а також теплозахисних покриттів для головних частин ракет і космічних апаратів.

У 1970-х роках значно розширилося виробництво спеціальних жароміцних сплавів, здатних працювати при температурах до 1050 °С. Такі матеріали широко застосовувалися для виготовлення деталей реактивних двигунів і газових турбін, зокрема лопаток турбін, камер згоряння та сопел. Для отримання високоякісних матеріалів аерокосмічного та електронного призначення набули поширення технології електронно-променевої плавки та вакуумно-дугового переплаву, які забезпечували високу чистоту й однорідність металів і сплавів. Одночасно активно розвивалося виробництво високоміцних низьколегованих сталей, властивості яких покращувалися шляхом мікролегування невеликими добавками легувальних елементів. Важливою інновацією стало впровадження термомеханічної обробки - контрольованого поєднання теплового та деформаційного впливу на сталеві заготовки. Застосування цього методу дало змогу істотно підвищити механічні характеристики сталей, особливо ультрамікролегованих, забезпечивши одночасне зростання міцності, пластичності та експлуатаційної надійності матеріалів.

До основних наукових напрямків, що визначають прогрес матеріалознавства в ХХІ столітті, наковці відносять:

- фізичну теорію реальних кристалів і фізику дефектів у твердому тілі;
- металургію тугоплавких, легких, жароміцних, прецизійних електротехнічних сплавів;
- теорію надпровідності та надпровідні матеріали;
- порошкову металургію;
- матеріалознавство напівпровідників, діелектриків, магнітів;
- матеріалознавство композитних матеріалів;
- хімію та матеріалознавство полімерів;

-фізико-хімію та технологію з'єднання різнорідних матеріалів (зварювання, склеювання тощо);

- фізико-хімію та технологію радіоактивних матеріалів;

- фізико-хімію та технологію надчистих матеріалів, монокристалів, тонких плівок, аморфних, аморфно-кристалічних, квазікристалічних, градієнтних і спрямовано-кристалічних матеріалів та покриттів;

- використання технологій обробки матеріалів під високим тиском, напиленням, лазерним випромінюванням, електронним і плазмово-дуговим нагрівом тощо;

- нанотехнології в матеріалознавстві (створення та вивчення матеріалів та конструкцій розмірами близько кількох нанометрів);

- комп'ютерне моделювання у створенні нових матеріалів;

- розробка способів створення матеріалів з наперед заданими властивостями, які не існують у природі.

Реалізація наведених напрямків стала можливою за рахунок використання принципово нових методів і апаратури для дослідження та обладнання для реалізації процесів їх формування у заготовки.

У світовій науковій спільноті визнано, що в найближчі 20 років значну кількість конструкційних і функціональних матеріалів буде замінено принципово новими, що приведе до революції в різних галузях техніки. Про перспективність робіт у цій галузі свідчить і той факт, що майже 22 % світових патентів видаються на винаходи нових речовин і матеріалів. Період від первинного відкриття матеріалу до його потрапляння на ринок складає до 20 років. Прискорення темпів відкриття та впровадження передових матеріальних систем буде мати вирішальне значення для досягнення глобальної конкурентоспроможності в XXI столітті.

1.5. Поняттєво-категоріальний апарат науки

У історичному аспекті наука сформувалася внаслідок суспільного поділу праці та відокремлення розумової діяльності від фізичної. Починаючи з XVI–

XVII століть, наука поступово перетворюється на важливу продуктивну силу суспільства, що забезпечує технологічний, економічний і соціальний розвиток. Її еволюція відбувалася як поступово, через накопичення знань, так і шляхом наукових революцій, які змінювали методологію, структуру та принципи наукового пізнання.

Поняттєво-категоріальний апарат науки являє собою систему базових понять і категорій, що використовуються для опису, пояснення та узагальнення явищ об'єктивної реальності у процесі наукового пізнання. Він забезпечує логічність, послідовність, системність і точність наукового мислення, а також формує основу для побудови наукових теорій, концепцій і методологічних підходів.

Формування сучасного поняттєво-категоріального апарату є результатом тривалого історичного та методологічного розвитку науки і філософії. Його витoki сягають античної філософії, насамперед праць Арістотель, який уперше систематизував основні категорії буття: сутність, кількість, якість, відношення та інші. Подальший розвиток категорійного апарату відбувався у межах середньовічної схоластики та класичної німецької філософії, зокрема у працях Іммануїл Кант і Георг Гегель, де категорії набули більш системного, логічного й діалектичного характеру.

У період наукової революції XVII–XVIII століть поняттєво-категоріальний апарат науки зазнав суттєвих змін. Саме в цей період:

- утвердився експеримент як основний метод наукового пізнання;
- сформувалися точні наукові поняття, зокрема простір, час, рух і причинність;
- активно розвивалася математизація науки;
- посилилася роль емпіричного та раціонального методів дослідження.

Сучасний поняттєво-категоріальний апарат науки є результатом багатовікового розвитку наукової та філософської думки. Він забезпечує логічну впорядкованість знань, сприяє систематизації наукової інформації та створює підґрунтя для подальшого розвитку науки. Завдяки цьому стає можливим глибше розуміння закономірностей природи, суспільства й мислення.

Категорії є найбільш загальними та фундаментальними поняттями науки, що відображають істотні властивості, взаємозв'язки та відношення об'єктивної реальності. Вони формуються у процесі розвитку науки та характеризують рівень її теоретичного осмислення. Категорійний апарат забезпечує єдність наукової мови, полегшує комунікацію між дослідниками, сприяє узагальненню та систематизації знань, а також створює умови для формування нових наукових концепцій і теорій.

У XX–XXI століттях розвиток поняттєво-категоріального апарату науки характеризується такими основними тенденціями:

- міждисциплінарністю, що проявляється у використанні понять і категорій у різних галузях знань;
- високим рівнем абстрагування та узагальнення, спрямованим на створення універсальних категорій, таких як система, структура, функція та інформація;
- формалізацією наукового знання через застосування математичних, логічних і комп'ютерних моделей;
- динамічністю, яка виявляється у постійному уточненні, перегляді та оновленні наукових категорій;
- інтеграцією знань із різних наукових дисциплін.

Попри специфіку окремих наук, існують загальнонаукові категорії, що застосовуються в більшості галузей знань і забезпечують єдність наукового пізнання.

До основних категорій наукового пізнання належать об'єкт і предмет дослідження.

Об'єкт дослідження - це явище, процес або система, на які спрямована пізнавальна, практична чи дослідницька діяльність людини.

Предмет дослідження - це конкретні властивості, аспекти або закономірності об'єкта, що безпосередньо вивчаються у межах наукового дослідження. У сучасному матеріалознавстві предметом дослідження виступають основні типи конструкційних і функціональних матеріалів - метали, полімери, кераміка, а також композиційні матеріали та матеріали зі

спеціальними фізичними властивостями, зокрема аморфні метали, металеві стекла, напівпровідники й надпровідники. Сучасний етап розвитку матеріалознавства характеризується стрімким розширенням номенклатури матеріалів, насамперед за рахунок полімерних і керамічних систем.

Факт - це перевірені й об'єктивні відомості про об'єкт дослідження, встановлені в результаті спостереження, експерименту або інших методів наукового пізнання. Наукового значення факти набувають лише за умови їх систематизації, узагальнення та інтерпретації, оскільки саме вони становлять основу для формування наукових законів, концепцій і теорій. Узагальнені та систематизовані факти утворюють наукові дані, які використовуються для обґрунтування висновків і підтвердження закономірностей.

Поштовхом до проведення наукового дослідження є наявність наукової проблеми - суперечності між уже існуючими знаннями та новими фактами, які не можуть бути пояснені в межах наявних теоретичних уявлень. Наукова проблема являє собою теоретичне або практичне питання, що потребує дослідження та розв'язання. Вона визначає напрям наукового пошуку, обґрунтовує актуальність дослідження, формує його мету, завдання та загальну структуру.

Актуальність наукового дослідження забезпечується відповідністю теми сучасним потребам науки, техніки та практичної діяльності. Аналіз наукових джерел дає змогу об'єктивно оцінити сучасний стан досліджуваної проблеми, визначити ступінь її розробленості та виявити невирішені аспекти. Водночас сам по собі аналіз літератури не забезпечує розв'язання поставлених завдань, оскільки для перевірки гіпотез і формулювання обґрунтованих висновків необхідне проведення власного наукового дослідження.

Метод - це спосіб досягнення наукової мети, система принципів, прийомів і засобів дослідження, що застосовуються для отримання достовірних наукових результатів. Вибір методу визначається характером об'єкта дослідження, поставленими завданнями та особливостями наукової проблеми.

Наукова ідея - це форма наукового пізнання, яка відображає інтуїтивне пояснення явища або процесу без повного теоретичного обґрунтування всіх

причинно-наслідкових зв'язків. Вона ґрунтується на попередньо накопичених знаннях, визначає стратегію наукового пошуку та спрямовує дослідницьку діяльність на досягнення нового результату. Наукова ідея узагальнює попередній досвід пізнання, водночас відкриваючи нові закономірності та перспективи розвитку науки. Практичне втілення наукових ідей реалізується у формі аксіом, постулатів і гіпотез.

Аксіома - це вихідне положення теорії, яке приймається без доведення як очевидне та використовується для побудови й обґрунтування інших теоретичних положень. Постулати в матеріалознавстві являють собою фундаментальні узагальнення, що визначають взаємозв'язок між складом, структурою, технологією обробки та властивостями матеріалів.

До основних постулатів матеріалознавства належать:

1. Властивості матеріалу визначаються його хімічним складом і структурою.

2. Структура матеріалу формується в процесі його отримання, термічної та механічної обробки.

3. Зміна структури призводить до зміни властивостей матеріалу. Навіть за незмінного хімічного складу властивості можуть істотно змінюватися внаслідок термічної обробки, зокрема гартування або відпуску.

4. Властивості матеріалів залежать від умов експлуатації. Температура, механічні навантаження, агресивне середовище та тривалість дії зовнішніх чинників впливають на поведінку матеріалу, спричиняючи явища повзучості, втоми та корозії.

5. Матеріали не мають абсолютно однорідної та бездефектної будови. Реальні матеріали завжди містять структурні дефекти - дислокації, пори, неметалеві включення та мікротріщини, які суттєво впливають на їхні фізичні й механічні властивості.

6. Властивості матеріалів є ієрархічними та масштабозалежними. Процеси, що відбуваються на атомному, мікро- та макрорівнях, взаємопов'язані та повинні аналізуватися комплексно.

Гіпотеза - це науково обґрунтоване ймовірне припущення, висунуте для пояснення явищ, процесів або причинно-наслідкових зв'язків, яке є вихідним етапом наукового пошуку. За допомогою гіпотези проводиться формулювання одного із можливих шляхів розв'язання наукової проблеми. Вона спрямовує процес збору, систематизації та аналізу фактів, а також сприяє формуванню нових положень, що потребують подальшого доведення й перевірки.

Гіпотеза виступає важливим структурним елементом наукового пізнання та є початковою ланкою формування наукової теорії. Вона забезпечує цілеспрямованість дослідження, допомагає впорядковувати фактичний матеріал і визначати логіку подальшого наукового пошуку.

За своєю сутністю гіпотеза є моделлю майбутнього наукового знання. Вона являє собою наукове припущення, яке потребує експериментальної перевірки, теоретичного обґрунтування та практичного підтвердження. Якщо результати дослідження узгоджуються з об'єктивними фактами та не суперечать уже встановленим науковим положенням, гіпотеза може трансформуватися в наукову теорію або стати основою для формулювання наукового закону.

У матеріалознавстві гіпотези розглядають як фундаментальні наукові припущення та концептуальні підходи, що пояснюють будову матеріалів, механізми формування їхніх властивостей і поведінку під впливом зовнішніх чинників. Наукова гіпотеза є необхідною складовою дослідження, оскільки вона:

- забезпечує попереднє пояснення нових проблем, для яких відсутні готові способи розв'язання;
- сприяє інтерпретації наукових фактів, що не узгоджуються з існуючими уявленнями;
- визначає напрям, зміст і методологію майбутнього дослідження.

У сучасному матеріалознавстві застосовують низку фундаментальних гіпотез і концептуальних підходів, серед яких:

1. **Дислокаційна гіпотеза пластичної деформації** - пояснює пластичну деформацію кристалічних матеріалів рухом дислокацій у кристалічній ґратці.

2. **Зерногранична гіпотеза** - ґрунтується на положенні, що межі зерен є активними структурними зонами, які суттєво впливають на механічні, фізичні та хімічні властивості матеріалів.

3. **Фазова гіпотеза** - визначає, що властивості матеріалів залежать від їх фазового складу та характеру фазових перетворень.

4. **Енергетична гіпотеза міцності** - стверджує, що руйнування матеріалу настає тоді, коли накопичена енергія деформації перевищує енергію міжатомних зв'язків.

5. **Гіпотеза самоорганізації матеріалів** - передбачає, що за певних умов структура матеріалу, зокрема наноструктурних матеріалів або аморфних сплавів, може формуватися спонтанно внаслідок нерівноважних процесів.

Якщо результати теоретичних і експериментальних досліджень підтверджують висунуту гіпотезу, вона набуває статусу наукової теорії або стає основою для формулювання наукового закону.

Закони науки - це узагальнені положення, які відображають істотні, стійкі та повторювані зв'язки між явищами й процесами. Вони мають об'єктивний характер і діють незалежно від волі та свідомості людини. Наукові закони становлять ядро наукової теорії та слугують основою для проведення прикладних досліджень і створення нових технологій. Водночас емпіричні закони переважно мають імовірнісний характер, оскільки ґрунтуються на результатах спостережень та експериментів.

У матеріалознавстві закони описують кількісні та якісні залежності між хімічним складом, структурою, методами обробки та властивостями матеріалів. Вони становлять теоретичну основу для прогнозування поведінки матеріалів у різних умовах експлуатації та розроблення нових матеріалів із заданими характеристиками. До базових законів матеріалознавства та фізики твердого тіла належать такі групи закономірностей.

1. **Фізичні та механічні закони.** До цієї групи належить закон Гука, який описує закономірності пружної деформації матеріалів. Відповідно до цього закону, у межах пружної деформації напруження прямо пропорційне відносній

деформації матеріалу. Закон Гука застосовується для характеристики механічної поведінки металів, полімерів, кераміки та інших конструкційних матеріалів.

2. **Закони міцності та руйнування.** Важливе значення має закон Холла–Петча, згідно з яким зі зменшенням розміру зерен підвищуються міцність і твердість матеріалу. Це пояснюється тим, що межі зерен перешкоджають руху дислокацій та ускладнюють пластичну деформацію.

Іншим фундаментальним законом є закон Гріффітса, який описує механізм крихкого руйнування матеріалів. Згідно з ним, поширення тріщини відбувається тоді, коли енергія, що вивільняється під час її росту, перевищує енергію, необхідну для утворення нових поверхонь. Цей закон є основою сучасної механіки руйнування.

3. **Фазові та структурні закони.** До них належить правило фаз Гіббса, яке визначає кількість ступенів вільності у багатофазних системах і дозволяє аналізувати умови рівноваги між фазами. Широко застосовується також правило важеля, яке використовується для визначення кількісного співвідношення фаз у сплавах на основі фазових діаграм стану. Це правило має важливе практичне значення при аналізі процесів кристалізації та термічної обробки матеріалів.

4. **Закон зміцнення деформацією.** Даний закон визначає, що зі збільшенням ступеня пластичної деформації підвищуються міцність і твердість матеріалу. Це явище пов'язане зі зростанням густини дислокацій у кристалічній решітці, що ускладнює подальше переміщення дефектів структури.

Найвищою формою узагальнення та систематизації наукових знань є теорія. Теорія - це цілісна система узагальнених знань, яка пояснює явища та процеси певної сфери діяльності. Вона об'єднує взаємопов'язані закони, поняття, принципи та методи, спрямовані на пояснення окремого фрагмента об'єктивної дійсності. У межах теорії окремі поняття, гіпотези й закони втрачають автономний характер і функціонують як елементи єдиної логічно впорядкованої системи знань.

Теорія забезпечує цілісне пояснення досліджуваних процесів, встановлює причинно-наслідкові зв'язки між явищами та дозволяє прогнозувати нові закономірності й тенденції розвитку науки і техніки. Саме теоретичні

узагальнення є основою для подальшого розвитку наукових досліджень і практичного застосування отриманих знань.

До наукової теорії висуваються такі основні вимоги:

- адекватність об'єкту дослідження;
- повнота та всебічність опису явища;
- внутрішня логічна несуперечність;
- здатність пояснювати взаємозв'язки між елементами системи;
- відповідність експериментальним і практичним даним;
- можливість теоретичного моделювання процесів і явищ;
- прогностична здатність щодо розвитку досліджуваних процесів.

До функцій наукової теорії відносять основні напрями її ролі у науковому пізнанні:

- синтетична функція полягає в об'єднанні окремих фактів, понять, гіпотез, законів і результатів досліджень у цілісну систему знань. Завдяки цій функції наукова теорія не є простим набором розрізнених відомостей, а формує логічно впорядковану картину певної сфери реальності;

- пояснювальна функція полягає в тому, що теорія розкриває сутність явищ, їх причини, механізми виникнення, закономірності розвитку та взаємозв'язки між ними. Саме пояснювальна функція відрізняє наукову теорію від простого опису фактів;

- методологічна функція означає, що теорія виступає основою для вибору методів, принципів і підходів до подальшого дослідження, формує логіку дослідницької діяльності.

- прогностична функція полягає у здатності теорії передбачати нові явища, можливі наслідки певних процесів або результати майбутніх досліджень;

- практична функція полягає у використанні теоретичних знань для розв'язання конкретних практичних завдань. Наукова теорія стає основою для розроблення технологій, нових методик, рекомендацій, програм дій.

Теорії матеріалознавства пояснюють внутрішню будову матеріалів, механізми формування їхніх властивостей і характер поведінки під впливом зовнішніх чинників. У сучасному матеріалознавстві теоретичні положення

об'єднують у кілька основних наукових напрямів, кожен з яких розглядає певні аспекти структури та функціонування матеріалів.

1. Атомно-кристалічна теорія Атомно-кристалічна теорія пояснює властивості матеріалів особливостями міжатомної взаємодії та будовою кристалічної решітки. Основними положеннями цієї теорії є:

- типи міжатомних зв'язків (іонний, ковалентний, металічний, водневий);
- будова кристалічної ґратки;
- наявність і вплив дефектів кристалічної структури.

Саме характер хімічного зв'язку визначає такі властивості матеріалів, як міцність, пластичність, електропровідність, теплостійкість та корозійна стійкість.

2. Теорія кристалічної будови. Теорія кристалічної будови розглядає закономірності просторового розташування атомів у твердому тілі. Вона включає:

- типи кристалічних ґраток (ОЦК, ГЦК, ГЦУ);
- анізотропію фізичних і механічних властивостей;
- вплив орієнтації зерен на характеристики матеріалу.

Дана теорія дозволяє пояснити залежність властивостей матеріалу від його текстури та кристалографічної орієнтації.

3. Теорія дефектів кристалічної будови Теорія дефектів кристалічної будови ґрунтується на положенні, що властивості реальних матеріалів значною мірою визначаються наявністю структурних дефектів. До основних дефектів належать:

- точкові дефекти (вакансії, міжвузлові атоми);
- лінійні дефекти (дислокації);
- поверхневі дефекти (межі зерен, міжфазні поверхні).

Наявність дефектів істотно впливає на міцність, пластичність, електропровідність, дифузійні процеси та інші характеристики матеріалів.

4. Дислокаційна теорія міцності. Дислокаційна теорія міцності пояснює механізми пластичної деформації та зміцнення матеріалів рухом і взаємодією дислокацій. Зростання міцності пов'язане зі збільшенням кількості перешкод для

руху дислокацій під час пластичної деформації та наклепу. Значний вплив на властивості матеріалу мають процеси легування, термічної обробки та подрібнення зерна.

5. Теорія термічної обробки. Теорія термічної обробки дає пояснення зміни структури та властивостей матеріалів унаслідок фазових перетворень і дифузії атомів під час нагрівання та охолодження. Основними видами термічної обробки є:

- відпал;
- гартування;
- відпуск;
- нормалізація.

У результаті термічної обробки змінюються фазовий склад, мікроструктура та експлуатаційні характеристики матеріалів.

Закономірності є конкретними проявами наукових законів і відображають окремі залежності в межах загальних теоретичних концепцій. Наукова концепція являє собою систему взаємопов'язаних поглядів, теоретичних положень і основних ідей щодо об'єкта дослідження. Наукові концепції матеріалознавства формують фундаментальні уявлення про взаємозв'язок між складом, структурою, властивостями та технологією отримання матеріалів.

До основних концепцій матеріалознавства належать такі.

1. Структурна концепція. Структурна концепція базується на положенні, що властивості матеріалу визначаються його структурою на різних масштабних рівнях:

- електронному - тип хімічного зв'язку (металічний, ковалентний, іонний);
- кристалічному - тип кристалічної ґратки, симетрія, параметри елементарної комірки;
- дефектному - вакансії, дислокації, межі зерен;
- мікроструктурному - розміри зерен, фазовий склад, неметалеві включення;
- макроструктурному - пористість, текстура, шаруватість.

2. Фазово-термодинамічна концепція. Фазово-термодинамічна концепція ґрунтується на законах термодинаміки та умовах фазової рівноваги. Відповідно до неї фазовий склад матеріалу визначається мінімумом вільної енергії Гіббса залежно від температури, тиску та концентрації компонентів. Саме ці закономірності пояснюють утворення фериту, перліту, цементиту та інших структурних складових сплавів.

3. Дислокаційна концепція. Дислокаційна концепція пояснює механізми пластичної деформації процесами ковзання та гальмування руху дислокацій. Вона лежить в основі сучасних уявлень про зміцнення матеріалів і механізми руйнування.

4. Квантово-механічна концепція. Квантово-механічна концепція використовується для пояснення електропровідності, напівпровідникових властивостей, магнетизму, надпровідності та оптичних характеристик матеріалів. Вона базується на квантових закономірностях поведінки електронів у твердому тілі.

5. Концепція композиційних матеріалів. Концепція композиційних матеріалів визначає, що їхні властивості залежать від взаємодії матриці та наповнювача. Вирішальне значення мають:

- властивості компонентів;
- їх кількісне співвідношення;
- міжфазна адгезія;
- орієнтація армувальних елементів.

Завдяки цьому композиційні матеріали можуть поєднувати високу міцність, малу густину та стійкість до зовнішніх впливів.

6. Наноструктурна концепція. Наноструктурна концепція ґрунтується на тому, що перехід до структурних елементів розміром менше 100 нм приводить до формування принципово нових властивостей матеріалів. Це пов'язано з домінуванням поверхневих явищ і проявом квантово-розмірних ефектів. Наноструктуровані матеріали характеризуються підвищеною міцністю, зносостійкістю, реакційною здатністю та специфічними електрофізичними властивостями.

Науковий факт - це достовірно встановлена подія, явище або результат спостереження чи експерименту, що слугує основою для формування наукових висновків і підтвердження теоретичних положень. Він є первинним елементом наукового знання та відображає об'єктивні властивості явищ і процесів. На основі наукових фактів виявляються закономірності, формуються теорії та виводяться закони. Процес наукового пізнання передбачає накопичення, перевірку, систематизацію та узагальнення фактів. Лише у впорядкованому й узагальненому вигляді факти стають складовою частиною наукового знання та основою підтвердження законів об'єктивної дійсності.

Науковий результат - це чітко сформульовані нові або уточнені наукові положення, висновки, концепції чи практичні рекомендації, отримані в процесі дослідження, які мають теоретичну або прикладну цінність. Науковий результат відображає внесок дослідника у розвиток певної галузі знань та може бути основою для подальших досліджень або практичного застосування.

Поняття - це форма мислення, що відображає суттєві ознаки предметів, явищ або процесів. За допомогою понять здійснюється узагальнення та систематизація знань про об'єкти дослідження. У матеріалознавстві прикладами понять є: кристалічна ґратка, дефект структури, пластична деформація, міцність, твердість, в'язкість, аморфний стан.

Категорія - це найбільш загальне поняття, яке має універсальний характер і використовується для відображення фундаментальних властивостей та закономірностей реальності. До основних наукових категорій належать: матерія, рух, простір, час, енергія, фаза. Категорії є основою формування наукового світогляду та методології дослідження.

Принципи - це основоположні ідеї, положення та правила, сформовані внаслідок узагальнення наукового досвіду. Вони визначають напрями розвитку науки, виступають орієнтирами для наукового пізнання та забезпечують єдність теоретичних підходів. Кожна галузь науки має власну систему принципів, що визначає її специфіку та вихідні положення відповідної теорії.

Наукова парадигма - це сукупність загальноприйнятих у науковому співтоваристві теоретичних положень, методів, норм і зразків наукового

мислення, які визначають підходи до пояснення фактів і проведення досліджень. Парадигма формує уявлення про об'єкт дослідження та способи інтерпретації наукових явищ у межах логічно узгодженої системи знань. Зміна наукових парадигм у процесі розвитку науки супроводжується науково-технічними революціями, що проявляються у трансформації базових понять, принципів, категорій і методів дослідження.

Сучасна парадигма матеріалознавства характеризується переходом до створення наноматеріалів, композиційних і «розумних» матеріалів із керованими властивостями, широким застосуванням комп'ютерного моделювання, цифрових технологій та методів прогнозування структури й властивостей матеріалів.

До загальнологічних методів наукового пізнання належать індукція, дедукція, аналіз, синтез, абстрагування, ідеалізація, аналогія, формалізація, а також логіко-математичне моделювання. Ці методи забезпечують системність, обґрунтованість і послідовність наукового дослідження.

Аналіз - це метод наукового пізнання, що полягає в умовному або практичному поділі об'єкта дослідження на окремі складові елементи, властивості чи ознаки з метою їх детального вивчення. Кожен елемент розглядається як частина єдиного цілого. Метод аналізу застосовується під час дослідження складних систем для встановлення їхньої структури, властивостей і впливу окремих факторів на результати дослідження.

Синтез - це метод наукового пізнання, який передбачає об'єднання елементів, отриманих у процесі аналізу, у єдину систему та встановлення взаємозв'язків між ними. Синтез використовується для формування цілісного уявлення про об'єкт дослідження, виявлення закономірностей і узагальнення результатів. Аналіз і синтез є взаємопов'язаними та взаємно доповнювальними методами, що застосовуються у процесі наукового дослідження паралельно.

Метод індукції - це спосіб наукового пізнання, який передбачає перехід від окремих фактів, спостережень і результатів експериментів до формування загальних закономірностей, принципів і теоретичних положень. Сутність індукції полягає в узагальненні однорідних явищ та встановленні властивостей

усієї сукупності об'єктів на основі дослідження її окремих представників. Як метод теоретичного дослідження індукція забезпечує формування узагальнюючих висновків шляхом аналізу великої кількості окремих випадків і накопичення емпіричних даних.

У матеріалознавстві метод індукції має важливе значення, оскільки більшість закономірностей щодо властивостей матеріалів встановлюються саме на основі численних експериментальних досліджень. Після аналізу отриманих результатів формуються загальні теоретичні положення щодо структури та поведінки матеріалів. Наприклад, дослідження мікроструктури сталей із різним вмістом вуглецю дало змогу встановити, що зі збільшенням концентрації вуглецю підвищуються твердість і міцність сталі, проте зменшується її пластичність. Аналогічно було визначено, що хром підвищує корозійну стійкість і твердість сплавів, тоді як нікель сприяє збільшенню їхньої в'язкості та пластичності.

Слід зазначити, що висновки за методом індукції мають імовірнісний характер, оскільки ґрунтуються на обмеженій кількості спостережень і експериментів. У зв'язку з цим важливого значення набуває систематичний і репрезентативний відбір об'єктів дослідження. Наприклад, закономірності легування низьковуглецевих сталей не можуть бути безпосередньо перенесені на інструментальні сталі через відмінності їхнього хімічного складу, структури та умов експлуатації.

Метод дедукції - це спосіб наукового пізнання, за якого дослідження здійснюється від загальних теоретичних положень, законів і закономірностей до конкретних висновків щодо властивостей об'єктів та їхньої поведінки в певних умовах. Дедуктивний метод базується на застосуванні загальних наукових принципів для пояснення й прогнозування окремих явищ, що робить його важливим інструментом теоретичного аналізу.

У матеріалознавстві дедукція використовується для прогнозування властивостей матеріалів на основі вже встановлених законів і теорій. Наприклад, застосування закону Гука дає змогу зробити висновок, що матеріал із високим модулем Юнга характеризуватиметься більшою жорсткістю та зазнаватиме

меншої деформації за однакового механічного навантаження. У межах теорії кристалічної будови дедуктивний підхід дозволяє прогнозувати механічні властивості матеріалів залежно від типу їхньої кристалічної ґратки: метали з гранецентрованою кубічною (ГЦК) ґраткою, як правило, мають високу пластичність, тоді як метали з об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) ґраткою можуть проявляти крихкість за низьких температур.

У наукових дослідженнях індукція та дедукція застосовуються у тісному взаємозв'язку. Індуктивний підхід забезпечує накопичення фактів і формування гіпотез, тоді як дедуктивний метод дозволяє теоретично обґрунтовувати отримані висновки та перевіряти їх у конкретних умовах. Саме поєднання індукції та дедукції забезпечує цілісність і наукову обґрунтованість процесу пізнання.

1.6. Основні наукові поняття в матеріалознавстві

Поняття - це форма мислення, що відображає предмети, явища та процеси через їхні суттєві, загальні й необхідні ознаки та взаємозв'язки. Сукупність основних понять певної науки утворює її понятійний апарат.

Понятійний апарат матеріалознавства - це система базових термінів, визначень і категорій, що використовуються для опису складу, будови, властивостей, способів одержання та умов експлуатації матеріалів. Він забезпечує наукову точність, логічність і єдність у дослідженні матеріалів та процесів їх обробки. Основні поняття матеріалознавства можна поділити на кілька груп.

1. Загальні поняття

Матеріал - речовина або система речовин, що застосовується для виготовлення виробів, деталей, конструкцій і технічних систем.

Речовина - форма матерії, яка має певний хімічний склад, будову та властивості. Усі фізичні тіла складаються з речовин, що характеризуються визначеними фізичними, хімічними та механічними властивостями.

Компонент - хімічний елемент або хімічна сполука, що входить до складу матеріалу та визначає його структуру і властивості.

Фаза - однорідна частина фізико-хімічної системи, яка характеризується однаковими хімічними й фізичними властивостями в усьому об'ємі та відокремлена від інших частин системи поверхнею розділу.

2. Структурні поняття

Структура матеріалу - внутрішня будова матеріалу, що формується на атомному, кристалічному, мікро- та макроскопічному рівнях і визначає його експлуатаційні властивості.

Кристалічна ґратка - впорядкована періодична просторова система розташування атомів, йонів або молекул у кристалічній речовині, яка визначає її фізичні та механічні характеристики.

Дефекти кристалічної будови - порушення ідеальної структури кристалічної ґратки, що виникають у реальних матеріалах. До них належать точкові, лінійні, поверхневі та об'ємні дефекти, які суттєво впливають на властивості матеріалів.

3. Фізико-механічні властивості матеріалів

Міцність - здатність матеріалу чинити опір руйнуванню або незворотній деформації під дією зовнішніх навантажень.

Пластичність - здатність матеріалу змінювати форму та розміри під дією навантаження без руйнування і зберігати набуту форму після припинення дії зовнішніх сил.

Крихкість - схильність матеріалу до руйнування без значної пластичної деформації.

Пружність - здатність матеріалу відновлювати початкову форму, розміри та об'єм після припинення дії навантаження, що спричинило деформацію.

Твердість - здатність матеріалу чинити опір проникненню в його поверхню іншого, твердішого тіла.

Ударна в'язкість - здатність матеріалу поглинати механічну енергію в процесі деформації та руйнування під дією ударного навантаження. Вона характеризує стійкість матеріалу до крихкого руйнування.

4. Фізичні та хімічні властивості

Теплопровідність - здатність матеріалу передавати теплову енергію від більш нагрітих ділянок до менш нагрітих унаслідок руху та взаємодії частинок речовини.

Електропровідність - здатність матеріалу проводити електричний струм під дією зовнішнього електричного поля.

Магнітні властивості - сукупність характеристик матеріалу, що визначають його здатність створювати магнітне поле, взаємодіяти з ним і змінювати магнітний стан під впливом зовнішнього магнітного поля.

Корозійна стійкість - здатність матеріалу чинити опір руйнівному впливу навколишнього середовища та зберігати свої властивості в процесі експлуатації.

Жаростійкість - здатність матеріалу протистояти хімічному руйнуванню та окисненню при високих температурах під дією газоподібного середовища.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 1

1. Що таке наука і яку роль вона відіграє у розвитку суспільства?
2. У яких основних аспектах уживається поняття «наука»?
3. Яка головна мета науки як особливої форми пізнавальної діяльності?
4. Що таке наукова проблема і чому саме вона є поштовхом до дослідження?
5. Які основні стадії наукового пізнання виділяють у процесі дослідження?
6. Чим емпіричний рівень дослідження відрізняється від теоретичного?
7. Яке значення має практика для розвитку науки та перевірки істинності знань?
8. Назвіть основні ознаки науки як системи знань і сфери діяльності.
9. Які критерії науковості дозволяють відрізнити наукове знання від псевдонаукового?
10. У чому полягає різниця між відносним і абсолютним знанням?
11. Що таке псевдонаука і які її характерні ознаки?
12. Яке значення має науковий скептицизм для розвитку науки?

РОЗДІЛ 2. ОРГАНІЗАЦІЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКОЇ РОБОТИ В УКРАЇНІ

2.1 Управління у сфері науки

Наукова діяльність є інтелектуальною та творчою діяльністю, спрямованою на здобуття, систематизацію, розвиток і практичне використання нових знань. В Україні її здійснення регламентується Законом України «Про наукову і науково-технічну діяльність», який визначає правові, організаційні та фінансові засади функціонування й розвитку науково-технічної сфери. Законодавча база створює умови для розвитку науки відповідно до потреб суспільства, держави та сучасних викликів науково-технічного прогресу.

Відповідно до чинного законодавства, наукова діяльність охоплює наукову та науково-технічну роботу, що передбачає проведення фундаментальних і прикладних досліджень, а також експериментальних розробок з метою отримання нових наукових і практичних результатів.

Наукова діяльність реалізується у різних формах, серед яких виокремлюють:

- науково-дослідницьку;
- науково-організаційну;
- науково-інформаційну;
- науково-педагогічну;
- науково-допоміжну діяльність.

Кожна із зазначених форм характеризується специфічними функціями, завданнями та результатами, що забезпечують комплексний розвиток наукової сфери.

Науково-технічна діяльність є складовою наукової діяльності та охоплює дослідження, експериментальні розробки й технологічні роботи, спрямовані на створення нових технічних рішень, технологій і методів їх практичного впровадження. Її основною метою є застосування наукових знань для вирішення актуальних технологічних, інженерних, економічних, соціальних і гуманітарних

проблем. Провідними формами науково-технічної діяльності є прикладні дослідження та експериментальні розробки.

До основних принципів державного управління та регулювання у сфері наукової і науково-технічної діяльності належать:

- єдність науково-технічного, економічного, соціального та духовного розвитку суспільства;
- ефективне поєднання централізації та децентралізації управління у сфері науки;
- дотримання вимог екологічної безпеки;
- визнання свободи наукової творчості;
- забезпечення збалансованого розвитку фундаментальних і прикладних досліджень;
- використання досягнень світової науки та розвиток міжнародного наукового співробітництва;
- свобода поширення відкритої науково-технічної інформації;
- інтеграція української науки у світовий та Європейський дослідницький простір із дотриманням інтересів національної безпеки;
- визнання допустимості обґрунтованого ризику отримання негативного результату в процесі наукових досліджень.

Основними цілями державної політики України у сфері науки є:

- наукове забезпечення стратегічного розвитку держави та суспільства;
- досягнення високого рівня розвитку науки і техніки;
- примноження національного інтелектуального та економічного потенціалу;
- підвищення якості життя населення;
- зміцнення національної безпеки;
- реалізація інтелектуального потенціалу громадян;
- забезпечення свободи наукової творчості;
- розвиток наукової діяльності у підприємницькому секторі;

- інтеграція України у світовий та європейський науково-дослідний простір.

Організаційна структура науки в Україні являє собою багаторівневу систему державних органів, наукових установ та закладів вищої освіти. Державне управління у сфері науки здійснюють Верховна Рада України, Кабінет Міністрів України та Президент України. Провідне місце серед наукових установ посідає Національна академія наук України, яка координує розвиток фундаментальних і прикладних досліджень та забезпечує науковий потенціал держави.

Сукупність органів державної влади, наукових установ і дослідницьких організацій формує організаційну структуру науки в Україні та забезпечує реалізацію державної науково-технічної політики.

Президент України як глава держави сприяє розвитку науки, інновацій та технологій з метою забезпечення технологічної незалежності й сталого розвитку країни. Відповідно до Конституції України та чинного законодавства Президент України:

- визначає систему органів виконавчої влади у сфері науки;
- здійснює контроль за функціонуванням цієї системи;
- утворює консультативно-дорадчі органи з питань науково-технічної політики.

Верховна Рада України відповідно до Конституції України та чинного законодавства визначає основні засади і пріоритетні напрями державної політики у сфері наукової та науково-технічної діяльності. До її повноважень належать затвердження пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки, а також прийняття загальнодержавних (національних) програм науково-технічного розвитку України.

Кабінет Міністрів України як вищий орган у системі органів виконавчої влади забезпечує реалізацію державної науково-технічної політики. Зокрема, уряд подає Верховній Раді України пропозиції щодо визначення пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки, їх фінансового та матеріально-технічного забезпечення, організовує виконання загальнодержавних науково-технічних

програм і затверджує державні науково-технічні програми відповідно до встановлених пріоритетів.

З метою забезпечення ефективної взаємодії між науковою спільнотою, органами державної влади та реальним сектором економіки у формуванні та реалізації єдиної державної політики у сфері науки і технологій при Кабінеті Міністрів України функціонує Національна рада України з питань розвитку науки і технологій - постійно діючий консультативно-дорадчий орган.

Відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 5 квітня 2017 року № 226, основними функціями Національної ради є:

- підготовка та подання Кабінетові Міністрів України пропозицій щодо формування державної політики у сфері наукової та науково-технічної діяльності;
- розроблення пропозицій щодо визначення пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки та механізмів їх реалізації;
- підготовка рекомендацій щодо інтеграції української науки у світовий та Європейський дослідницький простір із урахуванням національних інтересів держави;
- формування пропозицій щодо функціонування системи незалежної експертизи державних цільових наукових і науково-технічних програм, наукових проєктів, державної атестації наукових установ, а також присудження наукових ступенів і присвоєння вчених звань;
- розгляд проєктів концепцій державних цільових наукових і науково-технічних програм та надання відповідних висновків щодо них;
- надання Кабінетові Міністрів України рекомендацій щодо формування державного бюджету в частині фінансування наукової та науково-технічної діяльності, а також розподілу коштів між базовим і конкурсним фінансуванням наукових досліджень та грантовою підтримкою Національного фонду досліджень України;
- заслуховування та оцінювання звітів центральних органів виконавчої влади, Національного фонду досліджень України, Національної академії наук України, галузевих академій наук та інших розпорядників бюджетних коштів

щодо ефективності використання фінансування наукової діяльності та отриманих результатів;

- підготовка та оприлюднення щорічної доповіді про стан і перспективи розвитку наукової та науково-технічної сфери, а також щодо виконання Україною пріоритетів Європейського дослідницького простору;

- розроблення пропозицій щодо створення та розвитку державної дослідницької інфраструктури і системи державних ключових лабораторій;

- здійснення взаємодії у встановленому порядку з відповідними органами іноземних держав та міжнародними організаціями у сфері науки і технологій;

- ініціювання та замовлення прогнозних і форсайтних досліджень у галузі науки, технологій та інновацій, а також організація наукової експертизи рішень органів виконавчої влади у науковій сфері;

- підготовка пропозицій щодо принципів наукової етики та механізмів контролю за їх дотриманням;

- розроблення спільно з представниками реального та фінансового секторів економіки механізмів комерціалізації результатів наукових досліджень;

- надання рекомендацій щодо ефективної реалізації міжнародних проєктів і програм технічної допомоги у сфері наукової та науково-технічної діяльності;

- підготовка пропозицій щодо подальшого розвитку наукової та науково-технічної сфери в Україні;

- розроблення стратегічних підходів до залучення та підготовки учнівської молоді до наукової й науково-технічної діяльності.

Міністерство освіти і науки України є центральним органом виконавчої влади, який забезпечує формування та реалізацію державної політики у сферах освіти, науки, науково-технічної й інноваційної діяльності, а також у сфері інтелектуальної власності. Міністерство у взаємодії з науковими установами визначає пріоритетні напрями розвитку науки, організовує планування та фінансування наукових досліджень за рахунок коштів державного бюджету та інших джерел фінансування. Водночас воно сприяє впровадженню результатів

наукових досліджень і досягнень науково-технічного прогресу в різні галузі суспільного виробництва та практичної діяльності.

У науковій сфері функціонує значна кількість організаційних структур, створених централізовано, - від невеликих наукових лабораторій до великих науково-дослідних інститутів і спеціалізованих наукових центрів. Організація науки в державі охоплює чотири основні сектори, які забезпечують функціонування та розвиток науково-дослідної діяльності:

1. **Академічний сектор** - орієнтований на проведення фундаментальних наукових досліджень, результатом яких є отримання нових знань, формування наукових концепцій, ідей і теорій. До цього сектору належать установи Національної академії наук України та галузевих академій наук.

2. **Вузівський сектор (сектор вищої освіти)** - забезпечує проведення фундаментальних і прикладних досліджень у поєднанні з освітнім процесом, а також сприяє практичному застосуванню отриманих наукових результатів.

3. **Галузевий сектор** - спрямований переважно на виконання прикладних наукових досліджень, розроблення нових технологій, матеріалів і продукції. Фінансування таких досліджень здійснюється галузевими міністерствами, відомствами та іншими профільними структурами.

4. **Виробничий сектор** - пов'язаний із впровадженням науково-технічних розробок у діяльність підприємств, удосконаленням технічних процесів, технологій і створенням нових видів продукції.

Наукова діяльність у закладах вищої освіти є невід'ємною складовою освітнього процесу та спрямована на інтеграцію наукової, освітньої й виробничої діяльності. Відповідно до Закону України «Про вищу освіту», основними завданнями наукової діяльності у закладах вищої освіти є:

- забезпечення органічної єдності змісту освіти та наукових програм;
- розроблення стандартів вищої освіти, підручників і навчальних посібників з урахуванням сучасних досягнень науки і техніки;
- впровадження результатів наукових досліджень у практичну діяльність;
- залучення учасників освітнього процесу до виконання науково-дослідної роботи;

– організація та проведення наукових і науково-практичних заходів, зокрема семінарів, конференцій, олімпіад і конкурсів.

З метою забезпечення доступу дослідників до сучасного й унікального обладнання створюються центри колективного користування науковим обладнанням. Такі центри можуть функціонувати як структурні підрозділи наукових установ або закладів вищої освіти, а також як самостійні юридичні особи незалежно від форми власності.

Науковий потенціал України представлений розгалуженою системою установ і організацій, що функціонують у всіх основних галузях науки. Науково-дослідні роботи виконуються установами державної, комунальної та приватної форм власності, які мають рівні права щодо провадження наукової та науково-технічної діяльності відповідно до чинного законодавства України.

Безпосередню наукову діяльність в Україні здійснюють:

- науково-дослідні та проєктні установи Національна академія наук України;
- установи галузевих академій наук;
- наукові підрозділи закладів вищої освіти;
- науково-дослідні, конструкторські та технологічні установи міністерств і відомств;
- наукові підрозділи промислових підприємств;
- наукові установи та організації, створені на комерційній основі;
- громадські наукові організації.

Основними напрямками діяльності наукових установ є проведення фундаментальних і прикладних досліджень, виконання науково-технічних розробок, надання науково-технічних послуг, здійснення наукової експертизи, підготовка наукових кадрів, а також розвиток і збереження наукової інфраструктури держави.

Водночас для української науки початку ХХІ століття характерні низка негативних тенденцій, серед яких: скорочення кількості наукових організацій і виконавців досліджень, зміщення наукових пріоритетів у бік суспільних і гуманітарних наук, а також недостатній рівень упровадження результатів

наукових досліджень у практичну діяльність. Порівняно з 1991 роком кількість установ, що здійснюють дослідження у сфері технічних наук, зменшилася більш ніж удвічі, що негативно позначилося на розвитку науково-технічного потенціалу держави.

За характером і цілями розв'язуваних завдань наукові дослідження поділяють на фундаментальні та прикладні.

Фундаментальні наукові дослідження охоплюють теоретичні та експериментальні роботи, спрямовані на здобуття нових знань про закономірності розвитку природи, суспільства, людини та їх взаємозв'язків. Основним завданням фундаментальної науки є пізнання законів, що визначають функціонування і взаємодію базових структур природи, суспільства та мислення.

До сфери фундаментальних досліджень належать фізико-математичні, технічні, хімічні, біологічні науки, науки про Землю, а також соціальні науки. Зокрема, це математика, ядерна фізика, фізика плазми, фізика низьких температур, геологія, геофізика, фізика атмосфери, гідросфери та літосфери.

Результатами фундаментальних досліджень є формування гіпотез і теорій, відкриття нових законів природи, встановлення раніше невідомих явищ і властивостей матерії, створення нових методів наукового пізнання та визначення закономірностей розвитку суспільства. Такі дослідження, як правило, не орієнтовані на безпосереднє практичне застосування, оскільки їх основною метою є отримання нових знань незалежно від можливостей їхнього подальшого використання.

Фундаментальні дослідження можуть завершуватися науковими публікаціями, формуванням рекомендацій щодо проведення прикладних досліджень або визначенням перспектив практичного використання отриманих результатів. Для них характерний високий рівень невизначеності щодо досягнення конкретного результату, а практичне впровадження здобутих знань нерідко відбувається лише через тривалий проміжок часу.

Прикладні наукові дослідження являють собою теоретичні та експериментальні роботи, спрямовані на отримання та використання нових знань для розв'язання практичних завдань. Вони ґрунтуються на досягненнях

фундаментальної науки, яка створює для прикладних досліджень необхідну теоретичну основу у вигляді законів, закономірностей і наукових теорій. Рівень розвитку прикладних досліджень і науково-технічних розробок значною мірою залежить від досягнень фундаментальної науки, що забезпечує науково-технічний прогрес і впровадження інновацій у різні сфери суспільної діяльності.

Результатом прикладних досліджень є отримання нових знань, спрямованих на створення або вдосконалення матеріалів, продуктів, пристроїв, методів, систем і технологій, а також розроблення практичних рекомендацій щодо розв'язання актуальних науково-технічних і суспільних проблем. Створення конкурентоспроможної техніки та сучасних технологій можливе лише на основі досягнень фундаментальних і прикладних досліджень.

Прикладні дослідження поділяються на пошукові, науково-дослідні та дослідно-конструкторські. До прикладних наук належать технічні науки, значна частина медичних, економічних та інших галузей знань. У структурі сучасної науки прикладні дослідження становлять переважну частину наукових робіт і охоплюють до 90 % наукової діяльності.

Основним критерієм розмежування фундаментальних і прикладних досліджень є ступінь їх зв'язку із суспільною практикою та потребами матеріального виробництва. Водночас такий поділ є відносним, оскільки результати фундаментальних досліджень нерідко стають теоретичною основою для подальшого практичного використання та розвитку інноваційних технологій.

До основних видів наукової та науково-технічної діяльності належать науково-дослідні, дослідно-конструкторські, проектно-конструкторські, дослідно-технологічні, технологічні, пошукові та проектно-пошукові роботи, виготовлення дослідних зразків або партій науково-технічної продукції, а також інші види діяльності, пов'язані з доведенням нових знань до стадії практичного застосування. До таких видів діяльності також належать наукове керівництво дослідженнями, консультування аспірантів і докторантів, а також організація науково-дослідного процесу. Прикладні дослідження, на відміну від

фундаментальних, значно більшою мірою піддаються плануванню та прогнозуванню результатів.

Наукові дослідження здійснюються з метою отримання наукового результату. Науковий результат - це нове знання, здобуте в процесі фундаментальних або прикладних досліджень і зафіксоване на носіях наукової інформації у формі звіту, наукової праці, доповіді, монографії, відкриття, нового конструктивного чи технологічного рішення, експериментального зразка або завершеного випробування.

Науково-технічний (прикладний) результат являє собою нові або суттєво вдосконалені матеріали, продукти, процеси, пристрої, технології, системи чи послуги, створені в ході прикладних досліджень і розробок, які впроваджені або можуть бути впроваджені у практичну діяльність.

Залежно від поставлених завдань прикладні наукові дослідження можуть охоплювати:

- проведення пошукових досліджень та визначення перспективних шляхів розв'язання наукової проблеми;
- розроблення експериментально-теоретичних основ удосконалення існуючих або створення нових технологічних процесів і технічних об'єктів;
- виконання дослідно-конструкторських робіт;
- доведення створених технологій, процесів або технічних рішень до стадії практичного впровадження.

Ефективне впровадження інновацій забезпечується функціонуванням послідовного науково-виробничого ланцюга: «фундаментальна наука - прикладні дослідження - дослідне виробництво». Дослідно-конструкторські розробки спрямовані на доведення результатів науково-дослідних робіт до рівня серійного виробництва продукції. Вони передбачають створення проектно-технічної документації, а також експериментальну перевірку технічних, технологічних і виробничих рішень.

За джерелами фінансування наукові дослідження поділяють на держбюджетні, госпдоговірні та ініціативні. Держбюджетні дослідження (фундаментальні, прикладні, пошукові тощо) фінансуються за рахунок коштів

державного бюджету та є одним із ключових механізмів реалізації державної політики у сфері наукової й науково-технічної діяльності.

Грантова підтримка прикладних наукових досліджень і науково-технічних (експериментальних) розробок, що реалізуються протягом кількох років, надається відповідно до пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки, визначених законодавством на момент проведення конкурсного відбору.

Грант (від лат. *gratia* - «безоплатно») - це фінансові ресурси, які безоплатно надаються грантодавцем (донором або спонсором) фізичній особі чи неприбутковій організації для реалізації визначених програм або виконання наукових досліджень.

Гранти надаються на конкурсних засадах за результатами розгляду поданих заявок. Одержувач гранту зобов'язаний забезпечити цільове використання коштів і надати відповідну звітність. Грантодавцями можуть виступати фізичні та юридичні особи, у тому числі іноземні, а також міжнародні організації, уповноважені здійснювати грантову діяльність на території України. Основною метою підготовки грантової заявки є обґрунтування актуальності дослідження, демонстрація очікуваних результатів та підтвердження спроможності ефективно реалізувати проєкт. За оцінками соціологів, пошук інформації про грантові програми, її аналіз і підготовка заявок можуть займати до 20 % робочого часу дослідника.

Господогвірні дослідження фінансуються організаціями-замовниками - міністерствами, підприємствами або приватними структурами - на підставі господарських договорів. Ініціативні (нефінансовані) дослідження виконуються за власною ініціативою науковців або в межах міжустановчого наукового співробітництва.

З метою стимулювання фундаментальних і прикладних досліджень, реалізації державної політики у сфері науки та інтеграції України у світовий науковий простір створено Національний фонд досліджень України. Фонд здійснює експертну оцінку якості та результативності підтриманих проєктів, формує бази даних наукових досліджень та забезпечує їх фінансування. Це державна бюджетна установа, основним завданням якої є грантова підтримка

фундаментальних досліджень у природничих, технічних, суспільних і гуманітарних науках, а також прикладних досліджень і науково-технічних розробок за пріоритетними напрямками.

В Україні визначаються довгострокові та середньострокові пріоритетні напрями наукової, науково-технічної й інноваційної діяльності. Довгострокові пріоритети - це науково, економічно та соціально обґрунтовані напрями досліджень і розробок, що встановлюються на період до 10 років і забезпечують концентрацію ресурсів держави та наукового потенціалу для задоволення ключових потреб розвитку суспільства і держави.

Середньострокові пріоритетні напрями наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності визначаються на період до 5 років на основі довгострокових пріоритетів з метою їх практичної реалізації. Саме за цими напрямками здійснюється державна підтримка наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності.

Для України особливого значення набувають прикладні наукові дослідження, спрямовані на зміцнення національної безпеки й оборони, підвищення енергоефективності, розвиток критичних технологій, зокрема інформаційно-комунікаційних технологій та систем штучного інтелекту, удосконалення сфери охорони здоров'я та забезпечення повоєнного відновлення держави. Особлива увага приділяється розробкам подвійного призначення, які сприяють сталому розвитку, підвищенню конкурентоспроможності економіки та забезпеченню безпеки населення в умовах воєнного стану.

Відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 30 квітня 2024 року № 476, до ключових пріоритетних напрямів прикладних наукових досліджень в умовах воєнного стану належать:

- національна безпека і оборона - розроблення новітніх технологій, озброєння та військової техніки, систем кібербезпеки, а також засобів захисту критичної інфраструктури;

- енергетика та енергоефективність - пошук і впровадження альтернативних джерел енергії, підвищення рівня енергоефективності, забезпечення енергетичної незалежності держави та захист енергетичних мереж;

- інформаційні та комунікаційні технології - розвиток систем штучного інтелекту, технологій Big Data, сучасних засобів зв'язку та інформаційної безпеки;
- науки про життя та охорона здоров'я - створення нових методів профілактики, діагностики та лікування поширених захворювань, а також розроблення сучасних технологій реабілітації поранених;
- раціональне природокористування - розроблення методів відновлення довкілля, порушеного внаслідок бойових дій, та впровадження сучасних агротехнологій;
- нові речовини і матеріали - створення інноваційних матеріалів із покращеними фізико-хімічними характеристиками для потреб промисловості та оборонного сектору.

Під час визначення тематики наукових досліджень необхідно враховувати зазначені пріоритети, які держава визначає як стратегічно важливі напрями свого розвитку. Середньострокові пріоритетні напрями формуються на основі стратегічних і спрямовуються на їх поетапну реалізацію на загальнодержавному, галузевому та регіональному рівнях. Водночас вони забезпечують формування ефективного сектору наукових досліджень і створюють умови для практичного впровадження отриманих результатів.

З метою підтримки наукових досліджень, що здійснюються науковими установами, закладами вищої освіти та окремими вченими, у 2018 році відповідно до Закону України «Про наукову і науково-технічну діяльність» було створено Національний фонд досліджень України. Фонд є державною бюджетною установою, основним призначенням якої є надання грантової підтримки:

- фундаментальним науковим дослідженням у галузях природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук;
- прикладним науковим дослідженням та науково-технічним (експериментальним) розробкам за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки.

Національний фонд досліджень України є важливим інструментом реалізації державної політики у сфері науки, оскільки забезпечує фінансування заходів, спрямованих на розвиток наукового потенціалу держави. Діяльність Фонду орієнтована на підтримку наукової спільноти, здатної генерувати нові знання відповідно до актуальних потреб суспільства, економіки та держави.

До основних завдань Фонду належать:

- фінансова підтримка фундаментальних наукових досліджень на конкурсних засадах;
- сприяння розвитку наукових контактів і поширенню наукової інформації в Україні та за її межами;
- підтримка міжнародного наукового співробітництва та інтеграції української науки у світовий науковий простір.

Основним механізмом діяльності Фонду є організація та проведення відкритих конкурсів наукових проєктів із обов'язковим проведенням незалежної наукової та науково-технічної експертизи, зокрема за участю іноземних експертів. Після визначення переможців Фонд забезпечує їх фінансову та організаційну підтримку. Такий підхід сприяє впровадженню сучасних науково-технологічних розробок, підвищенню конкурентоспроможності української науки та формуванню сучасного дослідницького потенціалу держави.

2.2 Національна академія наук України

Вищою самоврядною науковою організацією України є Національна академія наук України (НАН України) - державна неприбуткова бюджетна установа. Вона організовує та здійснює фундаментальні й прикладні дослідження з ключових проблем природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук.

Основною метою діяльності Національна академія наук України є:

- здобуття нових та узагальнення наявних знань про природу, людину і суспільство;

- розроблення наукових засад соціально-економічного та технологічного розвитку держави;
- впровадження результатів наукових досліджень у практичну діяльність;
- підготовка висококваліфікованих наукових кадрів;
- формування наукового світогляду та популяризація науки в суспільстві.

До складу НАН України входить близько 150 наукових установ, у яких працюють понад 20 тисяч наукових співробітників і дослідників.

Керівництво НАН України здійснює Президент Академії, який обирається Загальними зборами. Академія побудована за галузевим принципом і складається з відділень за основними напрямками наук. Самоврядність НАН України полягає у праві самостійно визначати напрями та тематику наукових досліджень, формувати власну структуру, вирішувати науково-організаційні, кадрові та господарські питання, а також здійснювати міжнародне наукове співробітництво.

Найвищим органом управління НАН України є Загальні збори, до складу яких входять дійсні члени (академіки) та члени-кореспонденти Академії. Крім того, до складу Загальних зборів входять іноземні члени та представники наукових установ, підпорядкованих НАН України. Кількість дійсних членів Академії не перевищує 200 осіб, а членів-кореспондентів - 400 осіб.

Фінансування діяльності НАН України щорічно визначається Законом України про Державний бюджет України.

У структурі НАН України функціонують три секції:

- фізико-технічних і математичних наук;
- хімічних і біологічних наук;
- суспільних і гуманітарних наук.

Зазначені секції об'єднують 14 наукових відділень: математики; інформатики; механіки; фізики та астрономії; наук про Землю; фізико-технічних проблем матеріалознавства; фізико-технічних проблем енергетики; ядерної фізики та енергетики; хімії; біохімії, фізіології та молекулярної біології;

загальної біології; економіки; історії, філософії та права; літератури, мови та мистецтвознавства.

Основною структурною ланкою НАН України є науково-дослідні інститути та інші наукові установи, зокрема обсерваторії, ботанічні сади, дендропарки, природні заповідники, бібліотеки та музеї. До структури Академії також входять дослідні підприємства, конструкторсько-технологічні організації та обчислювальні центри. Нині у системі НАН України функціонує близько 160 наукових установ і понад 35 підприємств дослідно-виробничої бази.

Матеріалознавство є одним із провідних напрямів сучасної української науки. Його розвиток забезпечується значним інтелектуальним потенціалом, зосередженим у науково-дослідних установах НАН України, галузевих інститутах та закладах вищої освіти. Українські науковці займають провідні позиції у світі у сфері розроблення сцинтиляційних, сегнетоелектричних, сенсорних, надтвердих і радіопоглинаючих матеріалів, електронно-променевих технологій зміцнення, а також технологій вирощування монокристалів і синтезу нанопорошків.

Важливим напрямом розвитку сучасного матеріалознавства є створення композитів, керметів і керамічних матеріалів. Їх використання дає змогу зменшити матеріалоємність виробів, розширити температурні межі експлуатації конструкцій та суттєво підвищити рівень їх надійності й довговічності.

До складу секції фізико-технічних і математичних наук входить відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства, результати діяльності якого відповідають світовому науковому рівню. Основними напрямками роботи є створення конструкційних і функціональних матеріалів із заданими властивостями, розроблення методів їх оброблення та з'єднання, дослідження фізико-хімічної механіки матеріалів, проблем міцності, корозії та захисту металів.

У системі НАН України функціонує низка науково-дослідних інститутів, діяльність яких пов'язана з металознавством і матеріалознавством. Їхні дослідження спрямовані на розроблення фундаментальних основ створення матеріалів із прогнозованими властивостями, удосконалення методів їх

оброблення, з'єднання та технічної діагностики. Значна увага приділяється підвищенню надійності та довговічності конструкцій, створенню сучасних матеріалів для машинобудування, енергетики, авіаційної та аерокосмічної галузей.

Останніми роками суттєво активізувалися дослідження у сфері біомедичних матеріалів, наноматеріалів, нанотехнологій, матеріалів для «зеленої» енергетики та комп'ютерної інженерії. Після початку повномасштабної військової агресії Російської Федерації проти України діяльність наукових установ НАН України значною мірою спрямована на зміцнення обороноздатності держави, забезпечення функціонування критичної інфраструктури та формування науково-технічного потенціалу для повоєнного відновлення України.

Провідним науковим центром України у галузі матеріалознавства є Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України. Інститут здійснює фундаментальні дослідження та прикладні технологічні розробки у сферах порошкової металургії, композиційних матеріалів, фізичної хімії твердого тіла, паяння різномірних матеріалів, фізики фаз високого тиску, а також керамічних і наноструктурованих матеріалів. Упродовж останніх років ученими Інституту створено нові жароміцні та жаростійкі матеріали, матеріали для електроніки, систем накопичення енергії та сонячної енергетики. Інститут засновано у 1964 році.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України спеціалізується на дослідженні, синтезі та створенні надтвердих матеріалів і високоефективного інструментального оснащення. Ученими Інституту розроблено нові надтверді речовини, а також матеріали на основі алмазу, кубічного нітриду бору та карбідів, які широко застосовуються в машинобудуванні, металообробці та інших галузях промисловості.

Одним із провідних наукових центрів у сфері зварювальних технологій і матеріалознавства є Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. В Інституті розроблено сучасні технології інженерії поверхні, зокрема методи нанесення покриттів шляхом електронно-променевого випаровування, що

забезпечують істотне підвищення довговічності та експлуатаційного ресурсу виробів.

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України є провідною науковою установою у галузі фізико-хімічної механіки матеріалів. Основними напрямками його діяльності є дослідження процесів руйнування, корозії та взаємодії матеріалів із різними середовищами.

У Інститут термоелектрики НАН України та МОН України розроблено нові типи термоелектричних перетворювачів енергії на основі напівпровідникових матеріалів, а також сформовано сучасні теоретичні підходи до аналізу й оптимізації термоелектричних систем.

Науково-технологічний комплекс «Інститут монокристалів» НАН України проводить фундаментальні дослідження у сфері росту кристалів, наносистем і функціональних матеріалів. Значна увага приділяється створенню матеріалів для медичної діагностики, лазерної техніки та дефектоскопії.

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України здійснює дослідження, спрямовані на встановлення критеріїв міцності матеріалів і конструкцій, а також на підвищення їхньої надійності з урахуванням умов експлуатації, температурних і механічних навантажень.

Важливе місце серед наукових установ України посідає Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, який з 1945 року є одним із найбільших наукових центрів Європи у галузі фізики металів. Наукові дослідження Інституту здійснюються за такими основними напрямками:

- електронна структура та властивості металів і сполук на їх основі;
- атомна будова металів і металовмісних гетерофазних систем;
- наномасштабні та наноструктуровані матеріали;
- фізика міцності та пластичності металів і сплавів.

Головним завданням Інституту металофізики є проведення фундаментальних досліджень природи структурних змін і фазових перетворень у металевих матеріалах та сплавах на атомному, молекулярному й електронному рівнях. Дослідження охоплюють крупнокристалічні та наноструктуровані матеріали, поверхневі шари, аморфні стрічки, квазікристали, надпровідники й

тонкі плівки в умовах низьких і високих температур, високого тиску, вакууму, інтенсивного нагрівання та охолодження, радіаційного й ультразвукового опромінення, ударних навантажень, циклічного механічного і теплового впливу, пластичної деформації та агресивних середовищ. Водночас установлюється взаємозв'язок між структурними змінами та фізико-механічними властивостями матеріалів.

З метою підвищення ролі науки у формуванні та реалізації ефективної регіональної політики, спрямованої на поєднання загальнодержавних і регіональних інтересів, а також для наукового забезпечення розв'язання актуальних соціально-економічних проблем в Україні створено систему регіональних наукових центрів. Нині функціонують Донецький, Західний, Північно-Східний і Придніпровський наукові центри Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України.

Окрім Національна академія наук України, в Україні функціонують національні галузеві академії наук: Національна академія аграрних наук України, Національна академія медичних наук України, Національна академія педагогічних наук України, Національна академія правових наук України та Національна академія мистецтв України. Ці самоврядні наукові установи здійснюють координацію, організацію та проведення фундаментальних і прикладних наукових досліджень у відповідних галузях науки й техніки, а також взаємодіють з органами державної влади з метою реалізації пріоритетних напрямів державної науково-технічної політики.

Важливу роль у розвитку наукового середовища відіграють громадські наукові організації - академії наук, наукові товариства, асоціації, спілки та інші об'єднання вчених. Їхня діяльність спрямована на розвиток окремих галузей науки, координацію науково-дослідної роботи, захист професійних інтересів науковців і поширення наукового досвіду. Для реалізації статутних завдань такі організації можуть створювати тимчасові наукові колективи, науково-дослідні, проектно-конструкторські, експертні, консалтингові та пошукові структури, а також співпрацювати з міжнародними й іноземними науковими установами та входити до складу міжнародних наукових об'єднань відповідно до

законодавства України. Прикладом такої організації є Академія наук вищої школи України, заснована у 1992 році.

Суттєве значення для розвитку наукової та освітньої сфер має функціонування спільних науково-навчальних структур за участю Міністерство освіти і науки України та Національна академія наук України. Така взаємодія сприяє ефективному використанню наукового потенціалу академічних установ, підготовці висококваліфікованих фахівців, інтеграції науки й освіти, а також реалізації спільних наукових і науково-технічних проєктів.

Окрім Національна академія наук України, в Україні функціонують національні галузеві академії наук: Національна академія аграрних наук України, Національна академія медичних наук України, Національна академія педагогічних наук України, Національна академія правових наук України та Національна академія мистецтв України. Ці самоврядні наукові установи забезпечують координацію, організацію та проведення фундаментальних і прикладних досліджень у відповідних галузях науки, техніки та культури, а також взаємодіють з органами державної влади з метою реалізації пріоритетних напрямів державної наукової політики.

Важливу роль у розвитку наукової сфери відіграють громадські наукові організації - академії наук, наукові товариства, асоціації, спілки та інші професійні об'єднання вчених. Їхня діяльність спрямована на розвиток окремих наукових напрямів, координацію науково-дослідної роботи, захист професійних інтересів науковців, а також поширення наукових знань і професійного досвіду. Для реалізації статутних завдань такі організації можуть формувати тимчасові наукові колективи, створювати науково-дослідні, проєктно-конструкторські, експертні, консалтингові та пошукові структури, співпрацювати з міжнародними й іноземними науковими установами та брати участь у діяльності міжнародних наукових об'єднань відповідно до законодавства України. Прикладом подібної організації є Академія наук вищої школи України, заснована у 1992 році.

Важливим елементом сучасної організації науки є розвиток спільних науково-освітніх структур за участю Міністерство освіти і науки України та Національна академія наук України. Така взаємодія сприяє ефективному

використанню наукового потенціалу академічних установ у процесі підготовки висококваліфікованих фахівців, інтеграції науки й освіти, а також реалізації спільних науково-дослідних та інноваційних проєктів.

2.3. Суб'єкти наукової діяльності

Суб'єктами наукової діяльності є вчені, наукові та науково-педагогічні працівники, а також наукові установи, організації, заклади вищої освіти III–IV рівнів акредитації й громадські організації, що здійснюють діяльність у сфері науки та науково-технічного розвитку. Закон України «Про наукову і науково-технічну діяльність» визначає основні категорії учасників наукового процесу та регламентує їхній правовий статус.

Вчений - це фізична особа, яка проводить фундаментальні та/або прикладні наукові дослідження й отримує наукові або науково-технічні результати. Науковий працівник - учений, який має вищу освіту не нижче другого (магістерського) рівня, професійно здійснює наукову, науково-технічну, науково-організаційну чи науково-педагогічну діяльність відповідно до трудового договору та володіє необхідною кваліфікацією, підтвердженою результатами атестації у випадках, передбачених законодавством. Науково-педагогічний працівник поєднує педагогічну діяльність із науковою роботою у закладах вищої освіти. Аспірантом є дослідник, який у межах підготовки в аспірантурі виконує фундаментальні або прикладні дослідження з метою здобуття ступеня доктора філософії.

Законодавством України визначено основні права вченого. Зокрема, він має право самостійно обирати напрями, форми та засоби наукової діяльності відповідно до власних наукових інтересів і творчих можливостей; об'єднуватися з іншими науковцями у професійні спільноти та тимчасові творчі колективи; брати участь у конкурсах на виконання наукових досліджень; публікувати результати наукової діяльності; отримувати визнання авторства та державне чи громадське визнання за наукові досягнення.

Важливим елементом державної підтримки науки є присудження Державної премії України в галузі науки і техніки за видатні наукові досягнення, що сприяють розвитку гуманітарних, природничих і технічних наук, а також підвищують міжнародний авторитет української науки.

Поряд із правами науковий працівник має низку професійних обов'язків. До них належать: проведення наукових досліджень відповідно до укладених договорів, представлення результатів наукової діяльності у формі доповідей і публікацій, проходження атестації, постійне підвищення кваліфікації та дотримання етичних норм наукового співтовариства.

Наукова діяльність є інтелектуально складним видом праці, що вимагає від дослідника високого рівня професійної підготовки та значних психологічних зусиль. Для успішної роботи вчений повинен володіти такими якостями, як допитливість, наполегливість, здатність до самонавчання, гнучкість мислення, інтуїція, аналітичні здібності, уважність і спостережливість. Важливими характеристиками наукового мислення є об'єктивність, критичність, логічність і прагнення до перевірки достовірності отриманих результатів. Науковець повинен уміти аргументовано відстоювати власну позицію, ефективно працювати в колективі та грамотно представляти результати досліджень із використанням наукової термінології.

Необхідною умовою професійної діяльності дослідника є широкий світогляд і ґрунтовна ерудиція. Авторитет ученого визначається не лише результатами його праці, а й рівнем наукової культури, глибиною знань та здатністю творчо осмислювати наукову інформацію. Широка ерудиція дає змогу критично оцінювати наукові дані, знаходити нові підходи до вирішення проблем, формулювати оригінальні ідеї, проводити експерименти та узагальнювати результати досліджень.

Важливу роль у науковій творчості відіграє інтуїція, яка ґрунтується на накопиченому досвіді, знаннях і здатності передбачати можливий результат дослідження ще до повного усвідомлення механізмів його досягнення. Саме інтуїтивне мислення часто стає джерелом нових наукових ідей та концепцій.

За характером наукової діяльності дослідників умовно поділяють на кілька категорій. До категорії «мислителів» належать учені, які формують нові концепції та принципово нові підходи до пояснення явищ. Прикладом є Ісаак Ньютон, який сформулював універсальні закони механіки, а також Дж. Дж. Томсон, який встановив електронну будову атома. Категорію «відкривачів» представляють дослідники, що здійснюють фундаментальні відкриття, наприклад Вільгельм Рентген і Анрі Беккерель. До «конструкторів» належать учені, які створюють нові наукові прилади та експериментальні методи. Представником цієї групи був Чарльз Вільсон - винахідник конденсаційної камери. Окремо виділяють категорію «мисливців за ідеями», для яких характерна здатність швидко знаходити практичне застосування новим науковим відкриттям. Прикладом такого вченого є Майкл Фарадей.

До важливих рис науковця належать неупередженість, готовність відмовитися від непідтверджених гіпотез і здатність переосмислювати напрями дослідження. Надмірна консервативність мислення є фактором, що стримує розвиток науки. Історія свідчить, що багато видатних відкриттів були здійснені вченими у молодому віці, коли їхнє мислення залишалося максимально гнучким і відкритим до нових ідей.

Раціональна організація наукової діяльності передбачає поєднання творчого підходу з плановістю, самоорганізацією, критичністю та колективною взаємодією. Сучасна наука здебільшого розвивається в межах колективної праці, де формується так званий «колективний інтелект», у межах якого знання та компетентності окремих учених взаємно доповнюють одне одного.

Планування наукової роботи реалізується через складання індивідуальних і колективних планів, програм досліджень та календарних графіків. Водночас наукова діяльність не завжди піддається чіткій часовій регламентації, оскільки творчі рішення нерідко виникають поза межами офіційного робочого часу. Самоорганізація науковця передбачає раціональний розподіл часу, визначення пріоритетів, підготовку до виконання дослідницьких завдань та своєчасне коригування напрямів дослідження.

Ефективність наукової діяльності залежить від комплексу умов, серед яких важливе значення мають суспільна потреба в результатах досліджень, наявність фінансування, сучасної матеріально-технічної бази, високий рівень кваліфікації дослідників та мотивація до наукової праці. Особливу роль у розвитку наукового колективу відіграє наявність «генератора ідей» - особистості, здатної формувати нові наукові концепції та об'єднувати навколо себе творчий колектив.

За характером організації праці вчених умовно поділяють на дослідників-одинаків і керівників наукових груп. Учений-одинак переважно працює самостійно та практично не залучає інших до своїх досліджень. Керівник наукової групи, навпаки, координує діяльність учнів і співробітників, хоча при цьому часто змушений поєднувати наукову діяльність з адміністративною роботою. Психологи вважають, що оптимальна кількість дослідників, з якими керівник може підтримувати безпосередній ефективний контакт, не повинна перевищувати п'яти осіб.

Важливою формою організації наукової діяльності є наукові школи - творчі об'єднання вчених кількох поколінь, які працюють у певній галузі науки та дотримуються спільних методологічних підходів. Основними ознаками наукової школи є наявність авторитетного наукового лідера, висока кваліфікація учасників, спільність наукових ідей, оригінальність використовуваних методик дослідження та безперервність передачі досвіду між поколіннями дослідників.

Наукова школа виконує не лише функцію створення нових знань, а й забезпечує підготовку молодих учених, поширення наукових ідей та формування професійної культури наукового середовища. Мінімальний цикл існування наукової школи охоплює щонайменше три покоління дослідників: засновника школи, його послідовників та учнів наступного покоління.

2.4. Підготовка наукових кадрів в Україні

Наукова діяльність у закладах вищої освіти є невід'ємною складовою освітнього процесу та спрямована на інтеграцію освітньої, наукової й практичної підготовки. Відповідно до Закону України «Про вищу освіту», основними

завданнями наукової діяльності у закладах вищої освіти є забезпечення органічної єдності освітнього процесу та наукових досліджень, розроблення стандартів вищої освіти, підручників і навчально-методичних матеріалів з урахуванням сучасних досягнень науки й техніки, упровадження результатів наукових досліджень у практичну діяльність, залучення здобувачів освіти до науково-дослідної роботи, а також організація і проведення наукових та науково-практичних заходів: конференцій, семінарів, конкурсів, олімпіад тощо.

Державна політика у сфері науки охоплює не лише управління науковими й освітніми установами, а й систему підготовки та атестації наукових кадрів. Підготовка наукових і науково-педагогічних працівників в Україні здійснюється закладами вищої освіти, науковими установами та академіями наук.

Тривалий час в Україні діяла система присудження наукових ступенів кандидата наук і доктора наук. Однак після ухвалення Закону України «Про вищу освіту» у 2014 році система атестації наукових кадрів була реформована відповідно до європейських підходів. Зокрема, замість наукового ступеня кандидата наук було запроваджено ступінь доктора філософії, який відповідає міжнародній практиці підготовки дослідників.

Відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року «Про затвердження Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)», сучасна система підготовки наукових кадрів передбачає здобуття двох наукових ступенів: доктора філософії та доктора наук.

Науковий ступінь є кваліфікаційним рівнем, що засвідчує наявність у здобувача глибоких фахових знань, сформованих дослідницьких компетентностей і вагомих наукових результатів. Доктор філософії - це освітній і водночас науковий ступінь, який здобувається на основі ступеня магістра. Він присуджується після успішного виконання освітньо-наукової програми та публічного захисту дисертації. Ступінь доктора філософії є першим науковим ступенем, тоді як доктор наук становить найвищий рівень наукової кваліфікації, що здобувається на основі ступеня доктора філософії.

Здобуття наукового ступеня в Україні належить до третього рівня вищої освіти. Це рівень підготовки фахівця-дослідника, здатного самостійно здійснювати наукову, науково-педагогічну, дослідницько-інноваційну або творчу діяльність. Він відповідає восьмому рівню Національної рамки кваліфікацій і передбачає найвищий рівень академічної підготовки в межах системи вищої освіти.

Третій освітньо-науковий рівень передбачає набуття особою теоретичних знань, умінь, навичок та інших компетентностей, достатніх для продукування нових ідей, розв'язання комплексних проблем у професійній або дослідницько-інноваційній діяльності, оволодіння методологією наукової та педагогічної діяльності, а також проведення власного наукового дослідження. Таке дослідження має характеризуватися науковою новизною, теоретичним і практичним значенням.

Основні вимоги до компетентностей випускника третього рівня вищої освіти охоплюють кілька ключових напрямів. Насамперед це здатність самостійно формулювати наукову проблему, визначати мету, завдання та методологію дослідження. Важливе значення має вміння критично аналізувати наукову інформацію, працювати із сучасними джерелами, застосовувати відповідні методи дослідження, інтерпретувати отримані результати та обґрунтовувати їхню достовірність. Однією з провідних компетентностей є також здатність створювати нове знання.

До загальних компетентностей випускника третього рівня належать критичне й системне мислення, дотримання принципів академічної доброчесності, здатність до самостійної наукової роботи, комунікація українською та іноземними мовами, вміння презентувати результати дослідження фаховій спільноті, брати участь у науковій дискусії та працювати в міждисциплінарному середовищі. До спеціальних компетентностей належать поглиблені знання у відповідній галузі, володіння сучасною методологією досліджень, здатність розробляти й реалізовувати наукові проєкти, публікувати результати у фахових виданнях та впроваджувати їх у практичну або освітню діяльність. Методичні рекомендації Міністерства освіти і науки України

передбачають, що стандарт вищої освіти має містити перелік обов'язкових компетентностей випускника - загальних і спеціальних.

Результати навчання на третьому рівні мають відображати здатність випускника не лише володіти певним обсягом знань, а й діяти як самостійний дослідник. Після завершення підготовки здобувач повинен уміти визначати актуальні наукові проблеми, проводити оригінальні дослідження, застосовувати сучасні наукові методи, отримувати нові результати, формулювати аргументовані висновки, дотримуватися принципів академічної доброчесності, готувати наукові публікації, здійснювати викладацьку діяльність у закладах вищої освіти та брати участь у міжнародній науковій комунікації.

Третій рівень вищої освіти - це рівень підготовки не лише висококваліфікованого спеціаліста, а й фахівця, здатного створювати нове знання, розв'язувати складні наукові або творчі проблеми, працювати автономно, дотримуватися академічної доброчесності та робити внесок у розвиток науки, освіти, культури або професійної практики.

Згідно із Законами України «Про вищу освіту» та «Про наукову і науково-технічну діяльність», основними формами підготовки наукових кадрів вищої кваліфікації є аспірантура. Аспірантом є особа, яка має ступінь магістра або освітньо-кваліфікаційний рівень спеціаліста та навчається в аспірантурі з метою підготовки дисертації на здобуття ступеня доктора філософії.

У процесі навчання аспіранти опановують методологію наукових досліджень, формують тематику дисертаційної роботи, проводять власні дослідження, публікують результати наукової діяльності та беруть участь у наукових заходах.

Заклади вищої освіти та наукові установи, які мають відповідну ліцензію, здійснюють підготовку докторів філософії за освітньо-науковими програмами. Освітньо-наукова програма є цілісною системою освітніх і наукових компонентів, що включає навчальні дисципліни, практичну підготовку, індивідуальні завдання, контрольні заходи, проведення наукових досліджень і підготовку дисертації до публічного захисту. Такі програми підлягають

обов'язковій акредитації Національним агентством із забезпечення якості вищої освіти.

Відповідно до наказу Міністерства освіти і науки України № 1057 від 14.09.2011 р. «Про затвердження переліку наукових спеціальностей», в Україні визначено офіційний перелік наукових спеціальностей, за якими здійснюється атестація наукових кадрів. Зокрема, спеціальність «Матеріалознавство» має шифр 05.02.01 і належить до галузі «Технічні науки» (05), входячи до підгалузі «Машинознавство» (05.02.00).

Докторантура є вищою формою наукової підготовки, спрямованою на здобуття наукового ступеня доктора наук. Докторантом є особа, яка має ступінь доктора філософії або кандидата наук і здійснює підготовку докторської дисертації.

Здобувачі наукових ступенів зобов'язані дотримуватися принципів академічної доброчесності, виконувати індивідуальний навчальний план і план наукової роботи, а також регулярно звітувати про результати своєї освітньої та наукової діяльності. Атестація на третьому рівні зазвичай завершується підготовкою та захистом кваліфікаційної роботи. Для доктора філософії такою роботою є дисертація, спрямована на розв'язання комплексної проблеми професійної або дослідницько-інноваційної діяльності. Кваліфікаційна робота не повинна порушувати вимоги академічної доброчесності й має бути оприлюднена на офіційному вебсайті закладу освіти, його структурного підрозділу або в репозитарії

Таблиця 1

Наукові спеціальності у науковій підгалузі «машинознавство»

05.02.00	Машинознавство	
05.02.01	Матеріалознавство	технічні
05.02.02	Машинознавство	технічні
05.02.04	Тертя та зношування в машинах	технічні
05.02.08	Технологія машинобудування	технічні
05.02.09	Динаміка та міцність машин	технічні
05.02.10	Діагностика матеріалів і конструкцій	технічні

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею, що містить нові науково обґрунтовані результати дослідження. Вона має бути виконана здобувачем самостійно, не повинна містити порушень академічної доброчесності та підлягає обов'язковому оприлюдненню на офіційному вебсайті закладу вищої освіти, його структурного підрозділу або в інституційному репозитарії.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії повинна розв'язувати конкретне наукове завдання, що має істотне значення для відповідної галузі знань. У роботі мають бути чітко відображені особистий внесок автора, наукова новизна отриманих результатів, їх теоретичне та/або практичне значення.

Дисертації на здобуття ступенів доктора філософії та доктора наук підлягають обов'язковому оприлюдненню на офіційних вебсайтах закладів вищої освіти або наукових установ. Виявлення академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів дослідження є підставою для відмови у присудженні наукового ступеня.

За наявності позитивного висновку щодо наукової новизни, теоретичного та практичного значення дисертації здобувач звертається до вченої ради закладу вищої освіти або наукової установи із заявою про утворення разової спеціалізованої вченої ради. До складу такої ради входять голова, рецензенти та офіційні опоненти.

Захист дисертації проводиться у формі відкритої наукової дискусії. Під час атестації члени спеціалізованої вченої ради оцінюють науковий рівень дисертації, обґрунтованість і достовірність отриманих результатів, публікаційну активність здобувача, дотримання ним принципів академічної доброчесності, а також рівень сформованості дослідницьких компетентностей.

Доктор наук є другим і найвищим науковим ступенем в Україні. Його здобуття передбачає проведення оригінальних наукових досліджень, розроблення нових наукових концепцій, теорій або методологічних підходів, а також розв'язання важливої наукової чи прикладної проблеми, що має загальнодержавне або міжнародне значення. На відміну від дисертації на здобуття ступеня доктора філософії, основною метою якої є підтвердження здатності здобувача самостійно здійснювати наукові дослідження, докторська

дисертація має бути спрямована на розв'язання масштабної наукової проблеми та формування нових напрямів розвитку науки. Наукові результати докторської дисертації повинні бути опубліковані у фахових наукових виданнях, зокрема у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних. Ступінь доктора наук присуджується спеціалізованою вченою радою за результатами публічного захисту дисертації.

Остаточне рішення щодо присудження наукових ступенів ухвалюється відповідно до встановленої процедури після проведення експертизи атестаційних справ.

Окрім наукових ступенів, в Україні функціонує система вчених звань. Вчені звання присвоюються з урахуванням кваліфікації наукового або науково-педагогічного працівника, його професійного досвіду, наукових досягнень, публікаційної активності, навчально-методичної роботи та внеску у підготовку кадрів вищої кваліфікації.

В Україні передбачено такі вчені звання: старший дослідник, доцент і професор. Відповідно до нормативних актів Міністерства освіти і науки України, зокрема наказів № 13 від 14 січня 2016 року та № 322 від 17 березня 2021 року, вчене звання доцента присвоюється науково-педагогічним працівникам, які відповідають установленим кваліфікаційним вимогам. До основних вимог належать: наявність наукового ступеня доктора філософії, кандидата наук або доктора наук; необхідний стаж науково-педагогічної роботи; наявність наукових і навчально-методичних праць; публікації у виданнях, що індексуються у базах даних Scopus або Web of Science; підтверджений рівень володіння іноземною мовою не нижче B2; наявність міжнародного досвіду наукової або освітньої діяльності; здійснення викладацької діяльності на високому науково-методичному рівні.

Рішення про присвоєння вчених звань затверджується Атестаційною колегією Міністерства освіти і науки України.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 2

1. Яким законодавчим актом в Україні регламентується наукова і науково-технічна діяльність?
2. У чому полягає відмінність між науковою та науково-технічною діяльністю?
3. Які основні принципи державного управління у сфері наукової і науково-технічної діяльності?
4. Які головні цілі державної політики України у сфері науки?
5. Які органи державної влади здійснюють управління науковою сферою в Україні?
6. Які функції виконує Міністерство освіти і науки України у сфері науки та інноваційної діяльності?
7. Чим відрізняються фундаментальні наукові дослідження від прикладних?
8. Які основні джерела фінансування наукових досліджень існують в Україні?
9. Яке значення має Національний фонд досліджень України для підтримки науки?
10. Хто належить до суб'єктів наукової діяльності згідно із законодавством України?
11. Чим відрізняються поняття «вчений», «науковий працівник» і «науково-педагогічний працівник»?
12. Які основні права має вчений у процесі здійснення наукової діяльності?
13. Які професійні обов'язки покладаються на наукового працівника?
14. Які особистісні та інтелектуальні якості необхідні досліднику для успішної наукової діяльності?
15. Яку роль відіграє інтуїція у науковій творчості?
16. Що таке наукова школа і які її основні ознаки?
17. Які основні завдання наукової діяльності у закладах вищої освіти України?
18. Які наукові ступені передбачає сучасна система підготовки наукових кадрів в Україні?
19. Чим відрізняється дисертація на здобуття ступеня доктора філософії від докторської дисертації?

РОЗДІЛ 3. МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наукове дослідження - це форма наукової діяльності, спрямована на вивчення явищ, процесів або об'єктів за допомогою спеціальних наукових методів з метою здобуття нових знань та їх подальшого практичного застосування.

У процесі наукового дослідження отримують нові наукові результати, перевіряють гіпотези, підтверджують або спростовують наукові концепції, узагальнюють результати попередніх досліджень, а також визначають перспективні напрями подальших наукових розробок. Прагматичний підхід до наукового дослідження передбачає орієнтацію на практичну цінність отриманих результатів та їх використання для розв'язання прикладних завдань.

Відповідно до Закону України «Про наукову і науково-технічну діяльність», науковий результат - це нове наукове знання, отримане у процесі фундаментальних або прикладних досліджень і зафіксоване на матеріальних носіях інформації.

Наукові результати можуть бути представлені у формі звітів, наукових статей, тез доповідей, монографій, повідомлень про науково-дослідну роботу, наукових відкриттів, проєктів нормативно-правових актів, нормативних і науково-методичних документів тощо.

Знання теорії, методології та технології організації наукової діяльності є необхідною складовою професійної підготовки наукових працівників і дослідників. Ефективність наукової діяльності значною мірою визначається правильністю вибору методів, прийомів і засобів наукового пізнання.

Методологія науки - це система принципів, підходів, методів і засобів організації наукового пізнання, яка забезпечує отримання об'єктивної, достовірної та систематизованої інформації про явища, процеси та закономірності їх розвитку й взаємозв'язків. Вона визначає логіку та послідовність наукового дослідження, формує теоретичні засади здобуття нових знань і забезпечує практичні механізми реалізації дослідницького процесу.

Основними функціями методології науки є:

- визначення системи методів, способів і прийомів дослідження та послідовності їх застосування;
- забезпечення вибору оптимальних шляхів досягнення поставленої наукової мети;
- уточнення, систематизація та інтерпретація досліджуваних явищ і процесів;
- формування системи наукової інформації та способів її формалізації;
- забезпечення наукової обґрунтованості та достовірності результатів дослідження.

Перед початком наукового дослідження необхідно, спираючись на методологічні засади, чітко визначити:

- сутність досліджуваного явища або процесу;
- об'єкт і предмет дослідження;
- наявні суперечності та тенденції розвитку досліджуваного явища;
- провідну наукову ідею та концептуальні положення дослідження.

Важливими етапами реалізації методології наукового дослідження є визначення об'єкта і предмета дослідження, постановка наукової проблеми, формулювання гіпотези, вибір методів дослідження або побудова теоретичної моделі розв'язання проблеми, а також оцінка теоретичної та практичної значущості отриманих результатів.

До методологічних основ наукового дослідження належать:

- обґрунтування актуальності теми дослідження;
- визначення мети та завдань дослідження;
- визначення об'єкта і предмета дослідження;
- вибір методів дослідження для досягнення поставленої мети та отримання наукових результатів;
- розроблення методики теоретичних та емпіричних досліджень;
- перевірка достовірності та верифікація результатів дослідження;
- планування стратегії та організація етапів проведення дослідження;
- визначення перспектив практичного використання та впровадження результатів дослідження.

3.1 Методи наукового дослідження

Метод дослідження - це спосіб здобуття, обґрунтування та систематизації наукового знання незалежно від його теоретичного чи прикладного характеру. Він являє собою формалізовану систему принципів, логічно впорядкованих операцій і процедур, спрямованих на розв'язання наукових завдань. Метод визначає логіку наукового пошуку, підходи до пізнання явищ і процесів, а також способи перевірки достовірності отриманих результатів. До основних методів наукового пізнання належать експеримент, моделювання, спостереження, статистичний аналіз, системний підхід та інші. Кожна галузь науки формує власний комплекс методів дослідження, а дослідник повинен обирати найбільш доцільні з них відповідно до мети, об'єкта, предмета та умов проведення дослідження.

Поняття «методика дослідження» означає сукупність методів, прийомів, процедур і технічних операцій, що застосовуються для вивчення конкретного фактичного матеріалу з метою розв'язання визначеного наукового завдання. Методика є практичною формою реалізації методу, оскільки визначає послідовність виконання дослідницьких процедур, вибір інструментів і алгоритм проведення дослідження. Особливого значення методика набуває в емпіричних дослідженнях, насамперед під час спостереження та експерименту. Наприклад, методика металографічного дослідження регламентує порядок вирізання темплета з досліджуваного матеріалу, виконання шліфування, полірування, травлення мікрошліфа, а також вибір необхідного збільшення мікроскопа для аналізу структури матеріалу.

Методи наукового дослідження класифікують за різними критеріями. За рівнем наукового пізнання їх поділяють на теоретичні та емпіричні. За характером застосування розрізняють загальнонаукові та спеціальні методи. За функціональним призначенням виділяють методи опису, пояснення та передбачення, а за ступенем точності результатів детерміновані та стохастичні методи.

У матеріалознавстві значення методу особливо очевидне, оскільки властивості матеріалу не завжди доступні безпосередньому спостереженню: їх встановлюють через спеціальні методи аналізу структури, складу, фазового стану, механічних, термічних і фізико-хімічних характеристик. Методи дослідження виконують ряд функцій:

- пізнавальна функція методу полягає в тому, що метод дає можливість отримати нові знання про матеріал, його внутрішню будову, склад і властивості. Наприклад, за допомогою металографічного аналізу можна дослідити мікроструктуру сталі, визначити форму й розмір зерен, наявність фаз, включень, пористості або дефектів. Без застосування мікроскопічного методу ці характеристики залишалися б прихованими, оскільки не сприймаються неозброєним оком;

- описова функція методу забезпечує фіксацію властивостей і стану матеріалу в об'єктивній формі. Наприклад, під час рентгеноструктурного аналізу отримують дифрактограму, яка відображає положення та інтенсивність дифракційних максимумів. На основі цього можна описати фазовий склад матеріалу, параметри кристалічної ґратки, наявність твердих розчинів або структурних змін. Метод тут дає не загальне враження про матеріал, а конкретні вимірювані показники;

- пояснювальна функція методу полягає в тому, що він дозволяє не лише зафіксувати властивості матеріалу, а й пояснити причини їх виникнення. Наприклад, якщо після термічної обробки сталь має підвищену твердість, мікроструктурний аналіз може показати утворення мартенситу. Отже, метод допомагає встановити зв'язок між режимом обробки, структурними змінами та механічними властивостями матеріалу;

- діагностична функція методу проявляється у виявленні дефектів, пошкоджень або небажаних змін у матеріалі. Наприклад, ультразвуковий контроль дає змогу виявляти внутрішні тріщини, порожнини або розшарування без руйнування виробу;

- вимірвальна функція методу полягає в отриманні кількісних характеристик матеріалу. Завдяки цьому властивості матеріалу можна не лише описати словами, а й виразити числовими параметрами;
- порівняльна функція методу полягає в можливості зіставлення різних матеріалів або різних станів одного й того самого матеріалу. Метод забезпечує єдину основу для таких порівнянь;
- контрольна функція методу пов'язана з перевіркою відповідності матеріалу заданим стандартам, технічним умовам або вимогам експлуатації;
- прогностична функція методу полягає в тому, що результати дослідження дозволяють передбачити поведінку матеріалу в майбутніх умовах експлуатації;
- практична функція методу полягає у використанні отриманих результатів для вибору матеріалу, розроблення технології його обробки або вдосконалення виробу.

Відповідно до етапів наукового дослідження методи поділяють на первинні, вторинні та третинні. Первинні методи використовують для збору інформації та отримання вихідних наукових даних; до них належать спостереження, експеримент, вимірювання та інші емпіричні підходи. Вторинні методи застосовують для обробки, аналізу та систематизації отриманих результатів, зокрема кількісний і якісний аналіз, статистичну обробку та узагальнення даних. Третинні методи пов'язані з верифікацією й оцінкою достовірності результатів дослідження та передбачають їх перевірку з урахуванням взаємодії постійних і змінних чинників.

У матеріалознавстві провідне значення мають емпіричні методи дослідження, оскільки саме вони забезпечують отримання первинних даних про склад, структуру та властивості матеріалів. Методологія досліджень у матеріалознавстві охоплює систему методів аналізу металів, кераміки, полімерів та інших матеріалів з метою встановлення взаємозв'язку між їх складом, структурою та властивостями. Первинні методи дослідження в цій галузі включають комплекс експериментальних і теоретичних підходів, спрямованих

на вивчення фізичних, хімічних, механічних і технологічних характеристик матеріалів.

Вибір конкретного методу дослідження визначається характером об'єкта дослідження, поставленою метою, умовами проведення експерименту, технічними можливостями та логічною послідовністю виконання дослідницьких операцій. До основних методів дослідження в матеріалознавстві належать оптична та електронна мікроскопія, рентгенівський дифракційний аналіз, диференціальний термічний аналіз, спектроскопія, а також механічні випробування матеріалів. Застосування цих методів дає змогу встановити взаємозв'язок між технологією виготовлення матеріалу, його структурою та експлуатаційними властивостями.

Результати дослідження в матеріалознавстві значною мірою залежать від обраного методу. Один і той самий матеріал може давати різні характеристики залежно від того, який саме метод застосовано, які параметри вимірювання використано і як підготовлено зразок. Тому метод не є нейтральним «вікном» до об'єкта; він активно визначає форму і межі отриманого знання. Наприклад, під час визначення твердості матеріалу результати будуть різними залежно від використаного методу. Метод Брінелля доцільний для матеріалів із неоднорідною структурою і дає усереднене значення твердості на відносно великій площі. Метод Віккерса дозволяє досліджувати тонкі шари, покриття або дрібні ділянки структури. Метод Роквелла є швидким і зручним для виробничого контролю, але менш інформативним щодо локальних структурних особливостей. Отже, твердість не існує як абсолютно незалежна величина: її числове значення залежить від навантаження, форми індентора, тривалості дії навантаження, стану поверхні та обраної шкали вимірювання.

Подібна залежність спостерігається і в мікроструктурному аналізі. Якщо зразок неправильно відшліфований, недостатньо відполірований або неправильно протравлений, мікроскопічна картина може бути спотвореною. Надмірне травлення здатне створити ілюзію грубої структури або посилити видимість меж зерен, тоді як недостатнє травлення може приховати важливі

структурні елементи. Тобто результат залежить не лише від самого матеріалу, а й від методики підготовки зразка.

У рентгеноструктурному аналізі результат залежить від точності налаштування приладу, типу випромінювання, кута зйомки, якості поверхні зразка, його текстури та ступеня кристалічності. Наприклад, аморфні або дрібнокристалічні матеріали можуть давати нечіткі дифракційні максимуми, що ускладнює ідентифікацію фаз. Якщо ж у матеріалі є залишкові напруження, вони можуть спричинити зміщення або розширення дифракційних ліній.

У термічному аналізі результати залежать від швидкості нагрівання або охолодження, маси зразка, атмосфери дослідження, типу еталона і чутливості приладу. Наприклад, температура фазового перетворення може виглядати дещо інакше при повільному та швидкому нагріванні. Через це один і той самий сплав може демонструвати різні термічні ефекти залежно від умов проведення експерименту.

Отже, достовірність результатів у матеріалознавстві залежить від правильного вибору методу, точності його виконання, якості підготовки зразка, калібрування обладнання, умов проведення досліду та коректності інтерпретації отриманих даних. Саме тому в сучасному матеріалознавстві часто застосовують комплексний підхід: поєднують мікроскопію, рентгеноструктурний аналіз, механічні випробування, термічний аналіз і хімічні методи дослідження. Це дозволяє отримати не однобічну, а більш повну й надійну характеристику матеріалу.

Пошук і вибір методики дослідження здійснюються шляхом аналізу сучасних наукових праць, теоретичних концепцій і практичних розробок у відповідній галузі науки. Важливе значення мають результати досліджень як українських, так і зарубіжних учених. Раціональний вибір методик значно полегшується під час роботи в наукових колективах зі сформованими науковими школами та традиціями. У процесі колективної наукової діяльності особливу роль відіграють наукові дискусії, обговорення доцільності використання певних методик і критичний аналіз особливостей їх практичного застосування.

3.2. Визначення проблеми наукового дослідження

Методологія наукового дослідження передбачає, що одним із першочергових етапів наукового пошуку є визначення наукової проблеми - питання або комплексу питань, які потребують наукового розв'язання та спрямовані на отримання нового знання засобами наукового дослідження. Розв'язання наукової проблеми не міститься у вже наявному масиві знань і не може бути досягнуте шляхом простого узагальнення або опрацювання існуючої інформації. Саме формулювання проблеми визначає напрям дослідження, окреслює межі наукового пошуку та дає змогу відокремити ключові питання від другорядних.

Важливим етапом методологічного обґрунтування дослідження є узгодження наукової проблеми з існуючою науковою парадигмою. Наукова проблема повинна бути сформульованою в межах певної системи наукових уявлень, що забезпечує прийнятність методів її вирішення для наукового співтовариства. Передумовою виникнення нової наукової проблеми є виявлення емпіричних фактів або закономірностей, які не можуть бути пояснені в межах чинної теорії.

У випадках, коли наявна парадигма втрачає здатність пояснювати нові експериментальні результати та явища, виникає потреба у формуванні нової парадигми. У процесі наукових революцій відбувається зміна системи наукових уявлень, коли нові концепції, методи та підходи витісняють або суттєво доповнюють попередні. Таким чином, науковий прогрес характеризується чергуванням періодів відносної стабільності та етапів радикальних змін. Зміна парадигм виступає рушійною силою розвитку науки, оскільки супроводжується переглядом підходів до інтерпретації явищ і методів дослідження. Класичним прикладом є перехід від ньютонівської механіки до теорії відносності А. Ейнштейна, що змінив не лише фізичні уявлення, а й загальні підходи до сприйняття реальності.

У матеріалознавстві парадигма визначає сукупність наукових підходів до пояснення властивостей матеріалів, принципів їх створення та методів керування

їхньою структурою і властивостями. Історичний розвиток матеріалознавства супроводжувався формуванням низки наукових парадигм, які частково змінювали одна одну, а частково продовжують співіснувати.

1. Емпірично-описова парадигма. У межах цієї парадигми властивості матеріалів визначають переважно експериментальним шляхом без детального пояснення механізмів на мікрорівні. Підбір матеріалів здійснюється методом проб і помилок, а класифікація ґрунтується головним чином на хімічному складі та практичному досвіді використання. Для вибору матеріалів широко застосовують довідкові дані, стандарти та результати попередньої практики. Наприклад, вибір марки сталі для роботи в певних умовах часто здійснюється без аналізу дислокаційної структури або фазового стану. Характерним прикладом емпіричного відкриття є тefлон, властивості якого були виявлені випадково, а практичне застосування знайдено лише через значний проміжок часу.

2. Структурна парадигма. Ця парадигма базується на уявленні про те, що властивості матеріалів визначаються їх структурою на різних масштабних рівнях:

- атомному (будова кристалічної ґратки);
- дефектному (щільність дислокацій, вакансій та інших дефектів);
- мікроструктурному (розмір зерен, фазовий склад, форма та розподіл фаз);
- макроструктурному (текстура, неоднорідності, шлакові включення).

Наприклад, відповідно до закону Холла-Петча підвищення міцності сталі досягається шляхом формування дрібнозернистої структури.

3. Термодинамічно-кінетична парадигма. Згідно з цією парадигмою формування структури матеріалу пояснюється поєднанням впливом термодинамічних і кінетичних чинників. Термодинаміка визначає стабільність фаз, тоді як кінетика описує швидкість процесів дифузії, зародження та росту фаз. На основі цієї парадигми розроблено термокінетичні діаграми ізотермічного розпаду аустеніту, які дозволяють прогнозувати формування перліту, бейніту або мартенситу залежно від температури та часу витримки.

4. Дефектна (дислокаційна) парадигма. У межах цієї концепції механічні властивості металевих матеріалів визначаються поведінкою дефектів кристалічної ґратки. Саме дислокаційна теорія пояснює механізми зміцнення при пластичній деформації, явища повзучості, втомного руйнування та інші процеси, пов'язані з еволюцією дефектної структури.

5. Інтегративна парадигма. Інтегративний підхід розглядає матеріал у межах повного життєвого циклу: «процес виробництва - структура - властивості - експлуатація». Відповідно до цієї концепції довговічність і надійність виробів визначаються не лише вихідними властивостями матеріалу, а й технологічними особливостями виготовлення, умовами експлуатації та процесами деградації.

6. Комп'ютерна та багатомасштабна парадигма. Ця парадигма передбачає прогнозування властивостей матеріалів за допомогою математичного та комп'ютерного моделювання на різних масштабних рівнях. Вона ґрунтується на використанні методів квантової механіки, молекулярної динаміки, методу скінченних елементів та інших сучасних підходів. Використання комп'ютерного моделювання дозволяє прогнозувати властивості сплавів без необхідності проведення великої кількості повномасштабних експериментів.

7. Парадигма «матеріали за проєктом». Сучасний розвиток матеріалознавства пов'язаний із концепцією створення матеріалів із наперед заданими властивостями шляхом реалізації зворотної задачі: «властивості → структура → склад → технологія виробництва».

Тривалий час реалізація такого підходу була ускладнена через складність взаємозв'язків між технологічними процесами, мікроструктурою та властивостями матеріалів. Традиційні аналітичні та симуляційні методи характеризувалися низькою точністю та значними витратами часу на обчислення. Розвиток методів машинного навчання, нейронних мереж і великих баз даних матеріалів створив можливість поєднання прямого прогнозування та зворотного проєктування матеріалів. Це дозволяє оптимізувати мікроструктуру матеріалу відповідно до заданих механічних або експлуатаційних характеристик.

Поєднання таких підходів із технологіями адитивного виробництва відкриває перспективи прискореного створення матеріалів спеціального призначення.

Наукова діяльність базується на досягненнях попередніх досліджень, тому перед початком роботи необхідним є ґрунтовний аналіз наукових джерел з обраної проблематики. На підготовчому етапі застосовують методи критичного аналізу літератури, узагальнення практичного досвіду та оцінювання ефективності існуючих методик і обладнання. Постановка наукового завдання передбачає збір і систематизацію інформації про вже відомі способи розв'язання аналогічних задач та результати суміжних досліджень.

У процесі формулювання наукової проблеми здійснюється чітке розмежування між відомим і невідомим: визначаються факти, що вже мають наукове пояснення, та аспекти, які потребують подальшого дослідження або суперечать чинним теоріям. На цій основі визначають зміст проблеми, формулюють завдання дослідження, їх послідовність і методи вирішення.

Прикладом актуальної наукової проблеми у галузі матеріалознавства є підвищення жароміцності та корозійної стійкості нікелевих суперсплавів, що застосовуються для виготовлення лопаток газових турбін, шляхом оптимізації їх наноструктури та фазового складу. Розв'язання цієї проблеми дозволяє підвищити робочу температуру газотурбінних установок, збільшити їх коефіцієнт корисної дії та довговічність.

Наукова проблема, як правило, складається з комплексу взаємопов'язаних наукових задач. Для ефективного розв'язання проблему доцільно поділяти на окремі підзадачі, кожна з яких містить конкретне наукове завдання. Сукупність таких завдань формує наукові теми досліджень.

Тема наукового дослідження - це конкретизоване наукове завдання, що охоплює певну галузь наукового пошуку. Під час формування теми визначають мету дослідження, яка може полягати у створенні нової конструкції, технології, методики або способу обробки матеріалу. Вибір теми здійснюється після детального аналізу вітчизняних і зарубіжних наукових джерел, а також з урахуванням потреб замовника, наукового потенціалу колективу, наявності сучасного обладнання та можливостей практичного впровадження результатів.

Тема дослідження повинна відповідати таким вимогам:

- бути актуальною та суспільно значущою;
- містити елементи наукової новизни;
- не дублювати вже виконані дослідження;
- мати практичне або економічне значення;
- відповідати профілю та можливостям наукового колективу;
- бути реалістичною щодо термінів виконання та впровадження результатів.

У колективних наукових дослідженнях важливу роль відіграють наукові дискусії, критичний аналіз та обговорення результатів. Саме в процесі наукового обговорення часто формуються нові наукові проблеми та уточнюються перспективні напрями досліджень.

У межах наукової спеціальності 05.02.01 «Матеріалознавство» тематика досліджень охоплює фундаментальні та прикладні аспекти створення нових матеріалів і технологій. Прикладами перспективних наукових тем є:

- «Закономірності формування нанорозмірної структури жароміцних нікелевих сплавів при варіюванні співвідношення Ta/Al та Ti/Al»;
- «Термодинамічне моделювання та експериментальне дослідження фазової стабільності багатоконпонентних нікелевих систем для лопаток газотурбінних двигунів нового покоління»;
- «Розроблення принципів наноструктурного зміцнення міжфазних меж у монокристалах нікелевих сплавів шляхом мікролегування рідкісноземельними елементами»;
- «Підвищення корозійної стійкості лопаток газових турбін шляхом створення градієнтного фазового складу в поверхневих шарах суперсплаву»;
- «Вплив нанодисперсних інтерметалідних виділень на опір нікелевих сплавів гарячій корозії в продуктах згоряння палива»;
- «Оптимізація режимів гомогенізувального відпалу для усунення хімічної мікронеоднорідності в наноструктурованих жароміцних сплавах».

3.3. Формулювання об'єкта та предмета дослідження

Визначальним етапом організації наукового дослідження є чітке формулювання його об'єкта та предмета. Саме вони окреслюють межі наукового пошуку, визначають спрямованість дослідження та конкретизують коло наукових завдань.

Об'єкт дослідження - це процес, явище, матеріал або система, на які спрямована пізнавальна діяльність дослідника. Він містить проблемну ситуацію, що потребує наукового вивчення, характеризується відносною автономністю та має певні часові, просторові й функціональні межі. Об'єктом дослідження виступає та частина дійсності, на яку спрямована пізнавальна діяльність, а суб'єктом - дослідник або наукова спільнота, які здійснюють цю діяльність. Взаємозалежність між ними полягає в тому, що об'єкт визначає предметний зміст дослідження, а суб'єкт забезпечує його теоретичне осмислення, методологічне опрацювання та інтерпретацію результатів. Об'єкт дослідження і суб'єкт наукової діяльності перебувають у тісному взаємозв'язку та взаємозалежності, оскільки наукове пізнання завжди спрямоване на дослідження певної частини об'єктивної реальності суб'єктом пізнавальної діяльності.

До основних об'єктів наукових досліджень за спеціальністю 05.02.01 «Матеріалознавство» належать:

- конструкційні та функціональні матеріали: метали, сплави, полімери, кераміка, неорганічні сполуки, а також композиційні та гібридні системи (аморфні метали, металеві стекла, напівпровідникові й надпровідникові матеріали);

- технічні, технологічні та захисні покриття, призначені для підвищення експлуатаційних характеристик виробів;

- засоби нероз'ємного з'єднання матеріалів;

- фізико-хімічні процеси, що відбуваються в об'ємі та на поверхні матеріалів під час виготовлення й експлуатації;

- структура, фазовий склад, будова, механічні, фізичні, хімічні та технологічні властивості матеріалів.

У сучасному матеріалознавстві об'єктами дослідження є різноманітні класи конструкційних і функціональних матеріалів, зокрема метали, кераміка, полімери, композиційні системи та наноматеріали. Наприклад, об'єктами дослідження можуть бути:

- процеси структуроутворення у низьколегованих сталях під час термічної обробки;
- зносостійкі покриття, отримані методом плазмового напилення;
- жароміцні нікелеві сплави для лопаток газотурбінних двигунів.

Важливим завданням дослідника є виявлення чинників, що впливають на об'єкт дослідження, їх систематизація та виокремлення найбільш суттєвих факторів, які визначають характер досліджуваних процесів і властивостей.

Предмет дослідження є конкретизованим аспектом об'єкта та відображає ті його властивості, характеристики, взаємозв'язки або закономірності, які безпосередньо підлягають науковому аналізу. Фактично предмет дослідження визначає межі розгляду об'єкта й уточнює напрям наукового пошуку.

Сутність предмета наукового пізнання полягає у формуванні ідеалізованої моделі об'єкта, що охоплює найбільш значущі властивості, закономірності та взаємозв'язки, виділені дослідником відповідно до поставленої мети. Предметом дослідження можуть бути не лише матеріальні об'єкти, а й нематеріальні компоненти, зокрема методи, алгоритми, принципи, математичні моделі або технологічні підходи.

Об'єкт дослідження завжди є ширшим поняттям, ніж предмет дослідження, оскільки предмет становить лише окремий аспект або сторону об'єкта. Наприклад, якщо об'єктом дослідження є «процеси структуроутворення у низьколегованих сталях під час термічної обробки», то предметом дослідження можуть бути «закономірності кінетики розпаду переохолодженого аустеніту за умов безперервного охолодження».

3.4. Формулювання мети і завдань дослідження

На основі визначених об'єкта та предмета дослідження формулюються його мета і завдання. Мета дослідження визначає загальний напрям, логіку та кінцевий науковий результат дослідницької роботи. Вона відображає очікуваний результат теоретичного або експериментального пошуку та формулюється у вигляді наукової проблеми, що потребує розв'язання.

Мета дослідження конкретизується через систему взаємопов'язаних завдань. Завдання дослідження є окремими етапами досягнення поставленої мети та повинні формулюватися чітко, послідовно і лаконічно. Під час формулювання завдань доцільно використовувати дієслова: «вивчити», «дослідити», «встановити», «визначити», «виявити», «обґрунтувати», «розробити», «довести», «оцінити» тощо.

У матеріалознавчих дослідженнях типовими завданнями є:

- встановлення взаємозв'язку між хімічним складом матеріалу, його структурою та властивостями;
- дослідження впливу технологічних процесів отримання матеріалів (лиття, обробки тиском, порошкової металургії тощо) на формування структури та експлуатаційних характеристик;
- визначення впливу додаткових видів обробки, зокрема термічної, термомеханічної або хіміко-термічної, на властивості матеріалів;
- розроблення нових матеріалів, технологій їх обробки та методів контролю властивостей.

Більшість матеріалознавчих досліджень можна звести до трьох основних класів наукових задач:

- задачі опису, які передбачають встановлення та систематизацію закономірностей, наприклад побудову діаграм стану або залежностей типу «склад – структура – властивість»;
- задачі оптимізації, спрямовані на визначення раціональних технологічних параметрів для отримання заданого комплексу властивостей;

– задачі компромісу, що полягають в одночасному забезпеченні декількох взаємопов'язаних або суперечливих характеристик, наприклад високої міцності та достатньої пластичності чи в'язкості матеріалу.

Як приклад розглянемо тему дослідження: «Оптимізація температурно-деформаційних параметрів прокатки спеціальних сталей з урахуванням їх впливу на структуру та властивості». Метою цього дослідження є встановлення закономірностей структуроутворення та кінетики рекристалізації аустеніту в умовах багатопрохідної гарячої деформації, а також розроблення технології суміщеної деформаційно-термічної обробки для отримання прокату з підвищеним рівнем фізико-механічних властивостей.

Об'єктом дослідження є процеси структуроутворення та рекристалізації аустеніту під час гарячої деформації спеціальних сталей.

Предметом дослідження є закономірності впливу температурно-деформаційних параметрів прокатки на формування мікроструктури та властивостей прокату.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання дослідження:

- проаналізувати сучасний стан наукових уявлень щодо формування мікроструктури та властивостей спеціальних сталей;
- дослідити кінетику рекристалізації аустеніту та закономірності формування зеренної структури під час гарячої деформації;
- вивчити механізми виділення вторинних фаз у процесі термомеханічної обробки;
- розробити математичні та фізичні моделі структуроутворення;
- створити технологічні схеми деформаційно-термічної обробки;
- провести порівняльний аналіз механічних властивостей матеріалу після різних режимів обробки;
- розробити практичні рекомендації щодо оптимальних технологічних параметрів прокатки.

Одним із ключових критеріїв оцінювання результатів наукового дослідження є наукова новизна. Вона характеризує ступінь відмінності

отриманих результатів від уже відомих положень, наведених у науковій літературі, та визначає внесок дослідника у розвиток відповідної галузі знань.

Наукова новизна може проявлятися у відкритті нових закономірностей, уточненні або розвитку існуючих теоретичних положень, створенні нових моделей, методів, технологій чи технічних рішень. Вона відображає концептуальну сутність дослідження та забезпечує наукове обґрунтування отриманих результатів.

Слід враховувати, що практична й теоретична значущість нових наукових результатів не завжди є очевидною безпосередньо після завершення дослідження. У багатьох випадках їх повне наукове та прикладне значення усвідомлюється лише з часом у процесі подальшого розвитку науки й техніки.

3.5. Евристична функція науки

Евристична функція науки полягає у здобутті принципово нового знання, виявленні раніше невідомих властивостей уже досліджених об'єктів, а також у розробленні нових методів і підходів до розв'язання складних наукових і практичних завдань. Особливого значення ця функція набуває у фундаментальних науках, оскільки забезпечує перехід від простого накопичення фактів до формування якісно нових теоретичних узагальнень. Основою пошуку нових рішень є встановлення причинно-наслідкових зв'язків і закономірностей, відповідно до яких усі явища мають певну детермінованість та взаємозалежність.

Наукова ідея виникає як узагальнений або інтуїтивний образ пояснення факту, явища чи процесу без повного теоретичного обґрунтування та детального з'ясування всієї системи взаємозв'язків. Вона ґрунтується на наявних знаннях, однак у процесі розвитку науки може виявляти нові закономірності та створювати передумови для формування гіпотез і теорій. Нерідко нові ідеї виникають у ситуаціях, коли результати досліджень не узгоджуються із загальноприйнятими науковими уявленнями або потребують нового пояснення.

Інтуїція у науковому пізнанні формується на основі накопиченого досвіду, аналізу результатів досліджень та осмислення можливостей їх практичного

застосування. Формування конструктивних наукових ідей найчастіше характерне для дослідників із високим рівнем допитливості, розвиненим аналітичним мисленням, творчою уявою та здатністю до критичного аналізу. Евристичні методи особливо важливі на початкових етапах дослідження, коли обсяг наявних фактів є недостатнім для формулювання остаточних висновків.

До основних елементів евристичної функції науки належать:

1. Формування нових теоретичних положень, концепцій і наукових підходів.
2. Постановка нових наукових проблем і питань, що визначають напрями подальших досліджень.
3. Висування наукових гіпотез як основи експериментальних і теоретичних досліджень.
4. Пошук нестандартних рішень та нових підходів до вивчення складних явищ на основі критичного й аналітичного мислення.
5. Прогнозування перспективних напрямів розвитку науки, техніки та технологій.
6. Інтеграція знань із різних галузей науки шляхом розвитку міждисциплінарних досліджень.
7. Розроблення та вдосконалення нових методів наукового дослідження.

У матеріалознавстві евристична функція науки забезпечує наукове передбачення, інноваційність і формування нових концепцій створення матеріалів майбутнього та технологічного розвитку. Її реалізація проявляється у таких напрямках:

1. Використання евристичних підходів для прогнозування матеріалів із заданими властивостями (надпровідників, біосумісних полімерів, наноматеріалів тощо) ще до їх експериментального синтезу.
2. Формування на основі теоретичних моделей і попередніх досліджень припущень щодо фізичних, хімічних і механічних властивостей нових матеріалів, зокрема міцності, електропровідності, теплопровідності та корозійної стійкості.

3. Розроблення та вдосконалення сучасних технологій отримання матеріалів, зокрема 3D-друку, нанотехнологій, порошкової металургії та плазмового напилення.

4. Інтеграція досягнень фізики, хімії, біології та інженерії для створення нових класів матеріалів, зокрема біоматеріалів і функціональних покриттів.

5. Створення матеріалів із наперед заданими властивостями для потреб авіакосмічної техніки, медицини, енергетики та електроніки, зокрема жароміцних сплавів, біоінертних імплантів та енергоефективних матеріалів.

3.6. Загальнонаукові методи проведення теоретичних досліджень

Методи наукового пізнання умовно поділяють на три основні групи:

- методи емпіричного дослідження (спостереження, порівняння, вимірювання, експеримент);
- методи, що застосовуються як на емпіричному, так і на теоретичному рівнях (абстрагування, аналіз і синтез, індукція та дедукція, моделювання тощо);
- методи теоретичного рівня (сходження від абстрактного до конкретного, системний підхід).

Характерною особливістю емпіричного рівня пізнання є безпосередній контакт дослідника з об'єктом дослідження за допомогою органів чуття. Емпіричне пізнання забезпечує отримання знань про зовнішні, безпосередньо спостережувані зв'язки між явищами та накопичення фактичного матеріалу. Теоретичний рівень, своєю чергою, забезпечує осмислення, узагальнення та систематизацію отриманих даних. У взаємодії емпіричний і теоретичний рівні формують цілісну систему наукового пізнання, що є основою розвитку науки.

Теоретичний рівень наукового пізнання забезпечує логічне узагальнення практичного досвіду та спрямований на формування внутрішньо узгодженої системи знань про суттєві властивості, закономірності та причинно-наслідкові зв'язки досліджуваного об'єкта. На цьому рівні безпосередня взаємодія з

об'єктом відсутня, а його вивчення здійснюється опосередковано за допомогою логічних умовиводів, математичних перетворень, моделей, принципів і аксіом.

Теоретичні дослідження ґрунтуються на сформованих у процесі розвитку науки логічних конструкціях: аксіомах, законах, принципах, постулатах, теоремах тощо. Однією з характерних ознак теоретичного пізнання є створення ідеалізованих об'єктів, які відображають сутність емпірично спостережуваних явищ.

Теоретичні дослідження здійснюються в усіх галузях науки та можуть бути фундаментальними або прикладними, концептуальними чи пошуковими. Основною метою теоретичних досліджень у технічних науках є:

- вивчення фізичної природи об'єктів, явищ і процесів;
- побудова моделей досліджуваних об'єктів;
- розроблення розрахункових моделей функціонування об'єктів;
- розв'язання задач аналізу, синтезу та оптимізації параметрів.

Теоретичні дослідження виконують функції систематизації знань, опису об'єктивної реальності та пояснення її закономірностей. Такі дослідження можуть бути зумовлені як практичними потребами, так і необхідністю вдосконалення існуючих теорій.

Теоретичне дослідження технічного об'єкта може включати такі етапи:

- аналіз сутності процесів і явищ;
- формулювання припущення;
- висунення гіпотези дослідження;
- побудову фізичної або математичної моделі;
- проведення аналітичного дослідження результатів моделювання;
- формулювання та аналіз теоретичних положень.

Абстрагування є одним із базових методів теоретичного наукового пізнання. Воно полягає в уявному відокремленні несуттєвих властивостей, зв'язків і відношень об'єкта дослідження з концентрацією уваги на його ключових характеристиках. Ігнорування другорядних ознак дозволяє спростити дослідження та виокремити найбільш суттєві закономірності. У результаті

абстрагування складний об'єкт замінюється спрощеною моделлю, яка відображає його основні властивості.

Абстрагування є важливим інструментом теоретичного матеріалознавства, оскільки дозволяє:

- виділяти ключові властивості матеріалів;
- формувати узагальнені моделі їх структури та поведінки;
- встановлювати закономірності, що надалі перевіряються експериментально.

У теоретичних дослідженнях широко використовують абстрактні поняття, зокрема «матеріальна точка», «ідеальний газ», «абсолютно чорне тіло». Завдяки абстрагуванню та ідеалізації теоретичні моделі відображають реальність у спрощеній формі, акцентуючи увагу на найбільш суттєвих властивостях об'єкта. Теоретична модель є спрощеним відображенням реального об'єкта та виконує функцію його ідеалізованого представлення.

З розвитком науки теорії постійно уточнюються шляхом включення нових фактів і концепцій. Наприклад, результатом теоретичного дослідження може бути пояснення механізмів руйнування матеріалу в умовах температурних змін.

Реальні матеріали характеризуються складною структурою: дефектами кристалічної ґратки, домішками, неоднорідностями, залишковими напруженнями та впливом зовнішнього середовища. Одночасний облік усіх чинників є практично неможливим, тому дослідники абстрагуються від другорядних параметрів, виділяючи основні змінні - склад, структуру, температуру, напруження тощо. Наприклад, у теоретичних дослідженнях використовують ідеалізовані моделі: ідеальний кристал без дефектів, однорідний ізотропний матеріал, рівноважну структуру. Під час аналізу міцності металів спочатку розглядають ідеальну кристалічну ґратку, абстрагуючись від дислокацій, що дозволяє встановити фундаментальні закономірності деформації.

Абстрагування тісно пов'язане з конкретизацією - методом наукового пізнання, який полягає у виявленні та уточненні суттєвих властивостей, ознак і зв'язків об'єкта з наданням їм конкретного змісту. Конкретизація передбачає дослідження об'єкта в усій різноманітності його реального існування у часі та

просторі, на відміну від абстрактного, відокремленого розгляду. Метод конкретизації дозволяє перевірити коректність результатів, отриманих шляхом абстрагування, та оцінити їх відповідність реальним об'єктам і процесам.

До основних методів теоретичних досліджень належать:

- ідеалізація - формування уявлення про об'єкт шляхом виключення умов, необхідних для його реального існування;
- аксіоматичний метод - побудова теорії на основі вихідних положень, що приймаються без доказу;
- мисленнєвий експеримент - дослідження шляхом оперування уявними образами, практична реалізація яких є неможливою або утрудненою;
- формалізація - побудова узагальненої знакової моделі для відображення структури об'єкта та закономірностей процесів;
- гіпотетико-дедуктивний метод - формування системи гіпотез із подальшою їх перевіркою шляхом зіставлення з емпіричними даними;
- метод сходження від абстрактного до конкретного - послідовне уточнення та конкретизація вихідних абстракцій;
- математичне моделювання - застосування математичних структур для опису недостатньо досліджених об'єктів і процесів.

Аксіоматичний метод є способом побудови наукової теорії, за якого її основу становлять твердження, що приймаються без доказу (аксіоми), а всі інші положення логічно виводяться з них. Теорія, побудована аксіоматичним методом, вважається істинною за умови істинності аксіом і коректності логічних висновків. Основними сферами застосування аксіоматичного методу є математика, логіка та окремі розділи фізики.

У матеріалознавстві аксіоматичний метод використовується для побудови теоретичних моделей на основі фундаментальних законів термодинаміки, принципів кристалохімії та механіки суцільного середовища. Це дозволяє описувати властивості та поведінку матеріалів без необхідності проведення експерименту на кожному етапі дослідження.

До основних напрямів застосування аксіоматичного методу в теоретичному матеріалознавстві належать:

1. Формування теоретичних моделей матеріалів. Аксиоми використовуються як основа для побудови моделей кристалічної ґратки, дефектів і фазових станів. На базі постулатів квантової механіки та кристалографії формуються теорії електронної структури твердих тіл.

2. Теорія фазових перетворень. Аксиоматичний підхід застосовується під час побудови термодинамічних моделей фазових переходів. Вихідними положеннями є закони термодинаміки, принцип мінімуму вільної енергії та умови фазової рівноваги.

3. Розроблення нових матеріалів. На основі принципу взаємозв'язку «склад - структура - властивості» формуються теоретичні концепції композитів, наноматеріалів і функціональних покриттів.

4. Прогнозування поведінки матеріалів. Закони фізики твердого тіла та термодинаміки використовуються для прогнозування поведінки матеріалів в умовах високих температур, тиску та радіаційного впливу.

5. Дослідження прогартуваності сталі. Як аксіоматичну основу використовують закони дифузії, фазових перетворень і термодинамічної рівноваги.

Для формування нового знання в технічних науках широко застосовується гіпотетико-дедуктивний підхід. Висунення та обґрунтування первинної гіпотези здійснюється на основі поставлених завдань дослідження та критичного аналізу наявного фактичного матеріалу з урахуванням відомих наукових даних. У деяких випадках для уточнення робочої гіпотези проводять попередні експерименти, що дозволяє глибше дослідити об'єкт.

Гіпотеза є попереднім поясненням наукової проблеми, на основі якого здійснюється подальший науковий пошук. Завершальним етапом теоретичного дослідження є перевірка отриманих результатів на узгодженість із наявними теоріями та формулювання загальних закономірностей у межах відповідної предметної області. У процесі дослідження гіпотеза або підтверджується й набуває статусу наукового знання, або спростовується та відхиляється як хибна.

Проведення теоретичного дослідження спрямоване на узагальнення встановлених фактів, визначення зв'язків між ними та формулювання висновків

на основі прийнятої гіпотези. Гіпотеза забезпечує логічну впорядкованість дослідження та виконує функцію його цілеспрямування. Вона формулює можливе розв'язання проблеми, яке підлягає подальшій емпіричній перевірці.

На основі прийнятої гіпотези визначаються напрями та методика наукового дослідження. Формулювання гіпотези зазвичай здійснюється у три етапи:

1. накопичення фактичного матеріалу та висунення припущень;
2. теоретичне обґрунтування і формулювання гіпотези;
3. практична перевірка та уточнення гіпотези.

3.7. Застосування методів теоретичних досліджень

Теоретичні дослідження ґрунтуються на вивченні процесів і явищ без безпосередньої практичної взаємодії з об'єктом дослідження. Їх основною метою є пояснення, узагальнення та систематизація наукових знань, виявлення закономірностей функціонування об'єктів і формування наукових теорій. Теорія забезпечує осмислення та інтеграцію експериментальних даних у цілісну систему знань. Без належного теоретичного обґрунтування результати експериментів залишаються фрагментарними та не формують завершеної наукової картини. У процесі розвитку науки теоретичні положення постійно проходять уточнення й доповнюються новими фактами, концепціями та методологічними підходами.

У матеріалознавстві теоретичні дослідження виконують не лише пояснювальну, а й прогностичну функцію. Вони забезпечують перехід від емпіричного добору матеріалів до їх науково обґрунтованого проектування із заданими властивостями. Теоретичні методи дозволяють встановити взаємозв'язок між хімічним складом, структурою та властивостями матеріалів на атомному, кристалічному й мікроструктурному рівнях.

Використання моделей кристалічної будови, дефектів кристалічної решітки, дифузійних процесів і фазових перетворень дає змогу прогнозувати поведінку матеріалів у різних умовах експлуатації. Завдяки цьому теоретичні

дослідження забезпечують не лише інтерпретацію експериментальних результатів, а й передбачення властивостей нових матеріалів ще до їх практичного створення та випробування.

Сходження від абстрактного до конкретного є загальною формою розвитку наукового пізнання та включає два взаємопов'язані етапи:

- на першому етапі здійснюється перехід від безпосереднього сприйняття об'єкта до формування його абстрактних визначень - понять, суджень і умовиводів;

- на другому етапі відбувається рух від абстрактних визначень до цілісного відтворення об'єкта в усій багатогранності його властивостей і взаємозв'язків.

Прикладом застосування методу конкретизації у матеріалознавстві є використання загальної теорії фазових перетворень, що описується за допомогою діаграми стану «залізо – вуглець». У процесі конкретизації:

- уточнюється вміст вуглецю в конкретній марці сталі;
- визначаються критичні температурні точки (A_1 , A_3);
- враховується швидкість охолодження під час термічної обробки;
- оцінюється ймовірність утворення мартенситної структури.

У результаті абстрактна термодинамічна модель трансформується у практичний інструмент вибору режимів термічної обробки для отримання матеріалу із заданими структурою та властивостями.

Застосування методу конкретизації дозволяє:

- трансформувати загальні фізичні закони у прикладні інженерні розрахунки;

- адаптувати математичні моделі до реальних матеріалів і технологічних процесів;

- враховувати вплив технологічних параметрів, зокрема температури, тиску та швидкості охолодження;

- підвищувати точність прогнозування властивостей матеріалів;

- формувати науково обґрунтовані рекомендації для виробництва та практичного використання матеріалів.

Схематично процес конкретизації у матеріалознавстві можна подати таким чином: **загальна теорія → уточнення умов → врахування складу та структури → розрахунок параметрів → практичне застосування.**

Процес абстрагування у системі наукового пізнання тісно пов'язаний із такими методами теоретичного дослідження, як аналіз і синтез. Аналіз передбачає розчленування складного об'єкта на окремі елементи з метою детального вивчення їх властивостей і взаємозв'язків. Синтез, навпаки, полягає в об'єднанні окремих елементів у єдину систему, що забезпечує цілісне розуміння об'єкта дослідження. Поєднання аналізу та синтезу дозволяє отримати комплексне уявлення про закономірності функціонування матеріалів, їх структуру та механізми формування властивостей.

3.8. Проведення експериментальних досліджень

Жодне наукове дослідження не може вважатися завершеним без експериментальної перевірки отриманих результатів. Необхідність проведення експерименту зумовлена кількома причинами: недостатньою впевненістю у повноті прийнятої теоретичної моделі об'єкта; можливими похибками, пов'язаними з використанням наближень і спрощень під час постановки та теоретичного розв'язання задачі; а також імовірністю помилок у процесі теоретичного аналізу.

Експериментальні дослідження проводяться після завершення теоретичного етапу наукової роботи. Експеримент є науково організованим дослідом, у ході якого явище або процес штучно відтворюються в заданих умовах з метою перевірки висунутої гіпотези на основі отриманих наукових фактів. Науковий факт - це достовірно встановлена подія або явище, що слугує основою для формування висновків і підтвердження закономірностей. На відміну від фактів дійсності, які існують незалежно від процесу пізнання, наукові факти є осмисленими, систематизованими та верифікованими результатами дослідження. Саме вони становлять основу формування наукових теорій, законів і концепцій.

У процесі експерименту дослідник має можливість змінювати умови перебігу процесу, ізолювати окремі чинники та створювати контрольоване середовище для вивчення об'єкта. Однією з ключових характеристик експерименту є його відтворюваність, що забезпечує можливість повторної перевірки результатів іншими дослідниками. Тому методика проведення експерименту повинна бути описана максимально детально, що гарантує наукову достовірність і наступність досліджень.

Виділяють два основні взаємодоповнюючі типи експериментальних досліджень: якісні та кількісні. Якісні дослідження спрямовані на вивчення змісту, сутності, причин і характеристик явищ без використання числових показників. Вони дають відповідь на запитання «як?» і «чому?» відбувається певний процес. Кількісні дослідження базуються на використанні числових методів аналізу, статистичної обробки даних і дозволяють оцінити ступінь прояву досліджуваних характеристик.

На ранніх етапах розвитку науки та техніки широко застосовувався метод спроб і помилок. Його сутність полягає у послідовному аналізі різних варіантів дій із відбракуванням неефективних рішень та відбором найбільш раціональних результатів. Незважаючи на простоту, цей метод відіграв важливу роль у розвитку експериментального підходу та накопиченні практичного досвіду.

Завершальним етапом експериментального дослідження є статистична обробка отриманих результатів, їх інтерпретація, публічне обговорення та формулювання висновків. На цьому етапі також оцінюють відповідність отриманих результатів поставленим завданням дослідження. Ефективною вважається така методика, яка забезпечує мінімальну експериментальну похибку та високу достовірність результатів.

Аналіз і зіставлення результатів передбачають порівняння даних теоретичних і експериментальних досліджень. У результаті здійснюється остаточна перевірка гіпотези: вона або підтверджується, або потребує перегляду та формулювання нових положень. У деяких випадках пошуковий експеримент може передувати теоретичному аналізу, а подальше теоретичне узагальнення дозволяє пояснити отримані результати та встановити закономірності.

Емпіричний і теоретичний рівні наукового пізнання відрізняються за предметом, методами та засобами дослідження, однак перебувають у тісному взаємозв'язку. Гіпотези й теорії формуються на основі осмислення фактів і статистичних даних, отриманих емпіричним шляхом, а сформовані теоретичні положення, своєю чергою, визначають напрями подальших експериментальних досліджень.

Емпіричні дослідження спрямовані на виявлення, опис і вивчення чинників, що визначають перебіг явищ і процесів. До основних емпіричних методів належать:

- спостереження - цілеспрямоване вивчення об'єктів без втручання в їх функціонування;
- експеримент - дослідження явищ у контрольованих умовах;
- вимірювання - визначення числових характеристик об'єктів шляхом порівняння з еталоном;
- порівняння - встановлення подібностей і відмінностей між об'єктами;
- моделювання - створення та дослідження моделей об'єктів і процесів.

Спостереження є одним із базових методів наукового пізнання. Воно передбачає систематичне, цілеспрямоване та організоване вивчення об'єктів без активного втручання в їхню природу чи функціонування. Результати спостереження фіксують у вигляді протоколів, щоденників, фото- та відеоматеріалів. Основними функціями спостереження є реєстрація фактів, їх первинна класифікація та порівняльний аналіз.

Проведення наукового спостереження потребує попередньої підготовки, що включає збір інформації про об'єкт дослідження, вибір методів і технічних засобів. Основними вимогами до спостереження є об'єктивність, точність і відтворюваність результатів. Водночас дослідник повинен мінімізувати власний вплив на перебіг досліджуваного процесу.

Дані, отримані шляхом спостереження, відображають переважно зовнішні характеристики об'єктів і процесів, тоді як внутрішні механізми часто

залишаються недоступними без застосування додаткових методів дослідження. Щоб результати спостереження набули статусу наукового знання, вони повинні бути логічно обґрунтованими, систематизованими та підтвердженими експериментально.

Узагальнення є логічним процесом переходу від окремих фактів до загальних висновків. Воно базується на виявленні спільних властивостей об'єктів і формуванні узагальнених понять шляхом абстрагування та виділення суттєвих ознак.

Порівняння як метод наукового пізнання дає змогу встановлювати подібності та відмінності між об'єктами і процесами. Його кількісною формою є вимірювання - процес визначення числових характеристик властивостей об'єктів за допомогою вимірювальних приладів та еталонів.

Важливим етапом експериментального дослідження є обробка й аналіз отриманих даних. Цей процес включає систематизацію, класифікацію, статистичну обробку та інтерпретацію результатів. Для забезпечення наочності дані подають у вигляді таблиць, графіків, формул, діаграм і номограм.

Емпіричні закони дозволяють описувати явища та процеси, однак не завжди пояснюють їхню внутрішню сутність. Наприклад, закони теплового розширення характеризують кількісні параметри процесу, проте не розкривають механізмів, що лежать в його основі.

3.9. Експериментальні методи дослідження

Експериментальні методи мають важливе значення в емпіричних наукових дослідженнях. Вони являють собою систему пізнавальних операцій, спрямованих на вивчення об'єктів у спеціально створених і контрольованих умовах. Такі умови забезпечують можливість виявлення, вимірювання, порівняння та аналізу властивостей об'єкта, а також встановлення закономірностей і взаємозв'язків між досліджуваними параметрами.

На відміну від спостереження, експеримент передбачає активну взаємодію дослідника з об'єктом дослідження. Експеримент як загальнонауковий метод

полягає у спеціально організованій діяльності, спрямованій на створення умов для систематичного вивчення процесів і явищ. Його сутність полягає у цілеспрямованому впливі на об'єкт шляхом зміни окремих факторів з метою перевірки гіпотез і встановлення причинно-наслідкових зв'язків. Багаторазове відтворення однакових умов забезпечує можливість отримання відтворюваних та статистично достовірних результатів.

Експериментальні дослідження дозволяють:

- підтверджувати або спростовувати наукові гіпотези;
- перевіряти адекватність моделей і методик;
- оцінювати вплив окремих параметрів системи на функцію відгуку;
- визначати оптимальні умови технологічних процесів.

У процесі експерименту застосовують методи прямого втручання через зміну факторів впливу, наприклад введення легувальних елементів у сплав, зміну режимів термічної обробки або ступеня пластичної деформації. Фактором називають параметр, який змінюється в ході експерименту та впливає на об'єкт дослідження. Відгук - це результат дії факторів за певних умов експерименту, а функція відгуку - математично виражена залежність результату від досліджуваних факторів у визначеному інтервалі їх зміни. Зазвичай обирають найбільш інформативний параметр, який найбільш повно характеризує сутність процесу.

Експеримент забезпечує обґрунтоване визначення ефективності нових методів, матеріалів і технологій шляхом їх порівняння з базовими або контрольними зразками.

Порівняно зі спостереженням експеримент має такі переваги:

- можливість усунення або мінімізації впливу побічних факторів;
- дослідження заздалегідь визначених властивостей об'єкта;
- високу точність і відтворюваність результатів.

За способом отримання даних експериментальні методи поділяють на активні та пасивні.

Активний експеримент передбачає цілеспрямовану зміну умов дослідження та кероване варіювання факторів. Дослідник самостійно задає рівні

факторів і контролює умови проведення експерименту. Такі методи широко застосовуються у технічних і природничих науках, де необхідно встановити причинно-наслідкові залежності між параметрами процесу та властивостями об'єкта.

Пасивний експеримент базується на спостереженні за поведінкою об'єкта без втручання дослідника у перебіг процесу. У цьому випадку значення факторів лише фіксуються, але не задаються експериментатором. Пасивні методи застосовують для аналізу об'єктів у реальних умовах функціонування, коли активне втручання є неможливим або недоцільним. Основною метою пасивного експерименту є встановлення функціональної залежності між параметрами системи на основі аналізу накопичених даних.

Залежно від умов проведення активний експеримент поділяють на лабораторний, виробничий (натурний), природний і пошуковий.

Лабораторний експеримент проводять у спеціально створених умовах із використанням обладнання та установок, що забезпечують контроль параметрів і високу відтворюваність результатів. У лабораторних умовах дослідник має можливість стабільно підтримувати задані рівні факторів і змінювати їх у широкому діапазоні. Найчастіше досліджують не сам об'єкт, а його модель або зразок.

Перевагами лабораторного експерименту є:

- мінімальний вплив випадкових похибок;
- висока точність вимірювань;
- можливість ретельного контролю умов дослідження;
- широкі можливості варіювання факторів.

Наприклад, під час лабораторного дослідження процесу термічної обробки сталі температуру можна змінювати у широких межах, тоді як у промислових умовах такі зміни часто обмежені технологічними вимогами. Важливу роль у лабораторному експерименті відіграє кваліфікація дослідника, оскільки саме він забезпечує коректне налаштування обладнання та достовірність результатів.

Однак лабораторний експеримент не завжди повністю відтворює реальні умови функціонування об'єкта, тому виникає необхідність у проведенні

виробничого (натурного) експерименту. Виробничі експерименти здійснюють безпосередньо в умовах експлуатації або виробництва з урахуванням впливу зовнішніх факторів. У таких умовах значно зростає кількість неконтрольованих параметрів, що ускладнює процес вимірювання та обробки результатів.

Природний експеримент передбачає дослідження об'єкта у його природному середовищі без створення штучних умов. Прикладом є вивчення корозійної стійкості металів у різних кліматичних умовах.

Пошуковий експеримент застосовують у випадках недостатності теоретичних знань про досліджуваний процес. Його метою є отримання нових даних, виявлення значущих факторів та формування наукової гіпотези. Пошукові дослідження особливо важливі тоді, коли відсутня достатня апріорна інформація щодо механізмів досліджуваного явища.

Організація експериментального дослідження включає такі етапи:

- формулювання мети та завдань;
- висунення наукової гіпотези;
- вибір об'єкта дослідження;
- розроблення методики та схеми експерименту;
- підготовку експериментальної установки;
- вибір факторів і визначення діапазону їх варіювання;
- обґрунтування кількості дослідів;
- визначення послідовності зміни факторів;
- проведення спостережень і вимірювань;
- статистичну обробку та аналіз результатів;
- узагальнення отриманих даних.

Для підтвердження наукової новизни результати експерименту порівнюють з уже відомими даними, що дозволяє оцінити їх унікальність і практичну значущість.

Під час розроблення програми експерименту необхідно прагнути до її максимальної простоти, наочності та достовірності без втрати точності результатів. Це досягається шляхом попереднього аналізу методів вимірювання, вибору оптимальних технічних засобів і коректної обробки отриманих даних.

Якісні дослідження спрямовані на вивчення сутності, характеристик і особливостей явищ без визначення їх кількісних параметрів. Результати таких досліджень переважно подають у формі словесного опису. Якісний експеримент дозволяє встановити сам факт існування певного явища, але не визначає його числових характеристик.

У матеріалознавстві прикладом якісного дослідження є аналіз мікроструктури сталі після термічної обробки за допомогою оптичної мікроскопії, коли оцінюють форму зерен, фазовий склад і наявність структурних дефектів без проведення кількісних вимірювань.

Іншим прикладом є дослідження пластичності металевого дроту методом багаторазових перегинів. Якщо один зразок піддавався пластичній деформації без подальшого відпалу, а інший після деформації пройшов термічний відпал, то необроблений дріт руйнуватиметься після меншої кількості перегинів. Це дозволяє зробити якісний висновок про нижчу пластичність матеріалу.

Кількісний експеримент, на відміну від якісного, дозволяє встановити числові залежності між параметрами впливу та функцією відгуку. У наведеному прикладі кількісне дослідження пластичності дроту передбачає:

- визначення параметрів процесу відпалу та характеристик матеріалу, що можуть впливати на пластичність;
- вибір кількісного показника пластичності, наприклад кількості перегинів до руйнування;
- встановлення математичної залежності між пластичністю дроту та параметрами термічної обробки, а також можливими варіаціями хімічного складу сталі.

3.10. Моделювання при проведенні наукових досліджень

Аналогія - це метод наукового пізнання, що ґрунтується на перенесенні знань про один об'єкт на інший на основі їхньої подібності за суттєвими ознаками. Метод аналогії широко застосовується як у межах однієї науки, так і між різними галузями знань. Наприклад, закономірності коливань механічного

маятника та електричного коливального контуру описуються аналогічними математичними залежностями. Подібно до цього, закони руху рідини в каналі мають аналогії з проходженням електричного струму в провіднику. У матеріалознавстві метод аналогії використовують для опису процесів теплопровідності, електропровідності та дифузії.

У багатьох випадках безпосереднє проведення експериментального дослідження є складним, небезпечним або економічно недоцільним. У таких ситуаціях застосовують метод моделювання - спосіб дослідження об'єкта шляхом створення та вивчення його моделі, побудованої на основі аналогії з реальним об'єктом. Модель є спрощеним аналогом реальної системи, який відображає її найважливіші властивості та дозволяє отримувати нову інформацію про поведінку досліджуваного об'єкта. Моделювання ґрунтується на принципі подібності між моделлю та оригіналом і дає змогу досліджувати процеси, які складно або неможливо вивчити безпосередньо. Залежно від способу представлення об'єкта розрізняють фізичні, математичні, структурні та комп'ютерні моделі.

Основні положення теорії подібності визначають властивості подібних об'єктів дослідження - систем, процесів і явищ - та встановлюють умови, за яких один об'єкт може розглядатися як модель іншого. \

Співвідношення між моделлю та оригіналом можуть виражатися:

- простими масштабними співвідношеннями;
- складними функціональними залежностями між групами параметрів порівнюваних об'єктів.

Характеристикою подібних об'єктів є критерії подібності, за допомогою яких встановлюють закономірності взаємно однозначної відповідності моделі та оригіналу. Критерії подібності - це безрозмірні степеневі комплекси параметрів, однакові за формою математичного запису та рівнозначні за величиною для подібних систем.

Фізичне моделювання передбачає використання матеріальних моделей, які відтворюють геометричні, механічні або фізичні властивості реального об'єкта.

Такі моделі застосовують у лабораторних умовах із подальшим перенесенням отриманих результатів на реальний об'єкт відповідно до теорії подібності.

Залежно від врахування часових змін розрізняють статичне та динамічне моделювання. Статичне моделювання характеризує стан об'єкта у фіксований момент часу або в умовах рівноваги. Наприклад, визначення фазового складу сталі за діаграмою стану при заданій температурі та концентрації компонентів є прикладом статичної моделі.

Динамічне моделювання враховує зміну параметрів системи в часі. Воно використовується для опису процесів розвитку, еволюції та функціонування систем. Наприклад, дослідження деформації матеріалу під дією тривалого навантаження дозволяє прогнозувати його довговічність і працездатність.

За характером перебігу процесів моделі поділяють на детерміновані та стохастичні. Детерміновані моделі описують процеси без випадкових впливів, коли результат однозначно визначається початковими умовами та математичними залежностями. За однакових вхідних даних така модель завжди забезпечує однаковий результат.

Стохастичне моделювання враховує випадкові процеси, статистичні флуктуації та неоднорідність структури матеріалу. Результати таких моделей мають імовірнісний характер і описуються статистичними закономірностями. Наприклад, процеси руйнування матеріалів та зародження тріщин значною мірою залежать від мікродфектів і структурних неоднорідностей, тому часто описуються імовірнісними моделями міцності, зокрема теорією Вейбулла.

У зв'язку з математизацією науки значного поширення набув метод формалізації. Формалізація - це метод дослідження, що полягає у відображенні об'єктів і процесів у знаковій формі за допомогою математичних символів, логічних конструкцій або спеціалізованих мов опису. Вона дозволяє абстрагуватися від другорядних властивостей об'єкта та зосередитися на його суттєвих характеристиках.

Математичне моделювання базується на методі формалізації та полягає у створенні математичного опису процесів і явищ. Математична модель являє собою систему рівнянь, функцій і залежностей, які пов'язують параметри об'єкта

з факторами впливу. Використання математичних моделей дозволяє прогнозувати поведінку систем, аналізувати закономірності їх функціонування та оптимізувати технологічні процеси.

Порівняно з фізичним моделюванням математичне моделювання є менш затратним і забезпечує можливість дослідження складних систем із використанням комп'ютерної техніки. Воно дозволяє варіювати параметри об'єкта в широких межах та аналізувати вплив окремих факторів. Водночас під час побудови математичних моделей використовують певні спрощувальні припущення, що може знижувати точність опису реальних процесів.

Сучасні інформаційні технології забезпечили широке впровадження комп'ютерного моделювання. Комп'ютерна модель є формалізованим представленням об'єкта або процесу у вигляді алгоритму, який описує закономірності зміни параметрів системи. Дослідження математичних моделей за допомогою електронно-обчислювальних машин є швидшим, економічно ефективнішим і часто більш інформативним, ніж проведення натурального експерименту.

Комп'ютерне моделювання стало важливою складовою сучасної науково-інженерної діяльності та широко використовується для проведення обчислювальних експериментів. Наприклад, математичне моделювання застосовують для опису дифузії хімічних елементів у металах, кінетики хімічних реакцій або формування фізико-хімічних властивостей сплавів залежно від їхнього складу.

Поєднання комп'ютерного та натурального експерименту дозволяє значно підвищити ефективність досліджень і скоротити витрати на розробку нових матеріалів. На завершальному етапі результати моделювання перевіряють обмеженою кількістю ретельно спланованих експериментів.

Комп'ютерні моделі є зручним інструментом дослідження, оскільки дозволяють аналізувати вплив параметрів і початкових умов на поведінку системи. Їх використовують як для отримання нових знань, так і для наближеного аналізу складних систем, недоступних для точного аналітичного опису.

У матеріалознавстві комп'ютерне моделювання відіграє особливо важливу роль, оскільки дозволяє прогнозувати властивості матеріалів, оптимізувати їхню структуру та поведінку в різних умовах експлуатації.

Основними напрямками застосування комп'ютерного моделювання є:

1. **Моделювання структури матеріалів на атомарному рівні.** Цей підхід передбачає дослідження взаємодії атомів і молекул, аналіз будови меж зерен, дислокацій та інших дефектів структури, а також їхнього впливу на процеси деформації, руйнування, спікання та дифузійної повзучості. Наприклад, у дослідженнях титанових сплавів моделюють вплив легувальних елементів на механічні властивості матеріалу.

2. **Моделювання поведінки матеріалів під дією навантажень.** Для аналізу механічної поведінки матеріалів за різних умов навантаження застосовують чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів. Це дозволяє прогнозувати поведінку конструкцій в умовах реальної експлуатації.

3. **Моделювання термічних властивостей.** Комп'ютерне моделювання використовують для дослідження процесів теплопередачі, формування температурних полів і теплообміну в матеріалах та технічних системах.

4. **Моделювання виробничих процесів.** Такі моделі застосовують для оптимізації технологій лиття, термічної обробки та прогнозування утворення дефектів.

5. **Моделювання фазових переходів.** Охоплює дослідження змін кристалічної структури та властивостей матеріалів під впливом температури, тиску й деформації.

6. **Моделювання корозії та зношування.** Дає змогу прогнозувати довговічність матеріалів в агресивних середовищах та оцінювати їхню стійкість до руйнування.

7. **Моделювання взаємодії з навколишнім середовищем.** Використовується для оцінювання впливу зовнішніх факторів - ультрафіолетового випромінювання, радіації, температурних і механічних навантажень - на властивості матеріалів.

Застосування комп'ютерного моделювання дозволяє значно скоротити час і витрати на створення нових матеріалів та підвищити ефективність технологічних процесів. Зростання продуктивності обчислювальної техніки зробило можливим моделювання складних багатокomпонентних систем і сприяло розробленню матеріалів із заданими властивостями.

Структурне моделювання - це метод дослідження, що полягає у відображенні структури системи, її елементів, зв'язків та ієрархії. Такі моделі часто подають у вигляді графів, де вершини відповідають елементам системи, а дуги - зв'язкам між ними. У матеріалознавстві структурне моделювання застосовують для аналізу зерен, фаз, домішок і взаємозв'язків між структурними компонентами матеріалу, що дозволяє прогнозувати його механічні властивості.

Під час розроблення математичної моделі враховують такі особливості:

- реальне явище спрощують і описують засобами математичного апарату;
- визначають межі досліджуваного об'єкта та обмеження моделі;
- встановлюють змінні, що характеризують стан системи;
- обирають математичний апарат для формалізації;
- визначають зв'язки між змінними відповідно до законів і закономірностей досліджуваного процесу;
- здійснюють аналітичне або імітаційне дослідження моделі із застосуванням методів оптимізації.

Аналітичне моделювання передбачає використання математичних рівнянь - алгебраїчних, диференціальних або інтегральних - для опису досліджуваного об'єкта та отримання його кількісних характеристик.

Побудова моделі є ключовим етапом моделювання і включає такі стадії:

1. Формалізацію задачі дослідження - визначення критеріїв оцінювання, формулювання припущень та встановлення меж застосування моделі.
2. Визначення параметрів, що впливають на функціонування системи.
3. Формалізацію процесів - розроблення алгоритму моделювання та встановлення взаємозв'язків між параметрами.

4. Побудову моделі та перевірку її відповідності реальному об'єкту, оцінювання точності, чутливості й прогностичної здатності.
5. Проведення серії експериментів на моделі для накопичення інформації про поведінку системи.
6. Інтерпретацію результатів і перенесення їх на реальний об'єкт із формулюванням висновків.

3.11. Системний аналіз

Системний аналіз є методом наукового пізнання, що передбачає встановлення структурних і функціональних зв'язків між елементами складної системи та її властивостями. Принцип системності орієнтує дослідника на вивчення не лише окремих компонентів об'єкта, а й закономірностей їхньої взаємодії в межах цілісної концептуальної моделі, інтегрованої у ширший контекст взаємопов'язаних явищ і процесів.

Сутність системного аналізу полягає у комплексному дослідженні об'єкта як єдиного цілого з узгодженим функціонуванням усіх його складових.

У наукових дослідженнях системний аналіз передбачає оцінку поведінки об'єкта як системи з урахуванням усіх чинників, що впливають на її функціонування. На відміну від структурного аналізу, який зосереджується переважно на внутрішній будові об'єкта, системний аналіз орієнтований на дослідження цілісної поведінки системи, її функціонування та взаємодії із зовнішнім середовищем. Структурний і системний аналіз є взаємопов'язаними підходами, однак відрізняються спрямованістю дослідження. Системний аналіз базується на принципі руху від загального до часткового з урахуванням кінцевої мети функціонування системи.

Основними завданнями системного підходу є:

- формалізація опису об'єкта як системи;
- дослідження елементів системи та взаємозв'язків між ними;
- побудова моделей системи та аналіз її динаміки.

Важливим методом системного аналізу є класифікація, яка передбачає багаторівневий поділ об'єкта з метою систематизації знань про його структуру, елементи, підсистеми, компоненти, зв'язки, властивості та функції.

До основних принципів системного підходу належать:

- багатокomпонентність;
- цілісність;
- взаємозалежність елементів;
- динамічність;
- ієрархічність;
- структурність;
- самоорганізація;
- взаємодія із зовнішнім середовищем.

Системний підхід передбачає дослідження кожного елемента системи у взаємодії з іншими складовими, визначення впливу властивостей окремих частин на поведінку системи в цілому, а також встановлення найбільш ефективних режимів її функціонування.

Розрізняють такі типи взаємодії чинників у системі:

- адитивну - сумарний ефект дорівнює сумі окремих впливів;
- синергетичну - сумарний ефект перевищує суму окремих впливів;
- антагоністичну - сумарний ефект є меншим за суму окремих впливів.

У матеріалознавстві системний аналіз широко застосовується для дослідження взаємозв'язку між структурою матеріалу та його властивостями. Властивості матеріалів визначаються їхнім хімічним складом, структурою та технологією обробки. Взаємодія цих чинників відповідно до законів термодинаміки й кінетики формує мікроструктуру матеріалу, яка, своєю чергою, визначає його експлуатаційні характеристики.

Розглянемо деякі приклади застосування системного аналізу в матеріалознавстві.

1. Аналіз процесів термічної обробки металів. Системний аналіз застосовується для оцінки впливу різних режимів термічної обробки на структуру та властивості сталі. За допомогою математичного й комп'ютерного

моделювання досліджують процеси нагрівання, витримки та охолодження металу при різних температурних режимах і швидкостях охолодження. Це дозволяє визначити вплив параметрів термообробки на фазовий склад, кристалічну структуру, твердість, границю текучості, пластичність та ударну в'язкість сталі. При цьому використовують моделі теплопереносу, аналіз фазових перетворень, чисельне моделювання та методи оптимізації термічних циклів.

2. Оцінка впливу легуючих елементів на властивості металів.

Системний підхід дозволяє прогнозувати зміни механічних, фізичних і хімічних властивостей металів при введенні легуючих компонентів. Аналізу підлягають зміни твердості, корозійної стійкості, теплопровідності, жароміцності та інших характеристик сплавів. Для цього застосовують багатофакторні моделі, які враховують складні взаємодії між компонентами сплаву, вплив легуючих елементів на фазові рівноваги та формування структури матеріалу.

3. Моделювання процесів ливарного виробництва.

Системний аналіз використовується для оптимізації процесів лиття та підвищення якості готових виробів. За допомогою математичних моделей визначають температурні поля, швидкість охолодження та характер кристалізації металу у ливарних формах. Це дає можливість прогнозувати утворення дефектів, зокрема пористості, тріщин і структурної неоднорідності, а також удосконалювати технологічні режими виробництва. Для аналізу застосовують методи чисельного моделювання теплообміну, фазових переходів і метод кінцевих елементів для оцінки напружень та деформацій.

4. Моделювання процесів корозії металів.

Системний аналіз корозійних процесів дозволяє створювати математичні моделі, що враховують вплив температури, вологості, кислотності середовища (рН) та концентрації агресивних речовин. Це забезпечує можливість прогнозування швидкості корозійного руйнування та оцінки терміну експлуатації металевих конструкцій. Для таких досліджень використовують кінетичні моделі корозійних реакцій, методи математичного моделювання та прогнозування деградації матеріалів.

Таким чином, системний аналіз забезпечує інтеграцію різних аспектів матеріалознавства в єдину наукову систему, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень, оптимізації технологічних процесів, зниженню ризиків та підвищенню наукової й практичної цінності отриманих результатів.

3.12. Методи технічного прогнозування

До функцій науки, окрім опису та пояснення явищ дійсності, належить завдання технічного прогнозування.

Прогнозування - це сукупність методів визначення перспектив розвитку явищ або процесів, що ґрунтується на знанні закономірностей їх розвитку в минулому та аналізі сучасних тенденцій. На сьогоднішній день актуальним є вироблення єдиних універсальних підходів до наукового прогнозування і конструювання структури і властивостей матеріалів різноманітної природи (метали, кераміка, полімерні матеріали тощо). Це необхідно для раціонального вирішення прикладних завдань з наступним визначенням галузей їх раціонального практичного використання, а також методів і технологій обробки та переробки матеріалів у конкретні вироби і конструкції з комплексом заданих властивостей. Прогнозування базується на використанні моделей або теорій для формування обґрунтованого передбачення майбутнього стану об'єкта.

Наукова концепція прогнозування повинна розкривати сутність прогнозованої діяльності, форми реалізації, критерії перевірки достовірності результатів і межі застосування прогнозів.

Метод екстраполяції - це перенесення висновків, отриманих при дослідженні частини явища, на інші його частини. У матеріалознавстві метод екстраполяції є ключовим інструментом для оцінки довговічності та поведінки матеріалів у майбутньому на основі даних, отриманих під час короткострокових випробувань. Метод базується на припущенні, що закономірності розвитку процесів, виявлені в минулому та сьогодні, збережуться й у майбутньому. Для підготовки до реалізації методу екстраполяції на початковому етапі проводять збір кількісних показників матеріалу (міцність, маса, опір) через рівні проміжки

часу та визначають математичну функцію (лінійну, експоненціальну тощо), яка найточніше описує зміну властивостей. Прогнозування проводять поширенням цієї функції за межі часового діапазону випробувань.

Наведемо приклади проведення прогнозування методом екстраполяції в матеріалознавстві.

- **Прогнозування тривалої міцності та повзучості:** матеріали (особливо метали та композиційні матеріали) піддають прискореним випробуванням при підвищених температурах або навантаженнях, а потім екстраполюють отримані дані для визначення терміну служби (наприклад, 100 000 годин і більше) за робочих умов.

- **Оцінка корозійної стійкості:** досліджуючи швидкість корозії протягом обмеженого часу в агресивних середовищах, вчені використовують екстраполяцію для розрахунку ймовірної глибини руйнування матеріалу через десятиліття експлуатації.

- **Термічна деградація полімерів:** аналізуючи зміну властивостей пластиків під впливом тепла протягом короткого часу, можна спрогнозувати час до настання критичної крихкості матеріалу за нормальних температур.

- **Зносостійкість вузлів тертя:** проведення екстраполяції динаміки зносу вузлів тертя після короткого терміну експлуатації дозволяє визначити міжремонтні інтервали для деталей машин без проведення багаторічних натурних випробувань.

При застосуванні методу екстраполяції в матеріалознавстві слід враховувати можливість зміни механізмів руйнування. Наприклад, при певній температурі матеріал може різко змінити фазовий стан або структуру через фазові перетворення, що зробить попередні прогнозні оцінки неприйнятними.

Метод експертних оцінок передбачає отримання прогнозованої інформації шляхом аналізу думок кваліфікованих спеціалістів. Оцінки формуються незалежно, узагальнюються та піддаються статистичній обробці, що дозволяє отримати узагальнену модель майбутнього.

Однією з форм експертного прогнозування є метод «мозкової атаки», який передбачає розмежування процесів генерації ідей та їх критичної оцінки.

Експертне наукове прогнозування може реалізовуватися методом «мозкової атаки». Цей метод полягає у розмежуванні двох завдань:

- генерування нових ідей;
- критична оцінка запропонованих ідей групою аналітиків.

Метод «мозкової атаки» передбачає наступні етапи:

1. Формування учасників та модератора експертної групи з фахівців високої кваліфікації у галузі досліджуваної проблеми, а також спеціалістів із суміжних сфер, що забезпечує широту аналізу та різноманітність альтернатив.

2. Підготовка аналітичною групою проблемної записки, яка містить короткий опис наукової проблеми, причини її виникнення, аналіз досвіду розв'язання подібних завдань і перелік можливих альтернатив. наприклад, "створення легкого композиту з високою жароміцністю".

3. Генерація ідей (безпосередньо «мозкова атака»). Етап розпочинається з представлення модератором змісту проблемної задачі. Група спеціалістів (10-15 осіб) висловлює максимальну кількість ідей без обговорення за обмежений час (15-20 хвилин), після чого проводиться їх аналіз, селекція та оцінювання (1,5-2 години).

4. Висловлювання учасників щодо викладеної проблеми, систематизація та узагальнення запропонованих ідей аналітичною групою.

5. Проведення обґрунтованої критики та оцінки висунутих ідей. Кожна ідея розглядається з точки зору можливих перешкод її реалізації та висуваються контрідії.

6. Складання зведеної таблиці альтернатив із відповідними критичними зауваженнями та оцінкою практичного застосування. Після цього виключаються нереальні або малоприматні варіанти і формується остаточний перелік альтернативних прогнозів.

Застосування методу мозкової атаки у матеріалознавстві для прогнозування є ефективним інструментом колективного генерування ідей, спрямований на вирішення складних науково-технічних завдань, розробку нових матеріалів та прогнозування їх властивостей. Метод дозволяє вийти за межі традиційних підходів, стимулюючи творче мислення та долаючи

стереотипи. Цей метод часто використовується на початкових етапах науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт для визначення перспективних напрямків досліджень у матеріалознавстві.

3.13. Застосування технологій штучного інтелекту в матеріалознавстві

У контексті концепції Індустрії 4.0 змінюється не лише інструментарій дослідника, а й сама логіка наукового пошуку - від ізольованих експериментів до комплексних інтегрованих систем, що поєднують великі масиви даних, цифрове моделювання, хмарні обчислення та алгоритми машинного навчання. Така синергія суттєво трансформує парадигму наукових досліджень і технологічних розробок, відкриваючи нові можливості для прогнозування властивостей матеріалів, оптимізації їх складу та структури.

Одним із найбільш відомих прикладів цифрових платформ у сучасному матеріалознавстві є платформа Materials Project, яка надає дослідникам широкий набір інструментів для моделювання кристалічних структур, побудови фазових діаграм, аналізу стабільності фаз, оцінювання електронної провідності та прогнозування реакційної енергії. Інтерфейс платформи забезпечує пошук матеріалів за хімічним складом, просторовою групою, енергетичними параметрами та іншими характеристиками. Використання подібних цифрових систем сприяє переходу від інтуїтивного пошуку до системного, керованого даними проектування матеріалів, що особливо важливо в умовах сучасних енергетичних, екологічних і технологічних викликів.

Штучний інтелект - це сукупність методів і технологій, що забезпечують здатність обчислювальних систем виконувати завдання, які традиційно асоціюються з інтелектуальною діяльністю людини: навчанням, аналізом, міркуванням, розпізнаванням образів, прийняттям рішень і прогнозуванням. Сучасні системи штучного інтелекту базуються на використанні високопродуктивних обчислювальних комплексів та алгоритмів, здатних моделювати складні логічні й аналітичні процеси.

Одним із ключових напрямів розвитку штучного інтелекту є машинне навчання, що дає змогу комп'ютерним системам самостійно навчатися на основі великих обсягів даних. Алгоритми машинного навчання здатні розпізнавати закономірності, аналізувати текстову та графічну інформацію, прогнозувати властивості матеріалів і виявляти приховані кореляції без прямого втручання людини. Використання таких підходів активно формує нову модель розвитку матеріалознавства, спрямовану на створення матеріалів із покращеними та унікальними властивостями.

Особливо важливу роль штучний інтелект відіграє у проєктуванні нових сплавів. Алгоритми машинного навчання та моделі, орієнтовані на аналіз великих масивів даних, дають змогу прогнозувати поведінку різних складів сплавів, оцінювати їх фізико-хімічні властивості та визначати найбільш перспективні рецептури. Це забезпечує ефективну навігацію у надзвичайно великому просторі можливих комбінацій елементів і суттєво скорочує час розроблення нових матеріалів.

Провідні наукові центри світу дедалі активніше використовують алгоритми машинного навчання для прогнозування фізико-хімічних властивостей матеріалів, оптимізації їх складу та автоматизованого проєктування функціональних систем. Унаслідок цього матеріалознавство поступово трансформується у кіберфізичну дисципліну, де фізичні процеси інтегруються з цифровими моделями та аналітичними платформами.

Методи машинного навчання, зокрема глибинного навчання, значно пришвидшують процес відкриття нових матеріалів завдяки здатності аналізувати великі обсяги експериментальних даних та результатів комп'ютерного моделювання. Алгоритми дозволяють ідентифікувати приховані закономірності, встановлювати кореляції між складом, структурою та властивостями матеріалів, прогнозувати їх термодинамічну стабільність і механічні характеристики, а також моделювати процеси синтезу й обробки.

Високу ефективність демонструють моделі глибинного навчання у сфері аналізу мікроструктур. Алгоритми комп'ютерного зору успішно застосовуються для автоматичного аналізу зображень, отриманих методами електронної

мікроскопії, зокрема растрової електронної, трансмісійної електронної та атомно-силової мікроскопії. Такі системи дають змогу автоматично ідентифікувати фази, визначати розмір зерен, виявляти тріщини, пори та інші дефекти, а також аналізувати зернисту структуру матеріалів із високою точністю та повторюваністю.

Використання штучного інтелекту забезпечує перехід від традиційних емпіричних методів «проб і помилок» до раціонального й цілеспрямованого проєктування матеріалів. Завдяки здатності аналізувати величезні масиви даних, прогнозувати властивості та оптимізувати технологічні параметри штучного інтелекту значно скорочує час і ресурси, необхідні для створення та комерціалізації інноваційних матеріалів.

Традиційні підходи до розроблення матеріалів є тривалими та дорогавартісними, оскільки значною мірою базуються на емпіричному доборі складів і багаторазових експериментальних перевірках. На відміну від них, алгоритми машинного навчання здатні швидко аналізувати існуючі бази даних, прогнозувати властивості нових, ще не синтезованих сполук та ідентифікувати перспективні матеріали для подальших досліджень.

Сутність прогнозування властивостей матеріалів за допомогою штучного інтелекту полягає у використанні алгоритмів машинного навчання для встановлення взаємозв'язків між складом, структурою та фізичними, хімічними, механічними, електричними й термічними характеристиками матеріалів. Для ефективного функціонування таких моделей необхідні великі масиви якісних і релевантних даних, які можуть включати параметри кристалічної ґратки, фазовий склад, пористість, електропровідність, теплопровідність, міцність, температуру плавлення, а також умови синтезу й обробки матеріалів.

Важливим етапом є виділення ознак - перетворення складних характеристик матеріалу у числові параметри, придатні для аналізу алгоритмами машинного навчання. Для опису атомного складу можуть використовуватися атомні номери, електронегативність, атомні радіуси, енергії іонізації та інші характеристики. Залежно від складності задачі застосовують різні типи моделей - від лінійної регресії до багатошарових нейронних мереж.

Після побудови моделі здійснюється її валідація - процес підтвердження відповідності результатів встановленим вимогам і реальним експериментальним даним. Незважаючи на високу ефективність штучного інтелекту, прогнози моделей зазвичай потребують експериментального підтвердження, що залишається важливою складовою наукового дослідження. Водночас складні нейронні мережі часто функціонують як «чорні скриньки», що ускладнює інтерпретацію механізмів прийняття рішень та створює проблеми для забезпечення прозорості й відтворюваності наукових результатів.

Суттєвою проблемою також залишається обмежений доступ до великих масивів наукових даних. Провідні наукові установи, корпорації та консорціуми не завжди готові відкривати власні бази даних через їх високу комерційну цінність. Це обмежує можливості створення універсальних моделей і сповільнює розвиток відкритої науки у сфері матеріалознавства.

Штучний інтелект активно використовується для оптимізації процесів синтезу й обробки матеріалів. Алгоритми здатні моделювати вплив температури, тиску, часу реакції, швидкості охолодження та інших технологічних параметрів на формування структури й властивостей матеріалу. Це дає змогу точно налаштовувати технологічні режими та досягати оптимальних характеристик, таких як міцність, електрична провідність чи теплопровідність.

У сучасному матеріалознавстві активно застосовуються високошвидкісні комп'ютерні симуляції у поєднанні з методами активного навчання. Це дає можливість дослідникам аналізувати сотні тисяч гіпотетичних матеріалів у цифровому середовищі та швидко визначати найбільш перспективні структури для подальшого синтезу. У таких системах штучний інтелект здатний самостійно формувати гіпотези, перевіряти їх за допомогою симуляцій і вдосконалювати власні моделі на основі отриманих результатів.

Практичне застосування штучного інтелекту охоплює широкий спектр галузей. У США алгоритми штучного інтелекту використовуються для розроблення матеріалів нового покоління для акумуляторів, твердотільних електролітів, каталізаторів та високотемпературних сплавів для аерокосмічної техніки.

Китайські дослідники активно впроваджують генеративні моделі ШІ для створення нових кристалічних структур і матеріалів із заданими властивостями, а також для оптимізації процесів синтезу та виробництва. Особливу увагу приділяють автоматизованому аналізу зображень, отриманих методами електронної мікроскопії та рентгеноструктурного аналізу, для виявлення дефектів і контролю якості матеріалів.

Прикладом ефективного використання штучного інтелекту є розроблення дослідниками Університету Південного Китаю нового типу сталі для 3D-друку. Використовуючи алгоритми машинного навчання та аналіз 81 фізичної характеристики металів, ученим вдалося створити сплав із високою міцністю, пластичністю та корозійною стійкістю. Під час випробувань матеріал продемонстрував міцність близько 1730 МПа та пластичність на рівні 15,5 % подовження до руйнування, що робить його перспективним для високотехнологічних галузей промисловості.

Штучний інтелект також широко впроваджується у виробничі процеси. Японські компанії Toshiba та Hitachi використовують штучний інтелект для оптимізації виробництва напівпровідників і контролю дефектів у кристалічних структурах. В Україні група Metinvest впровадила системи штучного інтелекту для автоматичного контролю якості металургійного виробництва, що дозволило зменшити кількість рекламцій та оптимізувати енергоспоживання.

Значний інтерес у сучасному матеріалознавстві викликають високоентропійні сплави, які містять п'ять і більше основних компонентів. На відміну від традиційних сплавів, у яких домінує один базовий метал, такі системи формують однофазні тверді розчини завдяки високій ентропії змішування. Інтеграція концепцій високої ентропії, комп'ютерного моделювання та алгоритмів штучного інтелекту забезпечує принципово новий підхід до проєктування матеріалів, орієнтований не лише на склад, а й на мікроструктурні параметри та методи обробки.

Особливого значення набуває використання металобрухту та електронних відходів як джерела компонентів для створення нових багатокомпонентних сплавів. Використання штучного інтелекту дозволяє аналізувати мільйони

можливих комбінацій елементів, оптимізувати їх склад і створювати матеріали з високими експлуатаційними характеристиками. Такий підхід відповідає принципам сталого розвитку та циркулярної економіки, сприяючи зменшенню залежності від критично важливих металів і скороченню обсягів відходів.

Використання штучного інтелекту в освіті й науці створює низку суттєвих проблем, пов'язаних з академічною доброчесністю, авторськими правами, достовірністю інформації та прозорістю методів отримання результатів.

Однією з головних проблем є порушення академічної доброчесності. Штучний інтелект може використовуватися студентами або дослідниками для повного чи часткового створення текстів, рефератів, наукових робіт без належного самостійного опрацювання матеріалу. У такому разі виникає ситуація, коли результат подається як власна інтелектуальна праця, хоча фактично значна частина змісту була згенерована автоматизованою системою. Особливо небезпечним є приховане використання штучного інтелекту без зазначення цього факту, оскільки воно підриває довіру до освітнього процесу й наукової комунікації.

Іншою проблемою є порушення авторських прав. Системи штучного інтелекту навчаються на великих масивах текстів, зображень, наукових статей, програмного коду та інших матеріалів, частина яких може бути захищена авторським правом. Через це виникає питання: чи має право така система використовувати чужі твори для навчання, а також чи не відтворює вона фрагменти вже існуючих матеріалів без належного посилання на автора. У науковій діяльності некоректне запозичення ідей, формулювань або результатів може розглядатися як плагіат.

Загрозу також становить вигадкування даних, коли штучний інтелект створює фактично неправильні твердження або хибні посилання на наукові праці. Тому будь-які дані, джерела й наукові твердження, отримані за допомогою штучного інтелекту, потребують обов'язкової перевірки за надійними джерелами.

Проблемою є непрозорість методик роботи штучного інтелекту. Багато сучасних моделей функціонують як складні алгоритмічні системи, внутрішня

логіка яких не зрозуміла науковцям. Це створює проблему довіри, особливо у науковому дослідженні, де важливими є відтворюваність, перевірюваність і чітке пояснення методології. Якщо неможливо простежити шлях отримання результату, такий результат має обмежену наукову цінність.

Штучний інтелект є корисним інструментом, але його застосування потребує чітких етичних, правових і методологічних обмежень. Він може допомагати в навчанні та дослідженні, однак не повинен замінювати самостійне мислення, критичний аналіз, перевірку джерел і відповідальність автора за кінцевий результат. Найбільш доцільним є використання штучного інтелекту як допоміжного засобу: для пошуку ідей, структурування матеріалу, мовного редагування чи попереднього аналізу, але не як повноцінного автора наукової або навчальної роботи. Академічна доброчесність у цьому контексті вимагає прозорого зазначення факту використання штучного інтелекту, перевірки отриманих результатів і збереження особистої відповідальності дослідника або здобувача освіти.

3.14. Планування наукових досліджень

Планування наукових досліджень - це процес розробки та встановлення кількісних і якісних показників проведення дослідження, у якому визначаються терміни, ресурси та очікувані результати як у поточному періоді, так і на перспективу.

План наукового дослідження має містити:

- тему, мету та завдання дослідження;
- етапи виконання та їх виконавців;
- види робіт у межах кожного етапу;
- терміни виконання;
- обсяги фінансування науково дослідної роботи загалом і за етапами;
- відмітки про виконання та інші необхідні дані.

При виконанні науково-дослідних робіт передбачають наступні етапи:

1. Вибір теми дослідження та розробка плану проведення роботи. Тема дослідження повинна відповідати критеріям актуальності, наукової новизни та практичної значущості. Для уникнення плагіату необхідно провести інформаційний пошук і мати власні напрацювання. Важливу роль відіграють напрацювання наукової школи та якість наукового колективу. При цьому необхідно виконати:

- ознайомлення з проблемою та уточнення завдань;
- формулювання теми, мети та очікуваних результатів дослідження;
- складання плану виконання науково – дослідної роботи і календарного графіка.

2. Розробка техніко-економічного обґрунтування. У техніко-економічному обґрунтуванні вказуються причини виконання роботи, аналізується сучасний стан проблеми, визначаються невирішені питання, проводиться патентний пошук. Також визначається сфера та обсяги впровадження результатів і очікуємий економічний ефект.

3. Конкретизація цілей і вибір методів дослідження. Розробляються теоретичні моделі (фізичні, хімічні, математичні) та плануються експериментальні дослідження, включаючи розробку методик дослідження, програм і засобів вимірювання.

4. Теоретичний аналіз з формулюванням наукової ідеї, вибором гіпотези та проведенням моделювання.

5. Експериментальна частина з постановкою завдань, проведенням експериментів, оцінкою достовірності результатів.

6. Аналіз результатів експериментальних досліджень та їх порівняння з теоретичними даними, уточнення моделей, за потреби - проведення додаткових експериментів.

7. Проведення самоекспертизи отриманих результатів з оцінкою практичної цінності та техніко-економічної ефективності розробки.

8. Формулювання висновків і підготовка науково-технічного звіту.

9. Впровадження результатів у виробництво. практику.

У загальному вигляді план дослідження є комплексом документів, що формуються на різних стадіях наукового процесу. Планування наукових досліджень проводять спираючись на наступні принципи:

1. Комплексність - охоплення всіх взаємопов'язаних етапів дослідження.
2. Реальність - врахування фактичних матеріальних кадрових, матеріальних і фінансових ресурсів і можливостей.
3. Наступність – розвиток результатів попередніх досліджень та наявного досвіду.
4. Адаптивність - можливість корекції плану в ході виконання науково – дослідної роботи.
5. Інформаційна достатність - уникнення дублювання попередніх досліджень та неоднозначності висновків.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 3

1. Що таке наукове дослідження та з якою метою воно проводиться?
2. Яке значення має методологія науки для організації наукового пізнання?
3. Які основні функції виконує методологія наукового дослідження?
4. Чим відрізняються поняття «метод дослідження» і «методика дослідження»?
5. За якими критеріями класифікують методи наукового дослідження?
6. Які функції виконують методи дослідження у матеріалознавстві?
7. Чому достовірність результатів у матеріалознавстві залежить не лише від матеріалу, а й від обраного методу та методики підготовки зразка?
8. Що таке наукова проблема і чому її правильне формулювання є важливим етапом дослідження?
9. У чому полягає відмінність між об'єктом і предметом наукового дослідження?
10. Яке значення мають мета, завдання та наукова новизна у структурі наукового дослідження?
11. Чому експериментальна перевірка є необхідним етапом завершення наукового дослідження?

12. Що таке експеримент і чим він відрізняється від звичайного спостереження?
13. Які основні відмінності між якісними та кількісними експериментальними дослідженнями?
14. Що таке фактор, відгук і функція відгуку в експериментальному дослідженні?
15. У чому полягає різниця між активним і пасивним експериментом?
16. Які переваги має лабораторний експеримент порівняно з виробничим або природним?
17. Що таке моделювання і чому воно використовується у випадках, коли прямий експеримент є складним або недоцільним?
18. Які основні види моделей використовуються в наукових дослідженнях?
19. У чому полягає сутність системного аналізу та які його основні принципи?
20. Яку роль відіграють штучний інтелект і машинне навчання в сучасному матеріалознавстві?

РОЗДІЛ 4.

ВИМІРЮВАННЯ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вимірювання є невід'ємною складовою будь-якого експериментального дослідження. Саме із початком застосування методів вимірювання дослідницька діяльність набула ознак точної науки. Вимірюванням називають процедуру визначення числового значення певної величини дослідним шляхом за допомогою встановленої одиниці вимірювання. Така процедура забезпечує отримання кількісно визначених і об'єктивних характеристик досліджуваного об'єкта.

Основою вимірювання є порівняння властивостей або параметрів об'єкта з відповідним еталоном. Число, що відображає відношення вимірюваної величини до прийнятого еталона, називається числовим значенням величини. Точність експерименту значною мірою залежить від правильності виконання вимірювань та подальшої обробки результатів.

До основних елементів процесу вимірювання належать:

- об'єкт вимірювання;
- еталони;
- вимірювальні прилади;
- методи вимірювання.

Теоретичними та практичними аспектами вимірювань займається метрологія - наука про вимірювання, методи забезпечення їх єдності та необхідної точності. Основні засади метрологічної діяльності в Україні регламентуються Законом України «Про метрологію та метрологічну діяльність».

Основними функціями методу вимірювання є:

- фіксація кількісних характеристик об'єкта;
- класифікація об'єктів;
- порівняння результатів вимірювання.

Одиницям фізичних величин надають відповідні символічні позначення - розмірності. Одиницею фізичної величини називають фізичну величину, якій умовно присвоєно числове значення, що дорівнює одиниці. Вона слугує мірою для кількісного порівняння однойменних властивостей різних об'єктів.

За способом отримання результатів розрізняють такі види вимірювань:

Абсолютні вимірювання - прямі вимірювання у встановлених одиницях фізичних величин. Наприклад, визначення маси дослідного зразка у грамах.

Відносні вимірювання - вимірювання величин, що визначаються як відношення до однойменної еталонної величини. Наприклад, відносне подовження при випробуванні матеріалу на розтяг характеризує відсоткове збільшення довжини робочої частини зразка до моменту руйнування.

Непрямі вимірювання - визначення величини розрахунковим шляхом на основі результатів вимірювання інших функціонально пов'язаних величин. Наприклад, границю міцності сталі при розтягу визначають за формулою:

$$\sigma_B = \frac{F}{S}$$

де, σ_B – границя міцності; F - зусилля, прикладене до зразка на розривній машині, при якому відбулося руйнування; S - початкова площа поперечного перерізу зразка, м².

Відповідно до вимог метрології застосовують такі основні методи вимірювання:

– метод безпосереднього вимірювання, за якого значення величини зчитують безпосередньо з вимірювального приладу, наприклад вольтметра, термометра або барометра;

– метод порівняння з еталоном, що ґрунтується на зіставленні вимірюваної величини зі стандартним зразком або мірою, наприклад, з гирею при зважуванні на терезах;

– диференційний метод, за якого визначають різницю між вимірюваною величиною та еталоном.

За рівнем точності вимірювання поділяють на три класи:

Особливо точні вимірювання забезпечують максимально можливу точність і використовуються переважно в еталонних дослідженнях. У матеріалознавстві вони мають важливе значення при визначенні параметрів кристалічної структури методом рентгенівської дифракції, вимірюванні міжатомних відстаней або контролі товщини тонких покриттів.

Високоточні вимірювання характеризуються суворо регламентованими допустимими похибками та застосовуються у відповідальних науково-технічних дослідженнях, зокрема в мікроелектроніці, авіакосмічній техніці та енергетиці.

Технічні вимірювання виконуються за допомогою поширених засобів вимірювання і використовуються для оцінки структури, складу та властивостей матеріалів у практичних умовах.

Вимірювання здійснюються за допомогою певних шкал. Шкала - це система впорядкування значень величини за допомогою чисел або категорій.

Шкала відношень дає змогу визначити, у скільки разів один об'єкт більший або менший за інший, прийнятий за еталон. Для таких шкал характерна наявність природного нуля. За шкалою відношень вимірюють більшість фізичних величин: довжину, площу, об'єм, силу струму, потужність тощо.

Порядкова шкала (шкала рангів) використовується для впорядкування об'єктів за певною ознакою. Прикладом є шкала твердості Мооса, що містить десять еталонних мінералів - від тальку до алмазу. Твердість досліджуваного мінералу визначають шляхом порівняння його здатності дряпати інші мінерали.

Особливу увагу експериментатор має приділяти контролю якості досліджень, забезпечуючи надійність роботи засобів вимірювання, відтворюваність результатів, необхідну точність і достовірність отриманих даних. Під час проведення експериментальних досліджень необхідно постійно контролювати стан вимірювального обладнання, стабільність роботи установок, правильність показань приладів та вплив умов навколишнього середовища. Недбале виконання вимірювань може призвести до суттєвих спотворень результатів і виникнення похибок. Виконавець експерименту повинен систематично здійснювати перевірку засобів вимірювання. Якщо робоча

перевірка не забезпечує необхідної точності, експеримент необхідно припинити, а обладнання передати на метрологічну повірку або калібрування.

Будь-яке вимірювання виконується з певною точністю. Точність вимірювання - це ступінь близькості результату вимірювання до істинного значення величини. Результати будь-яких вимірювань не є абсолютно точними та завжди містять певну похибку - різницю між виміряним та істинним значенням. Практика показує, що навіть за проведення повторних вимірювань однієї й тієї самої величини в максимально однакових умовах результати будуть дещо відрізнятися. Це зумовлено впливом систематичних і випадкових чинників, які об'єктивно супроводжують процес експериментального дослідження.

Основним завданням математичної обробки результатів експерименту є визначення найбільш імовірного значення вимірюваної величини з мінімально можливою похибкою. Усі похибки вимірювань поділяють на грубі, систематичні та випадкові.

Систематичними називають похибки, які під час повторних вимірювань залишаються сталими або змінюються за певною закономірністю. Систематичні похибки часто пов'язані з несправністю або неточністю вимірювальних приладів, неправильною установкою нульового значення, впливом температури навколишнього середовища, вологості, вібрації та інших зовнішніх чинників. Якщо величина систематичної похибки відома, її можна врахувати шляхом введення відповідних поправок у результати вимірювань. Для зменшення систематичних похибок проводять періодичну повірку та калібрування засобів вимірювання, використовують еталонні величини, здійснюють регулювання та технічне обслуговування обладнання, а також мінімізують вплив несприятливих чинників зовнішнього середовища до початку проведення експерименту.

Випадковими називають похибки, які виникають унаслідок дії великої кількості неконтрольованих чинників і проявляються при повторних вимірюваннях у вигляді випадкових відхилень результатів. За однакової ретельності проведення експерименту результати вимірювань однієї й тієї самої величини зазвичай незначно відрізняються між собою саме через наявність випадкових похибок. Випадкові похибки можуть бути зумовлені коливаннями

умов проведення експерименту, обмеженою точністю вимірювальних приладів або суб'єктивними особливостями спостереження. Повністю усунути випадкові похибки неможливо. Їх оцінюють і враховують методами теорії ймовірностей та математичної статистики, що дозволяє визначити найбільш достовірне значення вимірюваної величини. За умови багаторазового повторення дослідів та використання статистичних методів обробки даних вплив випадкових похибок є можливість суттєво зменшити.

Розрізняють:

- **систематичні похибки**, що повторюються за однакових умов вимірювання та зумовлені, наприклад, несправністю приладу;
- **випадкові похибки**, які виникають через змінність умов експерименту або обмежену точність обладнання.

Точність вимірювання характеризується абсолютною та відносною похибками.

Абсолютна похибка визначається як модуль різниці між істинним x_i і вимірним значеннями x величини:

$$\Delta x = |x_i - x| \quad (1)$$

Відносна похибка визначається за формулою:

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Похибки вимірювання можуть виникати внаслідок:

- недосконалості методів і засобів вимірювання;
- недостатньо ретельного проведення експерименту;
- впливу зовнішніх факторів;
- суб'єктивних особливостей експериментатора.

Достовірність вимірювань характеризує ступінь довіри до отриманих результатів і відповідність вимірних значень дійсному значенню досліджуваної величини. Висока достовірність результатів є необхідною умовою наукової обґрунтованості експериментальних досліджень.

4.1. Статистичні методи обробки результатів експериментальних досліджень

Під час проведення експериментальних досліджень обов'язковою умовою є систематичне ведення журналу спостережень. Детальне протоколювання результатів забезпечує можливість відтворення умов експерименту, порівняння отриманих даних, а також верифікації результатів спостережень. До журналу спостережень вносять дату, час і номер досліду, фіксують умови проведення експерименту, параметри навколишнього середовища та показники вимірювальних приладів. На основі даних журналу формують таблиці вихідних даних і відповідних результатів спостережень.

Кожен експериментатор повинен уміти правильно виконувати вимірювання досліджуваних величин, оцінювати похибки вимірювань, здійснювати обчислення з необхідною точністю та визначати мінімально достатню кількість вимірювань. Важливим завданням є також встановлення таких умов експерименту, за яких похибки будуть мінімальними, а результати - найбільш достовірними. Важливим етапом дослідження є аналіз отриманих результатів та оцінка їх наукової обґрунтованості.

Основним об'єктом теорії ймовірностей є випадкова величина - величина, яка в результаті експерименту може набувати різних, заздалегідь невідомих значень. Випадкові величини поділяють на дискретні та безперервні. Дискретними називають випадкові величини, що набувають окремих, переважно цілих значень і задаються певним набором можливих варіантів. Наприклад, кількість деталей, оброблених на верстаті, є дискретною випадковою величиною.

Безперервною випадковою величиною називають величину, яка може набувати будь-яких числових значень у межах певного безперервного інтервалу. Наприклад, фактичні розміри деталей, оброблених на верстаті, є безперервними випадковими величинами, оскільки їх значення можуть змінюватися в певних межах і набувати будь-яких числових значень.

Після завершення експерименту дослідник отримує масив даних, який потребує відповідної математичної та статистичної обробки. Лише застосування

методів математичної статистики дає змогу на основі сукупності варіантів оцінити достовірність отриманих результатів, визначити ступінь їх відхилення від норми, відокремити випадкові коливання від закономірних залежностей та сформулювати об'єктивне уявлення про досліджуване явище.

Основними цілями обробки експериментальних даних є:

- визначення закону розподілу результатів вимірювань;
- графічне представлення експериментальних даних;
- подання встановлених залежностей між виміряними величинами у вигляді аналітичних виразів;
- оцінювання тісноти зв'язку між варійованими факторами експерименту.

Обробка експериментальних даних спрямована на встановлення аналітичних залежностей, визначення тісноти зв'язків між варійованими характеристиками, розрахунок критеріїв достовірності та довірчих інтервалів. Статистичне опрацювання результатів дослідження дає змогу оцінити рівень статистичної достовірності отриманих даних та розглядати їх як науково обґрунтовані факти.

Для обробки експериментальних результатів широко застосовують математичні методи, які ґрунтуються на методах теорії ймовірностей і математичної статистики. Ці методи дають змогу компактно та інформативно описувати результати дослідження, встановлювати ступінь достовірності подібності або відмінності досліджуваних об'єктів, аналізувати наявність чи відсутність залежностей між окремими показниками та кількісно характеризувати ці залежності.

Статистико-математична обробка результатів експерименту є обов'язковою складовою наукового дослідження. Найчастіше застосовують два основні методи статистичного аналізу: дисперсійний і регресійний.

Дисперсійний аналіз використовують для оцінки впливу різних чинників на результати дослідження та встановлення наявності статистично значущих відмінностей між групами або змінними. Регресійний аналіз застосовують для визначення характеру та сили взаємозв'язків між змінними, а також для побудови математичних моделей досліджуваних процесів.

Результати будь-яких вимірювань не є абсолютно точними та завжди містять певну похибку. Основним завданням математичної обробки результатів експерименту є визначення найбільш імовірного значення вимірюваної величини з мінімально можливою похибкою. Усі похибки вимірювань поділяють на грубі, систематичні та випадкові.

Практика показує, що навіть за проведення повторних вимірювань однієї й тієї самої величини в максимально однакових умовах результати будуть дещо відрізнятися. Це зумовлено впливом систематичних і випадкових чинників, які об'єктивно супроводжують процес експериментального дослідження.

Систематичними називають похибки, які під час повторних вимірювань залишаються сталими або змінюються за певною закономірністю. Якщо величина систематичної похибки відома, її можна врахувати шляхом введення відповідних поправок у результати вимірювань. Систематичні похибки часто пов'язані з несправністю або неточністю вимірювальних приладів, неправильною установкою нульового значення, впливом температури навколишнього середовища, вологості, вібрації та інших зовнішніх чинників. Для зменшення систематичних похибок проводять періодичну перевірку та калібрування засобів вимірювання, використовують еталонні величини, здійснюють регулювання та технічне обслуговування обладнання, а також мінімізують вплив несприятливих чинників зовнішнього середовища ще до початку експерименту.

Випадковими називають похибки, які виникають унаслідок дії великої кількості неконтрольованих чинників і проявляються при повторних вимірюваннях у вигляді випадкових відхилень результатів. За однакової ретельності проведення експерименту результати вимірювань однієї й тієї самої величини зазвичай незначно відрізняються між собою саме через наявність випадкових похибок.

Повністю усунути випадкові похибки неможливо. Їх оцінюють і враховують методами теорії ймовірностей та математичної статистики, що дозволяє визначити найбільш достовірне значення вимірюваної величини. Випадкові похибки можуть бути зумовлені коливаннями умов проведення

експерименту, обмеженою точністю вимірювальних приладів або суб'єктивними особливостями спостереження. За умови багаторазового повторення дослідів та використання статистичних методів обробки даних вплив випадкових похибок можна суттєво зменшити.

До грубих похибок належать помилки, результати яких різко відрізняються за величиною або знаком від інших отриманих значень. Причинами таких похибок можуть бути описки у лабораторному журналі, порушення контакту датчиків, неправильне підключення або заміна блоків, несправність обладнання, механічні впливи на вимірювальну систему (наприклад, поштовх столу під час зважування) тощо.

Результати, що містять грубі похибки, підлягають виключенню на етапі подальшої обробки експериментальних даних. Промахи та грубі похибки здебільшого пов'язані з помилками експериментатора або раптовим виходом з ладу вимірювальних приладів. У матеріалознавстві причиною таких відхилень може бути, наприклад, наявність внутрішнього дефекту у зразку, який не було виявлено до початку випробувань. У разі виявлення грубих похибок результат вимірювання необхідно відхилити, а експеримент повторити.

Загальна похибка вимірювання може бути подана у вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \quad (3)$$

де ε_1 – систематична похибка; ε_2 – випадкова похибка вимірювання.

Під час проведення експерименту для будь-якої фізичної величини зазвичай отримують набір результатів $x_i : x_1, x_2, \dots, x_n$. Через вплив випадкових факторів ці результати розглядаються як випадкові величини. Такими даними можуть бути результати механічних випробувань зразків, вимірювання довжин січних ліній при визначенні розмірів зерен, результати аналізу вмісту легувальних елементів у зразках однієї плавки тощо. Основне завдання вимірювань полягає в отриманні результатів із мінімально можливими похибками.

Якщо область можливих значень певної величини поділити на інтервали, то при багаторазовому повторенні вимірювань відношення кількості результатів,

що потрапили до кожного інтервалу, до загальної кількості вимірювань буде наближатися до певного сталого значення, характерного для кожного інтервалу.

Закон розподілу повністю характеризує випадкову величину з імовірнісної точки зору. Проте у практичних дослідженнях не завжди є необхідність враховувати всі можливі значення випадкової величини та відповідні їм імовірності. Для узагальнення результатів використовують основні статистичні характеристики: математичне сподівання, дисперсію, моду та медіану.

У практичній діяльності дослідник зазвичай має справу лише з обмеженою кількістю значень випадкової величини. Генеральна сукупність являє собою повний набір усіх можливих значень, яких може набувати випадкова величина в умовах експерименту. Кількість отриманих експериментальних результатів (n) називають обсягом вибірки. Основне завдання математичної статистики полягає в тому, щоб на основі даних вибірки сформулювати обґрунтовані висновки щодо властивостей генеральної сукупності.

Для числової оцінки істинного значення вимірюваної величини випадкових величин використовують їх середнє арифметичне значення:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i . \quad (4)$$

Вважають, що при $n > 30$ значення середнього арифметичного достатньо наближається до істинного значення величини, що вимірюється.

Мірою розсіяння значень x_i відносно середньої величини \bar{x} є дисперсія:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 . \quad (5)$$

Дисперсія характеризує ступінь розсіювання значень вимірюваної величини відносно середнього арифметичного значення. Чим більшим є значення дисперсії σ^2 , тим більший розкид результатів вимірювань. Дисперсія та середньоквадратичне відхилення дають змогу оцінити ступінь варіабельності випадкової величини відносно її середнього значення, яке в теорії ймовірностей розглядають як математичне очікування.

Додатне значення квадратного кореня з дисперсії називають середньоквадратичним відхиленням або стандартним відхиленням.

Середньоквадратичне відхилення також характеризує розкид результатів вимірювань навколо середнього арифметичного значення та є одним із основних показників точності експериментальних даних. Чим меншим є значення стандартного відхилення, тим вищою є відтворюваність результатів вимірювання.

Випадкові похибки вимірювань у більшості експериментальних досліджень підпорядковуються нормальному закону розподілу (закону Гаусса), який описується функцією щільності ймовірності за формулою:

$$P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}}. \quad (6)$$

Криві нормального розподілу для різних значень стандартного відхилення наведені на рис. 1. Аналіз форми кривих свідчить, що зі збільшенням значення стандартного відхилення щільність розподілу зменшується, а розсіювання результатів вимірювань відносно середнього значення зростає.

Відповідно до положень теорії ймовірностей, за достатньо великої кількості вимірювань випадкова похибка може перевищувати потрібне значення середнього квадратичного відхилення лише приблизно у 0,3 % випадків. Отже, з імовірністю 99,7% істинне значення вимірюваної величини знаходиться в інтервалі: середнє арифметичне значення $\pm 3\sigma$.

Імовірність того, що випадкова похибка перевищить потрібне значення середнього квадратичного відхилення, є вкрай малою. Тому як діапазон істинного значення вимірюваної величини зазвичай приймають інтервал, обмежений середнім арифметичним значенням та потрібним середнім квадратичним відхиленням. Значення вимірювань, які відхиляються від середнього більш ніж на $\pm 3\sigma$, розглядають як такі, що містять грубі похибки, і виключають із подальшого аналізу.

Первинну обробку результатів експерименту здійснюють за таким алгоритмом:

- визначення та усунення систематичних похибок вимірювання;
- розрахунок середнього арифметичного значення;

- розрахунок дисперсії, середнього квадратичного відхилення та максимально можливої похибки вимірювань.
- аналіз експериментальних даних з метою виявлення грубих похибок і, за потреби, повторне проведення вимірювань або обробки результатів.

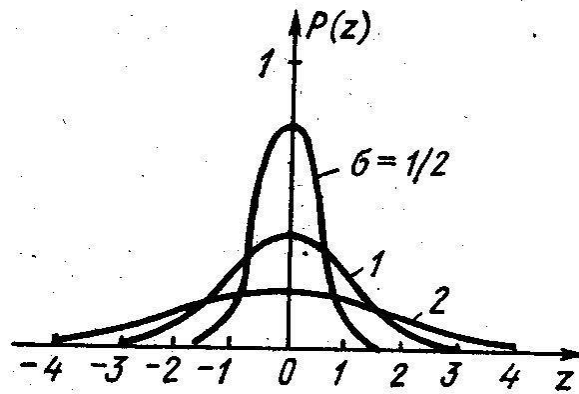


Рисунок 1 – Вигляд кривих нормального розподілу у залежності від значень дисперсії σ

4.1.1. Кореляційний і дисперсійний аналіз

Принципово розрізняють два основні типи зв'язку між змінними: функціональний і стохастичний. За функціонального, або однозначного, зв'язку кожному значенню змінної x відповідає лише одне певне значення змінної y . Такий зв'язок має детермінований характер і може бути описаний точною математичною залежністю.

На відміну від функціональної залежності, особливістю взаємозв'язку між випадковими величинами є те, що одному значенню незалежної змінної x може відповідати сукупність значень залежної змінної y , які мають характер випадкових величин. Значення залежної ознаки можуть змінюватися в певному інтервалі, зокрема в межах довірчого інтервалу, причому різні значення всередині цього інтервалу мають різну ймовірність появи. Це зумовлено одночасним впливом численних побічних факторів, що діють у різних напрямках і змінюють результат дослідження. У таких випадках зв'язок між величинами має статистичний характер і називається кореляційним. Кореляційним зв'язком називають різновид статистичного зв'язку, за якого різним значенням однієї

змінної відповідають різні середні значення іншої змінної. Такий зв'язок не є однозначним, а проявляється лише як загальна тенденція зміни однієї ознаки залежно від іншої.

Зважаючи на те, що кореляційний зв'язок є різновидом статистичного зв'язку, його вивчення потребує достатнього обсягу експериментальних або спостережуваних даних. Кількість дослідів, необхідна для коректного аналізу кореляційної залежності, визначається метою дослідження, необхідною точністю та надійністю оцінювання параметрів зв'язку, а також кількістю факторів, вплив яких аналізується. Як правило, обсяг вибірки має перевищувати кількість досліджуваних факторів щонайменше у 5–6 разів. Це дає змогу підвищити достовірність статистичних висновків і зменшити вплив випадкових коливань результатів. У разі проведення однофакторного дослідження кількість випробувань доцільно приймати не меншою ніж п'ять.

Кореляційний аналіз - це сукупність статистичних методів, спрямованих на виявлення, оцінювання та кількісну характеристику зв'язку між змінними величинами. Кореляційний аналіз являє собою процедуру встановлення співвідношення між незалежними змінними. Зв'язок між цими величинами виявляється у взаємній погодженості спостережуваних змін. Чим вищим є коефіцієнт кореляції між двома змінними, тим точніше можна прогнозувати значення однієї з них за значенням іншої.

Зв'язок між ними проявляється у взаємній узгодженості спостережуваних змін: зі збільшенням або зменшенням однієї змінної інша також може змінюватися у певному напрямі. До завдань кореляційного аналізу належить встановлення наявності, напрямку та тісноти зв'язку між двома рядами незалежно визначених величин. Щільність зв'язку між змінними величинами оцінюють за допомогою коефіцієнта кореляції. Чим вищим є абсолютне значення коефіцієнта кореляції між двома змінними, тим сильнішим є зв'язок між ними і тим точніше можна прогнозувати значення однієї змінної за відомим значенням іншої.

Розрахунок коефіцієнта парної кореляції r проводиться відповідно до наступної формули:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (7)$$

де x_i – і-те спостереження показника x ; y_i – і-те спостереження показника y ; \bar{x} – вибіркове середнє показника x (центр угруповання); \bar{y} – вибіркове середнє показника y (центр угруповання).

Якщо коефіцієнт кореляції дорівнює 1, це свідчить про наявність повного прямого лінійного зв'язку між змінними. У такому разі зміна однієї змінної супроводжується пропорційною зміною іншої. Якщо коефіцієнт кореляції дорівнює 0, це означає відсутність лінійного зв'язку між досліджуваними змінними. Однак, нульове значення коефіцієнта кореляції не виключає можливості існування нелінійної залежності.

Чим більшим є абсолютне значення коефіцієнта кореляції, тим тіснішим вважається зв'язок між двома змінними і тим точніше можна прогнозувати значення однієї змінної за значенням іншої. Позитивною кореляцією називають такий зв'язок, за якого зі збільшенням значень однієї змінної зростають значення іншої змінної (рис. 3, б). Негативна кореляція, навпаки, характеризується тим, що зі збільшенням значень однієї змінної значення іншої змінної зменшуються (рис. 3, а). Знак коефіцієнта кореляції характеризує напрямок зв'язку: знак «+» відповідає прямій залежності, а знак «-» - оберненій. За силою зв'язку це можна трактувати так:

Значення r	Характер зв'язку
0–0,3	слабкий
0,3–0,5	помірний
0,5–0,7	помітний / середній
0,7–0,9	сильний
0,9–1,0	дуже сильний

Кореляційний аналіз дає змогу встановити наявність, напрям і ступінь тісноти статистичного зв'язку між змінними, однак сам по собі не пояснює механізму цього взаємозв'язку та не дає підстав стверджувати про причинно-

наслідкову залежність між досліджуваними ознаками. Тому під час інтерпретації результатів кореляційного аналізу необхідно дотримуватися обережності й урахувати можливий вплив сторонніх чинників.

Відсутність лінійного кореляційного зв'язку не означає повної відсутності залежності між змінними. Зв'язок може мати нелінійний характер, проявлятися лише за певних умов або бути зумовленим одночасною дією кількох факторів. У таких випадках для глибшого аналізу доцільно застосовувати інші статистичні методи, зокрема нелінійну регресію, багатфакторний аналіз або моделі, що враховують складні взаємодії між ознаками.

Результати експерименту, подані лише в табличній формі, не завжди дають змогу достатньо наочно охарактеризувати залежність результативної ознаки від досліджуваних факторів. Більш інформативним способом подання експериментальних даних є побудова графіків функцій виду $y = f(x)$. Графічне зображення забезпечує наочне уявлення про характер впливу фактора на результат, дає змогу краще зрозуміти фізичну сутність досліджуваного процесу, виявити тип функціональної залежності, а також встановити наявність мінімуму або максимуму функції. Для графічного подання результатів експериментальних досліджень, як правило, використовують прямокутну систему координат.

Пару значень випадкових величин x_i та y_i можна подати графічно у вигляді точки з координатами $(x_i; y_i)$. Для цього на осях координат відкладають інтервали зміни досліджуваних змінних, після чого будують координатну сітку. Кожну пару значень із вибірки наносять на графік у вигляді окремої точки, розташованої відповідно до її координат. Під час побудови графіка функції $y = f(x)$ на координатну площину наносять експериментальні точки з координатами $(x_1; y_1)$, $(x_2; y_2)$, ..., $(x_i; y_i)$. Якщо експериментальні точки послідовно з'єднати прямими відрізками, утворюється ламана лінія, яка відображає зміну результативної ознаки залежно від зміни факторної ознаки (рис.2). Однак у більшості випадків реальні функціональні або статистичні залежності мають не ламаний, а відносно плавний характер. Тому під час графічного подання результатів експериментальних досліджень доцільно проводити через сукупність точок плавну апроксимуючу лінію. Така лінія має проходити якомога ближче до

більшості експериментальних точок і відобразити загальну тенденцію зміни досліджуваної величини.

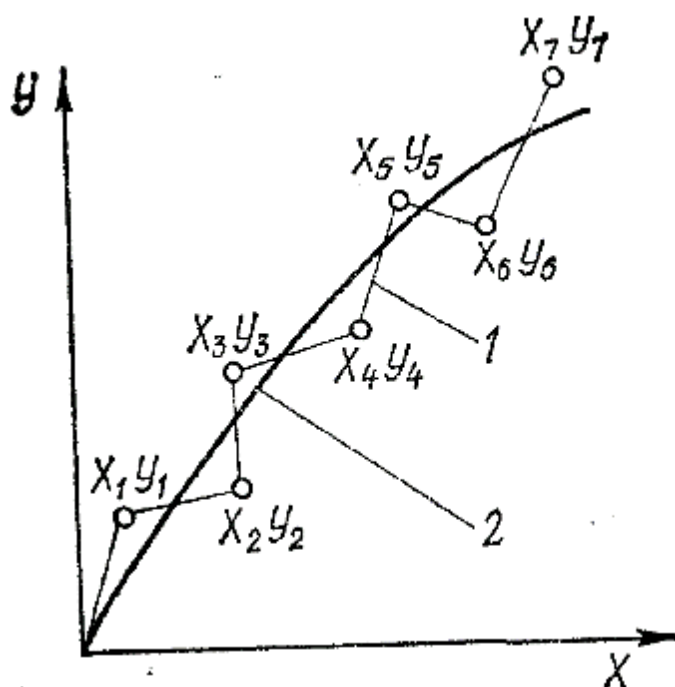


Рисунок 2 – Графічне зображення результатів експерименту: 1 - експериментальна ламана лінія, побудована за результатами вимірювань; 2 - згладжена крива, що відображає уявну апроксимуючу залежність

Сукупність таких точок, які отримані в результаті вимірювання певного параметра та відповідного входного фактора, утворює поле кореляції. Поле кореляції дає змогу візуально оцінити характер взаємозв'язку між змінними: наявність або відсутність зв'язку, його напрям, щільність, а також можливу форму залежності.

Кореляційне поле дає змогу попередньо оцінити характер взаємозв'язку між досліджуваними величинами. Розміщення точок у межах такого поля може бути не випадковим і свідчити про наявність певної закономірності. За конфігурацією експериментальних точок можна орієнтовно визначити можливий тип залежності між змінними. Така залежність може мати лінійний, параболічний, степеневий, експоненціальний, логарифмічний або тригонометричний характер. Проведення попереднього аналізу кореляційного поля є першим кроком по вибору математичної моделі, яка найкраще описує експериментальні дані.

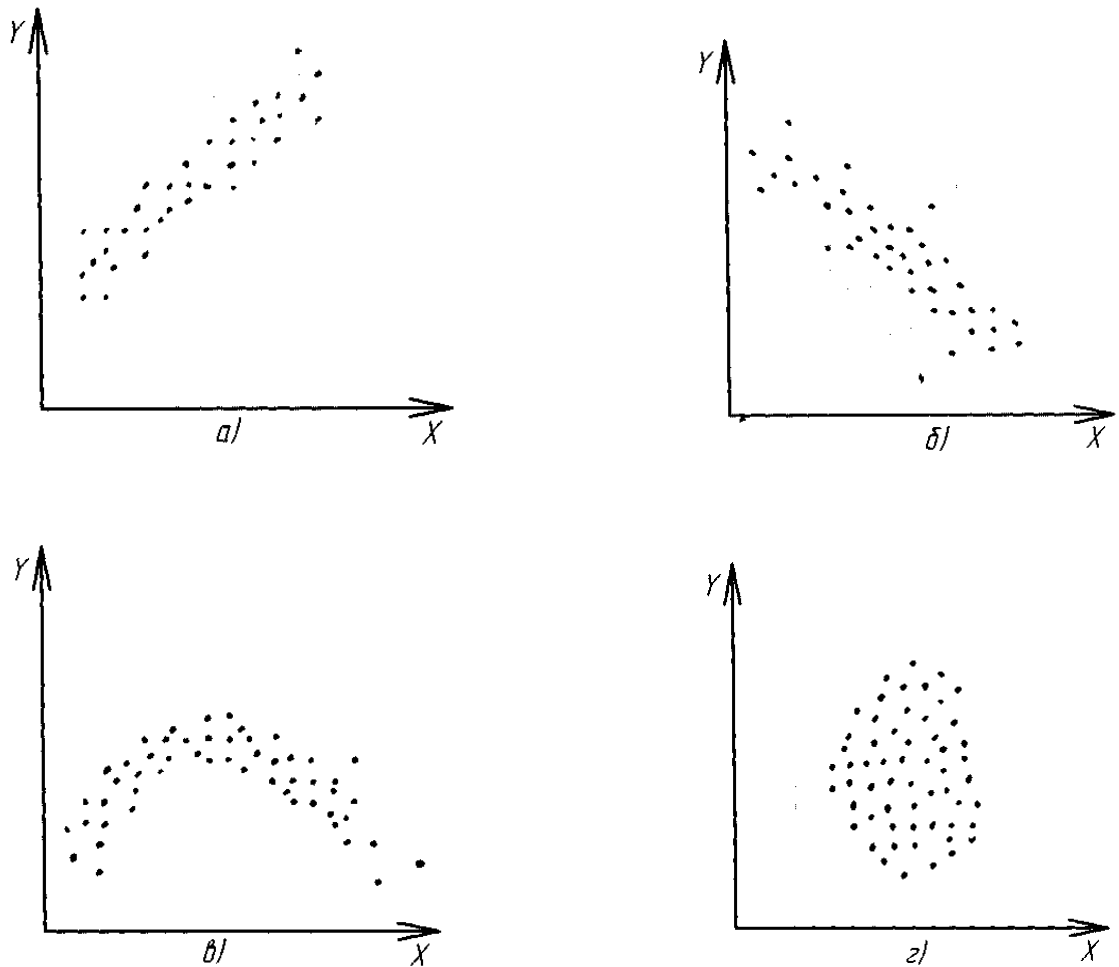


Рисунок 3 – Графічне зображення експериментальних даних з виявлення залежності y від x : а – наявна додатня (пряма) кореляція; б) наявна від’ємна (зворотня) кореляція; в) наявна параболічна залежність; зв’язок відсутній.; г) відсутність кореляції (залежності немає)

Часто виникає потреба у графічному поданні результатів двофакторного експерименту, у якому досліджувана величина залежить від двох незалежних змінних і описується функцією: $y = f(x, z)$.

У такому випадку доцільно застосовувати метод розділення змінних. Для однієї з незалежних змінних, наприклад z , у межах заданого інтервалу вимірювань $z_1 - z_n$ обирають кілька фіксованих значень. За кожного сталого значення $z = const$ будують графік залежності між двома іншими змінними - y та x , тобто криву виду: $y = f_1(x)$.

У результаті на одному координатному полі отримують серію кривих $y = f_1(x)$, кожна з яких відповідає певному фіксованому значенню змінної z . Такий спосіб подання дозволяє наочно оцінити характер впливу змінної x на результат y за різних рівнів змінної z , а також порівняти зміну форми та положення кривих залежно від значень другого фактора. Приклад побудови серії таких графічних залежностей наведено на рис. 4.

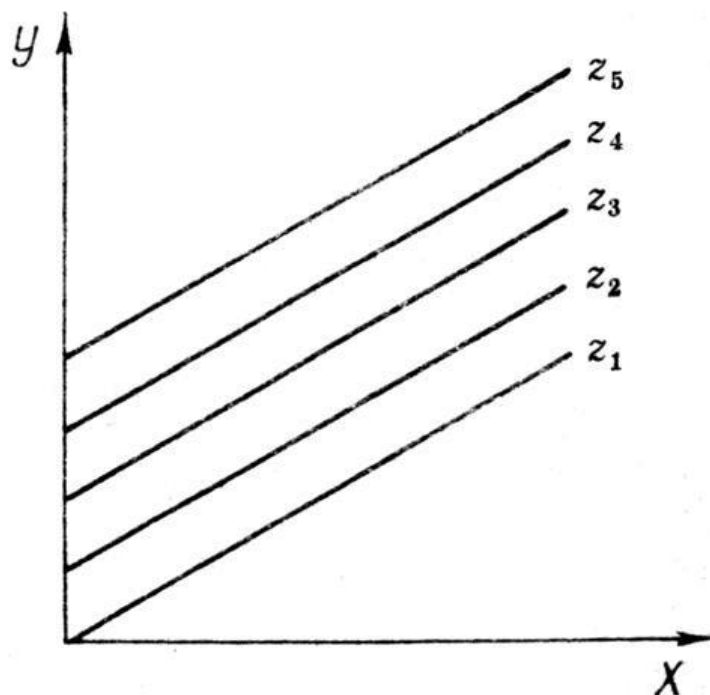


Рисунок 4 – Графічне відображення функції $y = f(x, z)$

Кореляційний аналіз широко застосовується у металознавстві для встановлення кількісних залежностей між параметрами технологічних процесів, структурою матеріалу та його експлуатаційними властивостями, значення яких у реальних умовах мають випадкові коливання.

Однією з найбільш поширених контрольних характеристик металевих матеріалів є твердість. Через особливості структури матеріалу твердість пов'язана з іншими механічними властивостями, зокрема з міцністю, тобто корелює з ними. Знання характеру та тісноти цього зв'язку дає змогу будувати градувальні графіки і на їх основі швидко прогнозувати показники міцності матеріалу за результатами вимірювання твердості.

Іншим прикладом застосування кореляційного аналізу у металознавстві є встановлення залежності між структурою матеріалу та його механічними

властивостями. Наприклад, за вмістом перліту у структурі вуглецевої сталі, з урахуванням характеру і тісноти статистичного зв'язку, можна прогнозувати твердість матеріалу.

Розглянемо конкретний приклад кореляційного аналізу в матеріалознавстві: визначення зв'язку між вмістом вуглецю в сталі та її твердістю. Так, під час дослідження було виготовлено 5 зразків вуглецевої сталі з різним вмістом вуглецю. Для кожного зразка визначали твердість за Брінеллем (табл.2).

Таблиця 2

Результати дослідів по визначенню твердості за Брінеллем у зразках з вуглецевої сталі з різним вмістом вуглецю

№ зразка	Вміст вуглецю (x), %	Твердість (y) НВ
1	0,20	122
2	0,30	134
3	0,40	156
4	0,50	164
5	0,60	190

Необхідно встановити, чи існує зв'язок між вмістом вуглецю та твердістю сталі. Розрахунок коефіцієнта парної кореляції r проводимо відповідно до формули (7).

Спочатку визначаємо середні значення:

$$x=(0,20+0,30+0,40+0,50+0,60) : 5 =0,40$$

$$y=(122+134+156+164+180):5=151,2$$

Складаємо розрахункову таблицю.

Таблиця 3

Обчислення зв'язку між вмістом вуглецю в сталі та її твердістю

№	x_i	y_i	$x_i - \bar{x}$	$y_i - \bar{y}$	$(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
1	0,2	122	-0,2	-29,5	5,9	0,04	870,25
2	0,3	134	-0,1	-17,2	1,72	0,01	295,84
3	0,4	156	0	4,8	0	0	23,04
4	0,5	164	0,1	12,8	1,28	0,01	163,84
5	0,6	180	0,2	28,8	5,76	0,04	829,44

Знаходимо суми:

$$\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = 5,9 + 1,72 + 0 + 1,28 + 5,76 = 14,66$$

$$\sum(x_i - \bar{x})^2 = 0,04 + 0,01 + 0 + 0,01 + 0,04 = 0,10$$

$$\sum(y_i - \bar{y})^2 = 870,25 + 295,84 + 23,04 + 163,84 + 829,44 = 2182,41$$

Отже, коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$4,66 : 0,0016 \times 687970,71 = 14,66 : 31,18 = 0,47$$

Коефіцієнт кореляції $r = 0,47$ означає, що між двома досліджуваними ознаками існує прямий помірний кореляційний зв'язок. Це можна пояснити так: якщо між вмістом вуглецю в сталі та твердістю за Брінеллем отримано $r = 0,47$, то зі збільшенням вмісту вуглецю твердість зазвичай зростає, але на твердість також помітно впливають інші фактори: термічна обробка, структура сталі, домішки, умови охолодження, похибка вимірювання тощо.

Дисперсійний аналіз - це статистичний метод, який застосовують для оцінювання впливу одного або кількох факторів на досліджувану результативну ознаку. Його основна мета полягає у встановленні статистичної значущості відмінностей між середніми значеннями вибірок шляхом порівняння внутрішньогрупової та міжгрупової дисперсій. Рішення про те, чи впливає істотно певний фактор на результат експерименту, залежить від цього, наскільки значимою є складова дисперсії, обумовлена цим фактором, в загальній дисперсії, обумовленій помилкою експерименту.

Дисперсійний аналіз доцільно використовувати тоді, коли залежна змінна має кількісний, тобто числовий, характер, а незалежні змінні, або фактори

впливу, є якісними чи категоріальними ознаками. За допомогою цього методу визначають, чи зумовлені відмінності між вибірковими середніми істотним впливом досліджуваного фактора, чи вони є випадковими та статистично несуттєвими. Наприклад, дисперсійний аналіз може бути застосований для встановлення наявності відмінностей між показниками стійкості інструментів, виготовлених на різних заводах. У цьому випадку досліджуваною результативною ознакою є стійкість інструменту, а фактором впливу - підприємство-виробник. Іншим прикладом використання дисперсійного аналізу є оцінювання ефективності певної модифікуючої добавки до розплаву щодо зміни конкретної властивості сплаву. Для цього порівнюють середні значення відповідного показника до та після внесення добавки і визначають, чи є виявлені розбіжності статистично вірогідними.

Залежно від кількості факторів, вплив яких вивчається одночасно, розрізняють однофакторний, двофакторний і багатофакторний дисперсійний аналіз.

Наведемо конкретний приклад застосування дисперсійного аналізу в матеріалознавстві для встановлення наявності впливу температури термічної обробки сталі на її твердість за Брінеллем НВ. Було взято три групи зразків сталі, які обробляли при різних температурах:

Таблиця 4

Результати дослідів по визначенню наявності впливу температури термічної обробки сталі на її твердість за Брінеллем НВ

Група зразків	Температура термообробки	Твердість НВ
1	800 °С	170, 172, 168
2	850 °С	185, 188, 182
3	900 °С	200, 198, 202

Використовуючи дисперсійний аналіз потрібно визначити, чи є різниця між середніми значеннями твердості випадковою, чи температура термічної обробки дійсно істотно впливає на твердість сталі.

Обчислюємо середнє значення твердості в кожній групі.

Для температури 800 °C: $\bar{x}_1=(170+172+168):3=170$

Для температури 850 °C: $\bar{x}_2=(185+188+182):3=185$

Для температури 900 °C: $\bar{x}_3=(200+198+202):3 = 200$

Загальне середнє значення для всіх зразків:

$$\bar{x}=(170+172+168+185+188+182+200+198+202):9=185$$

З обчислених середніх значень твердості в кожній групі видно тенденцію, що зі збільшенням температури термообробки твердість зростає. Однак, перед дослідником стоїть задача перевірити, чи ця різниця є статистично значущою.

Визначаємо міжгрупову суму квадратів, тобто варіацію, яка виникає через різницю між температурами обробки за формулою:

$$SS_{між}n \sum (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (8)$$

де n – кількість зразків у кожній групі, \bar{x}_i – середнє значення в окремій групі, \bar{x} – загальне середнє.

$$SS_{між}=3[(170-185)^2+(185-185)^2+(200-185)^2] = 1350$$

Обчислюємо внутрішньогрупову суму квадратів, тобто випадкові коливання твердості всередині кожної температурної групи:

– для групи 800 °C: $(170-170)^2+(172-170)^2+(168-170)^2=0+4+4=8$;

– для групи 850 °C: $(185-185)^2+(188-185)^2+(182-185)^2=0+9+9=18$;

– для групи 900 °C: $(200-200)^2+(198-200)^2+(202-200)^2=0+4+4=8$.

Загальна внутрішньогрупова сума квадратів:

$$SS_{внутр}=8+18+8=34$$

Далі визначаємо ступені свободи.

Кількість груп: $k=3$.

Загальна кількість спостережень: $N=9$.

Ступені свободи між групами:

$$df_{між}=k-1=3-1=2.$$

Ступені свободи всередині груп:

$$df_{внутр}=N-k=9-3=6.$$

Обчислюємо міжгруповий середній квадрат:

$$MS_{між} = \frac{SS_{між}}{df_{між}}, MS_{між} = \frac{1350}{2} = 675. \quad (9)$$

Внутрішньогруповий середній квадрат:

$$MS_{\text{внутр}} = \frac{SS_{\text{внутр}}}{df_{\text{внутр}}}, MS_{\text{внутр}} = \frac{34}{6} = 5,67. \quad (10)$$

Розраховуємо критерій Фішера, що використовується у статистичних розрахунках для порівняння дисперсій двох вибірок, оцінки адекватності моделей регресії Він визначає, чи є різниця між дисперсіями значущою, чи ця різниця є випадковою. Критерій Фішера визначається як відношення більшої дисперсії до меншої. Якщо $F_{\text{факт}} > F_{\text{крит}}$ (за таблицею значень критерію Фішера) дисперсії вважаються різними.

Таблиця 5

Значення F-критерія Фішера при ймовірності 0.95

k_2	k_1																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	16	20	24	30	50	100	∞
1	161	200	216	225	230	236	237	239	241	242	243	244	246	248	249	250	252	253	254
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,36	19,37	19,38	19,39	19,40	19,41	19,43	19,44	19,45	19,46	19,47	19,49	19,50
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,88	8,84	8,81	8,78	8,76	8,74	8,69	8,66	8,64	8,62	8,58	8,56	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	5,93	5,91	5,84	5,80	5,77	5,74	5,70	5,66	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,78	4,74	4,70	4,68	4,60	4,56	4,53	4,50	4,44	4,40	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	4,03	4,00	3,92	3,87	3,84	3,81	3,75	3,71	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,63	3,60	3,57	3,49	3,44	3,41	3,38	3,32	3,28	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,34	3,31	3,28	3,20	3,15	3,12	3,08	3,03	2,98	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,13	3,10	3,07	2,98	2,93	2,90	2,86	2,80	2,76	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,97	2,94	2,91	2,82	2,77	2,74	2,70	2,64	2,59	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,86	2,82	2,79	2,70	2,65	2,61	2,57	2,50	2,45	2,40
12	4,75	3,88	3,49	3,26	3,11	3,00	2,92	2,85	2,80	2,76	2,72	2,69	2,60	2,54	2,50	2,46	2,40	2,35	2,30
13	4,67	3,80	3,41	3,18	3,02	2,92	2,84	2,77	2,72	2,67	2,63	2,60	2,51	2,46	2,42	2,38	2,32	2,26	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,77	2,70	2,65	2,60	2,56	2,53	2,44	2,39	2,35	2,31	2,24	2,19	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,70	2,64	2,59	2,55	2,51	2,48	2,39	2,33	2,29	2,25	2,18	2,12	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,45	2,42	2,33	2,28	2,24	2,20	2,13	2,07	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,62	2,55	2,50	2,45	2,41	2,38	2,29	2,23	2,19	2,15	2,08	2,02	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,37	2,34	2,25	2,19	2,15	2,11	2,04	1,98	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,55	2,48	2,43	2,38	2,34	2,31	2,21	2,15	2,11	2,07	2,00	1,94	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,52	2,45	2,40	2,35	2,31	2,28	2,18	2,12	2,08	2,04	1,96	1,90	1,84
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,47	2,40	2,35	2,30	2,26	2,23	2,13	2,07	2,03	1,98	1,91	1,84	1,78
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,43	2,36	2,30	2,26	2,22	2,18	2,09	2,02	1,98	1,94	1,86	1,80	1,73
26	4,22	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,18	2,15	2,05	1,99	1,95	1,90	1,82	1,76	1,69
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,44	2,36	2,29	2,24	2,19	2,15	2,12	2,02	1,96	1,91	1,87	1,78	1,72	1,65
32	4,15	3,30	2,90	2,67	2,51	2,40	2,32	2,25	2,19	2,14	2,10	2,07	1,97	1,91	1,86	1,82	1,74	1,67	1,59
36	4,11	3,26	2,86	2,63	2,48	2,36	2,28	2,21	2,15	2,10	2,06	2,03	1,93	1,87	1,82	1,78	1,69	1,62	1,55
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,07	2,03	2,00	1,90	1,84	1,79	1,74	1,66	1,59	1,51
60	4,00	3,15	2,76	2,52	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	1,95	1,92	1,81	1,75	1,70	1,65	1,56	1,48	1,39
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,30	2,19	2,10	2,03	1,97	1,92	1,88	1,85	1,75	1,68	1,63	1,57	1,48	1,39	1,28
200	3,89	3,04	2,65	2,41	2,26	2,14	2,05	1,98	1,92	1,87	1,83	1,80	1,69	1,62	1,57	1,52	1,42	1,32	1,19
∞	3,84	2,99	2,60	2,37	2,21	2,09	2,01	1,94	1,88	1,83	1,79	1,75	1,64	1,57	1,52	1,46	1,35	1,24	1,00

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F = \frac{MS_{\text{між}}}{MS_{\text{внутр}}}, F = \frac{675}{5,67} = 119,05. \quad (11)$$

Для рівня значущості $p=0,05$, при $df_1=2$ і $df_2=6$, табличне значення критерію Фішера приблизно дорівнює: $F_{\text{табл.}} \approx 5,14$.

Порівнюємо: $119,05 > 5,14$. Отже, розрахункове значення F значно перевищує табличне.

Оскільки розраховане значення критерію Фішера $F=119,05$ значно більше за табличне значення $F_{\text{табл.}}=5,14$, різниця між середніми значеннями твердості сталі після обробки при $800\text{ }^\circ\text{C}$, $850\text{ }^\circ\text{C}$ і $900\text{ }^\circ\text{C}$ є статистично значущою. Це

означає, що температура термічної обробки істотно впливає на твердість сталі і є важливим технологічним фактором, який може використовуватися для керування механічними властивостями матеріалу.

4.1.2.Регресійний аналіз

Регресійний аналіз - це метод математичної статистики, призначений для встановлення та опису кількісного зв'язку між досліджуваними показниками за допомогою математичних рівнянь. Якщо кореляційний і дисперсійний аналіз дозволяють встановити наявність взаємозв'язку між змінними, то регресійний аналіз визначити аналітичну форму цього зв'язку. Це дає можливість побудувати математичні моделі, які описують зміну залежної змінної під впливом однієї або кількох незалежних змінних. Метою регресійного аналізу є визначення найкращої лінії або кривої, яка відображає зв'язок між незалежними змінними та залежною змінною. Він широко використовується для прогнозування значень однієї змінної на підставі відомих або заданих значень іншої змінної чи групи змінних.

Передбачається, що значення залежної змінної визначається певною функцією, яка залежить від одного або кількох факторів, а також від невідомих параметрів моделі. Завдання регресійного аналізу полягає у знаходженні таких значень цих параметрів, за яких побудована модель найточніше описує наявні експериментальні дані. Якщо залежності між змінними надано аналітичного вигляду, таку форму подання називають рівнянням регресії. Найчастіше використовують лінійні, параболічні, гіперболічні, показникові та поліноміальні моделі.

Наприклад, у простій лінійній регресії передбачається, що залежна змінна y є лінійною функцією незалежної змінної x :

$$y = ax + b \quad (12)$$

де a і b – параметри рівняння регресії.

Необхідно знайти такі значення параметрів a і b , за яких пряма $ax + b$ найкращим чином апроксимує експериментальні точки: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$.

Тип регресійної моделі вибирають з урахуванням теоретичних уявлень про

досліджуваний процес, характеру емпіричних даних і мети дослідження. Математичний опис цієї лінії відповідає теоретичній лінії регресії. У загальному вигляді рівняння регресії може бути подане як поліноміальна модель:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{k-1}x_{k-1}x_k + b_{11}x_1^2 + \dots + b_{kk}x_k^2 \quad (13)$$

де b_0, b_1, b_{12}, b_k – вибіркові коефіцієнти регресії, які визначають на підставі результатів експерименту. Ці коефіцієнти характеризують силу та напрям впливу окремих факторів, їхніх взаємодій і квадратичних членів на значення функції відгуку.

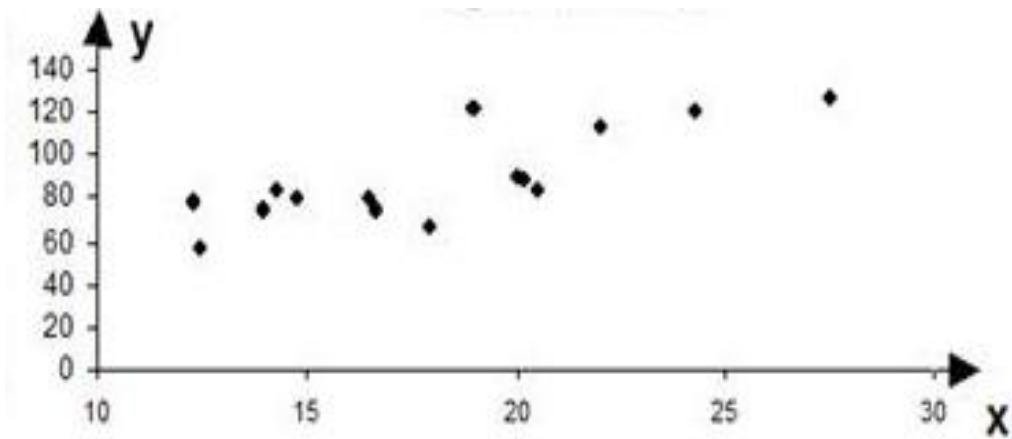
Коефіцієнти рівняння регресії найчастіше визначають за допомогою методу найменших квадратів. Сутність цього методу полягає у знаходженні таких параметрів моделі, за яких сума квадратів відхилень між експериментально отриманими значеннями та значеннями, розрахованими за рівнянням регресії, є мінімальною. Застосування методу найменших квадратів дозволяє отримати модель, яка найкраще узгоджується з наявними даними.

Якщо знайти і нанести на координатне поле середні значення \bar{y}_i , які відповідають значенням змінної x_i то залежність $y = f(x)$ стане більш очевидною. Ломана лінія, яка з'єднує точки середніх значень, називається емпіричною лінією регресії. Зі збільшенням числа дослідів ломана лінія починає згладжуватись, звільняючись від випадкових відхилень, і наближається до якоїсь плавної або прямої лінії.

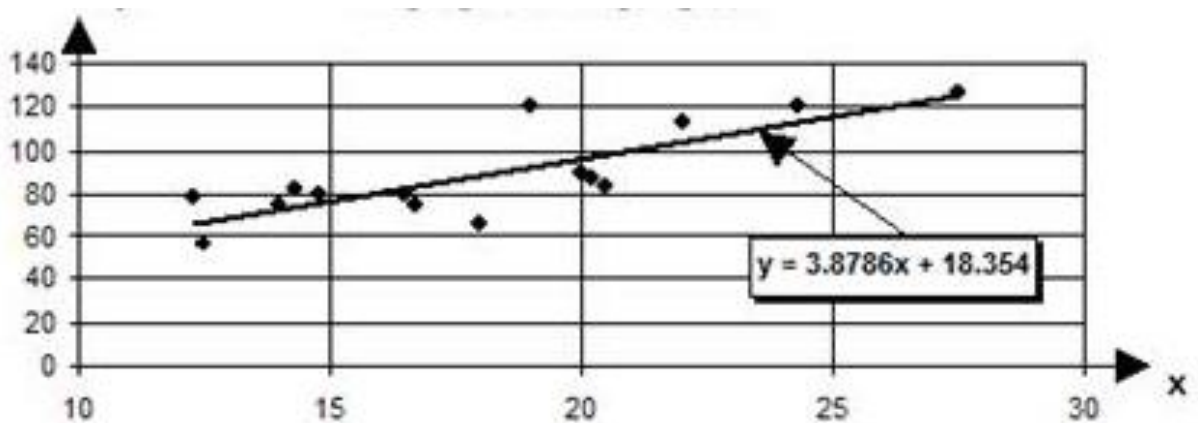
Математичний опис цієї лінії відповідає теоретичній лінії регресії. У загальному вигляді вона може бути представлена рівнянням прямої $y = a + bx$. Коефіцієнти регресії a і b визначаються за формулами, які виведені на підставі методу найменших квадратів:

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, \quad (14)$$

$$a = \frac{\sum y - b \sum x}{n}. \quad (15)$$



а)



б)

Рисунок 5 – Побудова регресійної моделі: а - кореляційне поле; б – побудова лінії регресії

Регресійна модель апроксимує сукупність експериментальних результатів і дає змогу не лише описати вже отримані дані, а й здійснювати прогнозування. Він дає змогу оцінити вплив окремих факторів на результат, описати характер залежності між змінними та виконати прогнозування значень функції відгуку в межах досліджуваної області.

Однією з найбільш поширених контрольних характеристик металевих матеріалів є твердість. Через особливості структури матеріалу твердість пов'язана з іншими механічними властивостями, зокрема з міцністю, тобто корелює з ними. Знання регресійної моделі дає змогу будувати градувальні графіки і на їх основі швидко прогнозувати показники міцності матеріалу за результатами вимірювання твердості. У матеріалознавстві така залежність практично важлива, тому що випробування на твердість є простішим і менш руйнівним методом, ніж повноцінне випробування зразка на розтяг. Тобто

можна не розривати на розривній машині кожен зразок, а достатньо на твердомірі вдавнити у зразок індентор і встановити приблизне уявлення про міцність матеріалу.

Іншим прикладом застосування регресійного аналізу у металознавстві є встановлення залежності між структурою матеріалу та його механічними властивостями. Наприклад, за вмістом перліту у структурі вуглецевої сталі, з урахуванням характеру і тисноти статистичного зв'язку, можна прогнозувати твердість матеріалу.

Застосування регресійного аналізу, статистичного методу, потребує дотримання певних припущень. По-перше, залежна змінна y , має розглядатися як випадкова величина, що підпорядковується нормальному закону розподілу. По-друге, дисперсія значень y повинна бути сталою і не залежати від абсолютного рівня цієї змінної. По-третє, значення факторів повинні вважатися невинуватими величинами, тобто їх встановлення на заданому рівні та підтримання під час експерименту мають бути значно точнішими, ніж похибка відтворюваності результатів.

Таким чином, регресійний аналіз є важливим інструментом статистичного опрацювання експериментальних даних.

Розглянемо приклад проведення регресійного аналізу для встановлення залежності між твердістю за Брінеллем НВ і границею міцності залізобуглецевої сталі σ_B .

Було досліджено 6 зразків вуглецевої сталі. Для кожного зразка визначали твердість за Брінеллем та границю міцності при розтягуванні.

Необхідно встановити залежність виду:

$$y = a + bx,$$

де y - границя міцності сталі, МПа; x - твердість за Брінеллем НВ; a - вільний член рівняння; b - коефіцієнт регресії.

Коефіцієнт нахилу прямої регресії визначають за формулою:

$$b = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (16)$$

Таблиця 6

Результати дослідів по визначенню залежності між твердістю за Брінеллем і границею міцності вуглецевої сталі

№ зразка	Твердість HB, x	Границя міцності σ_B , МПа, y
1	120	390
2	140	450
3	160	520
4	180	590
5	200	660
6	220	720

Складаємо розрахункову таблицю.

Таблиця 7

Обчислення лінійної залежності між твердістю за Брінеллем і границею міцності вуглецевої сталі

№	x	y	x ²	xy
1	120	390	14400	46800
2	140	450	19600	63000
3	160	520	25600	83200
4	180	590	32400	106200
5	200	660	40000	132000
6	220	720	48400	158400
Всього Σ	1020	3330	180400	589600

При розрахунку коефіцієнту регресії підставляємо значення у співвідношення (16):

$$b = \frac{6 \cdot 589600 - 1020 \cdot 3330}{6 \cdot 180400 - (1020)^2} = 3,36$$

Це означає, що при збільшенні твердості сталі на 1 одиницю НВ границя міцності в середньому зростає приблизно на 3,36 МПа.

Вільний член рівняння:

$$a = \frac{\sum y - b \sum x}{n}, \quad (17)$$

$$a = \frac{3330 - 3,36 \cdot 1020}{6} = -15,7$$

Отримане рівняння регресії має вигляд: $\sigma_b = -15,7 + 3,36 \text{НВ}$,

де σ_b - прогнозована границя міцності сталі, МПа; НВ - твердість за Брінеллем.

За результатами регресійного аналізу встановлено пряму лінійну залежність між твердістю за Брінеллем і границею міцності вуглецевої сталі. Зі збільшенням твердості сталі зростає її границя міцності.

Методи статистичного аналізу, які раніше широко застосовувалися в наукових дослідженнях, часто були складними для практичного використання через необхідність виконання трудомістких ручних розрахунків. Сучасний етап розвитку інформаційних технологій істотно спростив статистичне опрацювання експериментальних даних завдяки використанню універсальних і спеціалізованих комп'ютерних програм, функціональні можливості яких постійно розширюються та вдосконалюються. Інструмент MS Excel Регресия орієнтований на побудову лінійних одно- та багатофакторних моделей за процедурою методу найменших квадратів. Програма виводить коефіцієнти регресії та їхні стандартні помилки; масив значень, розрахований за рівнянням регресії; коефіцієнт детермінованості; стандартну похибку оцінки результативної змінної; регресійну і залишкову суму квадратів та інші характеристики.

Одним із прикладів універсальних програмних засобів є STATISTICA для операційного середовища Windows. Її окремі модулі можуть ефективно застосовуватися для обробки результатів експериментальних досліджень, зокрема у галузі матеріалознавства. Використання подібного програмного забезпечення дає змогу автоматизувати розрахунки, зменшити ймовірність

арифметичних помилок, прискорити аналіз даних та забезпечити більш наочне подання отриманих результатів.

На сучасному етапі поширення набуває впровадження технологій штучного інтелекту, насамперед алгоритмів машинного навчання. Їх застосування дає можливість автоматично виявляти статистично значущі залежності, кореляційні зв'язки, кластери, закономірності та тренди у великих масивах даних. Такі підходи є особливо цінними у випадках, коли складність або обсяг інформації ускладнює її аналіз традиційними статистичними методами.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 4

1. Що таке вимірювання і чому воно є необхідною складовою експериментального дослідження?
2. Які основні елементи входять до процесу вимірювання?
3. Що вивчає метрологія та яке її значення для забезпечення точності експерименту?
4. Чим відрізняються абсолютні, відносні та непрямі вимірювання?
5. Які основні методи вимірювання застосовують у метрології?
6. Які класи вимірювань розрізняють за рівнем точності?
7. Що таке шкала відношень і для яких фізичних величин вона використовується?
8. Чим порядкова шкала відрізняється від шкали відношень?
9. Що таке точність вимірювання і чому результати вимірювань не можуть бути абсолютно точними?
10. Які види похибок вимірювання існують і чим вони відрізняються між собою?
11. Якими способами можна зменшити вплив систематичних і випадкових похибок?
12. Для чого під час експериментальних досліджень ведуть журнал спостережень?

13. Що таке генеральна сукупність і вибірка у статистичній обробці експериментальних даних?
14. Яке значення мають середнє арифметичне, дисперсія та стандартне відхилення при аналізі результатів вимірювань?
15. Чим відрізняються кореляційний, дисперсійний і регресійний аналіз у статистичній обробці експериментальних даних?

РОЗДІЛ 5. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Теорія планування експерименту - це науковий напрям, що вивчає принципи та методи побудови раціональних експериментальних планів, які забезпечують отримання максимально повної й достовірної інформації про об'єкт дослідження за мінімальних витрат часу, матеріальних і трудових ресурсів. Вона охоплює організацію експериментального дослідження, вибір факторів і рівнів їх варіювання, методи статистичної обробки результатів, а також способи використання отриманих даних для оптимізації технологічних процесів, прогнозування властивостей матеріалів і виконання інженерних розрахунків.

Ефективність статистичних методів планування експерименту в матеріалознавстві та технології металів зумовлена тим, що багато характеристик технологічних процесів і властивостей матеріалів мають імовірнісний характер. Їхні значення залежать не лише від керованих технологічних параметрів, а й від випадкових чинників, похибок вимірювання та неоднорідності структури матеріалу. У багатьох випадках такі величини можуть бути описані закономірностями математичної статистики, зокрема нормальним розподілом.

Застосування методів математичної статистики дає змогу за обмеженої кількості дослідів побудувати статистичну модель, яка відображає залежність властивостей матеріалу від сукупності факторів впливу. Такі моделі формують на основі експериментальних даних, отриманих безпосередньо під час дослідження конкретного об'єкта або технологічного процесу. Найчастіше їх подають у вигляді алгебраїчних поліномів, що описують зв'язок між вхідними факторами та вихідними параметрами процесу. Отримані методом планування експерименту статистичні моделі є коректними переважно в межах дослідженого факторного простору або поблизу робочих точок експерименту.

Фактором називають причину, умову або керований параметр, що впливає на перебіг процесу, структуру матеріалу чи формування його властивостей. У матеріалознавстві цілеспрямоване керування властивостями матеріалів

здійснюється шляхом зміни їхнього хімічного складу, легування, модифікування, регулювання дисперсності структури, застосування термічної обробки, пластичної деформації та методів поверхневого зміцнення.

До типових факторів у металознавстві належать хімічний склад сплаву, температура плавлення й заливання, швидкість охолодження, тривалість витримки під час термічної обробки, температура нагрівання, ступінь пластичної деформації, швидкість нагрівання або охолодження, а також умови кристалізації та подальшої обробки матеріалу. Саме варіювання цих факторів дає змогу встановити їхній вплив на твердість, міцність, пластичність, зносостійкість, корозійну стійкість та інші експлуатаційні характеристики матеріалів.

Класичний підхід до проведення експериментальних досліджень ґрунтується на послідовній зміні лише одного фактора за умови фіксованих значень усіх інших чинників. Такий підхід лежить в основі однофакторного експерименту. Під час однофакторного дослідження встановлюють залежність вихідного параметра від одного фактора, тоді як інші умови експерименту підтримують сталими. Однак для складних багатофакторних систем цей підхід має обмежену ефективність, оскільки окремо отримані залежності не завжди можна коректно об'єднати в єдину математичну модель процесу. При цьому виникає необхідність застосування багатофакторного експерименту, який дає змогу одночасно оцінювати вплив кількох факторів, а також встановлювати характер їхньої взаємодії.

Планування експерименту - це науково обґрунтований процес визначення кількості дослідів, умов їх проведення та порядку реалізації експериментальної програми, які є необхідними й достатніми для розв'язання поставленого завдання із заданою точністю та надійністю. Методи планування експерименту застосовують для пошуку оптимальних умов перебігу технологічних процесів, побудови інтерполяційних залежностей, виявлення найбільш значущих факторів, уточнення параметрів математичних моделей, а також для перевірки наукових гіпотез. Окремим випадком планування експерименту є пошук області оптимальних значень функції відгуку за мінімально можливою кількістю експериментальних дослідів. Для цього застосовують метод крутого сходження,

який ґрунтується на послідовному переміщенні в напрямі найшвидшого зростання функції відгуку.

Математичні методи планування експериментів у металознавстві застосовуються для цілеспрямованого отримання достовірних залежностей між параметрами технології → структурою → властивостями металів та сплавів за мінімальної кількості дослідів. Математичні методи планування експериментів у металознавстві застосовують для науково обґрунтованої організації експериментальних досліджень, кількісної оцінки впливу технологічних факторів і побудови достовірних моделей, що описують властивості металів і сплавів. Їх використання дає змогу встановлювати вплив температури, тривалості витримки, хімічного складу, швидкості охолодження, режимів деформації та інших параметрів технологічного процесу на структуру й властивості матеріалу.

Основними напрямками застосування математичних методів планування експерименту в металознавстві є побудова математичних моделей властивостей матеріалів, оптимізація режимів плавлення, лиття, термічної та термомеханічної обробки, підвищення відтворюваності й достовірності металографічних, фізико-механічних та експлуатаційних характеристик, а також зменшення кількості дослідів і загальних витрат на проведення експериментальних робіт.

Незважаючи на різноманіття завдань, з якими стикається експериментатор у галузі матеріалознавства, більшість із них можна віднести до кількох типових груп. До першої групи належать завдання, пов'язані з оцінюванням певних характеристик або параметрів досліджуваного об'єкта, які мають статистичний характер, а також із перевіркою гіпотез щодо цих характеристик. Такі завдання безпосередньо пов'язані з вимірювальними процесами, оцінюванням похибок, визначенням середніх значень, дисперсій та довірчих інтервалів.

Друга група завдань передбачає встановлення факту впливу певних вхідних величин, тобто факторів, на вихідну величину - відгук системи. Результатом такого дослідження є відповідь на питання, чи має фактор статистично значущий вплив на властивості матеріалу. Наприклад, експеримент може бути спрямований на з'ясування того, чи впливає введення певного

легувального елемента на міцність сталі, або чи змінює добавка окремих хімічних елементів корозійну стійкість сплаву.

Третя група охоплює завдання встановлення функції відгуку, тобто статистично достовірної залежності між відгуком і факторами. Іншими словами, йдеться про побудову математичної моделі досліджуваного об'єкта або процесу. Такі завдання є предметом регресійного аналізу, який дає змогу кількісно описати вплив окремих факторів та їх взаємодій на кінцевий результат експерименту.

Четверта група завдань пов'язана з визначенням ступеня взаємного статистичного зв'язку між двома або кількома величинами. Наприклад, у металознавчих дослідженнях може вивчатися зв'язок між твердістю сталі та швидкістю охолодження під час гартування, між вмістом вуглецю і границею міцності, між розміром зерна та ударною в'язкістю. Такі завдання розв'язують за допомогою методів кореляційного аналізу.

П'ята група завдань полягає у визначенні оптимальних умов перебігу технологічного процесу. У цьому випадку необхідно знайти такі значення факторів, за яких відгук досягає максимального або мінімального значення. Наприклад, може визначатися оптимальне поєднання температури нагрівання та тривалості витримки, за якого забезпечується максимальна ударна в'язкість сталі, мінімальна крихкість або найкраще співвідношення міцності й пластичності. Такі завдання розв'язують у процесі оптимізації з використанням методів планування експерименту та математичного моделювання.

У теорії планування експерименту досліджуваний процес часто подають у вигляді моделі «чорного ящика». У такій моделі на вході системи розміщуються фактори впливу, а на виході - параметри, що характеризують стан, властивості або поведінку об'єкта дослідження. Незалежні змінні зазвичай позначають як (x_1, x_2, \dots, x_k) , а результати експерименту - як (y_1, y_2, \dots, y_m) . Вихідні параметри називають функціями відгуку або параметрами оптимізації. У матеріалознавстві до таких параметрів можуть належати механічні властивості, структурні характеристики, фазовий склад, твердість, міцність, зносостійкість, пористість або інші кількісно визначені показники якості матеріалу. Параметр оптимізації

має бути кількісним, вимірюваним, відтворюваним і однозначно визначеним для кожної комбінації факторів.

Під моделлю експерименту зазвичай розуміють модель чорного ящика, в якій використовується функція відгуку, що встановлює математичну залежність між функцією відгуку та факторами впливу. Під «чорним ящиком» розуміють узагальнене схематичне подання процесу або об'єкта дослідження, у якому на вхід подаються фактори впливу, а на виході реєструються параметри, що характеризують стан або результат функціонування досліджуваної системи. Фіксований набір рівнів факторів визначає один із можливих станів об'єкта дослідження, умовно поданого у вигляді «чорного ящика». Такий стан відповідає конкретним умовам проведення окремого дослідження. Якщо послідовно розглянути всі можливі комбінації рівнів факторів, можна отримати повну сукупність можливих станів досліджуваного об'єкта. Відповідно, кількість таких комбінацій визначає загальне число можливих варіантів проведення експерименту.

Найбільш поширеними при проведенні планування експерименту є алгебраїчні поліноміальні моделі, які дають змогу апроксимувати поведінку досліджуваної системи в межах вибраної області експерименту. У загальному вигляді така модель може бути представлена рівнянням регресії:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2 \quad (19)$$

де y - функція відгуку; b_0 - вільний член рівняння; b_i - коефіцієнти, що характеризують лінійний вплив окремих факторів; b_{ij} - коефіцієнти взаємодії факторів; b_{ii} - коефіцієнти квадратичних ефектів; x_i та x_j - незалежні змінні, тобто фактори експерименту.

Основною вимогою до математичної моделі є її адекватність, тобто здатність із достатньою точністю описувати експериментальні дані та прогнозувати поведінку досліджуваної системи в межах заданої області факторного простору. Така модель не лише відображає встановлені закономірності, а й дає змогу визначати подальший напрям досліджень, обирати оптимальні режими технологічного процесу та оцінювати вплив окремих факторів на кінцеві властивості матеріалу.

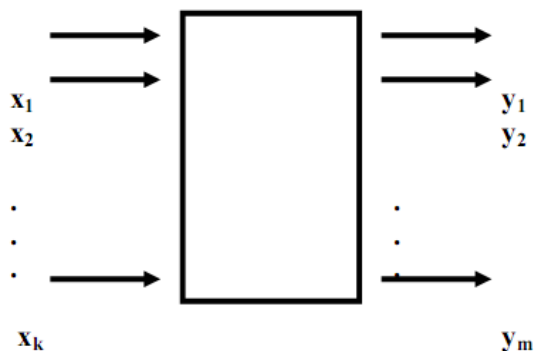


Рисунок 6 – Схема «чорного ящика»: x_1, x_2, \dots, x_k – незалежні змінні чинники y_1, y_2, \dots, y_p – відгук (результати експериментів)

Характерною особливістю планування експерименту є прагнення отримати максимальний обсяг достовірної інформації про досліджуваний об'єкт за мінімально необхідної кількості дослідів. Це досягається шляхом одночасного варіювання кількох факторів за заздалегідь визначеними алгоритмами, застосування математичного апарату для формалізації експериментальної процедури та можливості прийняття обґрунтованих рішень після кожної серії дослідів. Найчастіше використовують багатофакторні схеми активного експерименту, за яких вплив окремого фактора оцінюють не ізольовано, а на основі аналізу всієї сукупності експериментальних результатів.

Процес планування експерименту охоплює кілька послідовних етапів: постановку задачі, збір апріорної інформації про об'єкт дослідження, вибір методу розв'язання поставленої задачі, перевірку обраної методики, проведення експериментів та статистичну інтерпретацію отриманих результатів. На початковому етапі визначають мету дослідження, параметри оптимізації, функцію відгуку, а також допустимі витрати часу, матеріалів і технічних ресурсів. Далі здійснюють аналіз літературних джерел, нормативних матеріалів і наявних експериментальних даних, що дає змогу уточнити вихідні умови дослідження та сформулювати попередні уявлення про досліджуваний процес. Після аналізу апріорної інформації обирають фактори впливу, визначають їхні рівні та інтервали варіювання, а також формують математичну модель, яка має описувати зв'язок між факторами та досліджуваним параметром. Попередні

експерименти проводять з метою перевірки коректності методики, стабільності роботи експериментальної установки, відтворюваності результатів і доцільності обраних меж варіювання факторів. Завершальним етапом є статистична обробка результатів, яка дає змогу оцінити достовірність отриманих залежностей, значущість окремих факторів та адекватність побудованої математичної моделі.

До факторів, які використовують у плануванні експерименту, висувають низку методичних вимог. Вони мають бути незалежними, керованими, вимірюваними та такими, що безпосередньо впливають на об'єкт дослідження або функцію відгуку. Незалежність факторів означає можливість змінювати значення одного фактора за умови підтримання інших факторів на заздалегідь установленому незмінному рівні. При цьому кожен фактор має бути чітко визначеним і не повинен бути функціонально залежним від інших факторів, оскільки така залежність ускладнює інтерпретацію результатів експерименту та побудову адекватної математичної моделі. Правильно організоване планування експерименту забезпечує не лише економію ресурсів, а й підвищує наукову обґрунтованість, відтворюваність і практичну цінність отриманих результатів.

У процесі планування експерименту, як правило, одночасно варіюють кілька факторів. У зв'язку з цим до них висувають вимогу сумісності. Сумісність факторів означає, що всі передбачені планом експерименту комбінації їх рівнів мають бути технічно досяжними, фізично можливими та безпечними для виконання. Якщо певні поєднання факторів призводять до порушення технологічного процесу або пошкодження обладнання, такі комбінації мають бути виключені з плану експерименту або враховані під час його коригування.

Одним із найпоширеніших методів планування експерименту є повний факторний експеримент, за якого реалізуються всі можливі комбінації рівнів досліджуваних факторів. Такий підхід дає змогу отримати найбільш повну інформацію про вплив кожного фактора на вихідний параметр, а також про характер взаємодії між факторами.

Якщо кількість факторів становить k , а число рівнів кожного фактора - S , загальну кількість необхідних дослідів визначають за формулою:

$$N=S^k, \quad (20)$$

де N - необхідна кількість дослідів, S - число рівнів фактора, k - кількість факторів.

Для дворівневого факторного експерименту, у якому кожен фактор варіюється на двох рівнях, формула набуває вигляду $N=2^k$.

Повний факторний експеримент дає можливість оцінити не лише основні ефекти, тобто вплив окремих факторів, а й ефекти їхньої взаємодії. Це особливо важливо для дослідження складних технологічних процесів, у яких результат залежить не від ізольованої дії одного чинника, а від сукупного впливу кількох параметрів. Водночас зі збільшенням кількості факторів різко зростає і кількість необхідних дослідів, що може ускладнювати практичну реалізацію експерименту.

З метою скорочення обсягу експериментальних робіт застосовують дробові факторні експерименти. У таких планах реалізується лише частина всіх можливих комбінацій рівнів факторів. При цьому частиною ефектів взаємодії факторів свідомо нехтують або вважають їх менш істотними порівняно з основними ефектами. Такий підхід дозволяє зменшити кількість дослідів без суттєвої втрати інформативності, особливо на початкових етапах дослідження.

Після проведення експериментів здійснюють розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії, яке описує залежність вихідного параметра від досліджуваних факторів. Статистичну значущість отриманих коефіцієнтів оцінюють за критерієм Стьюдента. Це дозволяє встановити, які фактори або їхні взаємодії мають істотний вплив на досліджуваний процес, а які можуть бути виключені з математичної моделі.

Адекватність побудованої математичної моделі перевіряють за допомогою критерію Фішера шляхом порівняння експериментальних значень вихідного параметра з розрахунковими значеннями, отриманими за рівнянням регресії. Якщо модель виявляється неадекватною, її уточнюють шляхом урахування додаткових ефектів взаємодії факторів, звуження області варіювання параметрів або переходу до моделей другого порядку, які здатні описувати нелінійний характер досліджуваних залежностей.

Хоча цілі експерименту та об'єкти дослідження можуть відрізнитися на різних етапах наукового пошуку, у процесі побудови математичних моделей завжди можна виокремити низку загальних завдань. Вони визначають логіку дослідження, забезпечують його послідовність і створюють основу для отримання достовірної математичної моделі досліджуваного об'єкта.

У сучасних експериментальних дослідженнях для статистичної обробки отриманих даних широко застосовують спеціалізовані програмні пакети статистичного аналізу. Зокрема, комп'ютерна програма STATISTICA дає змогу будувати повні та дробові факторні плани, виконувати регресійний і дисперсійний аналіз, оцінювати статистичну значущість факторів, перевіряти адекватність моделей та розв'язувати оптимізаційні задачі. Використання таких програмних засобів підвищує точність обробки експериментальних результатів і сприяє більш обґрунтованому прийняттю інженерних та наукових рішень.

5.1 Етапи планування та реалізації повного факторного експерименту

Планування та проведення повного факторного експерименту передбачає послідовне виконання низки взаємопов'язаних етапів. До основних етапів належать: вибір параметра оптимізації, визначення факторів та рівнів їх варіювання; кодування факторів; складання плану-матриці експерименту; рандомізація порядку проведення дослідів; реалізація експериментального плану; перевірка однорідності дисперсій паралельних дослідів і відтворюваності результатів; розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії, оцінювання їх похибок та статистичної значущості; перевірка адекватності побудованої математичної моделі.

На початковому етапі визначають область експерименту, тобто сукупність допустимих значень факторів, у межах яких буде проводитися дослідження. Процедура вибору області експерименту включає два основні етапи: вибір основного, або нульового, рівня факторів та визначення інтервалу їх варіювання. Нульовий рівень відповідає такому стану об'єкта дослідження, який приймають за вихідний під час подальшого пошуку оптимальних умов процесу. Він, як

правило, обирається на основі апріорної інформації, результатів попередніх досліджень, технологічних рекомендацій або практичного досвіду.

Визначення меж варіювання факторів передбачає встановлення верхнього та нижнього рівнів кожного чинника. Інтервал варіювання має відповідати двом основним вимогам. По-перше, він повинен бути більшим за похибку вимірювання рівня фактора, оскільки за надто малого інтервалу верхній і нижній рівні можуть виявитися такими, що практично не розрізняються. По-друге, верхній і нижній рівні фактора не повинні виходити за межі області його допустимих значень, оскільки це може призвести до порушення умов проведення експерименту, технологічних обмежень або небезпечних режимів роботи обладнання. На практиці інтервал варіювання часто становить приблизно 3–10 % від ширини області визначення фактора, однак його конкретне значення залежить від природи досліджуваного процесу та точності вимірювань.

Важливим етапом планування факторного експерименту є кодування факторів, тобто перехід від натуральних значень досліджуваних параметрів до безрозмірних кодованих величин. Кодування забезпечує уніфікацію масштабів різних факторів, полегшує математичну обробку результатів і спрощує побудову матриці плану експерименту. Необхідність кодування зумовлена тим, що різні фактори можуть мати різні одиниці вимірювання: температуру виражають у градусах, концентрацію - у відсотках або масових частках, час - у секундах чи хвилинах тощо. Використання натуральних значень у такому вигляді ускладнює побудову та аналіз математичної моделі.

У повному факторному експерименті фактори найчастіше варіюють на двох рівнях: верхньому, який позначають символом «+», і нижньому, який позначають символом «-». Побудова плану експерименту полягає у виборі експериментальних точок, симетрично розташованих відносно нульового рівня. Для кожного фактора встановлюють верхнє значення $x_{i \max}$ і нижнє значення $x_{i \min}$, після чого визначають центральну точку, або нульовий рівень, x_{i0} . Центрування полягає у перенесенні початку координат у точку x_{i0} дає змогу описувати відхилення рівнів факторів від основного значення в уніфікованій кодованій формі:

$$x_{i0} = \frac{x_{i \min} + x_{i \max}}{2}. \quad (21)$$

Точку x_{i0} називають центром експерименту.

Інтервалом варіювання фактора називають величину, індивідуальну для кожного фактора, на яку змінюють його основний, або нульовий, рівень під час планування експерименту. Таким чином, інтервал варіювання задає межі зміни фактора в експерименті та визначає діапазон досліджуваних умов. Інтервал варіювання фактору визначають із співвідношення:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i \max} - x_{i \min}}{2}. \quad (22)$$

Допустимо, що одним з чинників є температура процесу. За основний рівень приймаємо $t = 720^\circ\text{C}$, а інтервал варіювання $\pm 80^\circ\text{C}$. Тоді відношення кодованих і натуральних значень даного фактору можливо представити формулою: $x = \frac{[t^\circ\text{C}] - 720}{80}$. Відповідно рівень +1 складає 800°C , а рівень - 1 дорівнює 640°C .

Інтервал варіювання повинен бути раціональним. Наприклад, зміна температури $\pm 0,5^\circ$ - близька до похибки вимірів, а в межах $\pm 200^\circ\text{C}$ – дуже широка, яка виходить за межі допустимого регулювання процесу.

Перед початком експериментальних досліджень уточнюють методику їх проведення, а також визначають послідовність виконання випробувань. Важливим елементом організації експерименту є рандомізація, тобто проведення дослідів у випадковому порядку, який встановлюють за допомогою таблиць або генераторів випадкових чисел. Застосування рандомізації дозволяє зменшити вплив суб'єктивного чинника під час визначення черговості випробувань і запобігти виникненню систематичних похибок. Завдяки цьому підвищується об'єктивність експериментальних даних, а отримані результати стають більш достовірними та придатними для подальшої статистичної обробки.

Модель першого порядку (повний факторний експеримент) використовується в тому випадку, коли відсутня взаємодія між факторами, що буває на практиці рідко, і має такий вигляд:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_k X_k \quad (23)$$

де β , X – коефіцієнт рівняння регресії.

У тому випадку, коли невідомо чи є взаємодія факторів, будують математичну модель, яка враховує ефекти взаємодії факторів (парна взаємодія, потрійна взаємодія тощо.)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (24)$$

Для виконання планування експерименту будують матрицю експерименту. Рядки такої таблиці відповідають окремим дослідом, а стовпці - значенням факторів та параметра оптимізації. Для двох рівневого фактора кількість значень «+1» у стовпці має відповідати кількості значень «1».

Визначення коефіцієнтів математичної моделі здійснюють за формулами, що ґрунтуються на ортогональності матриці планування. Насамперед обчислюють вільний член рівняння регресії:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i, \quad (25)$$

де N - кількість дослідів; \bar{y}_i - середнє арифметичне значення параметра оцінки кожного досліду.

Таблиця 8

Матриця повного факторного експерименту (2^2)

Номер досліду	x_1	x_2	Параметр оптимізації, y
1	+	+	y_1
2	-	+	y_2
3	+	-	y_3
4	-	-	y_4

Коефіцієнти при факторах визначають за формулою:

$$b_i = \sum_{u=1}^N x_{iu} \cdot y_u, \quad (26)$$

де u – номер досліду; x_{iu} - кодоване значення i -го фактора в u -му досліді.

Для повного факторного експерименту (2^2) коефіцієнти b_0 , b_1 , і b_2 визначають за співвідношеннями:

$$b_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}; b_1 = \frac{y_1 - y_2 + y_3 - y_4}{4}; b_2 = \frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4}{4}.$$

Таким чином, методика розрахунку коефіцієнтів полягає в такому: для визначення будь-якого коефіцієнта b_i значенням параметра оптимізації y надають знаки відповідного стовпця x_i , після чого алгебраїчно підсумовують отримані величини та ділять результат на кількість дослідів.

Розраховані коефіцієнти характеризують силу впливу факторів на параметр оптимізації. Коефіцієнти при незалежних змінних відображають ступінь впливу окремих факторів та їхніх взаємодій: чим більшою є абсолютна величина коефіцієнта, тим більш істотний вплив відповідного фактора. Якщо коефіцієнт має додатний знак, то зі збільшенням значення фактора параметр оптимізації зростає; якщо коефіцієнт має від'ємний знак параметр оптимізації зменшується. Величина коефіцієнта відповідає внеску фактора у зміну параметра оптимізації під час переходу фактора від нульового рівня до верхнього або нижнього рівня.

Оцінювання значущості коефіцієнтів виконують за допомогою критерію Стюдента. Коефіцієнт вважають статистично значущим, якщо виконується умова:

$$|b_j| \geq t_{c,f} S_{b_j} \quad (27)$$

де S_{b_j} – похибка коефіцієнта; $t_{q,f}$ – табличне значення критерію Стюдента; q – рівень значущості.

Кількість ступенів свободи дисперсії відтворюваності визначають за формулою:

$$f = N(n-1) \quad (28)$$

де n – кількість паралельних дослідів.

Якщо абсолютне значення коефіцієнта менше за його похибку, такий коефіцієнт вважають статистично незначущим, а відповідний член вилучають із рівняння регресії.

Адекватність отриманої математичної моделі перевіряють шляхом порівняння експериментальних результатів із результатами, розрахованими за побудованою моделлю. Перевірка рівняння регресії на адекватність передбачає оцінювання того, наскільки точно модель описує досліджуваний процес. Для цього використовують критерій Фішера.

Якщо умова адекватності виконується, можна вважати, що рівняння регресії з достатньою точністю узгоджується з результатами експерименту. Якщо ж умова адекватності не виконується, це свідчить про те, що лінійна модель недостатньо точно описує досліджуваний процес. У такому разі можливі такі рішення: включення до моделі нових взаємодій факторів; зменшення діапазону зміни факторів; перехід до планів другого порядку.

Включення до моделі взаємодій факторів дає змогу отримати точнішу характеристику їхнього впливу на об'єкт дослідження.

Як приклад розглянемо технологічну задачу забезпечення підвищеної зносостійкості куль діаметром 100 мм із легованого зносостійкого чавуну, які використовують як мелючі тіла в кульових млинах для тонкого подрібнення цементного клінкеру. Поверхня мелючих куль повинна мати високу твердість і зносостійкість. Знос мелючих куль у кульових млинах - це процес зменшення їхньої маси та розміру внаслідок ударної дії та стирання під час помелу матеріалу. Цей показник є важливим критерієм ефективності роботи млина, оскільки безпосередньо впливає на собівартість кінцевого продукту.

Знос мелючих тіл досліджували на хромомолібденовому зносостійкому чавуні такого хімічного складу: С - 3,0 %, Si - 1,0 %, Mn - 1,0 %, Cr - 13–19 %, Мо - 0,5–1,5 %, P і S - не більше 0,05 % кожного.

Метою дослідження є побудова математичної моделі впливу вмісту легуючих елементів у чавуні, зокрема хрому та молібдену, на зносостійкість мелючих куль. Для кожного прийнятого поєднання факторів вимірюють значення параметра оптимізації - втрату маси мелючих тіл під час подрібнення 1 т клінкеру. Фактори при плануванні експерименту мають такі значення:

- хром $X_{1min}=13\%$, $X_{1max}=19\%$,
- молібден $X_{2min}=0,5\%$, $X_{2max}=15\%$.

До кожного прийнятого поєднання факторів вимірюють значення параметра оптимізації.

Таблиця 9

Результати дослідів по визначенню впливу вмісту легуючих елементів (хрому та молібдену) на зносостійкість чавунних мелючих куль.

Номер дослідів	Вміст легуючих елементів	Втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру
Перший	Cr=19%; Mo=1,5%	$Y_1 = 15,6$ г
Другий	Cr =13%; Mo=1,5%;	$Y_1 = 18,7$ г
Третій	Cr =19%; Mo=0,5%	$Y_1 = 17,4$ г;
Четвертий	Cr =13 %; Mo=0,5%;	$Y_1 = 20,6$ г.

Центром дослідів є точка Cr =16 %; Mo=1,0%; втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $Y_0 = 18,5$ г.

$$b_0 = (15,6 + 18,7 + 17,4 + 20,6) : 4 = 18,075$$

$$b_1 = (15,6 - 18,7 + 17,4 - 20,6) : 4 = -1,575,$$

$$b_2 = (15,6 + 18,7 - 17,4 - 20,6) : 4 = -0,975,$$

Лінійна математична модель впливу вмісту хрому і молібдену у чавуні на зносостійкість куль, що мелють, має наступний вигляд:

$$y = 18,075 - 1,575x_1 - 0,975x_2.$$

Ця модель показує, що збільшення вмісту як хрому, так і молібдену сприяє зменшенню втрати маси мелючих тіл, тобто підвищенню їхньої зносостійкості.

В приведеному вище прикладі на першому етапі планування експерименту отримано лінійну модель. Проте в межах вибраних інтервалів варіювання залежність може мати нелінійний характер. Один із поширених проявів нелінійності пов'язаний із тим, що ефект одного фактора залежить від рівня іншого фактора. У такому разі має місце ефект взаємодії факторів.

Повний факторний експеримент дозволяє кількісно оцінити ефекти взаємодії. Для цього використовують правило перемножування стовпців матриці

планування, унаслідок чого отримують стовпець добутку двох факторів. Повний факторний експеримент дозволяє кількісно оцінювати ефекти взаємодії. Відповідно модель матиме наступний вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (29)$$

Для повного факторного експерименту (2^2) матрицю планування з урахуванням парної взаємодії факторів подано нижче.

Таблиця 10

Матриця повного факторного експерименту (2^2) з урахуванням парної взаємодії факторів

Номер досліджу	x_1	x_2	$x_1 x_2$	Параметр оптимізації, y
1	+	+	+	y_1
2	-	+	-	y_2
3	+	-	-	y_3
4	-	-	+	y_4

Коефіцієнт b_{12} , що характеризує парну взаємодію факторів, обчислюють аналогічно до розрахунку коефіцієнтів b_0 , b_1 , і b_2 . Стовпці x_1 і x_2 задають план експерименту та визначають умови дослідів, тоді як стовпець x_1x_2 використовують лише для розрахунків: $b_{12}=(15,6-18,7-17,4+20,6):4=-0,025$.

У цьому разі рівняння регресії має вигляд:

$$y = 18,075 - 1,575x_1 - 0,975x_2 - 0,025x_1x_2$$

Отримане значення коефіцієнта b_{12} є дуже малим, тому впливом парної взаємодії факторів x_1x_2 можна знехтувати. Незначущість коефіцієнтів може бути зумовлена такими причинами:

- фактор, що відповідає незначущому коефіцієнту, фактично не впливає на функцію відгуку;
- наявна значна експериментальна похибка;
- обрано надто малий інтервал варіювання незалежної змінної;
- екстремум функції розташований поблизу центру планування.

5.2. Планування дробового факторного експерименту

Під час проведення повного факторного експерименту з трьома факторами кількість необхідних дослідів зростає до ($2^3=8$). Водночас кількість дослідів можна скоротити за рахунок використання інформації, яка не є істотною для побудови лінійної моделі. Якщо в обраних інтервалах варіювання процес можна описати лінійною моделлю, більш доцільно визначити коефіцієнти b_0 , b_1 , b_2 і b_3 . У цьому випадку вектор-стовпець взаємодії x_1x_2 , якою можна знехтувати, використовують для введення нового фактора x_3 . Це дає змогу зменшити необхідну кількість дослідів із восьми до чотирьох. При цьому матриця планування зберігає основні оптимальні властивості, зокрема ортогональність.

Правило побудови дробового факторного експерименту формулюють так: щоб скоротити кількість дослідів, новому фактору надають вектор-стовпець матриці, який відповідає взаємодії факторів, впливом якої можна знехтувати. Умови дослідів для нового фактора визначаються знаками цього стовпця. Якщо для оцінювання трьох факторів виконують чотири досліди, то використовують половину повного факторного експерименту (2^3), тобто напіврепліку 2^{3-1} .

Як приклад, додамо до попередньої задачі необхідність побудови математичної моделі впливу на зносостійкість мелючих куль вмісту двох легуючих елементів - хрому, молібдену та вмісту вуглецю.

Таблиця 11

Матриця дробового факторного експерименту 2^{3-1} за умови лінійного характеру математичної моделі

Номер дослідів	x_1	x_2	x_3	Параметр оптимізації, y
1	+	+	+	y_1
2	-	+	-	y_2
3	+	-	-	y_3
4	-	-	+	y_4

Фактори при плануванні експерименту x_1 і x_2 мають наступні значення: хром $x_{1\min}=13\%$, $x_{1\max}=19\%$, молібден $x_{2\min}=0,5\%$, $x_{2\max}=15\%$. Додатково вплив вуглецю досліджується в межах: $x_{3\min}=2,5\%$, $x_{3\max}=3,5\%$. Відповідно:

перший дослід Cr=19%; Mo=1,5%; C=2,5%; втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $Y_1= 16,95$ г;

другий дослід Cr =13%; Mo=1,5%; C=3,5%; втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $Y_1= 17,5$ г;

третій дослід Cr =19%; Mo=0,5%; C=3,5%; втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $Y_1= 15,77$ г;

четвертий дослід Cr =13 %; Mo=0,5%; C=2,5% втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $Y_1= 22,08$ г.

Центром досліджу є точка Cr=16 %; Mo=1,0%; C=3,0% втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $Y_0= 18,5$ г.

Таблиця 12

Рівні варіювання факторів дробового факторного експерименту 2^{3-1}

Фактори	x_1	x_2	x_3
Основний (нульовий),%	16,0	1,0	3,0
Нижній, %	13,0	0,5	2,5
Верхній, %	19,0	1,5	3,5
Інтервал варіювання, %	3,0	0,5	0,5

Розрахуємо коефіцієнти рівняння регресії:

$$b_1=(16,95-17,5+15,77-22,08):4=-1,715$$

$$b_2=(16,95+17,5-15,77-22,08):4=-0,85$$

$$b_3=(16,95-17,5-15,77+22,08):4=1,44$$

Отже, математична модель має вигляд:

$$y=18,5-1,715x_1-0,850x_2+1,440x_3.$$

Отримане рівняння свідчить, що збільшення вмісту хрому та молібдену в процесі роботи зменшує втрату маси мелючих тіл, тобто підвищує їхню зносостійкість. Натомість додатний коефіцієнт при x_3 вказує на те, що збільшення вмісту вуглецю в межах досліджуваного інтервалу супроводжується зростанням втрати маси, тобто зниженням зносостійкості.

Геометрично отриману модель для випадку двох факторів можна подати на площині в декартовій системі координат. На одній осі відкладають значення

одного фактора, на іншій - значення другого фактора. Кожному стану досліджуваного об'єкта, умовно представленого у вигляді «чорного ящика», відповідає певна точка на площині. Оскільки кожен фактор має мінімальне та максимальне значення, у межах яких він може змінюватися безперервно або дискретно, область допустимих значень факторів утворює певну геометричну фігуру. Якщо фактори є сумісними, межі їх варіювання формують на площині прямокутник, усередині якого розташовані точки, що відповідають можливим станам досліджуваної системи.

STATISTICA - це програмна система, призначена для статистичного аналізу даних і візуалізації результатів досліджень. Вона містить широкий набір аналітичних процедур і методів, зокрема понад 100 типів графіків, засоби розрахунку описових статистик, внутрішньогруповий статистичний аналіз, побудову таблиць частот і таблиць спряженості, методи лінійної та множинної регресії, непараметричні статистичні методи, загальні моделі дисперсійного та коваріаційного аналізу, підбір теоретичних розподілів до емпіричних даних, а також інші інструменти статистичної обробки.

Standard Run	Design: 2**(3-0) design (10v by 11c)		
	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

	1 Var1	2 Var2	3 Var3
1	-1.00	-1.00	0.36
2	1.00	-1.00	0.51
3	-1.00	1.00	1.33
4	1.00	1.00	1.51
5	1.15	0.00	0.50
6	-1.15	0.00	0.31
7	0.00	1.15	1.59
8	0.00	-1.15	0.45
9	0.00	0.00	0.30
10	0.00	0.00	0.29
11	0.00	0.00	0.31

Рисунок 7 – Робоче вікно з результатами розрахунку плану повного факторного експерименту для 3 факторів та результати експериментів в пакеті STATISTICA

У програмному пакеті STATISTICA передбачено потужний модуль планування експериментів, який дає змогу розробляти повні та дробові факторні плани з варіюванням факторів на двох або трьох рівнях. Крім того, система дозволяє будувати центральні композиційні плани, латинські та греко-латинські квадрати, робастні (стійкі до впливу випадкових похибок) плани експерименту,

а також інші різновиди експериментальних схем, що застосовуються для оптимізації досліджуваних процесів і побудови статистично обґрунтованих моделей.

5.3. Методи оптимізації експерименту

Потреба в експериментах по пошуку ділянки екстремуму функції відгуку досить часто виникає в інженерній практиці, зокрема під час оптимізації технологічних процесів у металургії та металознавстві. Традиційний метод «проб і помилок», за якого значення факторів змінюють на основі попереднього досвіду, інтуїції або випадкового вибору, зазвичай є малоефективним. Це зумовлено великою кількістю факторів, що впливають на досліджуваний процес, а також складним характером залежності функції відгуку від цих факторів.

Більш раціональним є застосування пошукових методів оптимізації, які потребують меншої кількості дослідів і дають змогу швидше наблизитися до оптимальних умов функціонування об'єкта. У таких методах покрокове варіювання факторів здійснюється не випадково, а цілеспрямовано - відповідно до заздалегідь визначеного плану. Пошукові методи оптимізації належать до ітераційних процедур, тобто весь процес дослідження поділяється на послідовні кроки. На кожному кроці проводять певну серію дослідів, аналізують отримані результати та визначають напрям подальшої зміни факторів з метою поліпшення значення параметра оптимізації. Отже, інформація, одержана на попередньому етапі, використовується для вибору умов наступного етапу експерименту.

Одним із найефективніших напрямів пошуку екстремуму функції відгуку є рух у напрямку градієнта, що реалізується в методі «крутого сходження». Цей метод, розроблений Дж. Боксом і К. Вілсоном, ґрунтується на послідовному переміщенні в напрямку найшвидшого зростання або зменшення функції відгуку залежно від поставленої оптимізаційної задачі. Якщо метою є пошук максимуму, рух здійснюють у напрямку зростання параметра оптимізації; якщо необхідно знайти мінімум - у напрямку його зменшення. При цьому крок руху в напрямку

градієнта може відрізнитися від інтервалу варіювання факторів, який застосовують у повному або дробовому факторному експерименті.

Рух у напрямку градієнта продовжують доти, доки він забезпечує поліпшення значення параметра оптимізації. Під час пошуку максимуму це проявляється у зростанні функції відгуку, а під час пошуку мінімуму - у її зменшенні. Якщо подальше переміщення в обраному напрямку вже не приводить до покращення результату, вважають, що дослідник наблизився до області екстремуму. Після цього отримані значення факторів приймають за нові основні рівні, і подальші дії виконують у тій самій послідовності.

Процедуру руху до оптимуму повторюють доти, доки коефіцієнти лінійної моделі не стануть близькими до нуля. Це свідчить про те, що дослідження проводиться в досить малій локальній ділянці поверхні відгуку, де подальший рух у напрямку градієнта вже не має істотного ефекту. Таку ділянку можна розглядати як область екстремуму, а подальший експеримент доцільно проводити саме в цій локальній підобласті з використанням більш точних методів уточнення оптимальних умов.

Графічна інтерпретація задачі оптимізації об'єкта, що описується функцією відгуку $y(x_1, x_2)$ за двома факторами x_1 та x_2 , представлена на рис. 6.12.

Для планування експерименту, спрямованого на пошук екстремального значення функції відгуку, необхідно змінювати фактори пропорційно відповідним коефіцієнтам регресії та в напрямку, що визначається знаком цих коефіцієнтів. Такий підхід забезпечує цілеспрямований рух у напрямку найбільшого зростання або зменшення функції відгуку. У процесі пошуку екстремуму рух здійснюють у вибраному напрямку, наприклад у напрямку (M_0M_1) , доти, доки не буде виявлено локальний максимум, тобто поки значення функції відгуку перестане зростати.

В околиці знайденого локального екстремуму проводять нову серію дослідів з метою уточнення математичної моделі, визначення нових значень коефіцієнтів рівняння регресії та встановлення нового напрямку градієнта, наприклад у напрямку (M_1N) . Надалі ця процедура повторюється послідовно: після кожного етапу пошуку уточнюють рівняння регресії, визначають новий

напрямок руху та продовжують пошук до досягнення наступного локального екстремуму.

Такі ітераційні дії виконують доти, доки не буде визначено околицю координат максимуму функції відгуку. Ця область називається майже стаціонарною областю. Її досягнення свідчить про те, що подальший рух у напрямку лінійного градієнта вже не забезпечує суттєвого приросту функції відгуку. Ознакою досягнення майже стаціонарної області є статистична незначущість лінійних коефіцієнтів рівняння регресії. Водночас у цій області можуть набувати істотного значення коефіцієнти, що характеризують парні та потрійні взаємодії факторів. Це означає, що поведінка функції відгуку поблизу екстремуму визначається вже не стільки окремим впливом кожного фактора, скільки складними взаємодіями між ними.

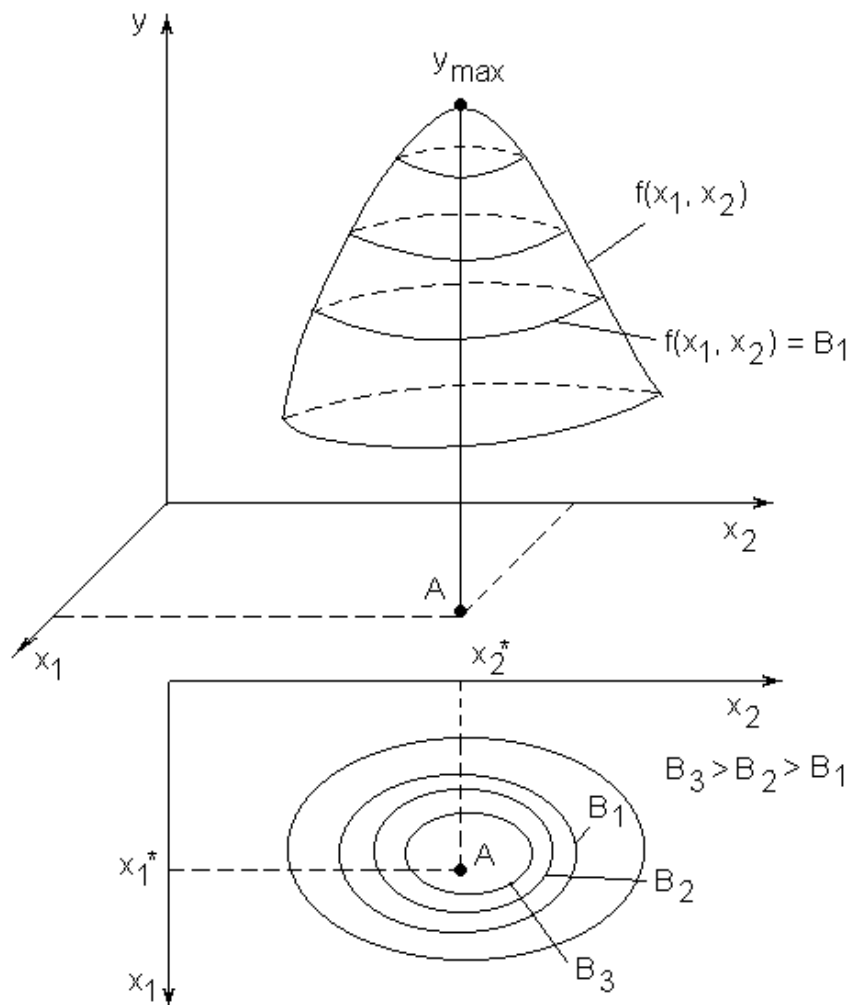


Рисунок 8 – Поверхня відгуку (а) та лінії рівного рівня (б): $y=f(x_1, x_2)=V=\text{const}$ для $n=2$

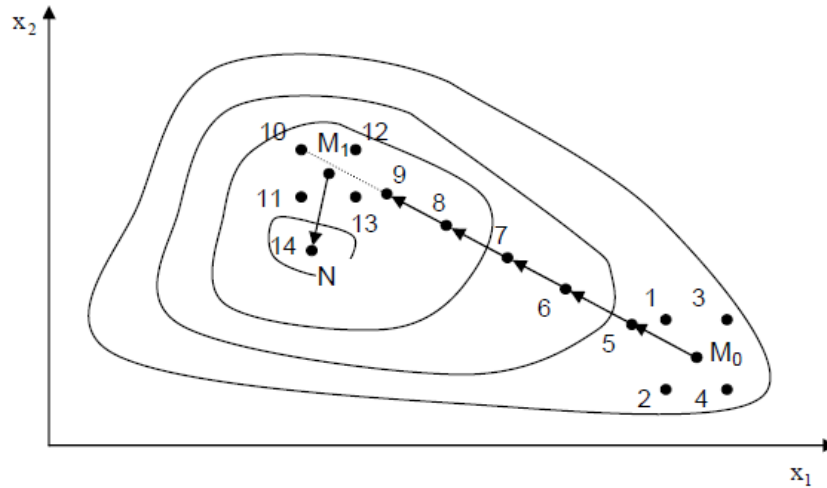


Рисунок 9 - Процедура оптимізації методом крутого сходження

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 5

1. Що таке теорія планування експерименту та яке її основне призначення?
2. Чому статистичні методи планування експерименту мають особливе значення в матеріалознавстві та технології металів?
3. Що називають фактором у плануванні експерименту?
4. Які типові фактори враховують у металознавчих дослідженнях?
5. У чому полягає сутність однофакторного експерименту?
6. Чому однофакторний експеримент має обмежену ефективність для складних багатфакторних систем?
7. Що таке багатфакторний експеримент і які переваги він має?
8. Що називають функцією відгуку або параметром оптимізації?
9. Які вимоги висувають до параметра оптимізації?
10. У чому полягає суть моделі «чорного ящика» в плануванні експерименту?
11. Які основні етапи включає процес планування експерименту?
12. Які методичні вимоги висувають до факторів експерименту?
13. Що означає незалежність факторів у плануванні експерименту?
14. Що таке сумісність факторів і чому вона важлива під час складання плану експерименту?
15. У чому полягає сутність повного факторного експерименту?
16. Як визначають кількість дослідів у повному факторному експерименті?
17. Для чого застосовують дробові факторні експерименти?
18. Як оцінюють статистичну значущість коефіцієнтів рівняння регресії?
19. За допомогою якого критерію перевіряють адекватність математичної моделі?
20. У чому полягає метод крутого сходження та для яких задач оптимізації його використовують?

РОЗДІЛ 6.

МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

Методи дослідження в матеріалознавстві - це система експериментальних, теоретичних та інструментальних підходів, спрямованих на вивчення складу, структури, властивостей і поведінки матеріалів на різних рівнях їхньої організації. У сучасному матеріалознавстві застосовують комплекс методів, які дають змогу встановити взаємозв'язок між хімічним складом, структурним станом, технологією отримання, умовами обробки та експлуатаційними властивостями матеріалів.

Сучасне матеріалознавство розглядає матеріал як складну багаторівневу систему. На атомному рівні досліджують типи атомів, їхні енергетичні стани, електронну конфігурацію, характер міжатомних зв'язків і закономірності взаємодії структурних елементів. На нанорівні вивчають наночастинки, кластери, поверхневі ефекти, міжфазні межі та інші структурні утворення, розміри яких зумовлюють специфічні властивості матеріалу. На мікрорівні аналізують зерна, фази, дислокації, пори, неметалеві включення, мікротріщини та інші дефекти внутрішньої будови. На макрорівні оцінюють суцільність матеріалу, анізотропію, текстуру, макродефекти, а також дефекти, що виникають у процесі виготовлення виробів.

Розвиток методів дослідження в матеріалознавстві відбувався шляхом послідовного поглиблення масштабу аналізу: від макроскопічних спостережень до досліджень на атомному та нанорівнях. Кожен етап цього розвитку був пов'язаний із відповідними технологічними досягненнями, зокрема створенням оптичного мікроскопа, розвитком рентгеноструктурного аналізу, електронної мікроскопії, спектроскопічних методів і нанотехнологій. Завдяки цьому стало можливим отримання дедалі точнішої інформації про структуру, фазовий склад, дефектний стан і властивості матеріалів.

Жоден окремий метод дослідження не може забезпечити отримання повної характеристики матеріалу. Саме тому сучасне матеріалознавство ґрунтується на

комплексному та міждисциплінарному підході, який охоплює різні структурні рівні - від атомного до макроскопічного. Поєднання взаємодоповнювальних методів дає змогу сформувавши цілісне уявлення про фазові, структурні, фізико-хімічні та механічні зміни, що відбуваються в матеріалах під час їх отримання, обробки й експлуатації.

Матеріалознавство базується на взаємодії щонайменше чотирьох фундаментальних і прикладних галузей знань: хімії, фізики, механіки та технології. Внесок кожної з них у розвиток матеріалознавства має специфічний характер. Хімія забезпечує теоретичне й експериментальне вивчення хімічного складу, будови, реакційної здатності та властивостей речовин і матеріалів на їхній основі. Фізика формує методологічну основу для дослідження структури, фізичних властивостей матеріалів, моделювання процесів і побудови теоретичних узагальнень. Механіка є базою для розроблення методів випробування механічних і деформаційних властивостей, а також для їх кількісної оцінки та інтерпретації. Технологія забезпечує практичні методи впливу на структуру і властивості матеріалів, а також визначає способи їх переробки в напівфабрикати та готові вироби.

Використання положень фізики та хімії твердого тіла має важливе значення для встановлення зв'язку між структурою матеріалу, просторовим розташуванням атомів, іонів або молекул та характером їхньої взаємодії. Багато електричних, магнітних, оптичних і хімічних властивостей матеріалів формуються саме на атомному рівні. Фізика твердого тіла досліджує квантові явища у твердих матеріалах, що має особливе значення під час вивчення напівпровідників, надпровідників, магнітних матеріалів та інших функціональних систем.

Хімічний зв'язок і просторове розташування атомів, тобто кристалічна будова матеріалу, мають фундаментальне значення для розуміння його властивостей і поведінки. Кристалографія - це наука, що вивчає закономірності розташування атомів у кристалічних твердих тілах. Більшість конструкційних матеріалів існує не у вигляді монокристалів, а в полікристалічному стані, тобто

як сукупність великої кількості дрібних кристалів - зерен, які мають різну кристалографічну орієнтацію.

Розуміння кристалічної структури є необхідною передумовою для аналізу кристалографічних дефектів, оскільки саме дефекти значною мірою визначають рівень фізичних, механічних і експлуатаційних властивостей матеріалів. Кристалографія охоплює методи визначення кристалічних структур, фізику кристалів, кристалохімію, а також вивчення фазових перетворень у твердому тілі. У матеріалознавстві кристалографічні методи широко застосовують для дослідження структури металів, сплавів, інтерметалевих сполук, керамічних матеріалів та інших твердотільних систем.

Особливе місце в матеріалознавстві посідає вивчення полімерних матеріалів. Полімери можуть мати різний ступінь кристалічності - від частково кристалічних до повністю аморфних. Дослідження полімерів поєднує елементи хімії високомолекулярних сполук, фізичної хімії, статистичної термодинаміки та механіки матеріалів. Такий міждисциплінарний підхід дає змогу здійснювати термодинамічний, структурний і механічний опис властивостей полімерних систем.

Залежно від переважного наукового підходу виділяють хімічне, фізичне, механічне та технологічне матеріалознавство. Ці напрями тісно пов'язані між собою, оскільки властивості матеріалів визначаються одночасно їхнім складом, структурою, умовами формування та характером зовнішнього впливу.

Важливу роль у матеріалознавстві відіграє термодинаміка, яка вивчає зв'язок теплових процесів і температури з такими макроскопічними параметрами, як внутрішня енергія, ентропія, тиск і вільна енергія. Термодинамічний підхід є основою для побудови фазових діаграм, аналізу фазової рівноваги, хімічних реакцій, магнітних явищ, поляризації, пружності та інших процесів, що відбуваються в матеріалах.

Поведінку мікроскопічних структурних складових, зокрема атомів, іонів і молекул, описують за допомогою законів статистичної механіки. Вона дає змогу пов'язати мікроскопічний стан системи з її макроскопічними властивостями.

Такий підхід має важливе значення для пояснення теплових, електричних, магнітних і механічних властивостей матеріалів.

Хімічна кінетика є теоретичною основою для дослідження швидкості процесів, що відбуваються в матеріалах у нерівноважних умовах. Вона дає змогу аналізувати, з якою швидкістю система змінюється під дією температури, тиску, концентраційних градієнтів, механічних напружень або інших зовнішніх чинників, а також як вона переходить від нерівноважного стану до рівноважного. Методи хімічної кінетики використовують для оцінювання швидкості фазових перетворень, хімічних реакцій, процесів росту зерна, утворення нових фаз, зміни форми, розміру, складу та структури матеріалів. Особливо важливим є застосування законів кінетики для вивчення дифузійних явищ. Дифузія є одним із найпоширеніших механізмів структурних змін у матеріалах, особливо під час термічної, хіміко-термічної та термомеханічної обробки. Саме дифузійні процеси визначають перебіг багатьох технологічних операцій, зокрема легування, цементації, азотування, рекристалізації, старіння, гомогенізації та фазових перетворень у твердому стані.

В історичному аспекті розвиток методів експериментального дослідження в матеріалознавстві тісно пов'язаний із формуванням фізичних і хімічних методів аналізу, а також із загальним прогресом науки й техніки. Еволюція цих методів проходила кілька послідовних етапів - від візуального спостереження макроструктури матеріалів до аналізу їхньої будови на атомному та нанометричному рівнях.

Становлення наукових методів дослідження у XVII–XVIII столітті і винайдення оптичного мікроскопа створили передумови для перших спостережень мікроструктури матеріалів. У цей період відбувся поступовий перехід від макроскопічного до мікроскопічного рівня аналізу.

У XIX столітті сформувалася оптична металографія як окремий науковий напрям. Було започатковано методи полірування та травлення металевих зразків, що дало змогу вивчати структуру металів і сплавів під мікроскопом. У цей самий період набули поширення механічні випробування матеріалів, зокрема дослідження міцності при розтягу та визначення твердості.

На початку ХХ століття, після відкриття рентгенівського випромінювання, було розроблено рентгеноструктурний аналіз. Його застосування дало можливість визначати фазовий склад матеріалів, параметри кристалічної решітки та особливості атомно-кристалічної будови речовини. Це стало важливим етапом переходу до дослідження матеріалів на атомно-кристалічному рівні.

Створення електронного мікроскопа в середині ХХ століття дало змогу проводити дослідження на нанометричному рівні та аналізувати дефекти кристалічної решітки. Наприкінці ХХ століття значного розвитку набули високоточні фізико-хімічні методи дослідження, які дозволили вивчати склад і структуру матеріалів на рівні окремих атомів і молекул. До таких методів належать мас-спектрометрія, інфрачервона спектроскопія, ядерний магнітний резонанс, скануюча тунельна мікроскопія та інші методи високороздільного аналізу.

У ХХІ столітті у зв'язку з розвитком цифрових технологій широкого застосування набули комп'ютерне моделювання матеріалів, цифровий аналіз експериментальних даних, методи машинного навчання та штучного інтелекту. Ці підходи істотно розширили можливості прогнозування властивостей матеріалів, оптимізації їхнього складу та моделювання процесів формування структури.

До поширених методів сучасного прикладного матеріалознавства належать металографічний аналіз, рентгеноструктурний аналіз, електронна мікроскопія, електронно-зондовий аналіз, емісійна та абсорбційна спектроскопія, а також методи дослідження механічних, теплових, електричних, магнітних і оптичних властивостей матеріалів.

Для дослідження структури матеріалів застосовують макроструктурний, мікроструктурний та електронно-мікроскопічний аналіз. Макроструктурний аналіз полягає у вивченні будови матеріалу неозброєним оком або при невеликому збільшенні. Його використовують для виявлення грубих структурних неоднорідностей, тріщин, пор, ліквіації, волокнистості та інших макродефектів.

Мікроструктурний аналіз застосовують для дослідження структури металів і сплавів, визначення фазового складу, форми та розміру зерен, характеру розподілу фаз і неметалевих включень. Зазвичай такий аналіз проводять за допомогою оптичного мікроскопа при збільшенні від $\times 50$ до $\times 1200$.

Електронна мікроскопія є одним із провідних інструментальних методів дослідження матеріалів на мікро- та нанорівні. Її застосування дає змогу отримувати деталізовану інформацію про морфологію, структурну організацію, дефекти та фазовий склад матеріалів, що особливо важливо для сучасного матеріалознавства.

Сканувальна електронна мікроскопія використовується переважно для вивчення поверхневої будови матеріалів. За її допомогою досліджують морфологію поверхні, рельєф, характер мікротріщин, пористість, особливості зеренної структури, а також механізми руйнування матеріалу після дії механічних, термічних або хімічних чинників. Цей метод є особливо інформативним під час аналізу зламів, покриттів, порошкових матеріалів, композитів і виробів із розвиненою поверхнею.

Трансмійна електронна мікроскопія застосовується для дослідження внутрішньої тонкої структури матеріалів. Вона дає змогу аналізувати дислокації, межі зерен, фазові включення, нанорозмірні частинки, дефекти кристалічної решітки та особливості міжфазної взаємодії. Завдяки високій роздільній здатності цей метод має важливе значення для встановлення взаємозв'язку між атомно-кристалічною будовою матеріалу, його фазовим станом і фізико-механічними властивостями.

У сучасному матеріалознавстві за допомогою сканувальної зондової мікроскопії досліджують топографію поверхні, шорсткість, адгезійні характеристики, локальні механічні властивості, електропровідність, розподіл електричних зарядів, магнітні домени та інші нанорозмірні особливості структури. Ці методи мають особливе значення для аналізу тонких плівок, полімерних матеріалів, нанокompозитів, біоматеріалів, захисних і функціональних покриттів, мембран, сенсорних структур та інших матеріалів із високою роллю поверхневих властивостей.

Для визначення хімічного складу матеріалів застосовують спектральні, хімічні та фізико-хімічні методи аналізу. Спектральні методи ґрунтуються на взаємодії речовини з електромагнітним випромінюванням. До них належать рентгенофлуоресцентний аналіз, атомно-абсорбційна спектроскопія, емісійна спектроскопія та мас-спектрометрія. Інфрачервону спектроскопію використовують для ідентифікації хімічних зв'язків, а раманівську спектроскопію - для аналізу молекулярної структури та коливальних характеристик речовини. Класичні хімічні методи базуються на проведенні лабораторних реакцій, зокрема титрування та гравіметричного аналізу.

Рентгеноструктурний аналіз, що ґрунтується на дифракції рентгенівських променів, є одним з основних методів визначення кристалічної структури матеріалів. Він дозволяє встановити фазовий склад, параметри кристалічної решітки, ступінь кристалічності, наявність залишкових напружень і текстуру матеріалу.

Методи дослідження механічних властивостей матеріалів поділяють на кілька основних груп. До статичних випробувань належать дослідження міцності, пластичності та модуля пружності при розтягу, стиску або згині. Визначення твердості проводять за методами Брінелля, Роквелла та Віккерса. Ударну в'язкість оцінюють за допомогою випробування на удар, зокрема методом Шарпі. Окрему групу становлять випробування на втому, які дають змогу визначити поведінку матеріалу за умов багаторазового циклічного навантаження.

До поширених теплових методів дослідження належать диференціальний термічний аналіз, термогравіметричний аналіз і дилатометричний аналіз. Диференціальний термічний аналіз використовують для визначення температур фазових переходів, плавлення, кристалізації та інших теплових ефектів. Термогравіметричний аналіз дозволяє встановити зміну маси зразка під час нагрівання або охолодження. Дилатометричний аналіз застосовують для визначення термічного розширення матеріалу та оцінювання його поведінки при зміні температури.

Окреме місце займають спеціальні методи дослідження фізичних властивостей матеріалів. Вони дають змогу визначати електропровідність, теплопровідність, магнітні властивості, оптичні характеристики, діелектричні параметри та інші функціональні властивості, які мають важливе значення для вибору матеріалів у машинобудуванні, електроніці, енергетиці, медицині та інших галузях.

До новітніх методів дослідження в матеріалознавстві належать нанорівневі методи аналізу, комп'ютерне моделювання та тривимірна томографія. Атомно-силова мікроскопія використовується для дослідження рельєфу поверхні з дуже високою роздільною здатністю, а скануюча тунельна мікроскопія - для вивчення електронної структури поверхні на атомному рівні. Комп'ютерне моделювання дозволяє прогнозувати властивості матеріалів, аналізувати процеси деформації, дифузії, кристалізації та руйнування. Томографічний 3D-аналіз забезпечує можливість вивчення внутрішньої будови матеріалів без їх руйнування, що особливо важливо для контролю якості складних виробів і композиційних систем.

Важливим напрямом є цифрове матеріалознавство та застосування штучного інтелекту. Методи машинного навчання використовують для автоматичного розпізнавання фаз, дефектів і меж зерен на мікроскопічних зображеннях, обробки великих масивів дифракційних і спектроскопічних даних, прогнозування властивостей матеріалів та оптимізації їхнього складу. Штучний інтелект дозволяє значно прискорити аналіз експериментальних даних і зменшити суб'єктивність інтерпретації результатів. Штучний інтелект вже застосовуються для автоматичного визначення кристалічних структур, орієнтацій ґратки та міжфазних меж за зображеннями, отриманими методом сканувальної трансмісійної електронної мікроскопії.

Таким чином, сучасне матеріалознавство використовує широкий комплекс експериментальних і розрахункових методів, які дають змогу всебічно досліджувати склад, структуру, властивості та поведінку матеріалів у різних умовах експлуатації. Розвиток цих методів відображає загальний прогрес науки

- від простого спостереження до високоточного атомно-молекулярного аналізу та цифрового прогнозування властивостей матеріалів.

6.1. Спектрометричні методи аналізу хімічного складу речовин

Для розв'язання завдань, пов'язаних з аналізом хімічного складу матеріалів, у сучасному матеріалознавстві широко застосовують комп'ютеризовані прилади - спектрометричні аналізатори хімічного складу речовин. Їх використання дає змогу швидко, точно й відтворено визначати якісний і кількісний склад досліджуваних зразків, що є особливо важливим як у наукових дослідженнях, так і в промисловому контролі якості матеріалів.

В основу роботи спектрометричних аналізаторів покладено оптичні фізико-хімічні методи дослідження. Вони ґрунтуються на аналізі спектрів, що виникають унаслідок взаємодії речовини з енергетичними потоками різної природи, зокрема світловим, рентгенівським, електричним або магнітним випромінюванням. Спектр є фізичною характеристикою здатності атомів, молекул або іонів речовини випромінювати, поглинати чи розсіювати електромагнітне випромінювання.

Взаємодія матеріалу з електромагнітним випромінюванням супроводжується низкою фізичних явищ. Найважливішими серед них є емісія енергії, тобто випромінювання енергії збудженими частинками речовини; поглинання електромагнітного випромінювання атомами, молекулами або іонами; а також розсіювання випромінювання, яке відбувається під час його проходження крізь досліджуване середовище. Саме ці явища лежать в основі різних методів спектрального аналізу.

Оптичні методи спектрального аналізу дають змогу отримати детальну інформацію про хімічний склад, структурні особливості та кількісний вміст компонентів у досліджуваній речовині. Залежно від фізичного принципу, покладеного в основу вимірювання, спектрометричні методи аналізу хімічного складу матеріалів поділяють на атомно-емісійну спектроскопію, атомно-абсорбційну спектроскопію та атомно-флуоресцентну спектроскопію.

Атомно-емісійна спектроскопія базується на реєстрації випромінювання, яке виникає під час переходу збуджених атомів або іонів у нижчі енергетичні стани. Атомно-абсорбційна спектроскопія ґрунтується на вимірюванні інтенсивності поглинання електромагнітного випромінювання атомами певного елемента. Цей метод спектроскопії використовує явище вторинного випромінювання, що виникає після поглинання атомами енергії зовнішнього джерела.

Спектрометричні методи аналізу на сьогодні стали одним із провідних інструментів сучасного матеріалознавства. Вони забезпечують оперативне отримання достовірної інформації про хімічний склад речовин і мають важливе значення для розроблення, дослідження та контролю якості конструкційних, функціональних і спеціальних матеріалів.

Сучасні спектрометричні аналізатори здатні протягом короткого часу виконувати точний хімічний аналіз і визначати вміст окремих елементів у досліджуваному зразку. Методи спектрального аналізу характеризуються високою чутливістю, достатньою точністю, швидкістю виконання та можливістю автоматизації. Завдяки цьому вони широко застосовуються для проведення рутинних масових аналізів, контролю технологічних процесів, сертифікації матеріалів, наукових досліджень і виробничого моніторингу.

6.1.1. Метод атомно-емісійного спектрального аналізу

Атомна спектроскопія ґрунтується на дослідженні електромагнітного випромінювання, яке виникає або поглинається під час енергетичних переходів електронів між дискретними енергетичними рівнями атомів. Метод атомно-емісійного спектрального аналізу дає змогу визначати хімічний склад речовини за спектрами випромінювання атомів, збуджених під дією зовнішнього джерела енергії. Основу методу становить реєстрація емісійного спектра після атомізації та збудження проби, а також подальший аналіз спектральних ліній, характерних для окремих хімічних елементів.

Спільною особливістю всіх методів атомного спектрального аналізу є необхідність попереднього переведення досліджуваної речовини в атомарний

стан. Під час атомно-емісійного аналізу проба матеріалу піддається дії джерела збудження - полум'я, електричної дуги, іскрового розряду або плазми. Унаслідок цього речовина нагрівається, випаровується, атомізується, а її атоми переходять у збуджений енергетичний стан.

У збудженому стані електрони атомів перебувають лише короткий проміжок часу, після чого повертаються на нижчі енергетичні рівні або до основного стану. Цей перехід супроводжується випромінюванням надлишкової енергії у вигляді квантів електромагнітного випромінювання. Атомні емісійні лінії формуються внаслідок спонтанних переходів електронів із вищих енергетичних рівнів на нижчі. Різниця між енергетичними рівнями є строго визначеною для кожного атома, а випромінювання має певну довжину хвилі.

Атомний спектр матеріалу складається з окремих спектральних ліній (рис.10). Метод атомно-емісійного спектрального аналізу базується на тому, що кожний хімічний елемент має індивідуальний, неповторний набір спектральних ліній. Ці лінії є своєрідною «спектральною ознакою» елемента і дають змогу ідентифікувати його в складі досліджуваного матеріалу. Випромінювання розкладають у спектр, складові якого відрізняються довжиною хвилі. Подальший аналіз положення та інтенсивності спектральних ліній дає можливість визначити якісний і кількісний склад речовини.

Якісний аналіз здійснюється шляхом зіставлення зареєстрованих спектральних ліній із довідковими спектрами відомих хімічних елементів. Кількісний аналіз ґрунтується на вимірюванні інтенсивності відповідних спектральних ліній, оскільки вона пов'язана з концентрацією елемента у пробі. Інтерпретація спектрів є ускладненою у випадку, коли в зразку одночасно присутні кілька хімічних елементів, оскільки їхні спектральні лінії можуть накладатися або взаємно впливати на результати вимірювання. Аналіз спектра випромінювання речовини та порівняння його з еталонними спектрами хімічних елементів дають змогу здійснювати якісний аналіз проби, тобто встановлювати наявність у ній певних елементів. У практиці емісійного спектрального аналізу зазвичай вимірюють інтенсивність не всіх спектральних ліній певного елемента, а лише однієї або кількох найбільш інтенсивних аналітичних ліній. Важливо,

щоб обрана лінія не перекривалася зі спектральними лініями інших елементів, які є присутніми у зразку. Наприклад, атоми заліза під час випромінювання утворюють значну кількість спектральних ліній, тому вибір оптимальної аналітичної лінії для цього елемента має принципове значення.

Спектри зазвичай подають у графічній формі: на осі абсцис відкладають довжину хвилі, а на осі ординат - інтенсивність випромінювання. Речовини в газоподібному атомарному стані утворюють лінійчасті атомні спектри, які складаються з окремих світлових ліній на темному фоні. Атоми кожного хімічного елемента мають власні резонансні частоти, тому випромінюють або поглинають електромагнітне випромінювання лише на певних довжинах хвиль. Саме лінійчасті спектри є основою для визначення хімічного складу матеріалів методом атомно-емісійного спектрального аналізу.

Для отримання лінійчатого спектра випромінювання досліджувану речовину нагрівають до високої температури або піддають дії іншого енергетичного джерела, достатнього для атомізації та збудження атомів. Під впливом енергії електрони переходять з основного стану на вищі енергетичні рівні. Повертаючись до нижчих рівнів, вони випромінюють надлишкову енергію у вигляді характеристичних квантів електромагнітного випромінювання переважно у видимій та ультрафіолетовій ділянках спектра. Дискретний характер електронних переходів зумовлює утворення лінійчастого спектра, який використовується для аналітичного визначення елементного складу матеріалу.



Рисунок 10 – Лінійчатий спектр випромінювання заліза

Для якісного аналізу найважливішою характеристикою спектральної лінії є її положення у спектральному діапазоні, тобто довжина хвилі λ . Сукупність частот, на яких відбувається випромінювання атомів певного хімічного елемента, називають спектром випромінювання цього елемента.

Процес атомного емісійного спектрального аналізу включає кілька послідовних етапів:

- пробопідготовку;
- випаровування досліджуваної проби;
- атомізацію молекул матеріалу;
- збудження випромінювання атомів та іонів хімічних елементів;
- розкладання випромінювання у спектр;
- реєстрацію спектра; ідентифікацію спектральних ліній з метою встановлення елементного складу проби;
- вимірювання інтенсивності спектральних ліній елементів, що підлягають кількісному визначенню;
- проведення розрахунку кількісного вмісту хімічних елементів за попередньо встановленими градувальними залежностями.

Для розв'язання конкретної аналітичної задачі необхідно правильно вибрати джерело збудження та оптимізувати його робочі характеристики. Це досягається шляхом використання інертної атмосфери, додаткового накладання магнітного поля або введення спеціальних добавок, які стабілізують температуру в зоні електричного розряду, ступінь іонізації атомів та інші параметри процесу.

Проведення атомізації у штучно створеній атмосфері аргону забезпечує захист розжареної ділянки зразка від окиснення та усуває вплив сторонніх атмосферних газів на результати аналізу. Це особливо важливо під час дослідження елементів, схильних до утворення оксидів або інших хімічно стійких сполук при підвищених температурах.

Класичним способом збудження спектра є використання полум'я, яке утворюється під час спалювання водню, метану або ацетилену в кисні чи очищеному повітрі. Однак цей підхід має низку недоліків. До основних із них належать нестабільність характеристик полум'я, що знижує відтворюваність і точність результатів, а також можливість утворення у полум'ї стійких сполук досліджуваних елементів - оксидів, карбідів або нітридів. Це може спричинити спотворення результатів вимірювання.

В атомному емісійному спектральному аналізі для збудження спектра випромінювання широко застосовують іскровий або дуговий розряд між вугільними чи вольфрамовими електродами. Зазвичай напруга на електродах становить 25–80 В, а сила струму - 10–15 А. За таких умов в атомізаторі спектрометра відбувається інтенсивне локальне нагрівання невеликої ділянки зразка до високих температур. Унаслідок дії іскри або дуги частина матеріалу з поверхні зразка випаровується, атомізується, а атоми переходять у збуджений стан і випромінюють електромагнітну енергію. Якщо досліджувана металева проба є суцільною, вона може виконувати роль одного з електродів атомізатора.

Спектрометр - це прилад, у якому приймач випромінювання реєструє оптичний спектр, розгорнений у фокальній площині оптичної системи. Він забезпечує розділення випромінювання на спектральні компоненти, вимірювання довжин хвиль та інтенсивності спектральних ліній, що необхідно для отримання аналітичних результатів. Емісійне випромінювання спрямовується в оптичну систему спектрометра, де воно розділяється на окремі спектральні компоненти. Розкладання випромінювання на спектр здійснюється під час проходження світла через призму або дифракційну решітку.

Випромінювання, що утворюється в атомізаторі, проходить через вхідну щілину S , розташовану у фокальній площині лінзи $L1$ (рис.11). Ця частина спектрометра називається коліматором і призначена для формування паралельного пучка променів. Після проходження через лінзу $L1$ паралельний пучок випромінювання падає на призму P . Завдяки дисперсії світло різних довжин хвиль після виходу з призми відхиляється під різними кутами. Дія призми у спектрометрі ґрунтується на явищі дисперсії, тобто залежності показника заломлення речовини n від довжини хвилі світла λ . У прозорих твердих матеріалах, з яких виготовляють призми, зокрема у склі або кварці, показник заломлення зменшується зі збільшенням довжини хвилі. Тому промені синьої та фіолетової частин спектра відхиляються призмою сильніше, ніж промені з більшою довжиною хвилі.

Найчастіше в атомному спектральному аналізі використовують ультрафіолетову ділянку спектра, оскільки саме в ній розташована переважна

кількість інтенсивних аналітичних ліній багатьох хімічних елементів. Діапазон довжин хвиль, які реєструють при оптико-емісійному спектральному аналізі, зазвичай становить 150 – 800 нм.

У фокальній площині фокусуєної лінзи L_2 встановлюють екран або приймальний елемент. Відповідно, в різних ділянках цієї площини формуються зображення від вхідної щілини у світлі різних довжин хвиль, що й утворює спектральну картину досліджуваного випромінювання.

Для виділення випромінювання потрібної довжини хвилі, яка відповідає певній спектральній лінії, у спектрометрах застосовують оптичні щілинні монохроматори.

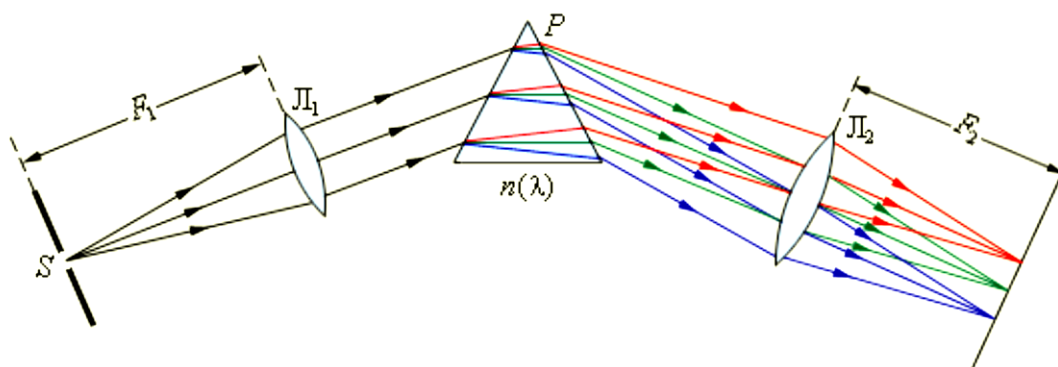


Рисунок 11 – Оптична схема спектрального приладу для проведення атомного емісійного аналізу

Детектори призначені для реєстрації спектрального випромінювання на певній довжині хвилі, характерній для конкретного хімічного елемента, а також для вимірювання інтенсивності відповідної спектральної лінії. У кількісному спектральному аналізі вміст елемента визначають за абсолютною або відносною інтенсивністю його аналітичних ліній чи смуг у спектрі. Інтенсивність спектральної лінії залежить від кількості збуджених атомів, що випромінюють, тому вона пов'язана з концентрацією відповідного елемента в досліджуваному зразку. Детектори перетворюють енергію спектрального випромінювання на електричний сигнал, величина якого пропорційна інтенсивності зареєстрованої спектральної лінії. Отже, отриманий сигнал може бути використаний для кількісного визначення концентрації хімічного елемента в аналізованому матеріалі. Тому стабільність, чутливість і точність роботи детекторної системи

мають важливе значення для достовірності результатів атомного оптико-емісійного аналізу.

У сучасних спектрометрах встановлено до 108 спектральних каналів із роздільною здатністю 3 - 4 пікселі. Конструкція багатоканального спектрометра поєднує монохроматор і систему детекторів, розташованих у вигляді напівкруглої матриці навколо монохроматора. Детектори розміщують у положеннях, що відповідають довжинам хвиль спектральних ліній елементів, які підлягають аналізу.

Інформація, що надходить від спектральних каналів, обробляється на комп'ютері із відповідним програмним забезпеченням. Сучасні спектрометри оснащуються базами даних, які можуть містити до 50 000 найважливіших спектральних ліній різних хімічних елементів. Час від початку аналізу до відображення результатів зазвичай становить від 3 до 30 секунд. Результати вимірювання, як правило, виводяться на монітор персонального комп'ютера.



Рисунок 12. Оптико - емісійний аналізатор Metavision 1008i виробництва компанії MetalPower

До зразків, призначених для атомного оптико-емісійного аналізу, висувають такі вимоги:

– досліджуваний зразок повинен бути твердим і не мати суттєвих дефектів структури, зокрема пористості, раковин, сторонніх включень, тріщин та інших пошкоджень;

- зразок повинен мати щонайменше одну плоску поверхню розміром приблизно 30×30 мм, придатну для проведення аналізу;
- товщина зразка має перебувати в межах від 2 до 50 мм.

Емісійний спектральний аналіз характеризується високою чутливістю визначення, оперативністю проведення дослідження, об'єктивністю отриманих результатів та універсальністю застосування. Метод широко використовують для якісного й кількісного аналізу хімічного складу матеріалів, насамперед металів і сплавів.

До основних переваг оптико-емісійних спектрометрів та аналізаторів належать:

- можливість визначення малих і надмалих концентрацій понад 35 хімічних елементів, зокрема N, C, P, S, Mn, Al, Fe, Cu та інших;
- висока точність аналізу, що забезпечує широке застосування методу на промислових підприємствах для контролю хімічного складу металевих матеріалів;
- швидке отримання результатів, що є важливим для поточного виробничого контролю та оперативної оцінки якості матеріалів;
- можливість одночасного визначення кількох елементів в одному зразку.

Водночас оптико-емісійні спектрометричні аналізатори мають певні обмеження. До основних недоліків цих приладів належать:

- переважно стаціонарне виконання, що зумовлено значними габаритами та масою обладнання, складність проведення аналізу великогабаритних зразків;
- необхідність наповнення робочої зони приладу аргоном під час проведення вимірювання;
- ускладнена ідентифікація невідомих металевих матеріалів, оскільки для коректного аналізу часто потрібна попередня інформація про орієнтовний хімічний склад зразка;
- висока вартість обладнання порівняно з іншими типами спектрометричних аналізаторів;
- необхідність попередньої підготовки поверхні зразка, зокрема очищення її від оксидного шару, забруднень та інших поверхневих нашарувань.

6.1.2. Спектроскопія комбінаційного розсіювання

Під час взаємодії електромагнітного випромінювання з досліджуваним матеріалом світло може відбиватися, поглинатися, проходити крізь речовину або розсіюватися (рис. 13). Якщо на поверхню зразка спрямувати монохроматичний світловий промінь, основна частина випромінювання зазнає пружного розсіювання. У цьому випадку змінюється лише напрям поширення світла, тоді як його довжина хвилі та енергія фотонів залишаються незмінними. Більшість фотонів, що взаємодіють із матеріалом, розсіюються з тією самою енергією, яку мали фотони падаючого випромінювання. Водночас незначна частина світла, приблизно один фотон із десяти мільйонів, під час розсіювання змінює не лише напрям поширення, а й довжину хвилі. Ефект комбінаційного розсіювання полягає в непружному розсіюванні монохроматичного оптичного випромінювання на молекулах речовини. Унаслідок такої взаємодії частина енергії фотонів передається коливальним або обертальним рівням молекул, або, навпаки, фотони одержують додаткову енергію від збуджених молекулярних станів. Це призводить до появи у спектрі нових спектральних ліній, які відсутні у спектрі первинного, збуджуючого випромінювання.

Саме ці додаткові спектральні лінії містять інформацію про молекулярну будову, хімічний склад, фазовий стан і структурні особливості досліджуваного матеріалу, що є фізичною основою спектроскопії комбінаційного розсіювання.

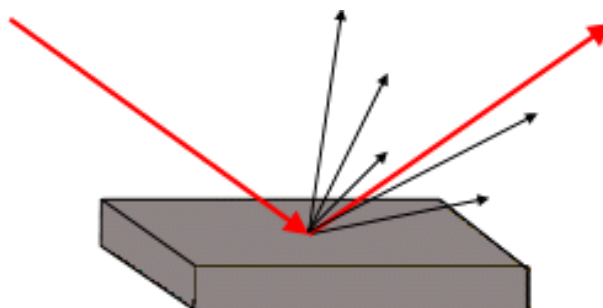


Рисунок 13 - Схема утворення комбінаційного розсіювання: червона стрілка - відбите світло; сині стрілки - світло, що формує раманівський спектр

Енергія фотонів, які падають на поверхню досліджуваного матеріалу, частково передається молекулам речовини, що зумовлює зміну їхнього внутрішнього енергетичного стану. Унаслідок такої взаємодії частина розсіяного випромінювання змінює свою довжину хвилі, а в спектрі з'являються нові лінії. Кількість, положення та інтенсивність цих спектральних ліній визначаються хімічним складом, молекулярною будовою та характером хімічних зв'язків у речовині. Це явище отримало назву раманівського розсіювання на честь його відкривача - індійського фізика Чандрасекара Венкати Рамана.

Спектроскопія комбінаційного розсіювання, або раманівська спектроскопія, дає змогу ідентифікувати речовини за особливостями їхньої молекулярної структури. Метод застосовують для аналізу широкого спектра матеріалів - полімерів і лакофарбових покриттів, мінералів, кераміки, скла.

Фізичною основою раманівської спектроскопії є зміна поляризації молекули під час її взаємодії з електромагнітним випромінюванням. Під дією світла електронна хмара молекули деформується, а за певних змін поляризованості молекулярних зв'язків виникають додаткові спектральні смуги раманівського розсіювання. Ці смуги містять інформацію про хімічний склад і молекулярну будову досліджуваної речовини.

Ідентифікація матеріалів методом спектроскопії комбінаційного розсіювання ґрунтується на порівнянні індивідуального раманівського спектра невідомої речовини зі спектрами еталонних матеріалів, збереженими у спеціалізованих спектральних бібліотеках. Завдяки застосуванню цього методу з'являється можливість швидко й об'єктивно встановлювати природу досліджуваного матеріалу без значного пошкодження зразка.

Під час проведення раманівського аналізу монохроматичний лазерний промінь, найчастіше у видимому або ближньому інфрачервоному діапазоні, спрямовується на поверхню досліджуваного об'єкта. Комбінаційне розсіювання виникає внаслідок взаємодії фотонів із молекулярними групами речовини. Частина розсіяного випромінювання має довжину хвилі, зміщену відносно довжини хвилі падаючого лазерного випромінювання і реєструється та аналізується у вигляді раманівського спектра.

Конструкція раманівського спектрометра містить оптичну систему, яка спрямовує та фокусує падаючий лазерний промінь на поверхню зразка, збирає слабке непружно розсіяне випромінювання і направляє його до спектрометра. Пружно розсіяне випромінювання, яке не містить аналітично значущої інформації, відсікається спеціальними оптичними фільтрами. Непружно розсіяне світло надходить на дисперсійний елемент - призму або дифракційну решітку, де розкладається на складові спектра. Далі випромінювання з різними довжинами хвиль та інтенсивністю реєструється детекторами, які перетворюють оптичний сигнал на електричний. Отримані сигнали передаються на комп'ютер для цифрового опрацювання, побудови спектра та подальшої ідентифікації матеріалу.

Конструкція раманівського спектрометра зазвичай включає такі основні елементи (рис. 14):

- лазерне джерело монохроматичного випромінювання;
- оптичну систему освітлення зразка, збирання та фокусування розсіяного випромінювання;
- оптичні фільтри для відсікання пружно розсіяного світла;
- призму або дифракційну решітку для спектрального розкладання розсіяного випромінювання;
- спектрометричний блок із системою детектування;
- комп'ютерну систему для цифрового аналізу та інтерпретації отриманого спектра.

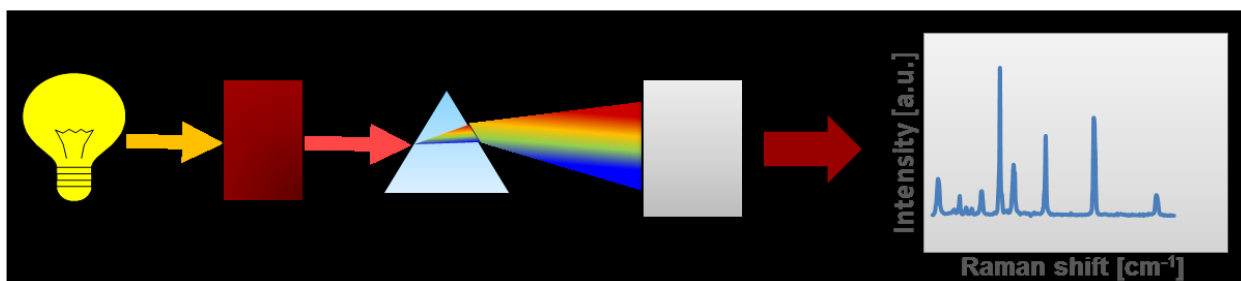


Рисунок 14 – Схема раманівського спектрометра 1 - джерело світла; 2 - досліджуєий зразок; 3 - дисперсійний елемент (призма); 4 - детектор комбінаційного розсіювання; 5 - раманівський спектр на екрані монітора



Рисунок 15 - Раманівський спектрометр RM5 Edinburgh Instruments

Розроблення сучасних потужних і водночас компактних лазерних джерел випромінювання створило передумови для широкого впровадження раманівських спектрометрів у практику аналітичних досліджень. Такі прилади ефективно застосовують для визначення молекулярної будови, фазового складу та структурних особливостей широкого спектра неметалевих матеріалів, зокрема полімерів, кераміки, скла, мінералів, композитів тощо.

6.1.3. Рентгеноструктурний аналіз

Існує низка речовин, які за однакового або близького хімічного складу можуть істотно відрізнятися за фізико-механічними, оптичними, електричними та іншими властивостями. Такі відмінності, у більшості випадків, зумовлені різним просторовим розташуванням атомів у кристалічній ґратці, особливостями кристалічної структури, наявністю дефектів, внутрішніх напружень або поліморфних модифікацій.

Одним із найбільш інформативних методів дослідження кристалічної будови речовин є рентгеноструктурний аналіз. Його застосування дає змогу однозначно оцінювати структуру кристалічних фаз, зокрема в умовах перебігу поліморфних перетворень, а також визначати параметри кристалічної ґратки,

ступінь її викривлення, наявність внутрішніх напружень і фазовий склад матеріалу.

Під час рентгеноструктурного аналізу досліджують безпосередньо кристалічне тіло без переведення зразка у стан плазми, газу або рідкого розчину. Це є важливою перевагою методу, оскільки дозволяє зберегти реальну будову матеріалу в твердому стані. Рентгеноструктурний аналіз застосовують переважно для дослідження кристалічних речовин, а у випадку багатокомпонентних матеріалів - для ідентифікації їхніх кристалічних фаз.

Метод рентгеноструктурного аналізу ґрунтується на явищі дифракції рентгенівського випромінювання на кристалічній ґратці. Кристалічну структуру можна уявити як систему паралельних атомних площин, які розташовані на певних міжплощинних відстанях. Кожна кристалічна фаза має власну ґратку з характерними параметрами та індивідуальним набором міжплощинних відстаней: d_1 , d_2 , d_3 тощо.

Під час аналізу вузький пучок монохроматичного рентгенівського випромінювання спрямовують на кристалічний матеріал. Унаслідок взаємодії рентгенівських променів з атомними площинами кристалічної ґратки відбувається їх розсіювання та дифракція. За певних умов розсіяні хвилі підсилюють одна одну, що призводить до утворення дифракційних максимумів.

Оскільки кожна кристалічна речовина має унікальну просторову структуру, під час взаємодії з рентгенівським випромінюванням формується характерна дифракційна картина - дифрактограма. Вона є своєрідним «структурним відбитком» матеріалу і дає змогу ідентифікувати кристалічні фази, визначити параметри ґратки, оцінити ступінь кристалічності, а також виявити структурні зміни, що виникають у матеріалі під впливом термічної, механічної або хімічної обробки.

Кожен максимум або пляма на дифрактограмі відповідає рентгенівським променям, дифрагованим певною системою кристалографічних площин. На основі вимірювання положення, інтенсивності та форми дифракційних максимумів розраховують міжплощинні відстані, параметри кристалічної

гратки, фазовий склад і особливості внутрішньої будови досліджуваного матеріалу.

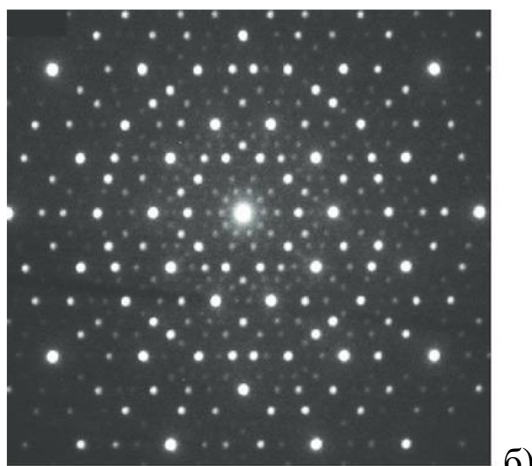
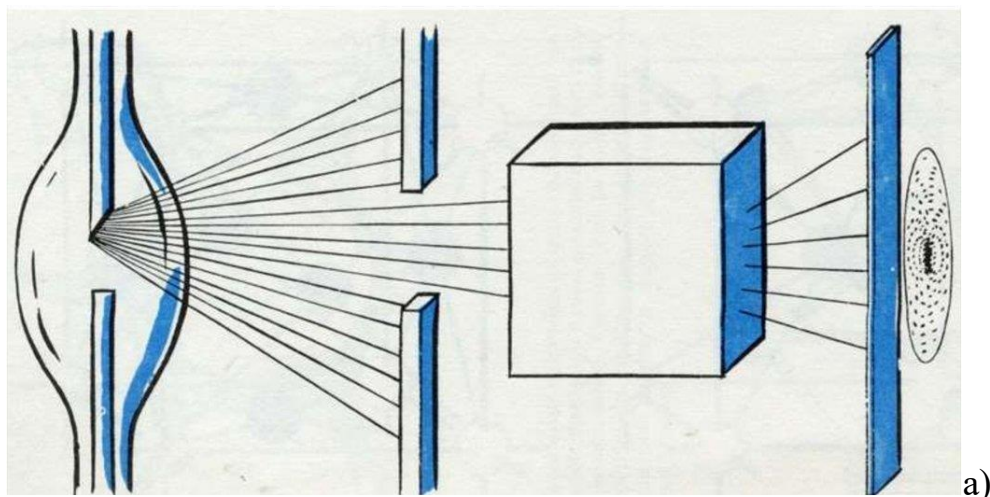


Рисунок 16 - Схема утворення дифракційної картини під час дифракції рентгенівських променів на кристалі та формування дифракційних плям на фотопластинці: а) схема дифракції рентгенівського випромінювання; б) - дифрактограма квазікристалу ікосаедриту, який виявлено у метеориті

Рентгенівські дифрактометри - це спеціалізовані лабораторні установки, призначені для проведення рентгенофазового та рентгеноструктурного аналізу кристалічних матеріалів. Основними функціональними елементами таких приладів є джерело первинного рентгенівського випромінювання, зазвичай рентгенівська трубка, а також система реєстрації рентгенівських променів, які проходять крізь досліджуваний зразок або дифрагують на його кристалічних площинах.

Залежно від конструкції, призначення та режиму роботи рентгенівські дифрактометри можуть містити низку допоміжних вузлів і пристроїв. До них належать тримач зразка, гоніометр для точного обертання зразка або детектора з вимірюванням кута повороту, а також детектор іонізуючого випромінювання. Як детектори можуть використовуватися лічильники Гейгера - Мюллера, сцинтиляційні та напівпровідникові детектори.

Блок живлення рентгенівської трубки містить генератор високої напруги, стабілізатори напруги й сили струму, пристрої для регулювання та контролю електричних параметрів, а також систему блокувань і захисних механізмів. Ці елементи забезпечують стабільну роботу приладу та безпеку персоналу під час роботи з високою напругою і рентгенівським випромінюванням.

Для отримання рентгенограм методом Дебая - Шеррера рентгенівську плівку розташовують уздовж циліндричної поверхні рентгенівської камери. Вісь цієї камери перпендикулярна до вузького падаючого пучка монохроматичного рентгенівського випромінювання, а кристалічний зразок розміщують у центрі камери на осі циліндра (рис. 17).

Тонкий пучок рентгенівських променів спрямовують на зразок, у якому відбувається дифракційне розсіювання випромінювання. Кути дифракції залежать від міжплощинних відстаней у кристалічній ґратці фаз або мінералів, що входять до складу досліджуваного матеріалу. Дифраговані промені потрапляють на детектор або на вузьку смугу фотоплівки, де формують сліди у вигляді системи дифракційних ліній чи кілець (рис. 18). У результаті отримують рентгенограму, яку надалі інтерпретують з метою визначення фазового складу, параметрів кристалічної ґратки та інших структурних характеристик матеріалу. Рентгенограма є графічним відображенням залежності інтенсивності рентгенівського випромінювання, що пройшло крізь зразок або було розсіяне ним, від кута повороту зразка чи відповідної міжплощинної відстані d (рис. 19). Дифраговане випромінювання може реєструватися на рентгенівській фотоплівці. Дифракційна лінія, тобто лінія перетину дифракційного конуса з фотоплівкою, виникає внаслідок відбиття рентгенівського випромінювання від певної системи атомних площин.

Кут між твірною конуса і напрямком первинного рентгенівського променя θ , який називають бреггівським кутом, пов'язаний із міжплощинною відстанню відповідної системи атомних площин законом Брегга - Вульфа. Максимуми інтенсивності на рентгенограмі називають дифракційними лініями. Вони відповідають напрямкам, у яких спостерігається найбільш інтенсивне дифраговане випромінювання.

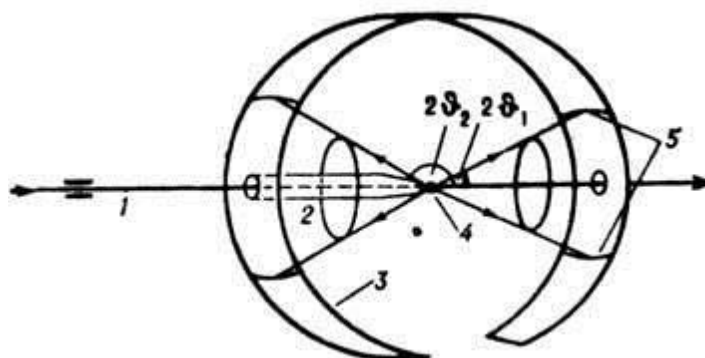


Рисунок 17 - Схема отримання рентгенограм за методом Дебая - Шеррера: 1 - первинний рентгенівський промінь; 2 - коліматор; 3 - рентгенівська плівка в циліндричній касеті; 4 - зразок, розташований на осі касети; 5 - дифракційні лінії, зафіксовані на рентгенівській плівці

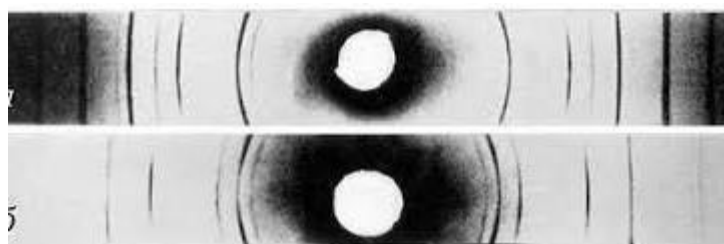


Рисунок 18 – Рентгенограми, які отримано за методом Дебая – Шеррера

Поширеним приладом для проведення рентгеноструктурного аналізу є дифрактометр із плоским кристалом, що обертається. Зокрема, дифрактометр моделі ДРОН-3 оснащений високовольтним джерелом живлення рентгенівської трубки з напругою до 50 кВ, а також дифрактометричним вузлом, до складу якого входять рентгенівська трубка в захисному кожусі, гоніометр і блок

детектування (рис. 20). Сучасні дифрактометри під'єднуються до контролера, інтегрованого з персональним комп'ютером. За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення здійснюється керування роботою приладу, реєстрація рентгенограм, збереження отриманих даних у пам'яті комп'ютера, а також їх подальша візуалізація на моніторі.

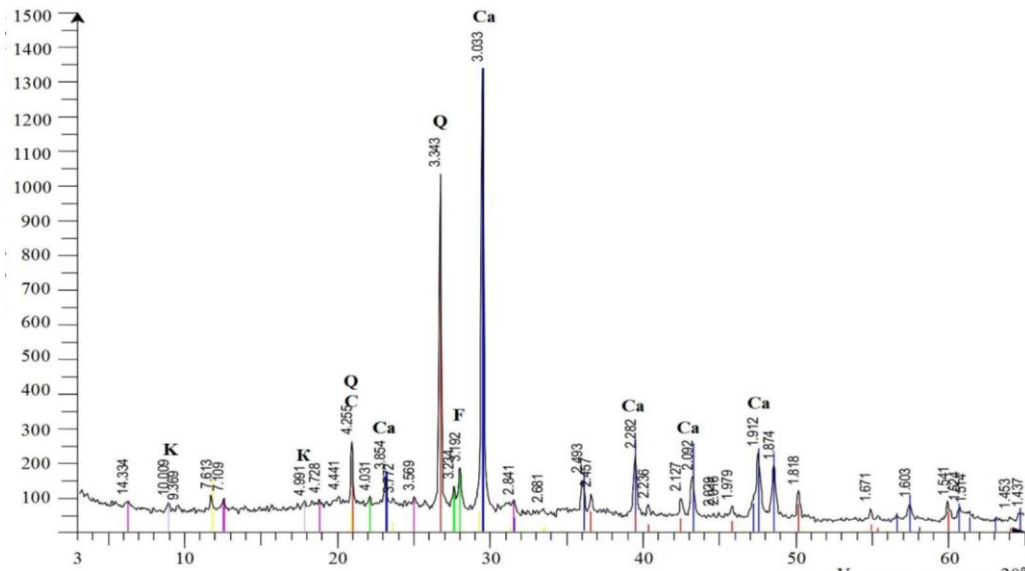


Рисунок 19 - Рентгенівська дифрактограма порошку металургійного шламу



Рисунок 20 - Рентгенівський дифрактометр призначений для рентгено-структурних досліджень кристалічних матеріалів

Метод рентгенівської дифрактометрії застосовують для визначення кристалічної структури металів і сплавів, мінералів, неорганічних сполук, полімерів та органічних матеріалів. Крім того, цей метод дає змогу оцінювати розміри кристалітів, їхню просторову орієнтацію, фазовий склад, ступінь кристалічності та інші структурні особливості досліджуваного зразка. На сучасних приладах реєстрація та комп'ютерна обробка дифрактограми зазвичай триває 10–20 хвилин, що робить метод зручним для оперативного дослідження фазового складу та структурного стану матеріалів.

Рентгенофазовий аналіз ґрунтується на тому, що кожна індивідуальна кристалічна сполука має характерну дифракційну картину, тобто специфічний набір дифракційних максимумів із певним положенням та відносною інтенсивністю. Саме ці параметри використовують для ідентифікації фазового складу матеріалу та встановлення наявності окремих кристалічних фаз у зразку. На дифрактограмах твердих розчинів, на відміну від дифрактограм чистих речовин, дифракційні максимуми можуть зміщуватися в напрямку більших або менших кутів дифракції. Напрямок і величина такого зміщення залежать від типу твердого розчину, а також від співвідношення атомних радіусів основного елемента та розчиненої речовини. У твердих розчинах заміщення це явище зумовлене зміною параметрів кристалічної ґратки внаслідок заміщення атомів базового елемента атомами іншого розміру.

Дифракційні спектри різних фаз систематизують у спеціальних базах еталонних дифракційних даних. Однією з найпоширеніших є картотека JCPDS - Joint Committee on Powder Diffraction Standards, створена Об'єднаним комітетом з порошкових дифракційних стандартів у США. Систематизація таких картотек ґрунтується на регулярному поповненні бази даних результатами дослідження еталонних зразків. Кожна картка містить комплекс відомостей, необхідних для ідентифікації кристалічної фази: значення міжплощинних відстаней, відносні інтенсивності дифракційних ліній, просторову групу, параметри елементарної комірки, метод отримання дифракційної картини, джерело наведених даних, хімічну формулу сполуки, а також окремі фізичні властивості досліджуваної речовини.

6.2. Термічні методи аналізу

Діаграма стану - це графічне зображення, яке характеризує фазовий склад сплавів певної системи залежно від температури та хімічного складу. Для двокомпонентних сплавів діаграма стану має вигляд графіка, на осі ординат якого відкладають температуру, а на осі абсцис - концентрацію компонентів сплаву. Така діаграма є своєрідною «картою», що дає змогу прогнозувати, які фази будуть наявні у структурі сплаву певного складу за відповідних температурних умов.

Інформація, отримана з діаграм стану, має важливе практичне значення. Її використовують для визначення температури заливання розплавлених сплавів у ливарні форми під час виготовлення виливків, вибору режимів нагрівання сплавів перед обробкою тиском, а також для встановлення оптимальних режимів термічної обробки.

Діаграми стану будують на основі експериментальних даних, отриманих методом термічного аналізу. Будь-які структурні перетворення, що відбуваються в металах і сплавах, зокрема плавлення під час нагрівання, кристалізація під час охолодження або зміна кристалічної будови у твердому стані, супроводжуються тепловими ефектами. Під час охолодження зазвичай відбувається виділення теплоти, а під час нагрівання - її поглинання.

Методика термічного аналізу полягає в тому, що досліджуваний металевий матеріал спочатку розплавляють, а потім охолоджують із безперервною реєстрацією зміни температури зразка в часі. У результаті отримують термічні криві охолодження. Наявність температурної зупинки, тобто горизонтальної ділянки на кривій охолодження чистих металів, або зміна швидкості охолодження сплавів свідчить про перебіг у матеріалі певного фазового перетворення, що супроводжується тепловим ефектом.

Температури, які відповідають таким зупинкам або характерним змінам ходу кривих охолодження, називають критичними температурами. У чистих металах фазові та поліморфні перетворення відбуваються за сталої температури, тоді як

у сплавах такі процеси, як правило, проходять у певному температурному інтервалі.

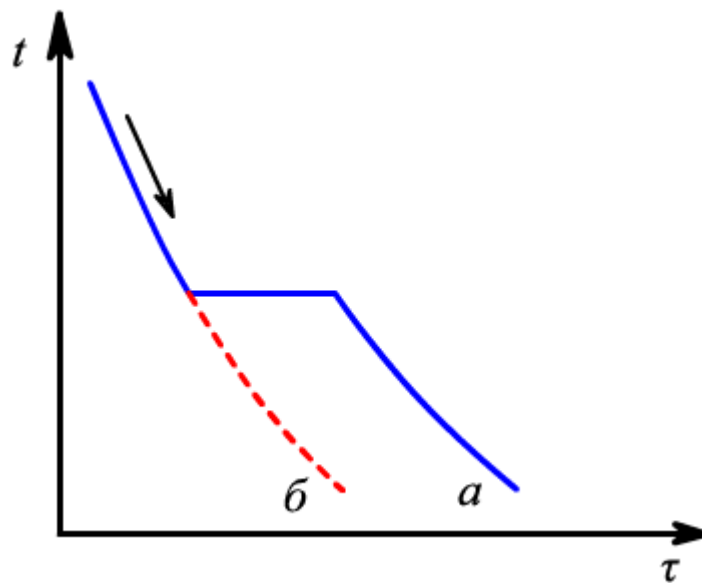


Рисунок 21- Криві охолодження сплавів за наявності фазового перетворення (а) та за його відсутності (б).

Реєстрацію зміни температури сплаву в часі під час термічного аналізу здійснюють за допомогою термопар. Термопара - це датчик, що складається з двох провідників, виготовлених із різнорідних металів або сплавів. З одного боку їхні кінці з'єднують, зазвичай шляхом зварювання, утворюючи робочий спай, який розміщують у зоні вимірювання температури. Інші кінці термопари під'єднують до вимірювального приладу, наприклад мілівольметра (рис. 22).

Принцип дії термопари ґрунтується на виникненні термоелектрорушійної сили внаслідок різниці температур між робочим спаєм і вільними кінцями термопари. Величина цієї електрорушійної сили залежить від температури робочого спаю, що дає змогу визначати температуру досліджуваного сплаву під час його нагрівання або охолодження.

Побудова діаграм стану ґрунтується на експериментальному отриманні серії термічних кривих охолодження сплавів із різним вмістом компонентів. За цими кривими визначають критичні температури, за яких відбуваються фазові перетворення. Отримані значення наносять на діаграму стану, де кожна лінія є геометричним місцем точок, що відповідають зміні фазового стану сплаву.

Температуру початку кристалізації сплаву називають температурою ліквідусу, або точкою ліквідусу, від лат. *liquidus* - рідкий. Температуру завершення кристалізації називають температурою солідусу, або точкою солідусу, від лат. *solidus* - твердий. Лінія ліквідусу відокремлює область рідкого стану від двофазної області, а лінія солідусу - двофазну область від області повністю твердого стану сплаву.

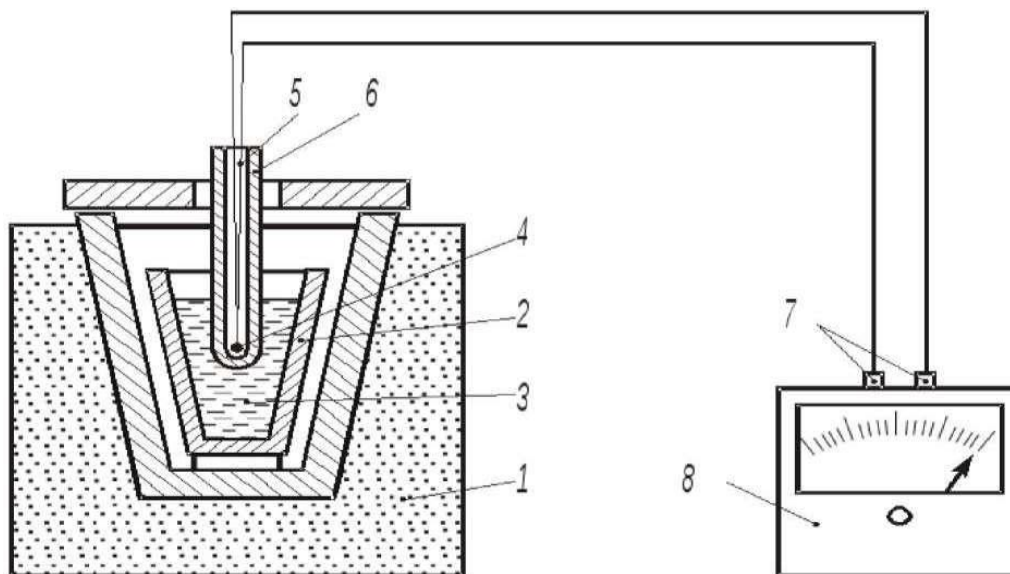


Рисунок 22. Схема установки для вимірювання температури металевого матеріалу в процесі проведення термічного аналізу: 1 - піч; 2 - тигель; 3 - розплавлений метал; 4 - спай термопари; 5 - термопара; 6 - кварцовий вогнетривкий захисний ковпачок; 7 - клемми вимірювального приладу; 8 - мілівольтметр

Метод диференціального термічного аналізу ґрунтується на порівнянні термічної поведінки досліджуваного зразка та термічно інертної еталонної речовини. Як еталон застосовують матеріал, який у заданому температурному інтервалі не зазнає фазових або хімічних перетворень, а отже, не супроводжується виділенням чи поглинанням теплоти. Під час проведення дослідження зразок і еталон одночасно нагрівають або охолоджують зі сталою швидкістю. Один спай диференційної термопари розміщують у досліджуваній речовині, а другий - в еталоні. У процесі нагрівання або охолодження реєструють різницю температур між зразком і еталоном, яка виникає у разі перебігу в

досліджуваному матеріалі фазових переходів, хімічних реакцій або інших теплових ефектів.

Якщо в зразку відбувається ендотермічний процес, наприклад плавлення або розкладання з поглинанням теплоти, його температура тимчасово відстає від температури еталона. У разі екзотермічного процесу, навпаки, температура зразка стає вищою за температуру еталона внаслідок виділення теплоти. Такі відхилення фіксуються на кривій диференціального термічного аналізу у вигляді максимумів або мінімумів, положення яких відповідає температурам відповідних перетворень.

Диференційна термопара реєструє різницю температур між ними, яка визначається як:

$$\Delta T = T_s - T_r,$$

де T_s - температура досліджуваного зразка, T_r - температура еталона. Реєстрованим параметром у методі диференціального термічного аналізу є різниця температур ΔT , яку подають як функцію температури еталона: $\Delta T(T)$. Така залежність відображається у вигляді диференціальної термограми, як показано на рис. 23.

Під час нагрівання в термопарах виникають електрорушійні сили, спрямовані назустріч одна одній. Якщо досліджуваний зразок і еталон перебувають в однакових термічних умовах, а в досліджуваній речовині не відбуваються процеси, що супроводжуються виділенням або поглинанням теплоти, ці електрорушійні сили взаємно компенсуються. Унаслідок цього струм у колі диференційного вимірювального приладу відсутній. Одночасно інший прилад реєструє температуру еталона.

За відсутності фазових перетворень або інших теплових ефектів у досліджуваному зразку його температура змінюється синхронно з температурою еталонної речовини. Тому різниця температур між зразком і еталонном не виникає, а крива диференційного термічного аналізу залишається без виражених відхилень.

У такому разі різниця температур дорівнює нулю або залишається сталою, а крива $\Delta T(T)$ має вигляд прямої лінії, паралельної осі абсцис. Цю ділянку називають базовою лінією.

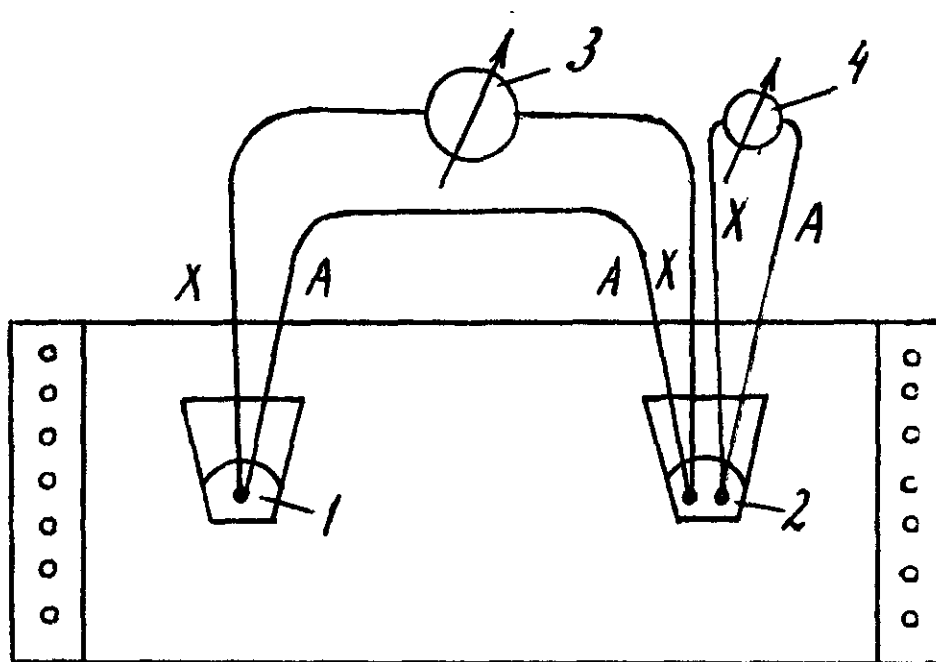


Рисунок 23 - Схема методу диференціального термічного аналізу: 1 - досліджуваний зразок, 2 – еталон; 3 - вимірювальний прилад диференціального термічного аналізу; 4 – прилад, який вимірює температуру еталона

Загалом диференціальна термограма, отримана методом диференціального термічного аналізу, складається з базових ділянок, які відповідають відсутності теплових ефектів, та піків, що відображають фазові або хімічні перетворення в досліджуваній речовині. На рис. 24 прямолінійні ділянки **oa**, **ca** і **cd** відповідають температурним інтервалам, у яких у зразку не відбуваються процеси, пов'язані з виділенням або поглинанням теплоти. У цих ділянках температура досліджуваного зразка змінюється синхронно з температурою еталона, тому різниця температур між ними є сталою або близькою до нуля.

Коли в досліджуваному матеріалі починається фізико-хімічний процес, що супроводжується поглинанням або виділенням теплоти, температура зразка відхиляється від температури еталона. Унаслідок цього на диференційній кривій формується пік. Ендотермічні процеси, пов'язані з поглинанням теплоти, зумовлюють зниження температури зразка відносно еталона, тоді як

екзотермічні процеси, що супроводжуються виділенням теплоти, спричиняють її підвищення.

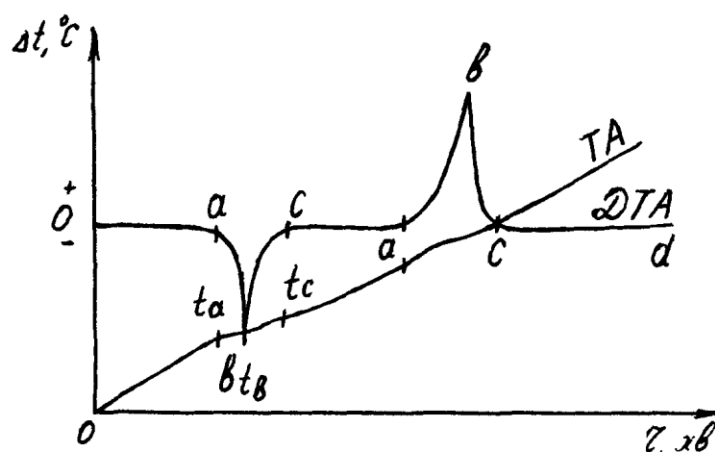


Рисунок 24 - Термограма диференціального термічного аналізу

Сукупність методів вимірювання теплового розширення тіл називають дилатометрією. Під час підвищення або зниження температури відбувається зміна об'єму та лінійних розмірів тіла. Дилатометричний метод ґрунтується на реєстрації розмірних змін, що виникають у зразках досліджуваних матеріалів у процесі їх нагрівання, охолодження або витримки за сталої температури.

У практичних умовах найчастіше визначають не безпосередню зміну об'єму, а зміну довжини зразка. Основною метою дилатометричних досліджень є визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення, встановлення критичних температур фазових перетворень, а також вивчення структурних змін у металах, сплавах, полімерах та інших матеріалах.

Зміна розмірів зразка може мати різну природу. З одного боку, вона може бути зворотною і зумовленою лише температурним розширенням або стисканням матеріалу. З іншого боку, розміри зразка можуть змінюватися стрибкоподібно або з відхиленням від закономірного перебігу теплового розширення внаслідок внутрішніх фазових чи структурних перетворень. Саме ці особливості використовують для дослідження процесів, пов'язаних із поліморфними перетвореннями, алотропними змінами, розпадом пересичених твердих розчинів, графітизацією чавуну, рекристалізацією матеріалів, відпуском сталі, а також ізотермічним розпадом аустеніту.

Для проведення дилатометричних досліджень застосовують спеціальні прилади - дилатометри. Вони призначені для вимірювання та реєстрації зміни довжини зразка під час його нагрівання, охолодження або ізотермічної витримки. Конструктивно дилатометр складається з вимірювального елемента, який фіксує зміну довжини зразка Δl , та елемента, що забезпечує запис або візуальне спостереження отриманих показників.

Перед початком вимірювання зразок розміщують в утримувачі та притискають до нього штовхачем із заданим зусиллям. У процесі нагрівання або охолодження зміна довжини зразка передається на вимірювальну систему приладу. Отримані дані реєструють у вигляді залежності видовження зразка від температури. За відсутності внутрішніх перетворень така залежність має плавний характер. Однак у разі наближення до температури фазового переходу, алотропного перетворення або зміни магнітного стану матеріалу на дилатометричній кривій з'являються характерні відхилення від плавного перебігу теплового розширення.

Перші дилатометри були механічними приладами, у яких зміни довжини зразка визначали за допомогою системи дзеркал і світлових променів. У сучасних дилатометрах застосовують точніші вимірювальні системи, що забезпечують автоматичну реєстрацію розмірних змін зразка.

У сучасних конструкціях дилатометрів зразок зазвичай розміщують у кварцовій трубці із запаяним кінцем, закріпленій у корпусі приладу (рис.25 - 26). Зміна довжини зразка передається через кварцовий стрижень-штовхач до вимірювальної головки. Система переміщення, з'єднана зі штовхачем, реєструє зміну довжини зразка під час нагрівання, охолодження або витримки в ізотермічних умовах. Переміщення правого торця стрижня 3, відповідно до конструкції датчика, дорівнює різниці між лінійним розширенням досліджуваного зразка та кварцової трубки на ділянці, що відповідає довжині зразка.

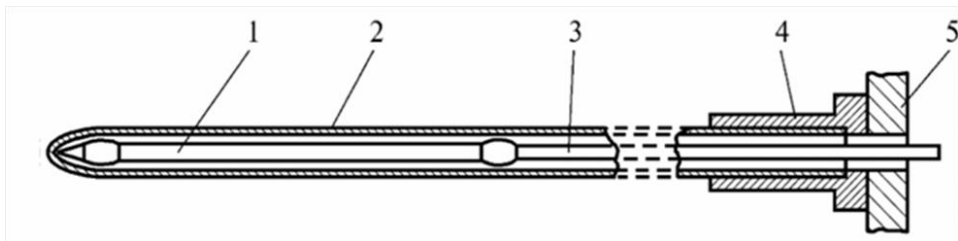


Рисунок 25 - Дилатометричний датчик: 1 - зразок, 2, 3 - кварцові трубки і стрижень (штовхач), 4- сполучна муфта, 5 - корпус дилатометра

Оскільки трубка і стрижень виготовлені з одного матеріалу, їхнє власне теплове розширення на ділянках поза межами довжини досліджуваного зразка взаємно компенсується. Використання кварцу для виготовлення елементів дилатометричного датчика зумовлене його низьким коефіцієнтом лінійного теплового розширення, що забезпечує високу точність вимірювання змін розмірів зразка. Водночас застосування кварцових елементів має певні температурні обмеження. За температури близько $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ у кварці відбувається поліморфне перетворення, що може впливати на стабільність його фізичних властивостей. Тому використання кварцу в конструкції дилатометрів зазвичай обмежується температурним інтервалом приблизно до $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Рисунок 26 - Дилатометр з горизонтальним штовхачем

Для точнішого виявлення навіть незначних лінійних змін, зумовлених фазовими перетвореннями, часто застосовують дилатометри, що працюють за диференційною схемою. У таких приладах реєструють різницю між видовженням досліджуваного зразка та еталона. Отже, зміна довжини зразка

порівнюється зі зміною довжини еталонного матеріалу, що дає змогу підвищити чутливість методу та зменшити вплив сторонніх температурних факторів.

Еталон виготовляють із матеріалу, який не зазнає фазових перетворень у досліджуваному температурному інтервалі та має відому температурну залежність коефіцієнта лінійного теплового розширення. Бажано, щоб ця характеристика була близькою до відповідного показника досліджуваного зразка. Крім того, еталонний матеріал повинен зберігати стабільність властивостей при багаторазовому використанні, бути жаростійким і стійким до окиснення за високих температур. Найпоширенішими є еталони з нікелевого сплаву «пірос», до складу якого входять 82 % Ni, 7 % Cr, 5 % W, 3 % Mn і 3 % Fe. Лінійне розширення та стискання піросу під час нагрівання й охолодження є практично оборотними.

6.3. Дослідження структури металів і сплавів

Структурою металевих матеріалів називають його внутрішню будову, що характеризується складом, формою, розмірами та взаємним розташуванням зерен, фаз і структурних складових. Структура, поряд із хімічним складом, визначає комплекс фізико-механічних, технологічних та експлуатаційних властивостей металів і сплавів. Зокрема, у багатьох металевих матеріалах зменшення розміру зерна сприяє підвищенню міцності, твердості та опору руйнуванню. Тому встановлення взаємозв'язку між мікроструктурою матеріалу та його властивостями має важливе значення для розроблення, виробництва й контролю якості металевих виробів.

Металогія - це науково-практична дисципліна, що вивчає структурні особливості металів і сплавів. Предметом металогічного аналізу є дослідження просторового розподілу зерен, фаз, структурних складових, неметалевих включень, дефектів та інших елементів внутрішньої будови матеріалу. Якісні методи металогічного дослідження дають змогу визначати тип, форму, розміри та взаємне розташування виявлених фаз і структурних компонентів. Кількісна металогія, своєю чергою, спрямована на числову

оцінку параметрів структури за мікроскопічним зображенням, зокрема розміру зерна, об'ємної частки фаз, кількості включень, пористості та інших морфометричних характеристик.

Залежно від масштабу спостереження розрізняють макроструктурний і мікроструктурний методи дослідження будови металів і сплавів.

Макроструктурний метод полягає у вивченні будови металу неозброєним оком або за допомогою лупи зі збільшенням приблизно у 5–30 разів. Макроаналіз дає змогу виявляти грубі дефекти внутрішньої будови матеріалу, зокрема усадкові раковини, шлакові включення, порушення суцільності металу, тріщини, пористість, ліквідаційну, хімічну та структурну неоднорідність зразків. Цей метод широко застосовують для попереднього оцінювання якості литих, кованих, зварних і деформованих металевих виробів.

6.3.1. Дослідження мікроструктури металевих матеріалів

Матеріалознавство - це галузь знань, що вивчає закономірності взаємозв'язку між хімічним складом, структурою матеріалів та їхніми функціональними властивостями. Такі знання є основою для вдосконалення традиційних металевих матеріалів і створення нових класів конструкційних та функціональних матеріалів.

Одним із основних інструментальних методів, що застосовуються в металографії, є оптична мікроскопія. Її проводять двома основними способами: у прохідному та у відбитому світлі.

Мікроструктурний аналіз - це метод дослідження будови металів і сплавів за допомогою оптичних або електронних мікроскопів при збільшенні понад 50 разів. Мікроскопію у прохідному світлі застосовують для дослідження тонких напівпрозорих зразків. Цей метод використовують, зокрема, у петрографічному аналізі для вивчення кристалічного складу керамічних матеріалів, зерна яких мають різні оптичні властивості.

Мікроскопія у відбитому світлі передбачає візуальне дослідження поверхні спеціально підготовлених, шліфованих і полірованих зразків при значному збільшенні. Саме цей спосіб є основним у металографічному аналізі

металів і сплавів, оскільки більшість металевих матеріалів є непрозорими для видимого світла.

Основний принцип металографічного дослідження полягає у вивченні спеціально підготовленого зразка, який попередньо шліфують, полірують і, за потреби, протравлюють хімічними реактивами. Після цього виконують мікроскопічне спостереження різних ділянок поверхні зразка при різних збільшеннях, фіксують отримані зображення та порівнюють їх з еталонними мікрофотографіями або типовими структурними ознаками.

Мікроструктурний аналіз є базовим методом дослідження металевих матеріалів і зазвичай розглядається як перший етап їхнього комплексного аналізу. Його застосовують для визначення форми, розмірів і взаємного розташування кристалічних зерен, з яких складається сплав; оцінювання змін внутрішньої будови металу після термічного, хіміко-термічного або механічного оброблення; виявлення мікротріщин, пор, корозійних уражень, неметалевих включень та інших дефектів.

Важливою умовою достовірності металографічного дослідження є правильна підготовка зразка. Структуру металевих матеріалів вивчають на поверхні спеціально підготовлених зразків, які називають мікрошліфами. Зразок вирізають із тієї ділянки заготовки або виробу, яка є найбільш інформативною для розв'язання конкретного завдання дослідження. Після шліфування і полірування поверхню мікрошліфа протравлюють спеціальними хімічними реактивами. Їхня дія ґрунтується на здатності по-різному розчиняти або забарвлювати окремі структурні складові металу, а також виявляти мікропори, тріщини, корозійні шари та інші дефекти. Підготовка зразка до металографічного аналізу включає кілька основних етапів.

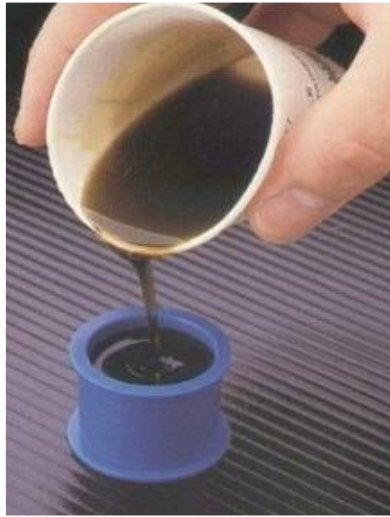
Етап 1. Відбір і вирізання зразка. Відбір зразків має вирішальне значення для отримання достовірних результатів металографічного дослідження. Зразок повинен бути репрезентативним для досліджуваної ділянки матеріалу. Важливим є також правильний вибір площини, у якій буде виготовлено мікрошліф, оскільки від цього залежить повнота інформації про структуру матеріалу.

Після вибору необхідної ділянки з неї вирізають темплет - пластинку певної форми та товщини, призначену для подальшої підготовки мікрошліфа. У дослідницьких лабораторіях для вирізання темплетів використовують відрізні машини з абразивними кругами. Такі машини, як правило, оснащені системою охолодження зони різання водою, тримачами зразків і механізмами регулювання зусилля, що прикладається до різального інструмента. Охолодження під час різання необхідне для запобігання перегріванню зразка, яке може спричинити зміну його мікроструктури.

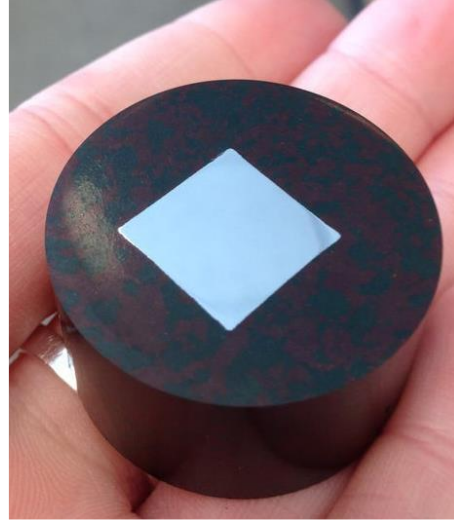
Етап 2. Закріплення темплету в оправці. Для зручності виготовлення мікрошліфа темплету фіксують у механічних затискачах або заливають у спеціальних формах - оправках - термореактивними смолами. Ця операція забезпечує надійне закріплення зразка в потрібній площині, збереження плоскопаралельності його поверхонь і запобігання заокругленню країв під час шліфування та полірування. Крім того, заливання темплету в оправку дає змогу уніфікувати форму зразка для автоматизованої пробопідготовки, полегшити його маркування та знизити ризик травмування під час ручного шліфування і полірування.

Підготовлені форми заповнюють холодною монтажною епоксидною або акриловою смолою, яка після заливання незворотно твердне на повітрі. Епоксидні смоли добре зчіплюються з поверхнею зразка та характеризуються незначною усадкою під час затвердіння. Для ідентифікації зразків у верхній частині оправки, під тонким шаром смоли, розміщують паперову етикетку із зазначенням номера або іншого маркування. Це дає змогу зберігати правильну ідентифікацію зразків на всіх наступних етапах оброблення та аналізу.

Етап 3. Шліфування та полірування мікрошліфа. Виготовлення шліфа починають із вирівнювання поверхні зразка на шліфувальному верстаті. Формування дзеркальної поверхні темплету досягається шляхом послідовного шліфування та полірування з поступовим зменшенням розміру абразивних частинок. Риски, що залишаються після завершального етапу шліфування, усувають під час полірування.



а)



б)

Рисунок 27 - Процес заливання темплета у формочці рідкою термореактивною смолою: а - заливання зразка; б - готовий мікрошліф

Сучасні шліфувально-полірувальні машини оснащують плоскими обертовими кругами, на яких для шліфування закріплюють абразивний папір різного ступеня зернистості. Номери шліфувального паперу, наприклад 120–600, характеризують розмір зерен абразивного матеріалу, нанесеного на паперову або тканинну основу.

Обробку зразка розпочинають із використання грубішого абразиву. На кожному наступному етапі шліфування проводять доти, доки повністю не зникнуть подряпини, утворені під час попередньої операції. Перед переходом до паперу з дрібнішим абразивом поверхню зразка ретельно очищують від залишків попереднього абразивного матеріалу, оскільки їх наявність може спричинити появу нових дефектів. Зазвичай шліфування виконують послідовно із застосуванням 4–5 номерів шліфувального паперу.

Найкращі результати полірування досягаються при використанні ротаційних полірувальних кругів з алмазним абразивом. Алмазні порошки зазвичай застосовують у вигляді паст у тубиках або суспензій на масляній основі, що постачаються в аерозольних балонах. Типовий діапазон розмірів частинок алмазного порошку для полірування мікрошліфів становить від 60 до 0,25 мкм. Полірування проводять із використанням кількох типів алмазної пасту з поступовим переходом від грубішого до тоншого абразиву.

Полірування здійснюють шляхом притискання зразка до обертової полірувальної тканини. Цей процес може виконуватися вручну або в автоматичному режимі з використанням спеціального тримача, який забезпечує фіксацію зразка та дає змогу регулювати силу притискання. На якісно відполірованій поверхні мікрошліфа під час мікроскопічного дослідження не повинно бути рисок, подряпин та інших механічних дефектів.



Рисунок 28. Шліфування темплета на шліфувально-полірувальній машині

Етап 4. Травлення мікрошліфа. Під час дослідження відполірованої поверхні мікрошліфа у світлому полі без попереднього травлення можна виявити лише окремі дефекти, зокрема тріщини, пори та неметалеві включення. Для виявлення мікроструктури металів і сплавів застосовують травлення.

Травлення - це обробка відполірованої поверхні мікрошліфа спеціальними реактивами на основі кислот, лугів або сольових розчинів. Така обробка дає змогу виявити та диференціювати структурні складові металевих сплавів. У процесі травлення різні фази та ділянки зерен по-різному взаємодіють із реактивом, що зумовлює неоднакове відбиття світла від їхньої поверхні. Завдяки цьому чіткіше візуалізуються межі зерен, фазові складові та локальні неоднорідності структури. Ділянки, які після травлення стають більш шорсткими або інтенсивніше розчиняються, під час дослідження у відбитому світлі виглядають темнішими.

Хімічне травлення виконують шляхом занурення зразка в реактив або протирання його поверхні тампоном, змоченим відповідним травильним розчином. Вибір реактиву, тривалість травлення та спосіб його нанесення

залежать від хімічного складу сплаву, його фазового стану та мети металографічного дослідження.

Відповідно до правил металографічного аналізу, перед травленням поверхню мікрошліфа необхідно попередньо дослідити в неперотравленому стані (рис. 63). Це пов'язано з тим, що під дією травильного реактиву окремі види включень можуть частково або повністю розчинитися, що ускладнює їх подальше виявлення та правильну інтерпретацію результатів дослідження.

Для зразків із конструкційних сталей одним із найпоширеніших травників є 3% розчин азотної кислоти в етиловому спирті. Поліровану поверхню мікрошліфа занурюють у реактив на кілька секунд - до появи рівномірного матового відтінку. Після цього мікрошліф промивають водою, обробляють етиловим спиртом і висушують, обережно притискаючи його до фільтрувального паперу.

Під час травлення межі зерен, у яких зазвичай зосереджена підвищена кількість домішок і дефектів кристалічної будови, розчиняються інтенсивніше, ніж внутрішні ділянки зерен (рис.29). Унаслідок цього межі зерен стають видимими під мікроскопом у вигляді тонкої темної сітки. В окремих випадках за умови застосування спеціальних реактивів можна отримати вибіркоче забарвлення різних структурних складових сплаву, що полегшує їх ідентифікацію під час мікроструктурного аналізу.

Для виявлення структури полірованої металевої поверхні також застосовують електролітичне травлення, яке проводиться шляхом диференційованого розчинення різних складових під дією електричного струму на занурений в електроліт зразок.

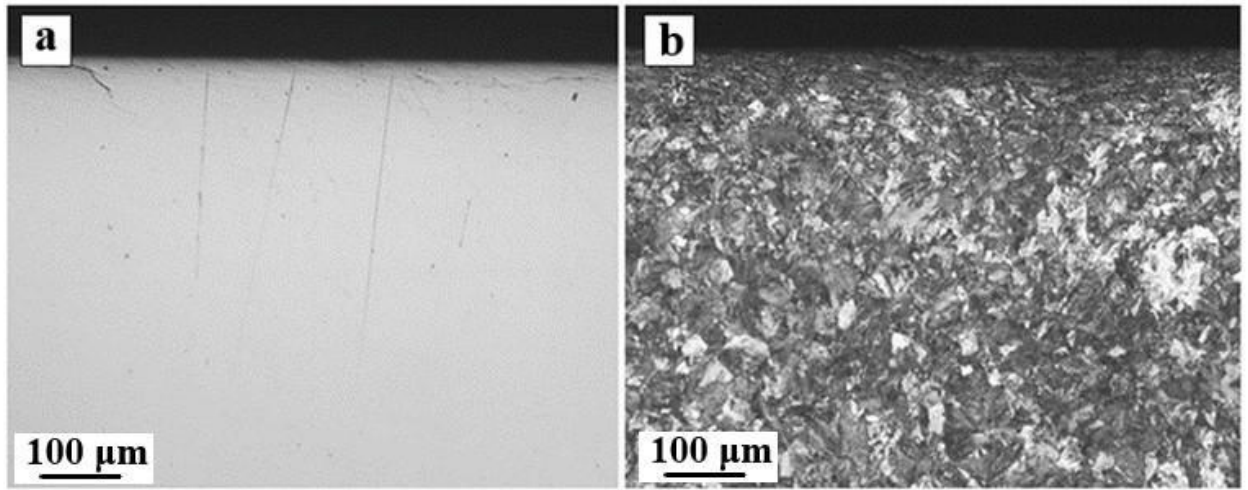


Рисунок 29 - Структура робочої поверхні сталевій заготовці: а - не протравлений мікрошліф; б - протравлений мікрошліф

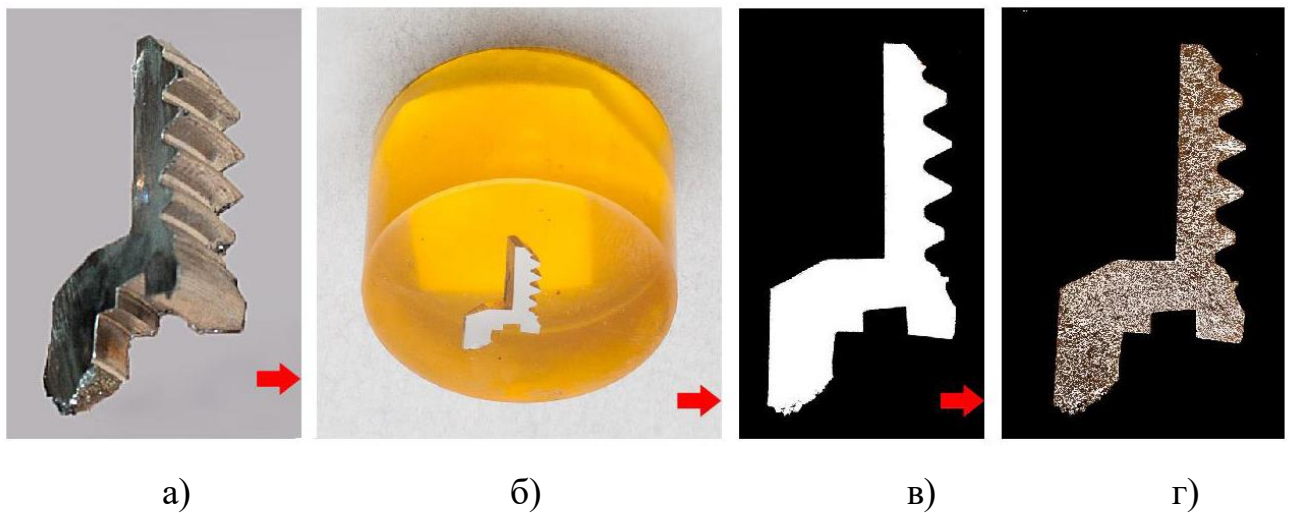


Рисунок 30. Послідовність виготовлення мікрошліфа:

а - темплет, вирізаний із досліджуваної деталі; б - мікрошліф, закріплений шляхом заливання у полімерну термореактивну смолу; в - мікроструктура непотравленого мікрошліфа; г - мікроструктура протравленого мікрошліфа.

Підготовлені до дослідження мікрошліфи потребують дбайливого зберігання, яке має запобігати потраплянню рідин на їхню поверхню, впливу агресивних корозійних середовищ, механічному пошкодженню та дії інших чинників, здатних змінити стан досліджуваної поверхні. Зберігати мікрошліфи доцільно в закритих ємностях за стабільних температурно-вологісних умов.

Для тривалого зберігання виготовлених мікрошліфів у сухому середовищі застосовують герметичні скляні ємності – екзикатори (рис.31). Герметичність екзикатора забезпечується щільним приляганням кришки до корпусу, а також

нанесенням силіконового мастила на контактну поверхню між ними. На дні ексикатора за потреби розміщують речовини-осушувачі, які поглинають вологу з повітря та підтримують суху атмосферу, необхідну для збереження стану поверхні мікрошліфів.



Рисунок 31 - Лабораторний скляний ексикатор для зберігання мікрошліфів

Мікроструктуру металів і сплавів досліджують за допомогою оптичних металографічних мікроскопів у відбитому світлі за збільшення від 50 до 1000 разів. Конструкція металографічного мікроскопа забезпечує спрямування світлового потоку через об'єktiv на поверхню підготовленого мікрошліфа. Світло, відбите від досліджуваної поверхні, проходить у зворотному напрямку через об'єktiv до окуляра, що дає змогу спостерігати мікроструктуру матеріалу.

В інверсійних металографічних мікроскопах об'єktiv розташований під мікрошліфом, а зразок установлюють на предметному столику досліджуваною поверхнею донизу. Така конструктивна схема значною мірою усуває обмеження, пов'язані з формою, масою та розмірами зразка. Це особливо важливо під час дослідження масивних або нестандартних металевих виробів.

Мікроскоп моделі ММВ виробництва фірми «МІКРОТЕХ» Україна є професійним інверсійним металографічним мікроскопом, призначеним для виявлення, ідентифікації та аналізу структури різних металів і сплавів (рис. 32). Стандартний діапазон збільшення цього мікроскопа становить від 50 до 500 разів.

Роздільна здатність оптичних мікроскопів обмежується явищем дифракції світла. У зв'язку з цим оптичні прилади не можуть чітко розрізнити дві

точки, відстань між якими є меншою приблизно за половину довжини хвилі видимого світла. Тому практичне збільшення оптичних мікроскопів обмежується приблизно $1500\times$, а їхня гранична роздільна здатність становить близько $0,2$ мкм. Чим вища роздільна здатність мікроскопа, тим чіткішим і детальнішим є отримане зображення мікроструктури.



Рисунок 32 - Металографічний мікроскоп моделі ММВ

Металографічний мікроскоп складається з трьох основних систем: оптичної, освітлювальної та механічної. Механічна система забезпечує фіксацію, переміщення та точне наведення зразка у фокус. До її складу входять основа, корпус, тубус, револьверна головка для швидкої зміни об'єктивів залежно від необхідного збільшення, макрометричний і мікрометричний гвинти для грубого та точного регулювання різкості зображення, а також предметний столик із фіксаторами для закріплення досліджуваних зразків.

Освітлювальна система металографічного мікроскопа призначена для формування та спрямування світлового потоку на поверхню мікрошліфа. До її складу входять джерело світла, система лінз, світлофільтри та діафрагми, які дають змогу регулювати інтенсивність, напрям і спектральний склад освітлення відповідно до умов дослідження.

Оптична система мікроскопа забезпечує формування збільшеного зображення мікроструктури зразка. Основними її елементами є об'єктиви, окуляри та допоміжні оптичні компоненти. У більшості сучасних металографічних мікроскопів застосовують змінні об'єктиви, які добирають з урахуванням

необхідного збільшення, роздільної здатності та характеру досліджуваної структури.

Металографічний мікроскоп моделі ММВ оснащений тринокулярною насадкою, револьверним механізмом на чотири об'єктиви зі збільшенням 5×, 10×, 20× і 50×, двома окулярами, поляризатором та набором світлофільтрів. Така комплектація дає змогу проводити візуальне спостереження мікроструктури, виконувати фотодокументування результатів дослідження та застосовувати різні режими освітлення.

У випадках, коли необхідно визначити абсолютні розміри структурних складових, зерен або мікроскопічних дефектів, використовують окуляр-мікрометр зі шкалою, нанесеною в площині зображення (рис. 33). Окуляр-мікрометр застосовують для мікрометричних вимірювань, зокрема для визначення довжини та ширини частинок, розміру зерна, товщини поверхневого шару після азотування або цементації, а також глибини й розмірів окремих мікрodefektів. Для отримання достовірних результатів шкалу окуляра-мікрометра попередньо калібрують за допомогою об'єкт-мікрометра для кожного використовуваного збільшення.



Рисунок 33 - Окуляр - мікрометр: зовнішній вигляд (а); вимірювальна шкала (б)

Зображення мікроструктури досліджуваного об'єкта, отримане за допомогою мікроскопа, може бути зафіксоване дзеркальною фотокамерою або цифровою камерою із застосуванням спеціального адаптера, встановленого у

вертикальний тубус тринокулярної насадки. Крім того, зображення, що спостерігається в мікроскопі, може передаватися через змінні відеоадаптери на відеокамеру для подальшої візуалізації на екрані монітора та комп'ютерного аналізу.

Для калібрування системи аналізу зображень під час досліджень із використанням оптичного мікроскопа застосовують об'єкт-мікрометр (рис.34). Він являє собою металеву пластину розміром із предметне скло з отвором у центральній частині, в якому розміщена скляна вставка. На центральну ділянку вставки нанесено шкалу довжиною 1 мм, поділену на 100 рівних частин. Відстань між сусідніми поділками становить 10 мкм.

Після фотографування шкали цифровою камерою отримують зображення поділок об'єкт-мікрометра для кожного фактичного збільшення мікроскопа. Таке калібрування дає змогу точно визначити масштаб зображення та встановити відповідність між розмірами об'єкта на мікрофотографії і його реальними розмірами.

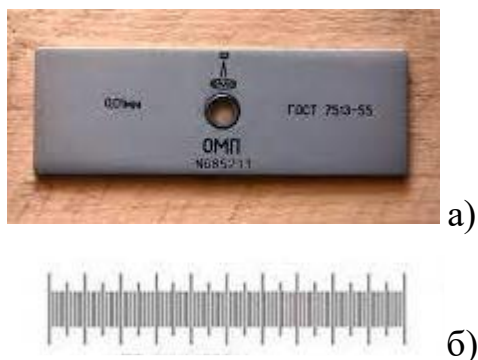


Рис. 34. Об'єкт-мікрометр зовнішній вигляд - (а); зображення шкали - (б)

Проведення металографічного дослідження структури матеріалу здійснюють у певній послідовності, що забезпечує комплексну оцінку його мікроструктурних особливостей.

1. Визначають вид, форму та тип зерен, наявних у структурі досліджуваного матеріалу.
2. Ідентифікують фази, що входять до складу мікроструктури матеріалу.
3. Оцінюють ступінь структурної однорідності та виявляють можливі відмінності між окремими ділянками зразка.

4. Визначають розмір зерен, а також аналізують особливості поверхонь, що зазнали деформації або термічної обробки. Розмір зерен встановлюють із використанням окуляр-мікрометрів або інших вимірювальних засобів мікроскопічного аналізу.
5. Досліджують розподіл неметалевих включень, зокрема шлакових, а також виявляють наявність швів, пористості та інших структурних дефектів.
6. Встановлюють наявність поверхневого покриття, наприклад позолоти, а також оцінюють його суцільність і товщину.
7. Аналізують характер поширення корозійних уражень у структурі матеріалу, визначають наявність і товщину корозійних шарів, а також ступінь збереження металевої основи та залишків металевих зерен.
8. Досліджують характер потовщень на межах зерен і виявляють можливе виділення вторинних фаз уздовж меж зерен.
9. Виявляють лінії деформації всередині зерен, що можуть свідчити про механічний вплив, пластичну деформацію або попередню технологічну обробку матеріалу.
10. У зразках ливарних сплавів визначають наявність дендритної будови та, за потреби, встановлюють відстань між осями дендритів.
11. Встановлюють наявність міжкристалічного або транскристалічного розтріскування зразка, що має важливе значення для оцінювання характеру руйнування матеріалу.

Для фіксації та подальшого аналізу зображень мікроструктури традиційно використовували фотокамери з фотопластинками або фотоплівкою, а також відеокамери, які приєднують до оптичної системи мікроскопа.

Аналіз складних зернистих мікроструктур потребує участі кваліфікованих фахівців у галузі матеріалознавства та фізики твердого тіла. Створення автоматизованих інтелектуальних систем прийняття рішень, що функціонують із використанням математичних методів обробки даних, дає змогу зменшити вплив людського фактора під час аналізу, скоротити тривалість дослідження, а також підвищити точність і достовірність контролю відповідності мікроструктури вимогам чинних стандартів.

Розвиток сучасних засобів реєстрації інформації забезпечив широке впровадження цифрових методів отримання зображень та їх подальшої комп'ютерної обробки. У відеонасадках, які встановлюють замість окуляра в оптичній системі мікроскопа, як світлочутливий елемент використовують ПЗЗ-матрицю - прилад із зарядовим зв'язком, англ. Charge-Coupled Device, CCD. ПЗЗ-матриця є спеціалізованою аналоговою інтегральною мікросхемою, що складається зі світлочутливих фотодіодів і призначена для перетворення світлової енергії фотонів на електричний заряд. Сигнал від відеонасадки передається до комп'ютера, де обробляється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Використання спеціалізованих комп'ютерних програм дає змогу:

1. Виконувати попередню обробку зображень, приводячи їх до вигляду, придатного для автоматизованого аналізу, а також здійснювати калібрування та визначення масштабу зображення.
2. Визначати лінійні розміри об'єктів, їхній периметр і площу для масиву елементів на зображенні, а також формувати статистичні дані щодо цих параметрів.
3. Встановлювати розміри великої кількості об'єктів, виділених у напівавтоматичному режимі, з подальшим отриманням статистичних характеристик.
4. Підраховувати кількість зерен у сталях і сплавах та визначати їхні розміри.
5. Проводити фазовий аналіз і встановлювати відсоткове співвідношення фаз у зразку, наприклад співвідношення фериту й перліту в сталі.
6. Оцінювати пористість матеріалу досліджуваного зразка.

Спеціалізовані комп'ютерні програми дають змогу швидко та якісно формувати панорамне зображення з окремих знімків мікроструктури (рис.35-36). Панорамні зображення дають можливість охопити великі ділянки мікроструктури, що особливо важливо у випадках, коли необхідно показати розподіл і розміри неметалевих включень, особливості макроструктури, зокрема транскристалізацію, градієнтні та шаруваті структури, а також суцільність поверхневого шару.

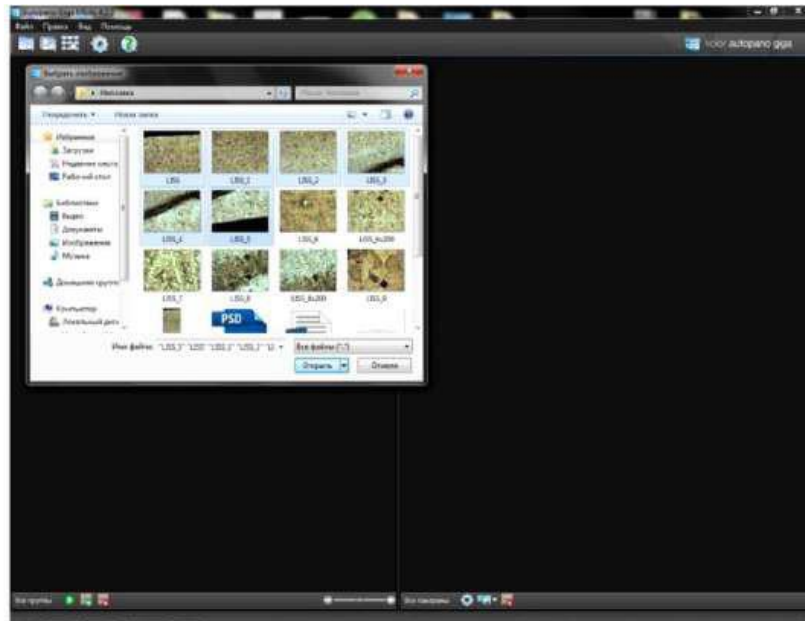


Рисунок 35 - Зображення мікроструктури на екрані комп'ютера

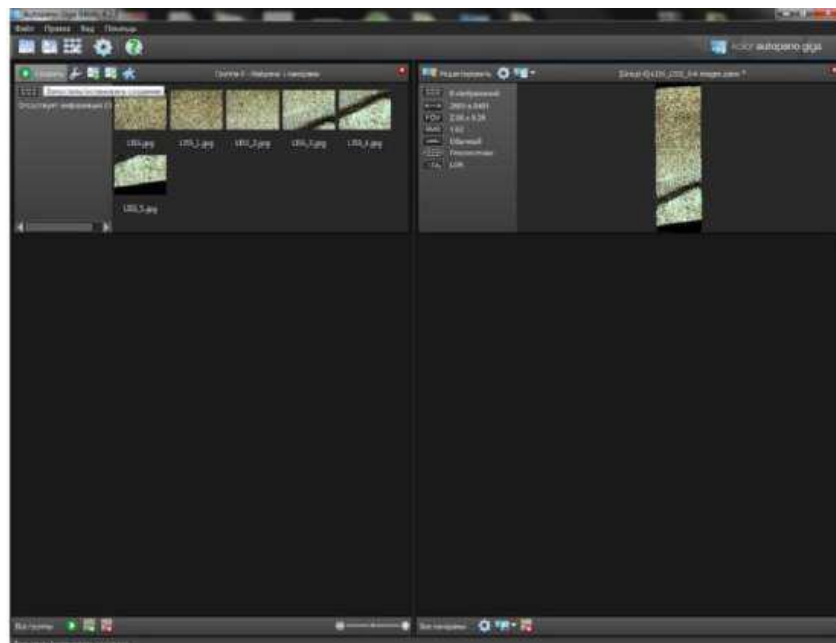


Рисунок 36 – Створення панорамного зображення на екрані комп'ютера шляхом об'єднання окремих фотографій мікроструктури

6.3.2. Металографічні дослідження у поляризованому світлі

У ряді випадків застосування хімічного травлення поверхні мікрошліфів є недостатнім для повної ідентифікації структурних складових матеріалу під час металографічного дослідження. Це, зокрема, спостерігається тоді, коли окремі фази є стійкими до дії травильних реактивів або мають слабкий контраст у світлопольному режимі. У таких випадках доцільно застосовувати мікроскопічне дослідження у відбитому поляризованому світлі. Цей метод є ефективним для

виявлення та ідентифікації у структурі металів і сплавів неметалевих фаз, яким властиві оптично анізотропні характеристики. Використання поляризованого світла також дає змогу підвищити контрастність і якість зображення, особливо під час аналізу матеріалів або структурних складових, для яких характерне подвійне променезаломлення.

У природному світлі коливання світлового вектора в будь-якій точці середовища відбуваються в різних напрямках. Світлову хвилю, у якій напрям коливань світлового вектора є впорядкованим, називають поляризованою. Поляризація світла - це впорядкування напрямку коливань вектора напруженості електричного поля світлової хвилі в площині, перпендикулярній до напрямку її поширення. Площину, у якій відбуваються коливання світлового вектора, називають площиною поляризації, або площиною коливань світлового вектора.

Плоскополяризоване світло можна отримати з природного світла за допомогою спеціальних оптичних елементів - поляризаторів. Поляризатор пропускає коливання світлового вектора, паралельні до його площини пропускання, і затримує коливання, перпендикулярні до цієї площини. Завдяки цьому в оптичній системі формується світловий пучок із визначеним напрямом коливань.

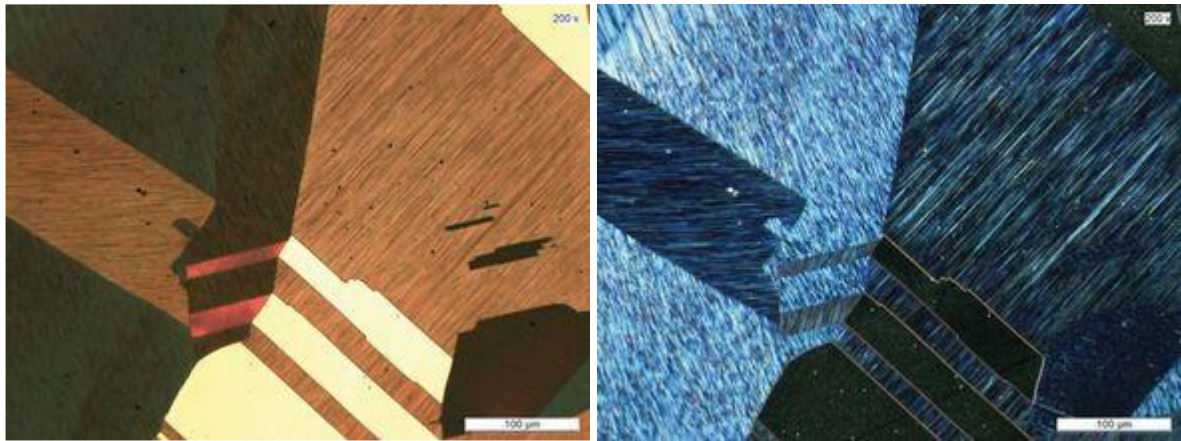
Мікроскопи, призначені для дослідження у відбитому поляризованому світлі, є стандартними металографічними мікроскопами, доповненими двома поляризаційними елементами: фільтром-поляризатором і фільтром-аналізатором. Зазвичай ці елементи виготовляють із матеріалів, здатних забезпечувати поляризацію світла.

Конструкція металографічного мікроскопа, пристосованого для роботи у поляризованому світлі, передбачає можливість введення та виведення поляризаційних фільтрів з оптичного шляху, а також обертання аналізатора в межах від 0 до 90° відносно площини поляризації поляризатора. За потреби поляризаційний блок вводять в оптичний шлях металографічного мікроскопа. Фільтр-поляризатор зазвичай розміщують у камері джерела світла. Плоскополяризоване світло, сформоване поляризатором, після відбиття від

поверхні мікрошліфа проходить через фільтр-аналізатор, який встановлюють між об'єктивом і окуляром.

Якщо досліджувана фаза є оптично ізотропною, то за відповідного взаємного положення поляризатора й аналізатора можна досягти майже повного поглинання світла. Якщо ж фаза є оптично анізотропною, то за схрещених поляризаційних фільтрів повного поглинання світла не відбувається: окремі кристали залишаються світлими або формують виразне контрастне зображення. За допомогою поляризованого світла можна досліджувати мікроструктуру анізотропних матеріалів і визначати розмір зерна навіть на нетравлених зразках. Анізотропні фази характеризуються зміною оптичних властивостей залежно від орієнтації падаючого світла відносно кристалографічних осей. Це полегшує ідентифікацію кристалографічних і морфологічних особливостей фаз під час металографічного аналізу. Забарвлення фаз, яке спостерігається у відбитому поляризованому світлі, визначається їхніми оптичними властивостями, зокрема показниками заломлення, ступенем анізотропії та характером взаємодії з поляризованим світлом.

Дослідження у поляризованому світлі суттєво спрощує ідентифікацію продуктів корозії. При світлопольному неполяризованому освітленні багато неметалевих включень і продуктів корозії спостерігаються переважно у вигляді ділянок, забарвлених у різні відтінки сірого кольору. Використання поляризованого освітлення при взаємному обертанні поляризатора й аналізатора дає змогу здійснювати кольорову диференціацію мінеральних фаз у корозійних шарах. Під час дослідження у поляризованому світлі металеві фази з оптично анізотропними властивостями у мікроструктурі сплавів можуть спричиняти характерні кольорові ефекти. До прикладів анізотропних металів належать сурма, олово та цинк. Крім того, анізотропні оптичні ефекти можуть проявлятися в ділянках деформаційних смуг, площин ковзання всередині зерен, а також у фазах бронз із високим вмістом олова (рис. 37). Дендритні структури, які мають переважну орієнтацію у напрямку росту, також можуть формувати ефекти світлотіні під час дослідження у поляризованому світлі.



а)

б)

Рис.37. Різниця в зображенні мікроструктури мідного сплаву у світлому полі після кольорового травлення (а) та у поляризованому світлі (б)

6.4. Електронна мікроскопія

Поряд зі світловою металографією, практичне збільшення якої зазвичай не перевищує 1200 разів, для детальнішого дослідження будови матеріалів дедалі ширше застосовують методи електронної мікроскопії. Електронні мікроскопи належать до найважливіших приладів сучасного матеріалознавства та фундаментальних досліджень структури речовини.

Основна відмінність електронного мікроскопа від оптичного полягає у природі випромінювання, яке використовується для формування зображення. В оптичному мікроскопі застосовують світлове випромінювання, тоді як в електронному мікроскопі - потік прискорених електронів. Завдяки значно меншій довжині хвилі електронів порівняно зі світловим випромінюванням електронна мікроскопія забезпечує істотно вищу роздільну здатність і дає змогу досліджувати мікро- та наноструктурні особливості матеріалів.

Методи електронної мікроскопії дають змогу виявляти особливості кристалічної будови матеріалів, характер їхнього руйнування, наявність мікроскопічних дефектів, структурних неоднорідностей, включень та інших елементів мікроструктури. За електронно-мікроскопічними зображеннями можна визначати розміри зерен, їхню морфологію, форму та характер меж між зернами, особливості перехідних зон, будову поверхні зламу, а також

топографію поверхні досліджуваного об'єкта. Одночасне вивчення мікроструктури, концентраційного розподілу хімічних елементів і окремих фізичних властивостей матеріалу дає змогу встановлювати взаємозв'язок між його хімічним складом, структурою та експлуатаційними характеристиками.

Електронні мікроскопи забезпечують можливість дослідження будови матеріалів при збільшеннях до 300 000 разів і більше з високою роздільною здатністю. У цих приладах як зондувальне випромінювання використовують потік електронів, довжина хвилі яких значно менша, ніж довжина хвилі світлового випромінювання. Наприклад, для електрона з енергією 50 еВ довжина хвилі становить приблизно 0,17 нм, що є однією з фізичних передумов високої роздільної здатності електронної мікроскопії.

Принцип дії електронних мікроскопів ґрунтується на взаємодії потоку прискорених електронів із речовиною досліджуваного зразка. Залежно від типу приладу та режиму дослідження зображення може формуватися електронами, що пройшли крізь об'єкт, електронами, відбитими від його поверхні, вторинними електронами, а також іншими сигналами, які виникають унаслідок взаємодії електронного пучка з матеріалом. До таких сигналів, зокрема, належить характеристичне рентгенівське випромінювання.

За характером дослідження об'єктів електронні мікроскопи поділяють на такі основні типи:

1. **Просвічувальні електронні мікроскопи**, у яких зображення формується електронами, що пройшли крізь тонкий досліджуваний об'єкт і потрапили на спеціальний екран або детектор.
2. **Сканувальні електронні мікроскопи**, у яких зображення формується внаслідок послідовного сканування поверхні зразка сфокусованим електронним пучком із подальшою реєстрацією вторинних або відбитих електронів.

6.4.1. Просвічувальна електронна мікроскопія

Просвічувальна, або трансмісійна, електронна мікроскопія ґрунтується на формуванні збільшеного зображення об'єкта за допомогою потоку електронів,

що проходять крізь досліджуваний зразок або його тонку репліку. На відміну від світлової мікроскопії, де зображення формується за участю світлового випромінювання, у просвічувальному електронному мікроскопі джерелом інформації є електронний пучок, траєкторія якого керується електромагнітними лінзами.

Просвічувальний електронний мікроскоп складається із системи формування стабільного потоку електронів, електронно-оптичної системи, системи реєстрації зображення, системи електроживлення та вакуумної системи. Джерелом електронів є електронна гармата, яка може бути термоемісійною або автоемісійною (рис.38). Електронно-оптична система містить комплекс електромагнітних лінз, призначених для зміни траєкторії руху електронів, їх фокусування та формування збільшеного зображення. Реєстрація зображення здійснюється за допомогою флуоресцентного екрана, фотокамери або цифрової камери. Для стабільного проходження електронного пучка в колоні мікроскопа підтримується високий вакуум, оскільки зіткнення електронів із молекулами повітря призводило б до їх розсіювання та погіршення якості зображення.

Електронна гармата є основним джерелом формування електронного пучка. Вона складається з катода, анода у вигляді диска з отвором і фокусувального електрода циліндричної форми. У термоемісійних джерелах як катод часто використовують вольфрамову нитку або кристал гексабориду лантану. Під час нагрівання катода до високої температури з його поверхні внаслідок термоелектронної емісії вивільняються електрони. Далі вони прискорюються електричним полем, створеним між катодом і анодом. Прискорювальна напруга в просвічувальних електронних мікроскопах зазвичай становить від 80 до 400 кВ, що забезпечує високу енергію електронів і можливість їх проходження крізь дуже тонкі об'єкти.

За допомогою конденсорних електромагнітних лінз електронний потік фокусується та спрямовується на досліджуваний об'єкт. Конденсорна система регулює інтенсивність, діаметр і збіжність електронного пучка. Зміна сили електричного струму, що проходить через обмотки електромагнітних лінз, змінює їхню фокусну відстань, унаслідок чого електронний пучок може

звужуватися або розширюватися. Сформований пучок електронів проходить крізь тонкий зразок або репліку, де частина електронів розсіюється пружно чи непружно залежно від локальної товщини, густини, хімічного складу та структурних особливостей матеріалу.

Електрони, що пройшли крізь досліджуваний об'єкт, надходять до об'єктивної лінзи, яка формує первинне збільшене зображення. Подальше збільшення здійснюється проміжними та проєкційними електромагнітними лінзами. У результаті на флуоресцентному екрані або цифровому детекторі формується збільшене дійсне зображення об'єкта. Світіння флуоресцентного екрана виникає під дією електронів, що потрапляють на його поверхню. Сучасні цифрові системи реєстрації дають змогу зберігати, обробляти, порівнювати та документувати електронно-мікроскопічні зображення з високою точністю.

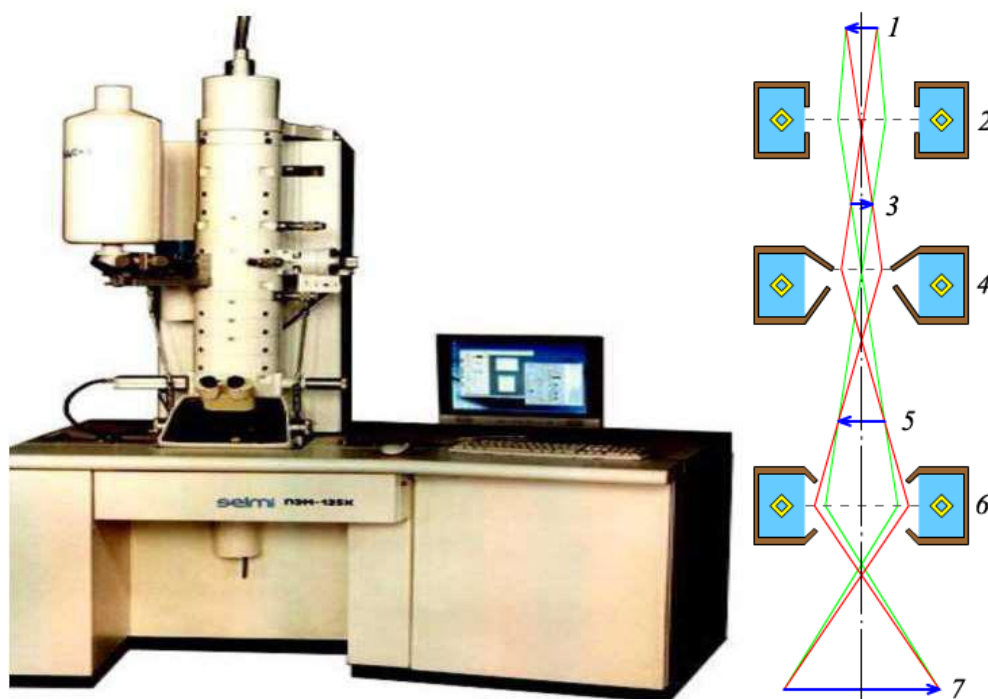


Рисунок 38 - Зовнішній вигляд (а) та схема роботи (б) просвічувального електронного мікроскопа: 1 - об'єкт дослідження; 2 - конденсорна лінза; 3 - оберт дослідження; 4 - об'єктивна лінза; 5 - проміжне зображення; 6 - проєкційна лінза; 7 - остаточне збільшене зображення

Безпосереднє дослідження структури металевого зразка шляхом просвічування електронним пучком у більшості випадків є неможливим. Це

зумовлено обмеженою проникною здатністю електронів у масивних металевих зразках. Для проходження електронного пучка об'єкт має бути надзвичайно тонким. Тому під час дослідження металевих матеріалів методом просвічувальної електронної мікроскопії часто застосовують непрямий спосіб дослідження - метод реплік.

Репліка - це тонка плівка завтовшки приблизно 0,01 мкм, яка відтворює мікрорельєф поверхні мікрошліфа або поверхні зламу зразка. Матеріал репліки має бути достатньо прозорим для електронного пучка і водночас здатним точно передавати особливості поверхні досліджуваного об'єкта. Для виготовлення реплік використовують попередньо підготовлені мікрошліфи, протравлені поверхні або свіжі поверхні зламу. Репліка фіксує субмікроскопічний рельєф поверхні, який під час проходження електронного пучка зумовлює локальні відмінності в розсіюванні електронів.

Під час електронно-мікроскопічного дослідження репліку просвічують електронним пучком. Ділянки різної товщини та щільності неоднаково взаємодіють з електронами, що забезпечує формування контрастного зображення. Аналіз такого зображення дає змогу отримати інформацію про геометрію поверхні мікрошліфа, характер зламу, особливості фазового складу, наявність дрібнодисперсних включень, дефектів та інших елементів тонкої будови матеріалу. Отже, метод реплік у просвічувальній електронній мікроскопії є важливим інструментом для вивчення мікро- та субмікроструктури металевих матеріалів, особливо у випадках, коли безпосереднє просвічування зразка є технічно неможливим.

Репліку з поверхні мікрошліфа можна отримати кількома способами. Залежно від способу виготовлення розрізняють лакові, напилені та окисні репліки.

Лакові репліки отримують шляхом нанесення на поверхню досліджуваного матеріалу тонкого шару лаку, наприклад розчину колодію в амілацетаті. Після висихання сформовану плівку обережно механічно відділяють від поверхні мікрошліфа. На отриманий відбиток у вакуумі напилюють контрастувальну речовину, зокрема тонкий шар важкого металу, який підкреслює виступи та

западини геометричного рельєфу. Такий шар інтенсивно розсіює електрони, завдяки чому під час електронно-мікроскопічного дослідження формується контрастне зображення.

Напилені репліки одержують шляхом осадження на поверхню досліджуваного матеріалу тонкого шару вуглецю, який утворюється під час розпилення вугільних електродів у вакуумі. В окремих випадках застосовують також комбіновані шари, що складаються з металу та вуглецю. Такі репліки дають змогу точно відтворити мікрорельєф поверхні та використовуються для подальшого аналізу її структурних особливостей.

Окисні репліки отримують після попереднього окиснення поверхні досліджуваного мікрошліфа. У процесі окиснення на поверхні матеріалу формується тонка оксидна плівка, яка відтворює характер мікрорельєфу. Після відділення така плівка може бути використана як репліка для електронно-мікроскопічного дослідження.

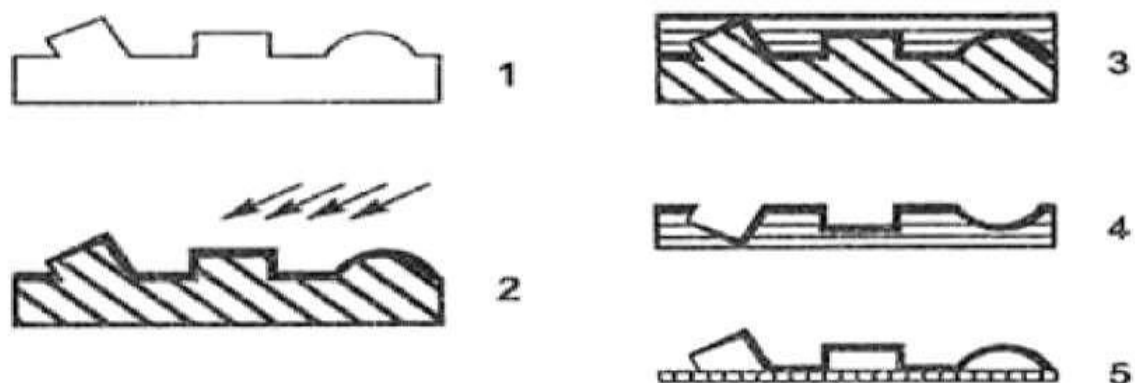


Рисунок 39 - Формування репліки з поверхні зразка: 1 - поверхня підготовленого мікрошліфа; 2 - нанесення відтінювального шару на поверхню мікрошліфа; 3 - нанесення шару колодію; 4 - відокремлення репліки від поверхні мікрошліфа; 5 - репліка, розміщена на несучій сітці.

6.4.2. Сканувальна електронна мікроскопія

Метод реплік дає змогу отримувати якісні результати під час дослідження мікрорельєфу поверхні зразка за допомогою просвічувальної електронної

мікроскопії. Його застосування є ефективним для вивчення дрібнодисперсних структурних елементів, розміри яких можуть становити до 10 нм.

Основним недоліком методу є технологічна складність виготовлення реплік, оскільки якість отриманого відбитка значною мірою залежить від стану підготовленої поверхні мікрошліфа, рівномірності нанесення відтінювального шару, властивостей плівкоутворювального матеріалу та обережності під час відокремлення репліки від поверхні зразка.

Сканувальна електронна мікроскопія, або растрова електронна мікроскопія, - це метод дослідження поверхні матеріалів, який дає змогу отримувати інформацію про морфологію, мікрорельєф, фазову неоднорідність і локальний розподіл хімічних елементів без виготовлення реплік. На відміну від просвічувальної електронної мікроскопії, у сканувальній електронній мікроскопії аналізують не електрони, що пройшли крізь тонкий об'єкт або репліку, а сигнали, які виникають унаслідок взаємодії сфокусованого електронного пучка з поверхневими та приповерхневими шарами зразка.

Завдяки значній глибині різкості цей метод дає змогу формувати зображення з вираженим об'ємним ефектом. Це особливо важливо під час дослідження грубих поверхонь, зламів, порошкових матеріалів, пористих структур і зразків зі складним мікрорельєфом.

Під час застосування сканувальної електронної мікроскопії збільшення зазвичай можна змінювати у широкому діапазоні - від десятків до десятків тисяч разів. Просторова роздільна здатність залежить від типу мікроскопа, режиму його роботи, прискорювальної напруги, властивостей зразка та параметрів електронного зонда. Метод використовують для дослідження металів і сплавів, кераміки, скла, шлаків, мінеральних сумішей, композиційних матеріалів, порошоків, покриттів та інших об'єктів.

Інформативність сканувальної електронної мікроскопії значно зростає за її поєднання з локальним рентгеноспектральним мікроаналізом, який виконують за допомогою енергодисперсійних або хвиледисперсійних спектрометрів.

У сканувальному електронному мікроскопі, як і в просвічувальному електронному мікроскопі, формування електронного пучка відбувається в

умовах вакууму. Пучок електронів фокусується електронно-оптичною системою і спрямовується на поверхню досліджуваного зразка. Під час роботи мікроскопа електронний зонд послідовно переміщується поверхнею зразка за заданою растровою схемою. У кожній точці взаємодії електронного пучка з речовиною виникають різні сигнали, інтенсивність яких реєструється відповідними детекторами. На основі цих сигналів формується зображення поверхні або отримується інформація про елементний склад досліджуваної ділянки.

Під час взаємодії електронного пучка з атомами твердого тіла утворюються кілька основних видів інформативного випромінювання та електронних сигналів. До них належать вторинні електрони, відбиті електрони та характеристичне рентгенівське випромінювання.

Вторинні електрони утворюються переважно в тонкому приповерхневому шарі зразка завтовшки кілька нанометрів. Вони мають відносно низьку енергію і є дуже чутливими до стану поверхні. Саме тому режим реєстрації вторинних електронів є найефективнішим для вивчення мікрорельєфу, тріщин, пор, виступів, западин, меж зерен та інших топографічних особливостей. У цьому режимі отримують зображення з високою роздільною здатністю і значною глибиною різкості.

Відбиті електрони виникають унаслідок пружного розсіювання електронів первинного пучка на атомах зразка. Вони мають вищу енергію, ніж вторинні електрони, і можуть надходити з більшої глибини взаємодії. Інтенсивність сигналу відбитих електронів значною мірою залежить від середнього атомного номера речовини: ділянки, що містять елементи з більшим атомним номером, на зображенні виглядають світлішими, а ділянки з елементами меншого атомного номера - темнішими. Тому зображення у відбитих електронах використовують для виявлення фазового контрасту, неоднорідності складу, включень і просторового розподілу окремих компонентів у матеріалі.

Характеристичне рентгенівське випромінювання виникає тоді, коли електрони первинного пучка выбивають електрони з внутрішніх оболонок атомів зразка. Під час переходу електронів із вищих енергетичних рівнів на вакантні нижчі рівні випромінюються рентгенівські кванти з енергіями, характерними для

певних хімічних елементів. Аналіз цього випромінювання дає змогу визначати елементний склад мікрооб'ємів зразка. Кожний із зазначених сигналів реєструється спеціальними детекторами, що забезпечує різні режими формування зображення та аналітичного дослідження. У режимі вторинних електронів отримують переважно топографічну інформацію про поверхню. У режимі відбитих електронів виявляють фазову та композиційну неоднорідність матеріалу. За допомогою детекторів рентгенівського випромінювання виконують якісний і кількісний аналіз хімічного складу.

Важливою перевагою сканувальної електронної мікроскопії є можливість дослідження не лише спеціально підготовлених шліфів, а й масивних зразків. Розміри таких зразків обмежуються переважно габаритами камери мікроскопа. У багатьох випадках зразки можна досліджувати без складної попередньої підготовки. Водночас для непровідних матеріалів часто потрібне нанесення тонкого електропровідного покриття, наприклад шару вуглецю, золота або платини. Це дає змогу запобігти накопиченню електричного заряду на поверхні під час опромінення електронним пучком.

Сканувальний електронний мікроскоп дає змогу досліджувати мікроструктуру поверхні шліфів при регульованому збільшенні та високій роздільній здатності, а також спостерігати об'ємне зображення поверхонь із розвиненим рельєфом, зокрема зламів, порошкових матеріалів, покриттів, пористих структур і корозійно змінених ділянок. Саме тому сканувальний електронний мікроскоп широко застосовують у матеріалознавстві, металографії, мінералогії, мікроелектроніці, нанотехнологіях, судовій експертизі та інших галузях.

Окреме значення сканувальна електронна мікроскопія має під час дослідження наноматеріалів. Наноматеріали часто характеризуються специфічними оптичними, електронними, магнітними або механічними властивостями, які зумовлені їхньою структурою на нанометровому рівні. До таких матеріалів належать фулерени, вуглецеві нанотрубки, нанокристали, наночастинки, нанопокриття та інші об'єкти.

Поверхні з нанотекстурою мають щонайменше один структурний параметр у наномасштабі, наприклад товщину поверхневого шару. Нанотрубки мають два нанорозмірні параметри, насамперед діаметр, тоді як їхня довжина може бути значно більшою. Сферичні наночастинки характеризуються трьома розмірами в наномасштабі. Для таких об'єктів сканувальна електронна мікроскопія є одним із провідних методів візуалізації морфології та оцінювання просторової організації структурних елементів.

Зображення у відбитих електронах дає змогу отримувати інформацію про просторовий розподіл фаз і хімічних компонентів у зразку. Чим більший середній атомний номер речовини в певній ділянці, тим світлішою вона виглядає на зображенні. Такий контраст особливо корисний під час аналізу багатофазних сплавів, неметалевих включень, покриттів, дифузійних шарів і зон хімічної неоднорідності.

Для аналітичних цілей сканувальні електронні мікроскопи оснащують детекторами рентгенівського випромінювання з енергетичною або хвильовою дисперсією. Рентгеноспектральний мікроаналіз полягає у визначенні елементного складу мікрооб'ємів зразка за характеристичним рентгенівським випромінюванням, яке виникає під дією електронного зонда.

Рентгеноспектральний мікроаналіз ґрунтується на тих самих фізичних принципах, що й емісійний рентгеноспектральний аналіз. Однак у цьому випадку збудження характеристичного випромінювання відбувається в дуже малих ділянках зразка за допомогою вузького електронного зонда, сформованого електронно-оптичною системою сканувального електронного мікроскопа. Аналіз рентгенівського випромінювання, яке виникає внаслідок взаємодії електронного пучка зі зразком, дає змогу якісно та кількісно характеризувати хімічний склад приповерхневих шарів.

Мікрорентгеноспектральний аналіз у сканувальній електронній мікроскопії дає змогу визначати елементний склад окремих фаз, включень, частинок, покриттів і локальних ділянок матеріалу. Водночас метод має обмежену чутливість щодо легких елементів, особливо елементів із малими атомними номерами. За допомогою аналізу енергії характеристичного рентгенівського

випромінювання можна також будувати карти розподілу окремих хімічних елементів на поверхні зразка. Таке елементне картування у штучних кольорах дає змогу одночасно візуалізувати розподіл кількох елементів у межах вибраної ділянки. Це особливо цінно під час вивчення сегрегації на межах зерен, дендритної ліквідації, дифузійних зон, корозійних продуктів, неметалевих включень і багатофазних структур.

Рентгеноспектральний мікроаналіз застосовують для дослідження локального розподілу основних компонентів і домішок у різних сплавах та матеріалах. Він є ефективним для якісного й кількісного аналізу хімічного складу з метою ідентифікації фаз і включень, вивчення розподілу елементів при дендритній ліквідації та мікросегрегації, визначення товщини покриттів, аналізу дифузійних процесів під час хіміко-термічної обробки, спікання порошкових матеріалів та інших технологічних процесів.

У загальному випадку поєднання сканувальної електронної мікроскопії з рентгеноспектральним мікроаналізом може бути використане для дослідження металів, сплавів, скла, кераміки, композиційних матеріалів, мінералів, покриттів і порошкових систем. Така комбінація методів забезпечує комплексне вивчення морфології поверхні, фазової неоднорідності та локального хімічного складу матеріалу.

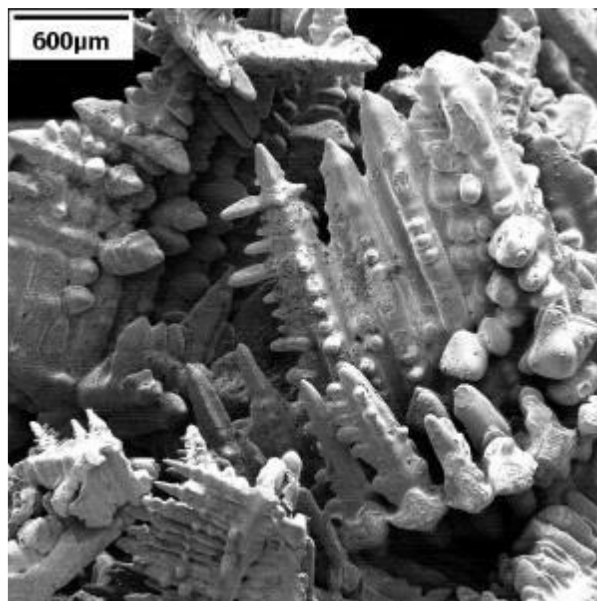


Рисунок 40 - Дендритні утворення на поверхні зламу усадкової порожнини всередині сталюого виливка, які виявлені методом сканувальної електронної мікроскопії, 200 х

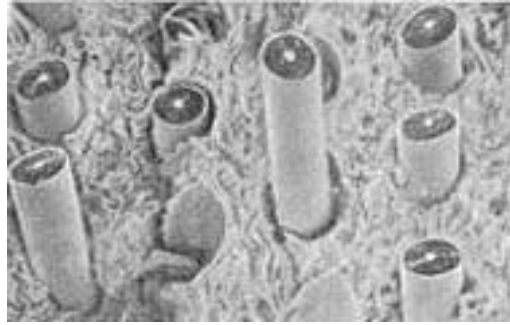


Рисунок 41 - Злом композитного матеріалу, 1500х



Рисунок 42 - Зовнішній вигляд сканувального електронного мікроскопа РЕМ-106И

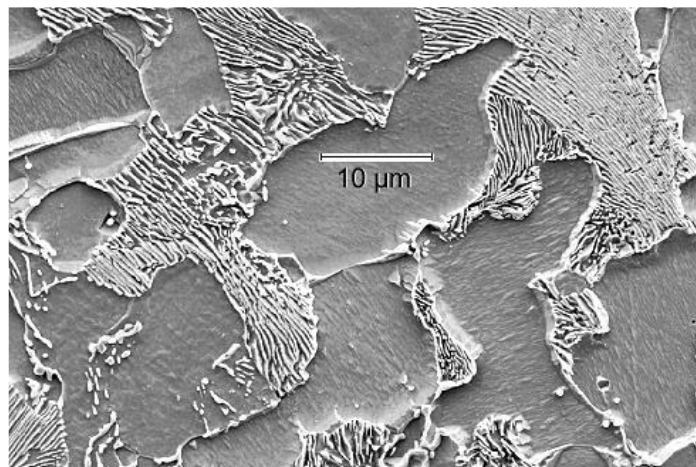


Рисунок 42 - Зображення від сканувального електронного мікроскопа мікроструктури доевтектоїдної сталі, що показує пластинчасту будову перліту

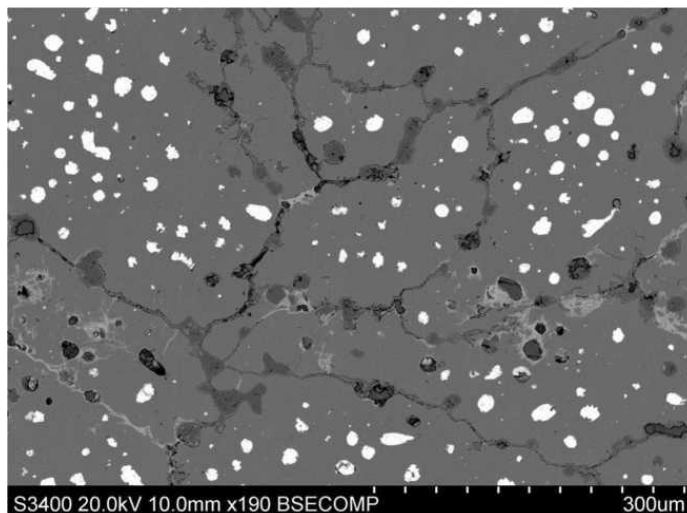


Рисунок 43 - Зображення структури зразка свинцевої бронзи, отримане за допомогою сканувального електронного мікроскопа

На мікрофотографії (рис.43) чітко візуалізується значна кількість свинцевих включень, які мають світле забарвлення. Також простежуються ознаки міжкристалітної корозії, що поширюється вздовж меж металевих зерен і виразно окреслює їхню морфологію.

6.5. Визначення властивостей металів і сплавів

Під час проведення експериментальних досліджень важливим етапом є визначення властивостей отриманих або досліджуваних матеріалів. Комплекс властивостей металів і сплавів визначає можливості їхнього практичного застосування, вибір технологічних режимів оброблення, а також прогнозування надійності та довговічності виробів в умовах експлуатації.

До фізичних властивостей матеріалів належать густина, питомий електричний опір, температура плавлення, теплопровідність, коефіцієнт теплового розширення тощо. Хімічні властивості характеризують поведінку матеріалів у хімічно активних середовищах, зокрема їхню корозійну стійкість, окиснюваність і здатність до взаємодії з різними речовинами. Технологічні властивості визначають придатність матеріалу до виконання певних технологічних операцій: лиття, що оцінюється рідкоплинністю та усадкою; оброблення тиском, яке залежить від ковкості та пластичності; зварювання, що

характеризується зварюваністю; оброблення різанням, яке визначається оброблюваністю матеріалу.

Механічними властивостями називають характеристики, що визначають поведінку матеріалу під дією зовнішніх навантажень у заданих умовах. Вони відображають здатність матеріалу чинити опір деформації та руйнуванню. Методи випробування механічних властивостей металів і сплавів поділяють на кілька основних груп: статичні випробування, які проводять за умов поступового зростання навантаження; динамічні випробування, за яких навантаження прикладають швидко; випробування за знакозмінних навантажень; випробування на зносостійкість; випробування на тривалу міцність і повзучість. До статичних випробувань належать випробування на розтяг, стискання, згин, а також технологічні проби й визначення твердості. Динамічні випробування застосовують для оцінювання поведінки матеріалів під час ударного навантаження, зокрема при випробуванні на ударний згин або ударний розтяг. Випробування за знакозмінних навантажень проводять тоді, коли навантаження в процесі дослідження багаторазово змінюється за величиною або одночасно за величиною і знаком. Такі випробування дають змогу визначити втомну міцність матеріалу. За напрямом дії навантаження випробування поділяють на розтягувальні, стискальні, згинальні та крутильні.

Під дією зовнішніх сил у зразках виникають напруження, що спричиняють деформацію матеріалу. За певного рівня навантаження деформація може залишатися допустимою, а матеріал - зберігати цілісність без розвитку процесів руйнування. Однак у разі перевищення граничних значень напружень відбувається руйнування зразка. Ступінь навантаження матеріалу характеризують величиною напруження, що виникає в його поперечному перерізі. До основних механічних властивостей матеріалів належать міцність, пластичність, ударна в'язкість і твердість.

Серед механічних властивостей особливе значення має міцність, оскільки саме від неї значною мірою залежить здатність виробу зберігати цілісність під дією експлуатаційних навантажень. Вчення про міцність і руйнування є однією з найважливіших складових матеріалознавства. Воно становить теоретичну

основу для вибору конструкційних матеріалів, призначених для виготовлення деталей різного функціонального призначення, а також для розроблення раціональних способів формування необхідного комплексу властивостей, що забезпечують надійність і довговічність виробів.

Міцність і пластичність визначають на випробувальних машинах шляхом розриву зразків стандартизованих розмірів і форми, виготовлених із досліджуваного матеріалу (рис. 44). Для випробувань застосовують циліндричні та плоскі зразки, головки яких закріплюють у захватах розривної машини. Плоскі зразки використовують переважно для оцінювання механічних властивостей листового матеріалу.

Міцність - це здатність матеріалу чинити опір руйнуванню під дією зовнішніх сил. Вона характеризується тимчасовим опором, або межею міцності. Цю характеристику визначають на розривній машині як напруження, за якого відбувається руйнування зразка під час випробування:

$$\sigma_b = \frac{P_b}{F_0},$$

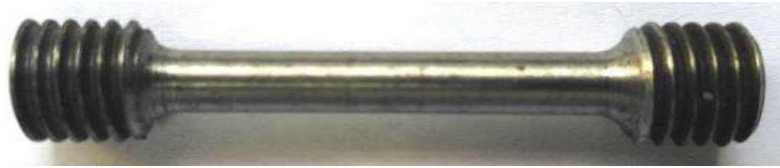
де P_b - максимальне зусилля, прикладене до зразка на розривній машині, за якого відбулося його руйнування; F_0 - початкова площа поперечного перерізу зразка, м².

Під дією зовнішніх сил у металевих матеріалах може відбуватися пластична деформація, унаслідок якої матеріал змінює свою форму та розміри без негайного руйнування. Пластичність - це здатність матеріалу змінювати форму й розміри під дією навантаження без руйнування та зберігати набуту форму після зняття навантаження. Матеріали з низьким рівнем пластичності називають крихкими.

Пластичність характеризують відносним видовженням, яке визначають на розривних зразках одночасно з визначенням міцності (рис. 44). Відносне видовження (δ) - це виражене у відсотках відношення приросту довжини робочої частини зразка після розриву до початкової довжини робочої частини зразка:

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\%,$$

де l_0 - довжина зразка до розривання, м; l_1 - довжина зразка після розривання, м.



а)



б)

Рис. 44. Зразки для визначення міцності при розтягуванні та пластичності: а - до випробування; б - після випробування



Рис. 45. Випробувальна розривна машина ZDM-10

Ударна в'язкість - це здатність матеріалу поглинати енергію та чинити опір руйнуванню під дією ударних навантажень. Вона характеризується роботою,

витраченою на руйнування зразка з надрізом, віднесеною до площі його поперечного перерізу в місці надрізу. Визначення ударної в'язкості за визначеними значеннями повної роботи деформації і руйнування найчастіше здійснюють на маятниковому копрі за методом Шарпі. Для проведення такого випробування виготовляють стандартизовані зразки з надрізом, які встановлюють на опори копра та руйнують ударом маятника.

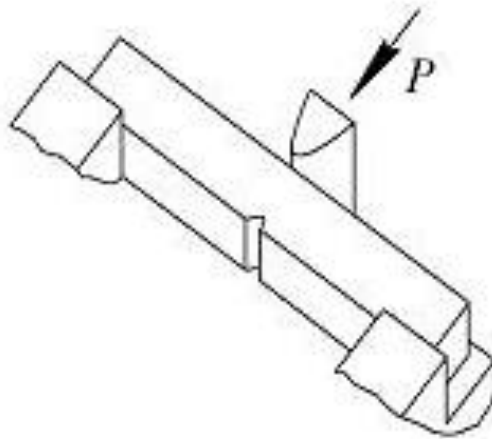


Рисунок 46 – Схема випробування на ударну в'язкість

Твердість - це властивість матеріалу чинити опір проникненню в його поверхню іншого, твердішого тіла - індентора. Визначення твердості належить до основних методів контролю механічних властивостей матеріалів, оскільки такі випробування є відносно простими, швидкими та не потребують значного пошкодження виробу або зразка. Отримані значення твердості використовують для орієнтовного оцінювання міцності, зносостійкості та пластичності досліджуваного матеріалу.

Залежно від розмірів, фізико-механічних властивостей і структурного стану досліджуваних об'єктів застосовують різні типи твердомірів і методики визначення твердості.

Під час визначення твердості за методом Брінелля у поверхню досліджуваного матеріалу за допомогою преса або твердоміра вдавлюють індентор - загартовану сталеву або твердосплавну кульку (рис. 47). Залежно від

твердості та товщини зразка використовують кульки діаметром 2,5; 5 або 10 мм. Навантаження на індентор може становити відповідно 1,8; 7,5 або 30 кН. Унаслідок прикладання навантаження на поверхні металевого зразка утворюється відбиток у вигляді сферичного сегмента певного діаметра та глибини.

Розміри відбитка залежать від твердості досліджуваного матеріалу: що більший діаметр відбитка після вдавлювання індентора, то нижчою є твердість матеріалу. Діаметр відбитка вимірюють за допомогою відлікового мікроскопа зі шкалою, ціна поділки якої становить 0,05 мм (рис. 48). Значення твердості за Брінеллем записують із відповідним індексом НВ, наприклад: 175 НВ.

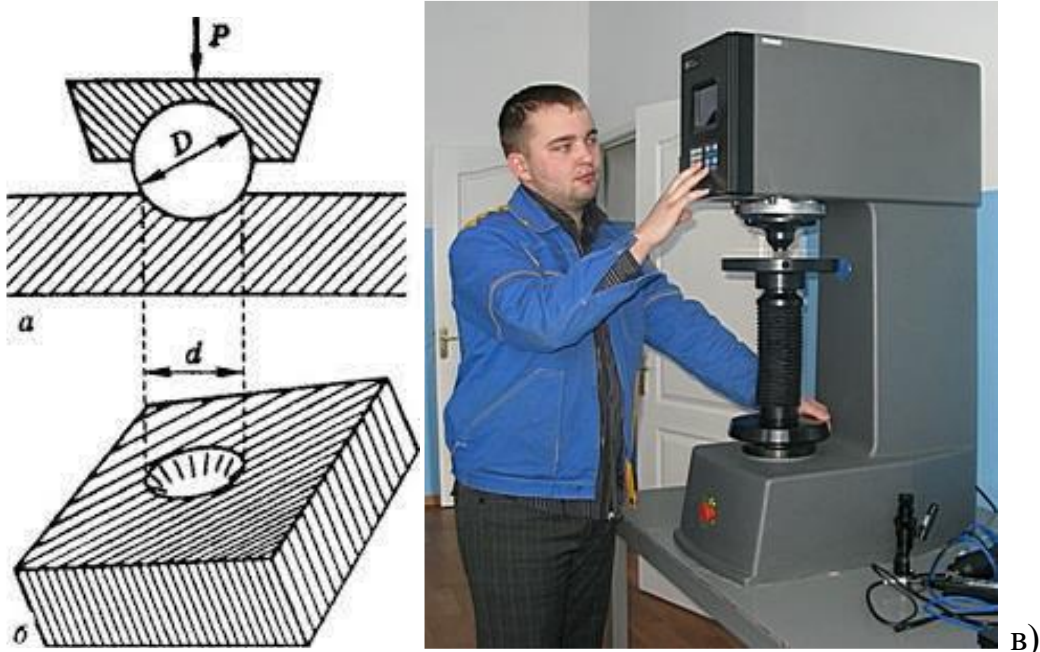


Рисунок 47 - Схема визначення твердості за методом Брінелля (а): утворення відбитку (б); твердомір (прес) Брінелля (в)

Твердість за Віккерсом (HV) визначають методом вдавлювання в поверхню досліджуваного матеріалу алмазного індентора, який має форму правильної чотиригранної піраміди з кутом 136° між протилежними гранями (рис. 49). Після прикладання заданого навантаження на поверхні зразка утворюється

ромбоподібний відбиток. Його геометричні параметри використовують для розрахунку твердості матеріалу.

Основним вимірюваним параметром є довжина діагоналей відбитка. Зазвичай вимірюють обидві діагоналі та визначають їхнє середнє значення, яке використовують для обчислення числа твердості за Віккерсом. Отриманий показник позначають символом HV.

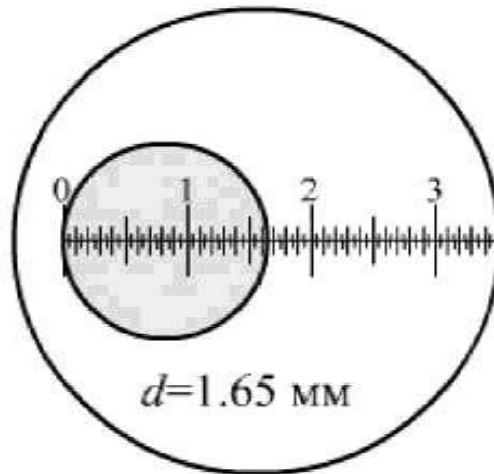


Рисунок 48 - Вимірювання діаметра відбитка при визначенні твердості за методом Брінелля

Вимірювання твердості за Віккерсом виконують у визначеній послідовності. Спочатку зразок або деталь установлюють на предметний стіл твердоміра досліджуваною поверхнею догори. Поверхня зразка має бути попередньо підготовленою: очищеною, вирівняною, а за потреби - відшліфованою або відполірованою, оскільки її стан істотно впливає на точність результатів вимірювання. Після встановлення зразка предметний стіл твердоміра піднімають обертанням маховика до моменту контакту поверхні зразка з індентором. Далі натискають на важіль або кнопку пуску, унаслідок чого приводиться в дію навантажувальний механізм приладу. Під дією заданого навантаження індентор вдавлюється в матеріал протягом усталеного часу витримки.

Після завершення дії навантаження випробувальна головка із закріпленим індентором повертається у вихідне положення. Потім предметний стіл твердоміра зі зразком повертають на 90° так, щоб утворений відбиток розмістився під об'єктивом відлікового мікроскопа. За допомогою мікроскопа

вимірюють довжини обох діагоналей ромбоподібного відбитка (рис. 49, а). Отримані значення використовують для визначення твердості за Віккерсом за відповідними таблицями або за розрахунковою формулою.

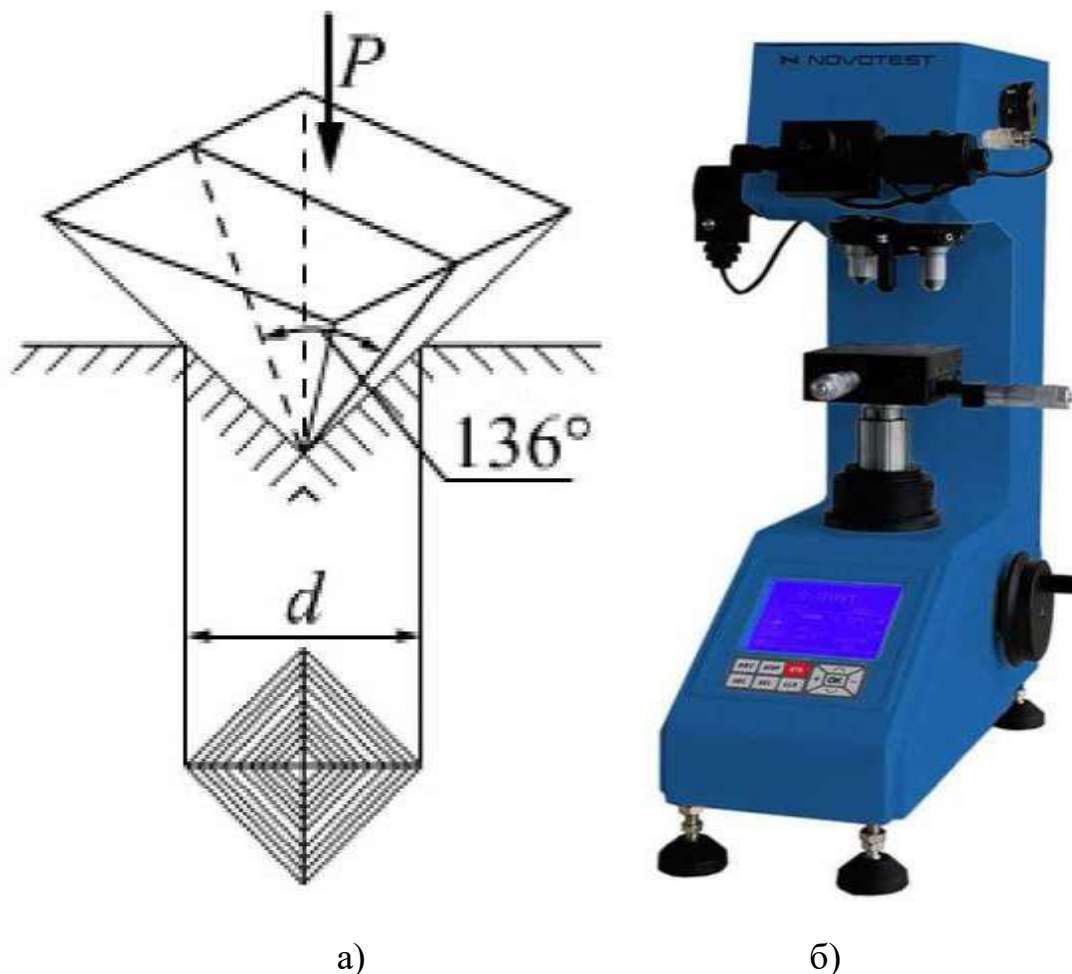


Рисунок 49 - Схема визначення твердості за методом Віккерса: а - утворений відбиток індентора на поверхні зразка; б - твердомір за методом Віккерса моделі NOVOTEST TC-B-C

Чим більшою є довжина діагоналей відбитка, що утворюється після вдавлювання індентора, тим нижчим є значення твердості досліджуваного матеріалу. Стандартний запис результатів вимірювання твердості за Віккерсом має такий вигляд: 440 HV 30/20, де 440 - числове значення твердості; HV - позначення твердості за Віккерсом; 30 - величина прикладеного навантаження, кгс; 20 - тривалість дії навантаження, с.

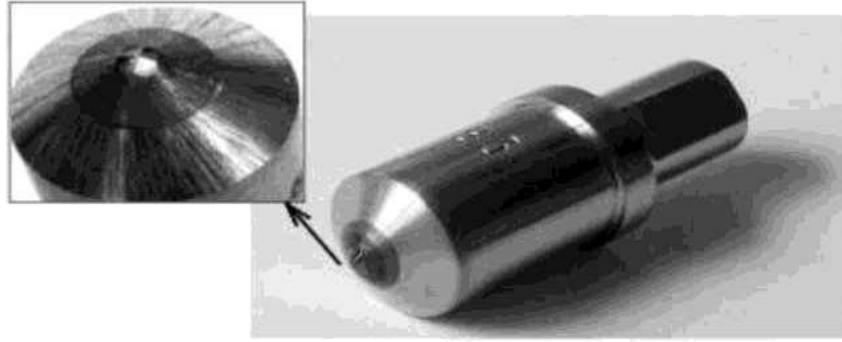


Рисунок 50 - Індентор з алмазною пірамідою для визначення твердості за методом Віккерса

До основних переваг визначення твердості за методом Віккерса належать: можливість проведення випробувань за значно менших навантажень на індентор порівняно з методом Брінелля; придатність методу для визначення твердості зразків малої товщини, а також тонких поверхневих шарів, нанесених на поверхню матеріалу; висока точність результатів, зумовлена застосуванням алмазного індентора та незначною деформацією вимірювального вузла; можливість точного вимірювання діагоналей відбитка за допомогою вимірювального мікроскопа з точністю до 1–2 мкм.

Для ідентифікації структурних складових металевих матеріалів, а також для оцінювання відмінностей у твердості окремих зерен, фаз або структурних складових сплавів під час мікроструктурного аналізу застосовують метод визначення мікротвердості. У цьому разі об'єм матеріалу, який деформується під час вдавлювання індентора, має бути меншим за об'єм досліджуваного зерна або структурної складової.

Метод визначення мікротвердості є різновидом методу Віккерса і відрізняється від нього застосуванням значно менших навантажень та утворенням відбитків меншого розміру. Як індентор під час вимірювання мікротвердості, так само як і при визначенні твердості за Віккерсом, використовують правильну чотиригранну алмазну піраміду з кутом між протилежними гранями 136° . Індентор плавно вдавлюється у поверхню зразка під заданим навантаженням. Зразки для вимірювання мікротвердості за способом підготовки є аналогічними до мікрошліфів, які використовують у

металографічному аналізі. Глибина вдавлювання індентора під час визначення мікротвердості становить кілька мікрометрів.

Під час визначення мікротвердості відбиток індентора формують на заздалегідь вибраній ділянці: окремому зерні, фазі або поверхневому шарі. При цьому добирають оптимальне навантаження, під дією якого індентор вдавлюється у поверхню мікрошліфа. За вимірними значеннями діагоналей відбитка, використовуючи відповідні перевідні таблиці або розрахункові залежності, визначають значення мікротвердості досліджуваної ділянки.

Прилад для визначення мікротвердості складається з механізму вдавлювання алмазного індентора під малим навантаженням і металографічного мікроскопа. Вдавлювання алмазної піраміди відбувається протягом устанавленого часу витримки під статичним навантаженням. Розміри відбитка визначають після зняття навантаження.

Для вимірювання мікротвердості застосовують мікротвердоміри, зокрема модель ПМТ-3. Металографічний мікроскоп, устанавлений на мікротвердомірі, забезпечує збільшення $130\times$ і $487\times$. Основними частинами мікротвердоміра є штатив із предметним столиком та головка з механізмом навантаження. На основі приладу розміщено предметний столик, який забезпечує переміщення мікрошліфа у двох взаємно перпендикулярних напрямках за допомогою мікрометричних гвинтів (рис.51). Крім того, для переведення в робоче положення столик може повертатися навколо власної осі на 180° за допомогою рукоятки.

Для утворення відбитка індентора досліджуваній мікрошліф устанавлюють під мікроскопом і за допомогою мікрометричних гвинтів вибирають ділянку, у якій необхідно визначити мікротвердість. Після вибору точки вимірювання зразок плавним поворотом предметного столика переміщують проти годинникової стрілки на 180° до упору таким чином, щоб центр майбутнього відбитка збігався з обраною ділянкою дослідження. Після цього індентор вдавлюють у поверхню мікрошліфа протягом 5 секунд. Після зняття навантаження зразок зворотним поворотом предметного столика повертають у положення під об'єктивом мікроскопа. Далі виконують

вимірювання довжин діагоналей утвореного відбитка, за якими визначають значення мікротвердості досліджуваного матеріалу (рис.52).



Рисунок 51 - Прилад для вимірювання мікротвердості моделі ПМТ-3

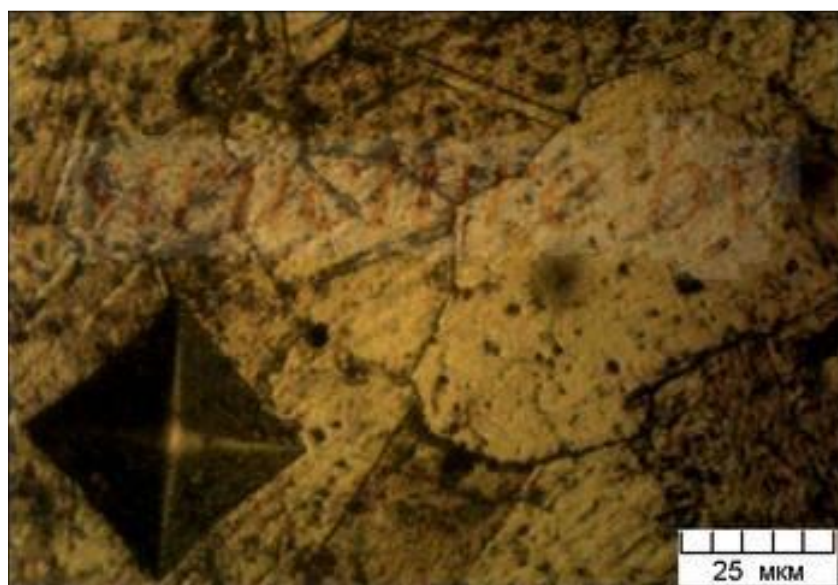


Рисунок 52 - Відбиток індентора при визначенні мікротвердості зерна мідного сплаву

6.6. Аналіз акустичної емісії при випробовуванні матеріалів

Під час дослідження поведінки різних матеріалів у процесі навантаження важливе значення має метод аналізу акустичної емісії. Акустична емісія - це явище випромінювання хвиль пружної деформації у твердому тілі, що виникають унаслідок швидкоплинних внутрішніх процесів, зокрема пластичної деформації, зародження та розвитку тріщин, локального руйнування або переміщення дислокацій.

Особливістю акустичної емісії є те, що джерелом сигналів виступає сам досліджуваний матеріал, а не зовнішнє джерело енергії. У процесі навантаження в матеріалі відбуваються мікроструктурні зміни, пов'язані з утворенням, переміщенням і взаємодією дефектів кристалічної ґратки, зокрема вакансій, атомів впровадження та дислокацій. Наявність таких дефектів спричиняє локальне спотворення кристалічної структури та накопичення додаткової потенціальної енергії.

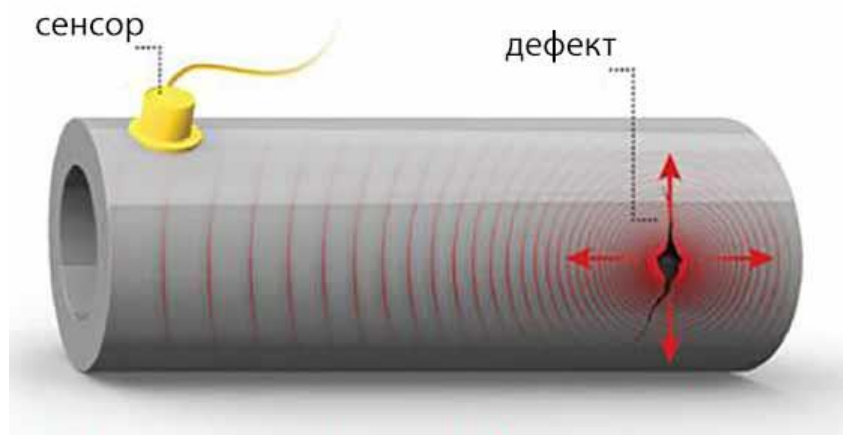


Рисунок 53– Розміщення датчика акустичної емісії на заготовці

Під час подальшого розвитку деформаційних процесів частина накопиченої енергії вивільняється у вигляді пружних хвиль. Зокрема, це може відбуватися внаслідок переміщення дислокацій, анігіляції дефектів, локального пластичного зсуву, зародження мікротріщин або їхнього поширення. Такі пружні хвилі поширюються в об'ємі матеріалу і, досягаючи його поверхні, спричиняють механічні коливання, які можуть бути зареєстровані спеціальними датчиками як імпульси акустичної емісії.

Найбільш інтенсивна акустична емісія спостерігається під час пластичної деформації металів, а також у процесах зародження, росту та поширення тріщин. За своїм характером акустична емісія є імпульсним процесом і являє собою потік короткочасних сигналів. Тривалість окремого імпульсу може становити від 10^{-8} до 10^{-4} с, а його енергія - від 10^{-9} до 10^{-5} Дж. Це відповідає дуже малим коливанням поверхні зразка, амплітуда яких може перебувати в межах приблизно від 10^{-11} до 10^{-4} мм.

Основними причинами виникнення акустичної емісії в металевих матеріалах є пластична деформація, пов'язана з рухом і взаємодією дислокацій; утворення та поширення мікротріщин; процеси тертя і стирання контактуючих поверхонь; структурні перебудови кристалічної ґратки, а також формування нових фаз у мікроструктурі матеріалу.

Нерівномірний і переривчастий характер дислокаційних процесів, пов'язаний із відривом дислокацій від точок закріплення, їх гальмуванням поблизу перешкод, а також виникненням і зникненням окремих дислокацій, є однією з причин утворення хвиль напружень у матеріалі.

Особливий інтерес становить формування сигналів акустичної емісії під час обробки різанням металевих матеріалів. Механічна обробка різанням належить до термомеханічних процесів, у ході яких із поверхні деталі внаслідок пластичної деформації видаляється тонкий шар матеріалу у вигляді стружки. У процесі різання локальне пластичне та пружне деформування шару металу різальним інструментом забезпечує відокремлення стружки й супроводжується складними фізичними процесами в зоні контакту інструмента із заготовкою. У цій зоні виникають інтенсивні пластичні деформації та деформації зсуву, які супроводжуються переміщенням дислокацій у кристалічній ґратці металу та генерацією високочастотних коливань. Крім того, значний внесок у формування сигналів акустичної емісії роблять процеси тертя та мікроударної взаємодії між поверхнею різця і стружкою. У зоні контакту можуть утворюватися локальні нарости, руйнування яких також супроводжується виникненням імпульсів акустичної емісії.

Важливим джерелом акустичної емісії є утворення мікротріщин на різальній кромці інструмента та в поверхневих шарах заготовки. Такі процеси особливо характерні для чорнової обробки високоміцних матеріалів або для умов різання, що супроводжуються значними ударними навантаженнями. У зоні різання виникають високі механічні напруження та температури, які можуть спричинити структурні зміни матеріалу. Процес стружкоутворення фактично є локалізованим мікроруйнуванням, що супроводжується пластичними зсувами, переміщенням дислокацій, тертям і, відповідно, генерацією сигналів акустичної емісії.

Інтенсивне тепловиділення під час різання істотно впливає на фазові перетворення, зміну мікроструктури та пластичність металу, що, своєю чергою, відображається на параметрах акустичної емісії. Значний вплив мають також умови механічної обробки: застосування або відсутність змащувально-охолоджувальної рідини, геометрія різального інструмента, тип і властивості твёрдосплавних пластин. Використання охолодження знижує температуру в зоні різання, зменшує інтенсивність пластичної деформації та тертя, унаслідок чого загальний рівень амплітуди сигналів акустичної емісії зменшується. Водночас спектральні піки можуть ставати більш вираженими завдяки зниженню рівня фонових шумів.

Основний частотний діапазон сигналів акустичної емісії під час різання металів зазвичай перебуває в межах 100–700 кГц. Амплітуда сигналів залежить від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, геометрії різальної частини інструмента, швидкості різання, величини подачі та умов контакту в зоні різання.

На характеристики акустичної емісії під час обробки різанням істотно впливають параметри режиму різання. Зі збільшенням швидкості різання підвищується інтенсивність утворення та видалення стружки, що супроводжується посиленням процесів пластичної деформації, тертя і тепловиділення в зоні контакту інструмента із заготовкою. Це може зумовлювати зміну амплітудно-частотних характеристик сигналів акустичної емісії, зокрема зміщення їхнього спектра у високочастотну область.

Збільшення глибини різання призводить до зростання об'єму деформованого матеріалу, а отже, до підвищення інтенсивності акустико-емісійних сигналів. Підвищення подачі також сприяє збільшенню поперечного перерізу зрізуваної стружки, сили різання та інтенсивності деформаційних процесів. Додатковим чинником, що впливає на параметри акустичної емісії, є зношування або затуплення ріжучого інструмента, а також наявність мікрОВикришувань ріжучої кромки. Такі дефекти спричиняють нерівномірне тертя, локальне зростання контактних напружень і підвищення амплітуди акустико-емісійних сигналів.

Сучасні методи аналізу акустичної емісії ґрунтуються на використанні високочутливих п'єзоелектричних датчиків, які встановлюють безпосередньо на інструмент, заготовку або елементи технологічної системи. Особливістю таких вимірювальних систем є робота у високочастотному діапазоні - від десятків до сотень кілогерц, а також необхідність ефективного захисту від електромагнітних і механічних завад. П'єзоелектричні датчики перетворюють пружні коливання, що виникають у матеріалі, на електричні сигнали. Надалі ці сигнали підсилюють, фільтрують і передають до системи реєстрації та обробки даних.



Рисунок 54 - П'єзоелектричний датчик акустичної емісії

Для аналізу зареєстрованих сигналів застосовують методи спектрального аналізу, цифрової фільтрації та статистичного оцінювання параметрів акустичної емісії. Це дає змогу виділяти корисні високочастотні складові сигналу на фоні низькочастотних коливань, вібрацій технологічного обладнання та інших шумових компонентів. Аналіз таких параметрів, як амплітуда, енергія, частота, кількість імпульсів і спектральний склад сигналу, дозволяє оцінювати

інтенсивність процесів деформування, тертя, зношування інструмента та формування стружки під час різання.

Експериментальний комплекс для вимірювання параметрів акустичної емісії має включати п'єзоелектричний датчик із центральною частотою 200–300 кГц і смугою пропускання 100–700 кГц, підсилювач із коефіцієнтом підсилення 40–60 дБ, високошвидкісний аналого-цифровий перетворювач зі швидкістю дискретизації не менше 2 МГц, високочастотний або смуговий фільтр, а також комп'ютерну систему збору й обробки даних. Така система може бути реалізована на основі DAQ-модуля або автономного реєстратора, що забезпечує реєстрацію, збереження та подальший аналіз акустико-емісійних сигналів у процесі механічної обробки матеріалів.

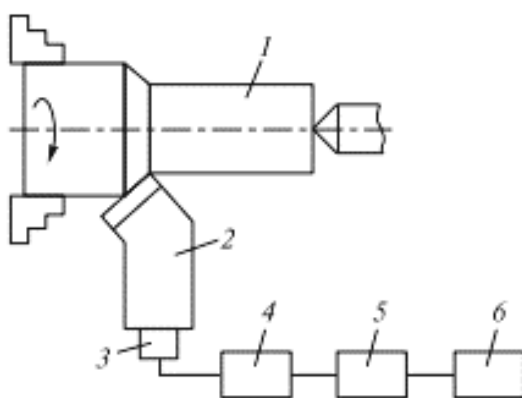


Рисунок 55 - Схема і блок-схема експериментальної установки: 1 – заготовка, 2 – різець; 3 – п'єзоелектричний датчик; 4 – підсилювач; 5 – аналогово – цифровий перетворювач сигналу акустичної емісії; 6 – комп'ютер

Після підсилення та фільтрації сигнал акустичної емісії надходить на аналого-цифровий перетворювач, який забезпечує його оцифрування для подальшої комп'ютерної обробки й аналізу. Для візуалізації, математичної обробки та інтерпретації отриманих даних застосовують спеціалізоване програмне забезпечення, зокрема MATLAB, а також інші програмні комплекси спектрального аналізу. Аналіз отриманих спектрів дає змогу виявляти характерні піки у певних частотних діапазонах, положення та інтенсивність яких можуть

змінюватися залежно від режимів різання, стану ріжучого інструмента й особливостей взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом.

Під час дослідження сигналів акустичної емісії важливе значення має амплітудний аналіз, який дає змогу оцінити часові зміни сигналу та його енергетичні характеристики. До основних амплітудних параметрів належать пікова амплітуда, середньоквадратичне значення амплітуди та середнє значення амплітуди. Зазначені показники використовують для оцінювання інтенсивності процесів пластичної деформації, тертя, утворення стружки та локального руйнування матеріалу в зоні різання. Їхній аналіз дає можливість встановити зв'язок між параметрами акустичної емісії та фізико-механічними процесами, що відбуваються під час механічної обробки.

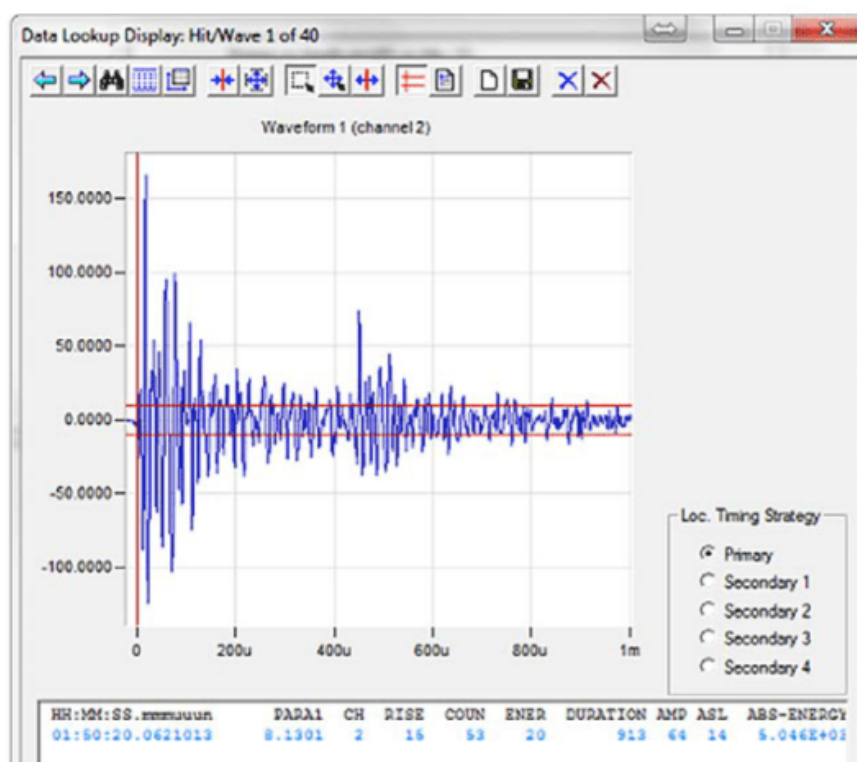


Рисунок 56 - Відображення на екрані монітора типової форми хвилі акустичної емісії

Для підвищення достовірності результатів аналізу акустичної емісії виконують фільтрацію шумів і порогову обробку сигналів. Імпульси, амплітуда яких є нижчою за рівень шумового фону, не враховують, оскільки вони не мають

істотного діагностичного значення. Фоновий рівень акустичної емісії зазвичай становить 40–45 дБ, тоді як процеси пластичної деформації супроводжуються імпульсами з амплітудою до 50–55 дБ. Сплески інтенсивності, що перевищують 60 дБ, можуть бути пов'язані зі зривом наросту з передньої поверхні різця, нестабільністю процесу стружкоутворення або виникненням критичних режимів різання.

Зміна параметрів режиму різання, зокрема швидкості різання, подачі та глибини різання, супроводжується відповідною зміною амплітудних характеристик сигналів акустичної емісії. У критичних режимах роботи, наприклад за максимального навантаження на інструмент або на початкових етапах його заглиблення в матеріал, амплітуда сигналів може зростати на 10–20 дБ порівняно із середнім рівнем. Така зміна свідчить про підвищення інтенсивності деформаційних процесів, тертя та локального руйнування матеріалу в зоні різання.

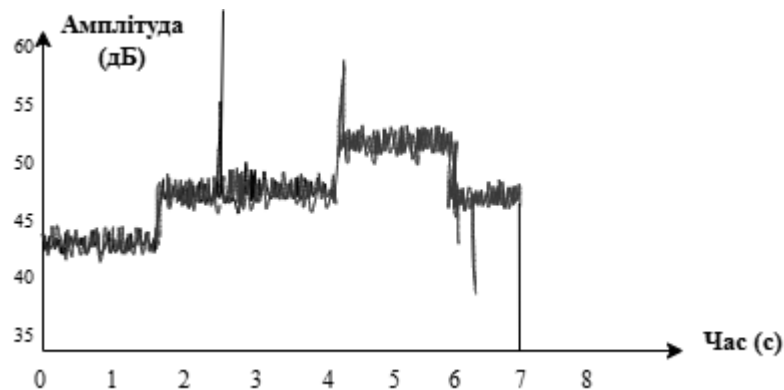


Рисунок 56 - Зміна амплітуди сигналу акустичної емісії (дБ) при зміні глибини різання

Практичним результатом застосування методу акустичної емісії є можливість створення систем онлайн-моніторингу процесів механічної обробки. Такі системи дають змогу своєчасно виявляти перевантаження різального інструмента, розвиток тріщин, надмірні вібрації, а також критичне підвищення температури в зоні різання.

Сфери застосування акустичної емісії в сучасній техніці є досить різноманітними. Метод використовують для контролю резервуарів з обмеженим доступом до поверхні, зокрема за наявності теплоізоляції, криогенного захисту та інших конструктивних обмежень; випробування автомобільних і залізничних цистерн, трубопроводів та газових балонів високого тиску; виявлення корозійного пошкодження конструкцій; контролю трубопроводів, клапанів, резервуарів та інших об'єктів з метою виявлення витоків; оцінювання залишкового ресурсу виробів і конструкцій; а також перевірки якості виготовлення продукції.

Практична значущість методу акустичної емісії підтверджується його широким використанням в атомній та авіаційній промисловості, суднобудуванні, залізничному транспорті й інших галузях техніки. До основних переваг методу належать висока чутливість до дефектів, що розвиваються, можливість реєстрації приросту тріщин розміром до 1 мкм, дистанційний характер контролю, а також здатність забезпечувати моніторинг технологічних процесів, пов'язаних зі зміною властивостей і стану матеріалів.

Контроль технічного стану конструкцій за допомогою методу акустичної емісії здійснюють без істотного втручання в їхню роботу. Датчики, як правило, закріплюють на поверхні обладнання без його демонтажу, що дає змогу проводити діагностику без порушення цілісності конструкції та без зупинення або з мінімальним обмеженням технологічного процесу.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 6

1. Що таке методи дослідження в матеріалознавстві та яке їх основне призначення?
2. Які структурні рівні матеріалів вивчаються в сучасному матеріалознавстві?
3. Чому жоден окремий метод дослідження не може повністю охарактеризувати матеріал?

4. Які галузі знань лежать в основі матеріалознавства та яку роль відіграє кожна з них?
5. У чому полягає значення кристалографії для дослідження матеріалів?
6. Які основні етапи історичного розвитку експериментальних методів у матеріалознавстві?
7. Чим відрізняються макроструктурний, мікроструктурний та електронно-мікроскопічний аналіз?
8. Які методи застосовують для визначення хімічного складу матеріалів?
9. У чому полягає принцип атомно-емісійного спектрального аналізу?
10. Яке значення мають рентгеноструктурний аналіз, раманівська спектроскопія та термічний аналіз у дослідженні матеріалів?
11. Що називають структурою металевого матеріалу і які її основні елементи?
12. Як структура металу або сплаву впливає на його фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні властивості?
13. У чому полягає різниця між макроструктурним і мікроструктурним методами дослідження металів і сплавів?
14. Які дефекти можна виявити за допомогою макроструктурного аналізу?
15. Що таке мікрошліф і які основні етапи його підготовки до металографічного дослідження?
16. Для чого проводять травлення мікрошліфа і як воно допомагає виявити мікроструктуру металу?
17. Які основні системи входять до складу металографічного мікроскопа і яку функцію виконує кожна з них?
18. У чому полягає перевага електронної мікроскопії порівняно з оптичною під час дослідження металів і сплавів?

РОЗДІЛ 7.

ВВЕДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У НАУКОВИЙ ОБІГ

Інформація є важливим засобом комунікації між людьми та відображає суспільні, виробничі, пізнавальні й інші зв'язки, а також різноманітні прояви матеріального світу. Відповідно до Конституції України та Закону України «Про науково-технічну інформацію», громадяни України, юридичні особи, державні органи та органи місцевого самоврядування мають право на відкриту науково-технічну інформацію. Це право передбачає можливість її вільного одержання, зберігання, використання та поширення у процесі наукової, виробничої, освітньої, громадської та іншої діяльності.

Наукова інформація є основою для проведення теоретичних і експериментальних досліджень. Вона підтверджує наукову обґрунтованість виконаної роботи, її достовірність, новизну та практичну значущість. Наукові публікації забезпечують суспільство первинною науковою інформацією, інформують наукову спільноту про появу нового знання, перетворюють індивідуальний результат дослідника на загальне наукове надбання та стимулюють подальші дослідження з відповідної проблематики.

Особлива цінність наукових публікацій полягає в тому, що вони дають змогу ознайомитися з різними підходами до трактування певних питань, критичним аналізом поглядів інших авторів, рівнем наукової новизни та сучасним станом розробленості проблеми. Саме тому результати наукової роботи мають бути належним чином узагальнені, оформлені та введені в науковий обіг.

Введення результатів дослідження в науковий обіг здійснюється шляхом їх усного або письмового оприлюднення. До усних форм належать доповіді, повідомлення, виступи на конференціях, семінарах, симпозіумах і наукових з'їздах. До письмових форм належать реферати, тези доповідей, наукові статті, монографії, дисертації, звіти про науково-дослідну роботу, патенти та інші документи. Обмін інформацією між дослідниками через наукові публікації, електронні ресурси або безпосередню професійну комунікацію сприяє розвитку науки, техніки й виробництва.

Параметри наукової інформації визначаються такими критеріями, як цільове призначення, наукова цінність, достовірність, надійність, повнота, актуальність, періодичність, безперервність, спосіб і форма подання.

Результат будь-якого наукового дослідження має бути оформлений у письмовому вигляді - друкованому або електронному - та оприлюднений у формі наукового звіту, доповіді, реферату, статті, книги, монографії або іншого наукового документа. Науковий документ - це сукупність логічно завершених відомостей, зафіксованих на матеріальному або електронному носії із зазначенням автора, місця й часу створення. Носіями інформації можуть бути папір, фотоплівка, магнітні й оптичні носії, електронні бази даних, пам'ять комп'ютера та інші засоби фіксації інформації.

Під науковою публікацією розуміють доведення результатів наукової діяльності до загального відома через періодичні або неперіодичні видання. До таких публікацій належать тези доповідей, статті, реферати, наукові звіти, дисертації, монографії, підручники, навчальні посібники тощо. Наукова публікація відображає основний зміст, новизну та результати виконаного дослідження, а також фіксує завершення певного етапу наукової роботи або дослідження загалом.

Дата публікації має важливе значення, оскільки вона підтверджує пріоритет автора або наукового колективу в отриманні й оприлюдненні певного результату. Зафіксований час появи наукового результату у відкритому доступі дає змогу встановити першість у здійсненні відкриття, розробленні методу, технології або концепції.

Наукові публікації виконують кілька основних функцій: повідомляють наукову спільноту про появу нового результату; сприяють установленню авторського пріоритету; визначають особистий внесок дослідника в розроблення наукової проблеми; підтверджують факт апробації та впровадження результатів; фіксують завершення певного етапу дослідження або роботи загалом.

Основними завданнями наукових публікацій є узагальнення й закріплення результатів теоретичних або експериментальних досліджень, стимулювання подальшої наукової роботи з відповідної проблематики, а також привернення

уваги наукових установ, виробничих організацій, інвесторів і промислових підприємств до перспективних напрямів досліджень.

Носіями наукової інформації можуть бути різні види наукових документів: книги, монографії, підручники, навчальні посібники, періодичні видання, журнали, збірники наукових праць, нормативні документи, стандарти, технічні умови, інструкції, каталоги, патентна документація, звіти про науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, інформаційні видання, аналітичні огляди, реферативні збірники й бібліографічні покажчики.

Періодичні видання виходять через певні проміжки часу, мають сталу назву, постійну нумерацію випусків і, як правило, однотипне оформлення. До періодичних друкованих видань належать газети, журнали, бюлетені, альманахи та інші видання, що виходять не рідше одного разу на рік.

Неперіодичні видання виходять одноразово й не мають регулярного продовження. До них належать книги, брошури, монографії, збірники, навчальні посібники. За обсягом серед неперіодичних видань розрізняють книгу, що має понад 48 сторінок, і брошуру, обсяг якої становить від 4 до 48 сторінок.

Обсяг друкованого твору зазвичай вимірюють в авторських аркушах. Один авторський аркуш дорівнює приблизно 40 тисячам друкованих знаків, включаючи літери, цифри, розділові знаки та пробіли між словами. Орієнтовно один авторський аркуш відповідає 24 сторінкам машинописного тексту, надрукованого через два інтервали на аркуші формату А4.

Усі друковані джерела наукової інформації поділяють на первинні та вторинні. До первинних належать документи, що містять безпосередні результати науково-дослідних робіт: статті, дисертації, монографії, книги, патенти, звіти. Вторинні документи є результатом аналітико-синтетичної та логічної обробки первинних джерел. До них належать реферати, огляди, бібліографії, рецензії, довідники, каталоги й аналітичні звіти. Вторинні документи оперативно повідомляють про появу первинних джерел і стисло викладають їхній основний зміст.

Первинні та вторинні документи можуть бути опублікованими або неопублікованими. Серед первинних опублікованих документів виділяють неперіодичні, періодичні видання та видання, що продовжуються.

У сучасних умовах інформація швидко старіє. Відомості, подані в наукових документах, зберігають актуальність лише протягом певного часу. Темпи старіння інформації залежать від галузі науки. Наприклад, в інформаційних технологіях дані можуть втрачати актуальність уже через 1–2 роки, тоді як у матеріалознавстві середній період актуальності наукової публікації може становити приблизно 4–5 років.

Публікації в наукових журналах є одним із головних способів поширення наукової інформації та професійної комунікації. Журнальна наукова стаття є поширеною формою оперативного письмового оформлення результатів дослідження, присвяченого актуальній науковій проблемі. Автори наукових статей оприлюднюють результати своєї роботи та беруть на себе відповідальність за їх достовірність.

Наукова стаття має містити нові результати, висвітлювати суперечності або прогалини в науковому знанні, а також аргументовано доводити обґрунтованість отриманих висновків. Обсяг наукової статті зазвичай становить 6–22 сторінки, або приблизно 0,35–1 друкований аркуш.

Робота над публікацією починається після завершення певного етапу дослідження, коли отримані результати пройшли аналітичну обробку і на їх підставі можна сформулювати обґрунтовані висновки. Перед підготовкою рукопису необхідно обрати журнал, до якого статтю буде подано. Різні наукові видання висувають різні вимоги до тематики, структури, обсягу та оформлення матеріалів, тому під час підготовки рукопису слід керуватися правилами конкретного журналу.

Для підвищення шансів на публікацію дослідник має чітко відповісти на два запитання: яка основна мета роботи і в чому полягає її відмінність від попередніх досліджень за науковими результатами та новизною.

У більшості наукових журналів статті, присвячені результатам експериментальних досліджень, будуються за єдиним логічним планом. Типова

структура наукової статті містить такі розділи: анотація, вступ, матеріали і методи, результати дослідження, обговорення результатів, висновки, список використаних джерел. Такий план є близьким до структури звіту про виконання науково-дослідної роботи, оскільки обидві форми передбачають логічний виклад мети, методики, результатів і висновків.

Анотація - це стислий виклад змісту роботи, який містить основні фактичні відомості та результати дослідження. Її мета полягає в тому, щоб дати читачеві уявлення про зміст статті без необхідності ознайомлення з повним текстом. Зазвичай анотація відтворює структуру статті, але подає матеріал у дуже стислій формі, приблизно у 10–15 реченнях. Після прочитання анотації читач може визначити, чи доцільно ознайомлюватися з повним текстом публікації та використовувати її у власній роботі.

У вступі наукової статті обґрунтовують актуальність дослідження, визначають його мету, описують сучасний стан проблеми, аналізують попередні дослідження та виявляють наукові суперечності або прогалини. Також у вступі можуть бути сформульовані вихідна гіпотеза, об'єкт і предмет дослідження, завдання роботи, прогнозований результат і спосіб перевірки гіпотези.

Під час написання вступу доцільно дотримуватися такої логіки викладу: опис проблеми та її актуальності; характеристика обставин виникнення проблеми; аналіз наявних методів її вирішення, їхніх переваг і недоліків; визначення об'єкта та предмета дослідження; обґрунтування обраного методу; формулювання гіпотези або вказівка на недостатність наявних даних; визначення мети й завдань роботи.

Основна частина статті присвячена поданню, узагальненню, аналізу та поясненню отриманих результатів. У ній наводять відомості про методику дослідження, використані матеріали, обладнання, умови проведення експериментів, способи математичної та статистичної обробки даних. Стандартні методики зазвичай не потребують докладного опису, однак автор має подати достатньо інформації для того, щоб інші дослідники могли відтворити експеримент і перевірити отримані результати.

Основна частина наукової статті має містити висвітлення наукової проблеми та її зв'язку з важливими теоретичними або практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій; визначення невирішених аспектів проблеми; формулювання мети дослідження; виклад основного матеріалу з повним обґрунтуванням отриманих результатів.

Під час обговорення результатів доцільно порівнювати отримані дані з результатами інших авторів, аналізувати можливі причини відмінностей, оцінювати наукову новизну, практичну значущість і обмеження проведеного дослідження.

Заключна частина статті містить висновки, узагальнення отриманих результатів, оцінку їхнього теоретичного й практичного значення, а також перспективи подальших досліджень у відповідному напрямі. Наприкінці статті наводять список джерел, які були використані та процитовані в тексті.

Наукова стаття, поряд з об'єктивними науковими даними, може містити неточності, помилкові положення або неправильні трактування. Тому під час опрацювання публікацій необхідно критично оцінювати їхній зміст, перевіряти обґрунтованість тверджень автора та достовірність наведених результатів. Більшість авторитетних наукових видань застосовують процедуру рецензування. Рецензування - це експертна оцінка наукової якості, новизни, методології, структури та відповідності рукопису вимогам видання. Зазвичай рецензія містить аналіз сильних і слабких сторін роботи та рекомендацію щодо її публікації, доопрацювання або відхилення.

Важливим критерієм оцінювання наукової публікації є рік її видання. У кожній галузі науки існує власний темп оновлення знань. Тому під час добору джерел необхідно враховувати не лише авторитетність видання, а й актуальність опублікованих даних.

Тези - це короткий, точний і послідовний виклад письмово сформульованих ідей, положень або результатів наукової доповіді, повідомлення, статті чи іншої наукової праці. Як правило, тези доповіді публікують до початку наукової конференції. Їхня основна мета - стисло подати основні результати проведеного

дослідження, окреслити актуальність проблеми, мету, методи, результати та висновки.

Реферат - це короткий письмовий виклад змісту наукових документів з певної теми. Основне призначення реферату полягає в тому, щоб продемонструвати ерудицію автора, його здатність самостійно аналізувати, систематизувати, класифікувати й узагальнювати наукову інформацію. У рефераті мають бути відображені історія та теорія питання, предмет і мета роботи, основні результати, методи й умови дослідження, висновки, пропозиції щодо практичного використання результатів, а також список опрацьованої літератури. Зазвичай обсяг реферату становить до 20 сторінок друкованого тексту.

Монографія - це наукова праця, присвячена всебічному дослідженню певної наукової або науково-технічної проблеми. Вона містить узагальнення теоретичного й практичного матеріалу, його критичний аналіз, формулювання нових наукових концепцій, підходів або висновків. Монографія може мати одного автора або колектив авторів.

Текст монографії має характеризуватися чіткістю формулювань, логічною послідовністю викладу, аргументованістю висновків і науковою обґрунтованістю положень. Основний текст монографії зазвичай містить результати досліджень автора або авторського колективу, які раніше могли бути опубліковані у вигляді статей у наукових фахових виданнях. До монографії висуваються вимоги щодо наявності рецензій фахівців, рекомендації вченої ради установи або закладу вищої освіти, відповідного обсягу, міжнародного ідентифікаційного номера ISBN та дотримання державних стандартів редакційного оформлення.

Характерною особливістю письмової наукової мови є побудова викладу у формі міркувань, доказів і логічних узагальнень. Важливу роль у науковому тексті відіграють терміни, які слід уживати точно й послідовно. Не допускається довільне поєднання різних термінологічних систем в одному тексті. Логічна цілісність і взаємозв'язаність частин наукового тексту потребують використання

складних синтаксичних конструкцій, однак вони мають залишатися зрозумілими й граматично коректними.

Обов'язковою умовою об'єктивності наукового викладу є посилання на джерела інформації. Якщо в роботі використано чужу думку, дані, методика, формулювання або результати, автор має чітко зазначити джерело запозичення. Це є необхідною умовою дотримання академічної доброчесності.

За результатами наукових досліджень, виконаних на замовлення держави, юридичної або фізичної особи, оформлюють звіт про виконану роботу. Науковий звіт - це документ, що містить повні відомості про проведене дослідження, використані методи, отримані результати, їх аналіз, висновки та рекомендації. У сфері науки і техніки вимоги до структури та оформлення звітів визначаються ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання».

Звіт умовно поділяють на вступну частину, основну частину та додатки. Вступна частина містить титульний аркуш, список авторів, реферат, зміст, перелік скорочень та умовних позначок, передмову. Основна частина містить вступ, змістову частину звіту, висновки, рекомендації та перелік джерел посилання.

Титульний аркуш є першою сторінкою звіту й основним джерелом бібліографічної інформації, необхідної для його опрацювання та пошуку. На ньому зазначають організацію, у якій виконано роботу, назву теми, номер державної реєстрації, відомості про виконавців та інші необхідні дані.

Список авторів розміщують після титульного аркуша. У ньому наводять ініціали та прізвища авторів, їхні посади, наукові ступені, вчені звання, а також зазначають частини звіту, підготовлені кожним із виконавців. Усі виконавці засвідчують свою участь у роботі особистим підписом.

У рефераті стисло подають основні аспекти звіту, які дають змогу оцінити доцільність ознайомлення з повним текстом. Ключові слова - це 5–10 слів або словосполучень, що відображають тему, предмет і галузь дослідження. Вони полегшують пошук документа в інформаційних системах і зазвичай подаються після анотації українською та англійською мовами.

У змісті перелічують структурні елементи звіту: скорочення та умовні позначки, передмову, вступ, назви розділів, підрозділів і пунктів, висновки, рекомендації, перелік джерел посилання, додатки із зазначенням сторінок, на яких вони починаються.

У вступі до звіту стисло подають оцінку сучасного стану об'єкта дослідження або розробки, світові тенденції розв'язання відповідної проблеми, актуальність роботи, підстави для її виконання, мету, можливі сфери застосування результатів та зв'язок з іншими дослідженнями.

Змістова частина звіту розкриває сутність роботи. У ній описують теоретичні положення, методи дослідження, характеристики створеного об'єкта, принципи його дії, метрологічне забезпечення, отримані результати та їх аналіз. Матеріал змістової частини поділяють на розділи, підрозділи та пункти.

У висновках подають найважливіші наукові та практичні результати роботи, оцінюють їх відповідність сучасному рівню знань, ступінь впровадження, можливі галузі використання, наукову, технічну, соціально-економічну значущість, а також доцільність продовження досліджень.

У рекомендаціях обґрунтовують необхідність подальших досліджень, проведення дослідно-конструкторських або дослідно-технологічних робіт, створення дослідних зразків, нових матеріалів, технологій, приладів або методик. Також формулюють пропозиції щодо практичного використання результатів.

Перелік джерел посилання подають наприкінці тексту звіту перед додатками. Бібліографічні описи джерел розміщують у порядку їх першого згадування в тексті. Посилання на джерело подають у квадратних дужках відповідно до його номера в переліку.

Сторінки звіту нумерують наскрізно, включаючи додатки. Номер сторінки проставляють у верхньому правому куті. Титульний аркуш входить до загальної нумерації, але номер сторінки на ньому зазвичай не проставляють.

Усі графічні матеріали звіту - ескізи, діаграми, графіки, схеми, фотографії, рисунки, кресленики мають бути підписані як рисунки. Рисунок розміщують одразу після тексту, у якому на нього вперше посилаються, або якомога ближче

до відповідного фрагмента. Таблиці подають безпосередньо після першого згадування або на наступній сторінці. Назву таблиці друкують над таблицею з великої літери. Формули та рівняння розміщують окремим рядком посередині сторінки, а їхні номери подають праворуч у круглих дужках.

З метою дотримання академічної доброчесності цитування необхідно використовувати в усіх випадках, коли в роботі наведено дані, ідеї, формулювання або результати, отримані з інших джерел. Якщо думку автора подано дослівно, її беруть у лапки. Якщо використано великий фрагмент тексту, його можна виділити іншим способом - окремим абзацом, іншим шрифтом або збільшеним відступом. Допускається скорочення цитати, якщо воно не спотворює змісту; місце пропуску позначають квадратними дужками з трикрапкою. У разі перефразування цитати лапки не ставлять, але посилання на джерело є обов'язковим.

До нормативно-технічної документації належать державні стандарти, технічні умови, нормативи, технічні каталоги, інструкції та інші документи, що мають регламентувальний характер.

Патентна інформація зберігається у вигляді описів винаходів, корисних моделей і патентів. Патент - це документ, що засвідчує авторство на винахід і виключне право на його використання протягом визначеного строку. Патентна інформація має низку переваг: оперативність, достовірність, повноту відомостей і впорядкованість. Її дані перевіряються державною патентною експертизою, а вимоги до викладу суті винаходу є чітко регламентованими.

Депонованими називають наукові роботи вузькоспеціального характеру, які недоцільно видавати масовим поліграфічним тиражем. Депонування забезпечує швидке введення наукових результатів у науковий обіг, фіксацію авторського пріоритету та збереження спеціалізованих матеріалів. Реферати депонованих рукописів і їхні бібліографічні описи публікують у реферативних журналах та бібліотечних покажчиках. В Україні функції депонування виконує Український інститут науково-технічної експертизи та інформації. Автори депонованих робіт зберігають право на їх подальшу публікацію.

З розвитком комп'ютерних і телекомунікаційних технологій можливості дистанційного обміну науковими працями істотно розширилися. Одним зі шляхів підвищення відкритості та доступності наукових результатів є розміщення праць в інституційних репозитаріях. Репозитарій - це цифрове сховище, призначене для зберігання, систематизації та забезпечення доступу до електронних документів. Інституційні репозитарії забезпечують відкритий доступ до електронних публікацій працівників закладів освіти, наукових установ та інших організацій.

Наукова дискусія є однією з ефективних форм колективної творчої діяльності. До усних форм апробації та поширення наукової інформації належать наукові з'їзди, конгреси, конференції, симпозіуми й семінари.

Наукова конференція - це зібрання наукових або практичних працівників, присвячене обговоренню певної тематики. Конференції можуть проводитися в межах однієї установи, регіону, країни або на міжнародному рівні.

Науковий семінар - це обговорення підготовлених доповідей або повідомлень порівняно невеликою групою учасників під керівництвом провідного фахівця. Семінари можуть бути разовими або постійно діючими. Вони сприяють формуванню спільних підходів, обміну думками та розвитку дослідницького колективу.

Найпоширенішою формою усного оприлюднення результатів є доповідь - публічно виголошене повідомлення, що містить розгорнутий виклад певної наукової проблеми. Хоча структура доповіді близька до структури статті, усний виступ має власну специфіку. Доповідь повинна містити пояснення й коментарі до ілюстративного матеріалу, а не дослівно повторювати інформацію зі слайдів, плакатів, схем, діаграм або таблиць. Коротку доповідь називають повідомленням.

Важливим засобом сучасної наукової комунікації є проведення семінарів, конференцій, форумів і засідань наукових товариств із використанням інтернет-технологій. Сучасні інформаційні технології забезпечують новий рівень спілкування, дають змогу оперативно поширювати наукову інформацію та частково замінюють традиційні форми наукової комунікації. До таких форм

належать електронні журнали, гібридні журнали, електронні препринти, електронні публікації, персональні сторінки дослідників, телеконференції та інші засоби дистанційного обміну інформацією.

Розвиток електронних засобів комунікації та комп'ютерних технологій сприяв створенню електронних бібліотек. Електронна бібліотека - це розподілена інформаційна система, що забезпечує зберігання, пошук і використання різноманітних колекцій електронних документів: текстів, графіки, аудіо-, відеоматеріалів та інших цифрових об'єктів. Електронні джерела інформації відрізняються від традиційних ширшою читацькою аудиторією, швидкістю доступу та розширеними можливостями пошуку.

Електронна бібліотека інтегрує інформаційні ресурси й забезпечує ефективну навігацію в них. Користувач отримує можливість шукати необхідну інформацію з високою повнотою та точністю при мінімальних витратах часу. Наприклад, Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського, окрім електронного каталогу, містить повнотекстові електронні автореферати дисертацій, статті з періодичних видань, книги та інші електронні матеріали.

Основними функціональними можливостями електронної бібліотеки є навігація в інформаційному просторі, пошук за ключовими словами, атрибутивний пошук за автором, назвою, місцем і роком видання, перегляд структури документа, підтримка гіпертекстових і гіпермедійних зв'язків, створення закладок, протоколювання сеансу роботи користувача та швидкий перехід до раніше переглянутих матеріалів.

Електронні бібліотеки надають користувачам низку переваг: доступ до документів з обмеженим фізичним доступом; можливість роботи з інформацією, що існує лише в електронній формі; зручність опрацювання великих електронних документів; використання інформації у зручний час; швидкий пошук; можливість експорту даних із зазначенням джерела; доступ до інформаційних ресурсів незалежно від місця їх розташування.

Сутність наукового дослідження полягає у створенні нового знання. Цей процес передбачає опрацювання значних масивів вихідної інформації. Дослідник витрачає зусилля не лише на отримання нового результату, а й на пошук

попередніх результатів, які становлять інформаційну основу дослідження. Зі зростанням обсягу наукової інформації дедалі важливішими стають засоби її систематизації: бібліотечні каталоги, бібліографічні покажчики, реферативні бази даних, електронні бібліотеки та інтернет-ресурси.

Наукове дослідження передбачає цілеспрямований пошук джерел інформації з метою їх подальшого опрацювання та використання. Основними критеріями пошуку є визначення кола питань, що підлягають вивченню; встановлення хронологічних меж пошуку; уточнення можливості використання зарубіжних джерел; визначення видів джерел інформації - книг, статей, дисертацій, патентів, нормативних документів тощо.

До способів пошуку джерел інформації для наукового дослідження належать участь у тематичних семінарах і конференціях, особисті контакти з фахівцями з обраної проблеми, вивчення нормативних документів, підручників, посібників, монографій, періодичних видань, пошук інформації в інтернеті, аналіз статистичних даних і виробничої документації.

У процесі аналізу інформації дослідник має багаторазово опрацьовувати зібрані джерела у темпі й строки, визначені програмою наукового дослідження. Важливими етапами такої роботи є відбір релевантних джерел, критична оцінка їх достовірності, систематизація матеріалу та формування власних висновків.

До основних різновидів інформаційної діяльності належать процеси отримання, застосування, поширення та зберігання інформаційних даних. Система інформаційного забезпечення наукових досліджень охоплює науково-технічну інформацію, канали її поширення, засоби пошуку, органи інформаційного забезпечення та відповідну нормативно-правову базу.

Відповідно до Закону України «Про науково-технічну інформацію», науково-технічна інформація - це будь-які відомості або дані про вітчизняні й зарубіжні досягнення науки, техніки та виробництва, отримані під час науково-дослідної, дослідно-конструкторської, проєктно-технологічної, виробничої та громадської діяльності, які можуть бути збережені на матеріальних носіях або в електронному вигляді.

Інформаційні ресурси науково-технічної інформації охоплюють систематизовані зібрання науково-технічної літератури й документації: книги, брошури, періодичні видання, патентну документацію, нормативно-технічні документи, промислові каталоги, конструкторську документацію, звітну документацію з науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, депоновані рукописи, переклади науково-технічної літератури та інші матеріали. Національна система науково-технічної інформації - це організаційно-правова структура, за допомогою якої формується державна інформаційна політика, а також здійснюється координація робіт зі створення, використання, зберігання та поширення національних ресурсів науково-технічної інформації з урахуванням інтересів національної безпеки.

Основними завданнями національної системи науково-технічної інформації є формування довідково-інформаційних фондів на основі вітчизняних і зарубіжних джерел; інформаційне забезпечення юридичних і фізичних осіб; отримання, обробка, зберігання, поширення та використання інформації, отриманої в процесі наукової, технічної, виробничої та громадської діяльності; організація надходження зарубіжної науково-технічної інформації; підготовка аналітичних матеріалів для прийняття управлінських рішень; створення інформаційної продукції та послуг; упровадження сучасних технологій у науково-інформаційну діяльність.

Український інститут науково-технічної експертизи та інформації здійснює інформаційне, аналітичне, консультаційне та організаційне забезпечення наукової, виробничої й економічної діяльності, а також ведення відповідних баз даних. Інститут забезпечує доступ до інформації в галузі науки, техніки та економіки, сприяє поширенню відомостей про новітні технології, бізнес-проекти й результати наукових досліджень.

Важливим інформаційним центром є також Державна науково-технічна бібліотека України. Це установа загальнодержавного рівня, що належить до системи науково-технічної інформації Міністерства освіти і науки України. Її науково-інформаційна діяльність спрямована на задоволення потреб громадян,

юридичних осіб і держави в науково-технічній інформації шляхом її збирання, аналітико-синтетичної обробки, реєстрації, зберігання, пошуку та поширення.

Бібліотека має значні електронні ресурси, зокрема електронний каталог книжкових видань і періодики, бази даних нормативно-технічних документів, патентний фонд, офіційні бюлетені, реферативні видання патентних відомств, довідково-пошуковий апарат, літературу з питань патентного права, інтелектуальної власності, методичні та довідкові матеріали.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 7

1. Що означає поняття «введення результатів дослідження в науковий обіг» і чому воно є важливим для розвитку науки?
2. Які існують усні та письмові форми оприлюднення результатів наукового дослідження?
3. Яке значення має наукова публікація для підтвердження новизни, достовірності та практичної цінності дослідження?
4. Які основні функції виконують наукові публікації?
5. Чим відрізняються первинні та вторинні наукові документи? Наведіть приклади кожного виду.
6. Які структурні елементи зазвичай містить наукова стаття?
7. Яку роль відіграє анотація у науковій статті?
8. Чому під час підготовки наукової роботи важливо враховувати актуальність і рік видання джерел?
9. У чому полягає різниця між тезами, рефератом і монографією як формами наукової роботи?
10. Яке значення мають електронні бібліотеки, репозитарії та інтернет-ресурси для пошуку й поширення наукової інформації?

РОЗДІЛ 8.

ЗБИРАННЯ ТА ВІДБІР НАУКОВО - ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Одним із основних етапів наукового дослідження є збирання, відбір, аналіз і систематизація науково-технічної інформації. З організаційного погляду цей етап передбачає уточнення хронологічних меж пошуку необхідних джерел, визначення основних інформаційних ресурсів, зокрема періодичних видань, монографій, навчальних посібників, патентної документації, дисертаційних матеріалів та електронних ресурсів, а також установлення критеріїв відбору джерел відповідно до теми, мети й завдань дослідження.

Пошук інформації може здійснюватися у традиційних бібліотечних фондах, електронних каталогах, наукових базах даних і мережі Інтернет. У загальному вигляді методика пошуку необхідних джерел охоплює два основні напрями: тематичний добір усіх релевантних джерел та тематичний добір джерел за видом документа, наприклад журнальних статей, патентних описів, дисертацій, матеріалів конференцій або навчальних видань.

Бібліотека є культурно-освітньою та інформаційною установою, що здійснює збирання, опрацювання, збереження й надання користувачам друкованих, рукописних та електронних документів. Бібліотечний фонд - це впорядкована сукупність джерел інформації, накопичених за певний період, які підлягають обліку, збереженню та використанню відповідно до чинного законодавства й внутрішніх правил бібліотеки.

Ефективне використання бібліотечного фонду неможливе без бібліотечних каталогів. Бібліотечний каталог - це впорядкований перелік друкованих праць та інших документів, наявних у фонді окремої бібліотеки або групи бібліотек. Він є основним засобом інформування користувачів про склад і зміст бібліотечного фонду.

До найпоширеніших інформаційно-пошукових систем традиційного типу належать карткові каталоги й картотеки, зокрема алфавітні та систематичні каталоги. Алфавітний каталог дає змогу встановити наявність у бібліотеці творів певного автора або конкретного видання, якщо відомі автор чи назва книги.

Систематичний каталог призначений для впорядкованого відображення документів за галузями знань відповідно до прийнятих класифікаційних схем.

Систематичний бібліотечний каталог - це каталог, у якому книги та інші документи розміщені за галузями знань відповідно до певної системи класифікації. У такому каталозі картки згруповані в логічній послідовності за окремими галузями знань. За його допомогою можна визначити, які саме видання з певної галузі наявні в бібліотеці, підібрати необхідну літературу за темою дослідження, а також установити автора й назву книги, якщо відомий її зміст.

Основними функціями систематичного каталогу є забезпечення тематичного пошуку документів, відображення інформації про наявні у фонді матеріали з певної галузі знань та допомога користувачеві у формуванні списку літератури з конкретної наукової теми.

Важливе значення для функціонування інформаційно-пошукових систем мають спеціальні інформаційно-пошукові мови класифікаційного характеру. Вони використовуються для індексування документів, тобто присвоєння їм відповідних класифікаційних індексів. Такі індекси формуються на основі бібліотечно-бібліографічних класифікацій, яким властива ієрархічна структура. Інформаційно-пошукова мова є семантичною системою символів і правил їх поєднання, що забезпечує формалізоване представлення змісту документа. Однією з найпоширеніших класифікаційних систем є Універсальна десяткова класифікація документів, або УДК, розроблена Міжнародним бібліографічним інститутом на початку ХХ століття.

Універсальна десяткова класифікація є комбінованою ієрархічною інформаційно-пошуковою мовою, що охоплює всі основні галузі знань. Вона використовується для систематизації документів у бібліотеках, видавництвах, наукових установах, бібліографічних базах даних і наукових публікаціях. Короткий класифікаційний код замінює розгорнутий тематичний опис документа, що значно спрощує його облік, пошук, каталогізацію та подальше використання.

УДК періодично оновлюється з урахуванням розвитку науки, техніки й суспільства. До її переваг належать відносна простота засвоєння працівниками бібліотек і видавництв, зручність шифрування, гнучкість деталізації понять та можливість швидкого пошуку інформації за вузькоспеціалізованими темами. Десятковою ця класифікація називається тому, що всі галузі знань у ній поділено на десять основних відділів, кожен із яких, своєю чергою, може поділитися на десять підрозділів, а ті - на ще дрібніші частини. Кожна наступна цифра, додана до позначення основного класу, уточнює зміст поняття. Чим більша кількість знаків міститься в індексі, тим детальніше конкретизовано відповідну тему. Для зручності сприйняття кожен три знаки в індексі зазвичай відокремлюють крапкою.

Основна таблиця УДК має таку структуру:

0 - Загальний відділ.

1 - Філософія. Психологія.

2 - Релігія. Теологія.

3 - Суспільні науки.

4 - Резервний відділ.

5 - Математика. Природничі науки.

6 - Прикладні науки. Медицина. Техніка. Сільське господарство.

7 - Мистецтво. Архітектура. Ігри. Спорт.

8 - Мова. Мовознавство. Художня література. Літературознавство.

9 - Географія. Біографії. Історія.

У межах одного розділу індекси розміщують від загального до часткового. Наприклад, літературні джерела технічних спеціальностей переважно належать до розділу 6. Якщо результати дослідження стосуються кількох рівнів класифікації або виконуються на межі кількох наукових напрямів, може використовуватися кілька класифікаційних індексів.

Під час складання списку літератури насамперед необхідно чітко сформулювати тему, мету й вихідні параметри пошуку. Після цього обирають рубрики систематичного каталогу, які відповідають темі дослідження, і визначають відповідний шифр за УДК. В індексі мають бути відображені галузь

знань, об'єкт дослідження та характер наукового підходу або напрямку дослідження.

Наприклад, галузь «Машинобудування» має шифр 621. Навчальний посібник для закладів вищої освіти «Методологія наукових досліджень» може мати індекс УДК 001.8(07), де 001 означає науку загалом, 001.8 - загальну методологію, науковий аналіз і синтез, а (07) - матеріали для викладання та вивчення, тобто навчальні посібники.

Окремим засобом ідентифікації друкованих і електронних книжкових видань є ISBN - Міжнародний стандартний номер книги. Система ISBN була розроблена у 1966 році у Великій Британії. Індекс ISBN є універсальним ідентифікаційним кодом, який присвоюється книгам незалежно від способу їх виготовлення, форми поширення, тиражу та обсягу.

Номер ISBN дає змогу ідентифікувати країну або мовну групу видання, видавця та конкретне видання. Він є унікальним для кожної книги. Для періодичних видань ISBN не застосовують, оскільки для них використовують інші системи ідентифікації. ISBN забезпечує об'єднання процесів видання, розповсюдження та інформаційного обслуговування книжкової продукції в єдину систему. Додатковий тираж, перевидання або електронна версія друкованої книги повинні мати окремий ISBN.

Пошук наукової інформації здійснюється не лише в традиційних бібліотеках, а й у мережі Інтернет. Інформація, розміщена в електронному середовищі, зазвичай доступна у цифровому форматі, що спрощує її пошук, збереження, опрацювання та використання в науковій роботі.

Глобальна мережа Інтернет забезпечує широкі можливості для отримання, поширення й аналізу наукової, освітньої та ділової інформації. Вона об'єднує наукові установи, університети, урядові організації, видавництва, інформаційні агентства, бібліотеки, архіви та інші джерела даних із різних галузей знань. Інтернет є глобальною системою взаємопов'язаних комп'ютерних мереж. Його складовими є електронна пошта, вебресурси, електронні бібліотеки, архіви, бази даних, цифрові репозитарії, стрічки новин та інші інформаційні сервіси.

Документи, призначені для відкритого доступу, розміщують на вебсерверах. Для перегляду таких документів користувачі застосовують веббраузери.

Під час пошуку інформації в Інтернеті використовують пошукові системи, електронні каталоги, наукові портали, інституційні репозитарії та бази даних. Через Інтернет можна знайти книги, журнальні статті, дисертації, автореферати, матеріали конференцій, патентні документи й інші джерела, необхідні для наукової роботи. Пошук в електронних бібліотеках здійснюється за загальними правилами роботи з електронними базами даних: за ключовими словами, авторами, назвами, роком видання, типом документа, тематичною рубрикою або класифікаційним індексом.

Одним із найпоширеніших інструментів пошуку наукової літератури є Google Академія, або Google Scholar. Це спеціалізована пошукова система, яка індексує наукові публікації та надає інформацію про їх цитування. Google Scholar дає змогу здійснювати онлайн-пошук цифрових копій статей, монографій, дисертацій, матеріалів конференцій та інших наукових праць.

Google Scholar охоплює значну кількість рецензованих онлайн-журналів, публікацій університетів, наукових видавництв і репозитаріїв. Для україномовних авторів ця система часто має практичне значення, оскільки індексує ширший масив локальних і національних публікацій, ніж окремі комерційні бібліометричні платформи.

Профіль науковця в Google Академії дає авторові можливість відстежувати бібліографічні посилання на власні публікації, переглядати дані про цитування, аналізувати динаміку цитувань у часі та визначати основні наукометричні показники, зокрема h-індекс та i10-індекс. Крім автоматично проіндексованих джерел, автор може самостійно додавати до профілю відомості про власні наукові праці, зокрема ті, що були опубліковані у виданнях, не представлених онлайн.

Після створення профілю в Google Scholar авторові доцільно перевірити різні варіанти написання свого імені та об'єднати відповідні записи в один авторський профіль. Це сприяє коректній індексації публікацій і точнішому обліку цитувань.

У контексті наукометричного оцінювання важливе значення мають видимість наукових публікацій, їх доступність для цитування та включення до авторитетних інформаційних систем. В Україні профілі науковців у Google Scholar, а також показники баз Scopus, Web of Science, Publons та інших ресурсів можуть використовуватися для інформаційно-аналітичного моніторингу наукової діяльності.

Одним із прикладів такої системи є «Бібліометрика української науки», створена у 2014 році відділом бібліометрії і наукометрії Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського. Цей сервіс систематизує бібліометричні профілі українських науковців і дослідницьких колективів, створені на основі відкритих наукових платформ та баз даних.

Окрім пошукових систем, у мережі Інтернет функціонують спеціалізовані наукові портали й соціальні мережі для дослідників. Одним із таких ресурсів є ResearchGate - наукова соціальна мережа, призначена для комунікації та співпраці між науковцями з різних галузей. ResearchGate надає можливості для пошуку публікацій, обміну файлами, ведення наукових дискусій, створення професійних контактів, участі в тематичних групах і поширення результатів досліджень.

Таким чином, збирання та відбір науково-технічної інформації є складним і багатоетапним процесом, що передбачає використання традиційних бібліотечних ресурсів, класифікаційних систем, електронних каталогів, пошукових систем, наукометричних платформ і спеціалізованих наукових порталів. Якість інформаційного пошуку безпосередньо залежить від чіткості сформульованої теми, правильного добору ключових слів, уміння працювати з класифікаційними індексами та критичного оцінювання знайдених джерел.

1. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 8

2. Які основні етапи передбачає збирання, відбір і систематизація науково-технічної інформації?
3. Які джерела інформації можуть використовуватися під час наукового дослідження?
4. У чому полягає різниця між тематичним доббором усіх релевантних джерел і доббором джерел за видом документа?
5. Що таке бібліотечний фонд і яке його значення для наукової роботи?
6. Яке призначення має бібліотечний каталог?
7. Чим відрізняється алфавітний каталог від систематичного каталогу?
8. Які основні функції виконує систематичний бібліотечний каталог?
9. Що таке Універсальна десяткова класифікація документів і для чого вона використовується?
10. Яке значення має ISBN для ідентифікації книжкових видань?
11. Які можливості для пошуку наукової інформації надають Google Scholar, наукові бази даних і спеціалізовані наукові портали?

РОЗДІЛ 9. ВІДКРИТА НАУКА

Відкрита наука - це сучасний підхід до організації наукової та науково-технічної діяльності, що ґрунтується на використанні інформаційно-комунікаційних технологій для поширення результатів досліджень, забезпечення відкритого доступу до науково-технічної інформації та розвитку співпраці між дослідниками. Її основна ідея полягає в тому, що результати наукових досліджень, особливо тих, що профінансовані за рахунок суспільних коштів, мають бути максимально доступними для наукової спільноти, закладів освіти, органів управління, бізнесу та громадськості.

Відкрита наука не заперечує авторства, наукової конкуренції чи інституційної відповідальності. Водночас вона змінює акцент у науковій діяльності: головною метою стає не ізольоване накопичення знань, а їх ефективне поширення, перевірка, повторне використання та розвиток в інтересах суспільства.

Відкрита наука орієнтована передусім на суспільну користь, глобальний доступ до знань і підвищення ефективності наукової діяльності, а не лише на індивідуальну конкуренцію, комерційні інтереси чи обмежене використання результатів досліджень окремими установами або корпораціями. Її метою є прискорення науково-технічного й суспільного розвитку, поглиблення міжнародної та міждисциплінарної співпраці, підвищення прозорості наукових процесів, а також забезпечення можливості перевірки, повторного використання та відтворення результатів досліджень.

У Рекомендаціях UNESCO щодо відкритої науки серед базових цінностей визначено спільне благо, рівний доступ до знань, інклюзивність, справедливість, співпрацю та солідарність. Ці принципи підкреслюють, що наукове знання має розглядатися як важливий суспільний ресурс, доступ до якого не повинен обмежуватися фінансовими, інституційними або географічними чинниками.

Парадигма відкритої науки передбачає перехід від традиційної моделі поширення результатів досліджень, що переважно ґрунтується на комерційних наукових виданнях із обмеженим доступом через високу вартість передплати, до

моделі вільного або максимально відкритого обміну науковими ідеями, публікаціями, даними, методиками, програмним забезпеченням та іншими результатами наукової діяльності. Особливого значення це набуває у випадках, коли дослідження фінансуються за рахунок державних коштів, міжнародних грантів або інших суспільних ресурсів.

Основними складниками відкритої науки є відкритий доступ до наукових публікацій, відкриті дослідницькі дані, відкрите рецензування, відкриті освітні ресурси, відкрите програмне забезпечення, відкриті методології та громадянська наука. Відкрита наукова інфраструктура сприяє ефективнішому поширенню знань, зменшенню дублювання досліджень, раціональному використанню ресурсів і формуванню умов для повторного аналізу та перевірки наукових результатів.

Відкриті наукові знання охоплюють публікації, дані, програмне забезпечення, навчальні матеріали та інші результати досліджень, доступні для вільного використання, поширення та повторного застосування з дотриманням етичних, правових і ліцензійних вимог. Важливими принципами відкритої науки є прозорість, контрольованість, критичний аналіз, відтворюваність і можливість незалежної перевірки достовірності отриманих результатів іншими дослідниками.

Відкрита наука передбачає не лише відкритий доступ до публікацій, а й ширший підхід до організації наукової діяльності. Він охоплює відкритість дослідницьких даних, методів дослідження, програмного забезпечення, освітніх ресурсів, наукової комунікації та співпраці між дослідниками, установами й суспільством. Відповідно до методичних рекомендацій Міністерства освіти і науки України, відкрита наука у сфері управління науковими даними передбачає такий спосіб організації та реалізації наукової діяльності, за якого забезпечується доступ до об'єктів дослідницької інфраструктури, наукових публікацій, дослідницьких даних та інших результатів наукової роботи з можливістю їх багаторазового використання.

Відкрита наука є одним зі стратегічних пріоритетів Європейської Комісії та стандартним підходом у програмах фінансування досліджень та інновацій.

Міжнародну основу для розвитку цієї практики формують Рекомендації UNESCO щодо відкритої науки, які визначають її ключові цінності, принципи та напрями впровадження. Важливою цінністю відкритої науки є рівний доступ до наукових знань. Це означає, що дослідники, викладачі, студенти, фахівці-практики та громадськість повинні мати можливість користуватися науковою інформацією незалежно від країни проживання, фінансових можливостей, належності до певної установи чи наукової школи. В Україні Міністерство освіти і науки здійснює заходи, спрямовані на розширення доступу українських учених до важливих електронних ресурсів наукової інформації.

У 2017 році заклади вищої освіти та наукові установи України вперше отримали доступ до провідних реферативних і бібліографічних баз даних Scopus та Web of Science. З 2019 року доступ до цих баз даних надається у форматі національної передплати, що дало змогу сотням закладів вищої освіти та наукових установ користуватися цими ресурсами.

Окрім доступу до реферативних і бібліографічних баз даних, українським науковцям за рахунок бюджетних коштів було надано доступ до повнотекстових баз даних провідних світових видавців наукової літератури. Зокрема, у 2020 році було забезпечено доступ до електронних книг і журналів Springer Nature, а у 2021 році - до колекції електронних книг видавництва Elsevier. Водночас архівування наукових праць в інституційному репозитарії з обмеженим доступом не повною мірою відповідає принципам відкритого оприлюднення результатів наукової роботи, оскільки не забезпечує їх широкого та вільного використання.

Участь у практиках відкритої науки передбачає послідовне виконання кількох етапів. На підготовчому етапі дослідник створює міжнародний унікальний цифровий ідентифікатор ORCID, ознайомлюється з політикою відкритої науки, принципами академічної доброчесності, вимогами грантодавців і правилами роботи з відкритими даними. На етапі планування дослідження необхідно передбачити використання принципів відкритої науки у дослідницькому плані, визначити відповідні репозитарії для розміщення результатів, обрати журнали відкритого доступу та підготувати план управління дослідницькими даними.

Під час проведення дослідження важливо документувати всі його етапи, зберігати дані у відкритих або стандартизованих форматах, використовувати надійні інструменти збереження інформації, забезпечувати належний опис методів, матеріалів і процедур. Це створює умови для перевірки результатів, їх повторного аналізу та використання іншими науковцями.

На етапі публікації результати дослідження мають бути оприлюднені у відкритому доступі, а дослідницькі дані, за можливості, розміщені у відповідних репозитаріях із зазначенням умов їх використання. Додатково можуть застосовуватися наукові соціальні мережі, інституційні платформи та інші канали комунікації для популяризації результатів дослідження.

Основними принципами відкритої науки є прозорість, перевірюваність, відтворюваність і доступність. Прозорість означає, що дослідник має чітко описувати мету, методи, джерела даних, етапи дослідження та підходи до аналізу результатів. Перевірюваність передбачає можливість незалежної оцінки достовірності отриманих висновків. Відтворюваність полягає в тому, що інші дослідники за наявності відповідних даних і методик можуть повторити дослідження або перевірити його результати. Доступність забезпечує можливість користування науковими матеріалами широким колом зацікавлених осіб.

Для науковців відкрита наука створює низку переваг: підвищення видимості наукових результатів, збільшення цитованості, розширення можливостей для міжнародної співпраці, відповідність вимогам грантодавців і підвищення довіри до результатів дослідження. Відкритість дослідницьких даних, методів і результатів підвищує можливість перевірки наукових висновків, виявлення помилок, повторення досліджень і запобігання фальсифікаціям. Таким чином, відкрита наука посилює довіру до наукових результатів і сприяє дотриманню принципів академічної доброчесності.

На рівні університету впровадження принципів відкритої науки сприяє покращенню академічної репутації, зростанню показників цитування, залученню нових партнерів, участі в міжнародних дослідницьких проєктах та інтеграції установи у світовий науково-освітній простір.

Водночас відкрита наука, попри значний потенціал для розвитку досліджень, підвищення прозорості та забезпечення доступу до знань, супроводжується низкою ризиків. Вони пов'язані з недостатнім регулюванням, нерівністю доступу до ресурсів, питаннями етики, безпеки та якості наукової інформації.

Одним із ключових ризиків відкритої науки є порушення прав інтелектуальної власності. Відкритий доступ до наукових публікацій, даних, методик і результатів досліджень може створювати умови для неправомірного використання чужих ідей, результатів або матеріалів без належного цитування та визнання авторства. Особливо це стосується дослідників, які оприлюднюють проміжні результати, бази даних або препринти до завершення повного циклу наукової роботи.

Ще одним важливим ризиком є зниження якості наукової інформації через можливість поширення неперевіраних або недостатньо рецензованих матеріалів. У таких умовах особливого значення набувають наукове рецензування, критичний аналіз, редакційний контроль та академічна відповідальність.

Окрему проблему становить фінансова модель частини відкритих публікацій. Деякі видавництва використовують відкритий доступ як джерело прибутку, перекладаючи фінансове навантаження з читача на автора. У результаті виникає ситуація, коли доступ до читання є відкритим, але можливість публікації стає обмеженою для дослідників, які не мають достатнього фінансування.

Особливо небезпечними є хижацькі журнали та псевдонаукові платформи, які імітують відкритий доступ, але не забезпечують належного рецензування, редакційного контролю та дотримання академічних стандартів. Такі ресурси можуть публікувати низькоякісні або навіть фальсифіковані матеріали за оплату, що підриває довіру до відкритої науки загалом.

Отже, ефективна реалізація відкритої науки потребує не лише технічного забезпечення, а й чітких етичних, правових і методологічних механізмів контролю. Відкритість у науці має бути не хаотичною, а відповідальною, організованою та такою, що поєднує доступність знань із дотриманням академічної доброчесності, прав авторів і стандартів якості наукової інформації.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 9

1. Що таке відкрита наука і яка її основна ідея?
2. Чому результати досліджень, профінансованих суспільними коштами, мають бути максимально доступними?
3. Які базові цінності відкритої науки визначені у Рекомендаціях UNESCO?
4. У чому полягає відмінність відкритої науки від традиційної моделі поширення наукових результатів через комерційні видання?
5. Назвіть основні складники відкритої науки.
6. Яке значення мають прозорість, перевірюваність і відтворюваність у відкритій науці?
7. Які етапи має пройти дослідник для участі у програмах відкритої науки?
8. Чому ORCID є важливим для науковця в контексті відкритої науки?
9. Які переваги відкрита наука створює для науковців та університетів?
10. Які основні ризики пов'язані з відкритою наукою, зокрема щодо інтелектуальної власності, якості інформації та хижацьких журналів?

РОЗДІЛ 10.

АКАДЕМІЧНА ДОБРОЧЕСНІСТЬ У НАУКОВІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

Академічна доброчесність є однією з ключових передумов забезпечення якості освітньої, наукової та науково-технічної діяльності. Її дотримання формує довіру до результатів навчання, наукових здобутків і дослідницької роботи, а також сприяє утвердженню поваги до честі, гідності та інтелектуальної праці людини. У сучасній системі вищої освіти академічна доброчесність розглядається не лише як сукупність етичних норм, а і як важливий механізм забезпечення якості освіти й науки.

29 січня 2026 року Президент України підписав Закон України «Про академічну доброчесність», ухвалений Верховною Радою України 18 грудня 2025 року. Основною метою цього Закону є забезпечення довіри до результатів навчання, наукової, науково-педагогічної та творчої діяльності. Закон України «Про академічну доброчесність» ґрунтується на положеннях Конституції України та доповнює норми законів України «Про освіту», «Про вищу освіту» і «Про наукову і науково-технічну діяльність».

Закон визначає академічну доброчесність як важливу передумову провадження якісної освітньої та наукової діяльності, здобуття якісної освіти, забезпечення довіри до результатів навчання і наукових досягнень, а також формування поваги до честі й гідності людини. Цей нормативно-правовий акт встановлює принципи і правила академічної доброчесності, механізми її формування та забезпечення, основні види порушень академічної доброчесності, а також відповідальність за такі порушення.

Особливої актуальності проблема академічної доброчесності набула у зв'язку зі стрімким розвитком технологій штучного інтелекту. Такі технології створюють нові можливості для навчання, наукового пошуку, аналізу даних і підготовки академічних текстів. Водночас їх використання породжує низку етичних і правових проблем, пов'язаних із прозорістю авторства, самостійністю виконання робіт, достовірністю результатів і недопущенням привласнення згенерованого контенту як власного академічного результату.

Базовими цінностями академічної доброчесності є чесність, довіра, повага, справедливість, відповідальність, стійкість і рішучість у дотриманні доброчесної академічної поведінки.

Чесність передбачає правдивість суб'єктів академічної діяльності перед собою та іншими особами. Довіра означає переконання в тому, що результати академічної діяльності інших осіб здобуті чесно, із дотриманням установлених правил і стандартів. Повага охоплює визнання честі й гідності членів академічної спільноти, різноманіття думок, а також прав інтелектуальної власності. Справедливість передбачає формування об'єктивних і неупереджених політик закладів освіти та наукових установ, послідовне реагування на порушення академічної доброчесності й об'єктивне оцінювання результатів академічної діяльності.

Відповідальність означає усвідомлення суб'єктами академічної діяльності наслідків власних дій перед собою, академічною спільнотою і суспільством. Стійкість полягає у здатності дотримуватися доброчесної поведінки незалежно від зовнішніх або внутрішніх спонукань до порушення правил академічної доброчесності, а також незалежно від наявності зовнішнього контролю. Рішучість передбачає активне формування, підтримку й захист культури академічної доброчесності у сфері освіти і науки.

Основи академічної доброчесності в українському законодавстві були закладені ще у 2017 році в Законі України «Про освіту». У цьому Законі академічну доброчесність визначено як сукупність етичних принципів і встановлених законом правил, якими мають керуватися учасники освітнього процесу під час навчання, викладання та провадження наукової або творчої діяльності з метою забезпечення довіри до результатів навчання, наукових і творчих досягнень.

Дотримання академічної доброчесності педагогічними, науково-педагогічними та науковими працівниками передбачає обов'язкове посилення на джерела інформації у разі використання чужих ідей, розробок, тверджень або відомостей; дотримання норм законодавства про авторське право і суміжні права; надання достовірної інформації про методики й результати досліджень,

джерела використаної інформації та власну педагогічну, науково-педагогічну або творчу діяльність; контроль за дотриманням академічної доброчесності здобувачами освіти; об'єктивне оцінювання результатів навчання.

Дотримання академічної доброчесності здобувачами освіти передбачає самостійне виконання навчальних завдань, завдань поточного й підсумкового контролю результатів навчання. Для осіб з особливими освітніми потребами ця вимога застосовується з урахуванням їхніх індивідуальних потреб і можливостей. Здобувачі освіти також зобов'язані посилатися на джерела інформації у разі використання чужих ідей, розробок, тверджень або відомостей; дотримуватися норм законодавства про авторське право і суміжні права; надавати достовірну інформацію про результати власної навчальної, наукової чи творчої діяльності, використані методики досліджень і джерела інформації.

Закон України «Про академічну доброчесність» визначає низку основних термінів, необхідних для регулювання академічної діяльності. Автором визнається фізична особа, яка своєю працею створила академічний твір або його частину, навчальну роботу чи її частину. Академічна доброчесність трактується як сукупність цінностей, принципів і заснованих на них правил, якими мають керуватися суб'єкти академічної діяльності під час її провадження.

Академічний твір - це твір у сфері освіти чи науки, виражений у формі дисертації, творчого мистецького проєкту, кваліфікаційної роботи, курсової роботи, наукової монографії, наукової статті, підручника, навчального посібника або в іншій формі, визначеній законодавством чи внутрішнім актом.

Внутрішнім актом є документ закладу освіти, наукової установи або іншого суб'єкта академічної діяльності, затверджений у встановленому порядку його колегіальним органом управління та спрямований на врегулювання питань академічної доброчесності. Джерелом інформації визнається друковане чи електронне видання, архівний матеріал, інтернет-ресурс, особиста комунікація або інше джерело, з якого отримано інформацію, використану в академічному творі чи навчальній роботі.

Навчальна робота - це результат виконання здобувачем освіти навчального завдання або кількох навчальних завдань, відображений у текстовій, візуальній,

аудіовізуальній, пластичній, цифровій чи іншій формі. До суб'єктів академічної діяльності належать педагогічні, науково-педагогічні та наукові працівники, інші вчені, здобувачі освіти, вступники, учасники й організатори конкурсів, експерти у сфері освіти і науки, суб'єкти освітньої та наукової діяльності.

Уповноваженим органом є колегіальний орган закладу освіти або наукової установи, який відповідно до Закону розглядає повідомлення про порушення академічної доброчесності та/або застосовує заходи реагування на такі порушення. Уповноваженою особою є педагогічний, науково-педагогічний або науковий працівник закладу освіти чи наукової установи, наділений повноваженнями реагувати на порушення академічної доброчесності, розглядати відповідні повідомлення та застосовувати заходи реагування, визначені внутрішнім актом.

Дія Закону України «Про академічну доброчесність» поширюється на суспільні відносини, що виникають у зв'язку з провадженням академічної діяльності. До такої діяльності належать наукова, науково-педагогічна, педагогічна і викладацька діяльність; навчальна діяльність здобувачів освіти; освітня діяльність закладів освіти і наукових установ; створення, виконання та оцінювання проєктів у сфері освіти і науки; створення, рецензування та наукове редагування академічних творів; проведення вступних випробувань у закладах освіти і наукових установах; організація та проведення олімпіад, турнірів, конкурсів, змагань та інших заходів змагального характеру у сфері освіти і науки. Закон також охоплює процедури присудження наукових ступенів і ступенів освіти, присвоєння вчених і педагогічних звань, кваліфікаційних категорій, обрання дійсних членів і членів-кореспондентів Національної академії наук України та національних галузевих академій наук України. Крім того, його положення поширюються на процедури внутрішнього і зовнішнього забезпечення якості освіти, атестацію наукових працівників, державну атестацію наукових установ і закладів вищої освіти в частині провадження ними наукової та науково-технічної діяльності, а також на проведення наукової і науково-технічної експертизи.

Суб'єкти наукової та науково-технічної діяльності зобов'язані дотримуватися цінностей, принципів і правил академічної доброчесності; забезпечувати прозорість наукового дослідження шляхом надання достовірної інформації про первинні дані, використані методи, методики, матеріали, обладнання, порядок проведення дослідження та його результати. Вони також мають аналізувати надійність і достовірність вихідної інформації та раніше отриманих наукових результатів, які використовуються для одержання нових знань; формулювати висновки й рекомендації на основі належних доказів і фактів; чітко розмежовувати власні наукові результати і результати наукової діяльності інших осіб; під час оприлюднення результатів досліджень нести відповідальність за їх достовірність і суспільний вплив.

Заклади освіти і наукові установи зобов'язані здійснювати перевірку академічних творів, які вони видають або які оприлюднюються у заснованих ними виданнях чи у виданнях, рекомендованих ними до друку, на відсутність ознак порушення академічної доброчесності.

Стаття 18 Закону України «Про академічну доброчесність» визначає основні види порушень академічної доброчесності. До них належать відчуження авторства, академічний плагіат, приписування авторства, самоплагіат, фабрикація, фальсифікація, недоброчесне використання результатів, згенерованих штучним інтелектом, недоброчесне оцінювання, несамостійне виконання завдання, недозволена допомога, академічний саботаж, схилення до порушення академічної доброчесності, а також інституційні порушення академічної доброчесності.

Відчуження авторства - це передача автором або авторами створеного ними академічного твору чи його частини іншій особі з подальшим оприлюдненням такого твору із зазначенням автором особи, яка фактично не брала участі в його створенні.

Академічний плагіат полягає в оприлюдненні наукового або творчого результату, отриманого іншою особою, як результату власної академічної діяльності, а також у відтворенні в академічному творі чи навчальній роботі

чужого тексту, ідей, даних або перекладу без належного посилання на джерело та автора.

Приписування авторства означає оприлюднення твору, серед авторів якого зазначено особу, яка не брала участі в його створенні. Самоплагіат полягає в оприлюдненні власних раніше опублікованих наукових результатів без зазначення інформації про джерело їх попереднього оприлюднення.

Фабрикація - це вигадкування даних або фактів щодо результатів академічної діяльності. Фальсифікація - це свідомо зміна чи модифікація наявних даних, що призводить до створення завідомо неправдивої інформації про результати академічної діяльності.

Недоброчесне використання результатів, згенерованих штучним інтелектом, полягає в оприлюдненні текстів, зображень, моделей, даних або інших результатів, створених за допомогою штучного інтелекту, як результатів власної академічної діяльності, якщо факт такого використання не зазначено в академічному творі або супровідних матеріалах.

Недоброчесне оцінювання - це свідоме порушення встановлених вимог щодо оцінювання, яке призводить до завищення або заниження оцінки результатів академічної діяльності.

Несамостійне виконання завдання передбачає виконання навчального або конкурсного завдання із залученням недозволених джерел інформації, технічних засобів чи сторонньої допомоги, зокрема у формі списування або виконання роботи іншою особою. Недозволена допомога - це надання допомоги, не передбаченої умовами навчального чи конкурсного завдання, що призвело або могло призвести до викривлення оцінки результатів академічної діяльності.

Академічний саботаж охоплює дії або бездіяльність, які перешкоджають реалізації прав, свобод і законних інтересів іншої особи в академічній діяльності. Схиляння до порушення академічної доброчесності передбачає прохання, вмовляння, доручення, погрозу, примушування, тиск або іншу форму спонукання особи до вчинення відповідного порушення.

Інституційними порушеннями академічної доброчесності з боку закладів освіти, наукових установ або наукових видавництв є поширення недостовірної

інформації про власну академічну діяльність або діяльність працівників і здобувачів освіти; бездіяльність щодо розбудови системи забезпечення академічної доброчесності; безпідставне залишення без розгляду повідомлення про порушення академічної доброчесності; невжиття заходів щодо виявлення таких порушень; невжиття заходів реагування на встановлені факти порушень. Типовими проявами самоплагіату є дублювання публікацій, тобто публікація однієї й тієї самої наукової роботи або роботи з неістотними змінами у кількох виданнях; повторне оприлюднення раніше опублікованих статей, монографій чи інших праць як нових наукових результатів; дублювання наукових результатів у різних публікаціях без належного посилання на попередні роботи; подання у звітах із виконання наукових проєктів результатів, які вже були представлені раніше.

До проявів самоплагіату також належать агрегування або доповнення даних без чіткого відокремлення нових і раніше опублікованих результатів; дезагрегування даних, тобто публікація частини раніше оприлюднених даних без посилання на первинне джерело; повторний аналіз раніше опублікованих даних без зазначення попередньої публікації та раніше виконаного аналізу.

Використання принципів відкритої науки, зокрема забезпечення доступу до наукових даних, функціонування репозитаріїв і незалежне рецензування, сприяє об'єктивності, прозорості та можливості перевірки наукових результатів. Для виявлення порушень академічної доброчесності застосовують технічні засоби контролю: антиплагіатні системи для перевірки текстів на автентичність, програми для виявлення підроблених результатів, електронні платформи тестування, а також аудіо- чи відеофіксацію під час проведення контрольних заходів.

Дисертації та кваліфікаційні роботи, підписані кваліфікованим електронним підписом, підлягають обов'язковому оприлюдненню на вебсайтах закладів освіти або в академічних репозитаріях у відкритому доступі. Експерти у сфері освіти і науки також зобов'язані дотримуватися принципів академічної доброчесності та не можуть оцінювати заклади чи установи, у яких вони

працювали або навчалися, протягом трьох років після звільнення чи завершення навчання.

Закон України «Про академічну доброчесність» передбачає різні види відповідальності за порушення встановлених правил. До них можуть належати дисциплінарні стягнення, позбавлення посад, звань, привілеїв, наукових ступенів, а для здобувачів освіти - відрахування із закладу освіти. Факт порушення академічної доброчесності має встановлювати спеціальний уповноважений орган, створений у закладі освіти або науковій установі.

Ефективна система реагування на порушення академічної доброчесності повинна бути прозорою, послідовною, невідвратною та пропорційною характеру порушення. Вона має враховувати ступінь тяжкості вчиненого діяння - від неналежного оформлення цитування до фабрикації чи фальсифікації результатів. Відповідні заходи можуть варіюватися від зниження оцінки, позбавлення академічної стипендії або анулювання результатів роботи до відрахування із закладу освіти чи звільнення з посади. Важливо, щоб такі заходи застосовувалися без вибірковості, упередженості або подвійних стандартів.

Окремим елементом забезпечення академічної доброчесності є створення Реєстру осіб, щодо яких застосовано обмеження за порушення академічної доброчесності. Такий механізм має сприяти підвищенню відповідальності суб'єктів академічної діяльності, зміцненню довіри до освітнього і наукового середовища, а також формуванню сталої культури чесності, відкритості та відповідального ставлення до результатів інтелектуальної праці.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 10

1. Що таке академічна доброчесність і чому вона є важливою для освітньої та наукової діяльності?
2. Які основні цінності академічної доброчесності визначаються в сучасному освітньому середовищі?
3. Яку роль відіграє Закон України «Про академічну доброчесність» у забезпеченні якості освіти і науки?
4. Які обов'язки щодо дотримання академічної доброчесності мають педагогічні, науково-педагогічні та наукові працівники?
5. Які вимоги академічної доброчесності висуваються до здобувачів освіти?
6. Що таке академічний плагіат і чим він відрізняється від самоплагіату?
7. У чому полягає фабрикація та фальсифікація результатів академічної діяльності?
8. Чому використання результатів, згенерованих штучним інтелектом, може вважатися порушенням академічної доброчесності?
9. Які основні види порушень академічної доброчесності передбачає законодавство України?
10. Які заходи відповідальності можуть застосовуватися за порушення академічної доброчесності?

РОЗДІЛ 11. НАУКОВА КОМУНІКАЦІЯ, БІБЛІОМЕТРІЯ ТА НАУКОМЕТРИЧНІ РЕСУРСИ В СУЧАСНІЙ НАУКОВІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

Створення нових теорій, конкурентоспроможних зразків техніки, технологій і матеріалів ґрунтується на всебічному аналізі науково-технічної інформації. Науково-технічна інформація - це документовані або публічно оприлюднені відомості про вітчизняні та зарубіжні досягнення науки, техніки й виробництва. Первинним результатом більшості видів науково-дослідної діяльності є наукові публікації, у яких фіксуються отримані результати, методи дослідження, їх інтерпретація та значення для подальшого розвитку відповідної галузі знань. Ефективність роботи науковця значною мірою залежить від того, наскільки оперативно він отримує інформацію про сучасний стан досліджень у своїй галузі, а також від можливості своєчасно обговорювати проміжні результати власної наукової роботи з фаховою спільнотою. У цьому контексті особливе значення має наукова комунікація.

Наукова комунікація - це процес обміну науковою інформацією, ідеями, знаннями, результатами досліджень та їх інтерпретацією між науковцями, дослідницькими колективами, науковими установами й іншими учасниками наукового процесу. Її основними функціями є поширення наукових результатів, забезпечення їх експертного оцінювання, формування наукової дискусії та розвиток наукового знання.

До основних форм науково-технічної інформації належать наукові статті, монографії, матеріали конференцій, звіти про науково-дослідні роботи, дисертації, патентна документація, а також матеріали наукових дискусій. Обмін інформацією між дослідниками здійснюється через різні канали комунікації: наукові журнали, конференції, семінари, симпозіуми, електронні ресурси, професійні мережі та безпосереднє фахове спілкування. Саме ці канали забезпечують циркуляцію наукових знань і сприяють науково-технічному прогресу.

У процесі наукової комунікації виокремлюють такі основні елементи:

1. **Комунікант** - відправник наукового повідомлення, тобто особа або група осіб, які генерують і передають наукову інформацію.
2. **Комунікат** - саме повідомлення, у якому зафіксовано наукову інформацію. Це може бути текст наукової доповіді, стаття, монографія, звіт про науково-дослідну роботу, дисертація, опис винаходу, книга, брошура, електронний ресурс тощо.
3. **Канал комунікації** - спосіб або засіб передавання наукової інформації.
4. **Реципієнт** - особа або група осіб, які отримують наукове повідомлення, інтерпретують його та певним чином реагують на нього.
5. **Зворотний зв'язок** - реакція реципієнта на отриману інформацію, що може проявлятися у формі цитування, посилання, рецензії, відгуку, наукової дискусії або подальшого дослідження.

Наукова комунікація починається з комуніканта, який формує наукову ідею, концепцію, гіпотезу або повідомляє результати дослідження. Комунікантами можуть бути окремі науковці, дослідницькі групи, наукові школи, лабораторії, університети, академічні інститути та інші наукові установи. Науковий статус комуніканта визначається рівнем його фахової підготовки, наявністю наукового ступеня або вченого звання, кількістю і якістю публікацій, досвідом наукової роботи, участю в дослідницьких проєктах та рівнем визнання у фаховій спільноті.

Однією з основних формальних ознак визнання кваліфікації науковця є публікація результатів досліджень в авторитетних наукових виданнях, а також участь із доповідями в наукових конференціях. В Україні авторитетність частини наукових видань формально визначається через відповідні переліки фахових видань, публікації в яких враховуються під час атестації здобувачів наукових ступенів.

Між комунікантом і реципієнтом встановлюється канал комунікації, без якого передавання наукової інформації є неможливим. До таких каналів належать наукові конференції, семінари, симпозіуми, видавництва, редакції журналів, бібліотеки, електронні бази даних, інтернет-платформи, радіо, телебачення та інші засоби поширення інформації. Наукова комунікація є

ефективною лише за умов наявності зворотного зв'язку, тобто реакції реципієнта на отримане повідомлення. Такою реакцією можуть бути цитування, посилання, рецензія, науковий відгук, написання статті, участь у дискусії або використання отриманих даних у подальших дослідженнях.

Наукові повідомлення найчастіше передаються за допомогою мови, зображень, графіків, схем, таблиць, моделей або демонстрації певних дій. Зображення й графічні матеріали зазвичай виконують допоміжну функцію, уточнюючи або візуалізуючи зміст мовного повідомлення. Водночас наукова комунікація можлива лише за умови, що мова, термінологія та форма повідомлення є зрозумілими для реципієнта.

За характером взаємодії наукову комунікацію поділяють на кілька видів. Пряма наукова комунікація передбачає безпосереднє спілкування фахівців, залучених до науково-дослідного процесу. Опосередкована комунікація здійснюється через наукові публікації, електронні ресурси, бази даних та інші інформаційні канали. Вертикальна комунікація відбувається між науковим керівником і дослідником, тоді як горизонтальна комунікація пов'язує дослідників одного або близького наукового рівня, представників наукової школи чи фахової спільноти.

Найпоширенішим є поділ наукових комунікацій на формальні й неформальні, а також документні й недokumentні. Формальна наукова комунікація — це обмін науковою інформацією через спеціально створені структури, призначені для генерування, оброблення, експертного оцінювання та поширення наукового знання. Прикладами формальної комунікації є публікація статті в науковому журналі, видання монографії, захист дисертації або оприлюднення звіту про науково-дослідну роботу.

Неформальна наукова комунікація здійснюється через особисті контакти, фахові бесіди, листування, телефонні розмови, професійні зустрічі, обговорення під час конференцій або спілкування в електронних мережах. Її позитивними рисами є оперативність, економія часу, можливість швидкого обміну думками та досягнення глибшого взаєморозуміння між дослідниками.

Вивчення формальних комунікаційних процесів та інформаційних потоків у науковій галузі здійснюється за допомогою бібліометрії.

Бібліометрія - це наукова дисципліна, яка використовує статистичні методи для аналізу наукової літератури з метою виявлення тенденцій розвитку окремих предметних галузей, структури наукової комунікації та взаємного впливу публікацій. Бібліометрія аналізує бібліографічні дані, розподіл публікацій за часом, галузями знань, географічними регіонами, науковими установами та авторами.

До основних аспектів бібліометричного аналізу належать:

- характеристики видання, зокрема рік випуску, тип журналу й тип документа;
- авторство, зокрема співпраця між авторами, установами, країнами та організаціями-спонсорами;
- дослідницькі теми й тематичні категорії;
- кількість цитувань публікації;
- взаємозв'язки між публікаціями, авторами та науковими школами.

Бібліометричні зв'язки, зокрема цитування, взаємне цитування, бібліографічні посилання та колективне авторство, забезпечують документальне підтвердження комунікацій у межах окремих наукових галузей і між ними.

Наукометрична база даних - це бібліографічна й реферативна база даних, яка містить інструменти для відстеження цитованості статей, опублікованих у наукових виданнях. Вона функціонує як спеціалізована пошуково-аналітична система, що формує статистичні показники, які характеризують стан, динаміку, активність і вплив наукової діяльності окремих учених, наукових колективів та дослідницьких організацій.

Цитування - це використання чужого тексту, ідей, думок, формул, таблиць або інших результатів інтелектуальної діяльності у власній роботі з обов'язковим зазначенням автора та джерела запозичення. Цитування є важливим елементом академічної доброчесності та водночас одним із механізмів оцінювання впливу наукової праці.

Наукометрія - це напрям бібліометрії, що вивчає кількісні характеристики наукової діяльності, зокрема структуру та динаміку масивів наукової інформації, інтенсивність публікаційної активності, цитованість наукових робіт і вплив окремих авторів або організацій. Наукометричний аналіз використовується для оцінювання тенденцій розвитку науки, вивчення інформаційних потоків і порівняння результативності наукової діяльності.

Метою бібліометричних і наукометричних досліджень є формування об'єктивної картини розвитку певного наукового напрямку, оцінювання його актуальності, потенціалу, інтенсивності формування інформаційних потоків і поширення наукових ідей. Такі дослідження також використовуються для підвищення наукової видимості дослідника, формування репутації наукової установи та оцінювання рейтингу університету.

Якісні зміни, що відбуваються в сучасному бібліотечно-інформаційному середовищі, пов'язані з поширенням електронних ресурсів, розвитком цифрових технологій, автоматизацією інформаційного пошуку та зростанням вимог до якості інформаційних послуг. Підвищений інтерес до наукометричних показників зумовлений передусім можливістю автоматизованого оцінювання наукової діяльності за допомогою програмних інструментів бібліографічних і реферативних баз даних.

Наукометричні показники - це кількісні індикатори, які характеризують публікаційну активність авторів, наукових організацій, журналів і дослідницьких напрямів, а також значущість окремих публікацій. Сьогодні такі показники широко використовуються для оцінювання результативності наукової діяльності поряд з експертною оцінкою. Вони особливо зручні для аналізу фундаментальних досліджень, результати яких не завжди мають безпосередній економічний ефект.

Одним із найпоширеніших показників, що застосовуються для оцінювання діяльності дослідників і наукових колективів, є індекс цитування. Його величина визначається кількістю посилань на праці науковця або організації в джерелах наукової інформації. Індекс цитування відображає ступінь впливу автора, наукової групи або установи на розвиток відповідної галузі знань. Чим вищий

цей показник, тим більшими є рівень видимості та визнання наукових результатів у фаховому середовищі.

До загальноновизнаних міжнародних бібліографічних і наукометричних баз належать Web of Science, Scopus, Google Scholar та інші спеціалізовані ресурси.

Web of Science - комерційна аналітична та цитатна база даних, яка забезпечує пошук наукових публікацій, аналіз цитувань і формування бібліографічних зв'язків між джерелами. Вона охоплює рецензовані журнали, книги, патенти, матеріали конференцій у галузі природничих, суспільних, гуманітарних наук і мистецтва. Наявність інформації про бібліографічні посилання дає змогу оперативно формувати повну картину публікацій за обраною темою дослідження.

Scopus - одна з найбільших комерційних реферативних баз наукових публікацій, розробником і власником якої є видавнича корпорація Elsevier. База постійно оновлюється та містить інформацію про наукові журнали, матеріали конференцій, патенти й інші типи публікацій. Scopus забезпечує пошук наукових джерел, аналіз цитувань, відстеження авторських профілів і наукометричних показників. Порівняно з Web of Science, Scopus ширше представлена в галузях природничих наук, техніки, медицини та прикладних досліджень.

Індексація журналу в Scopus або Web of Science свідчить про відповідність видання певним критеріям якості, міжнародної видимості, регулярності публікацій, редакційної політики та рецензування. Для того щоб наукова праця була проіндексована в Scopus, вона має бути опублікована в журналі або іншому виданні, що входить до цієї бази. Однією з причин недостатньої представленості українських науковців у міжнародних базах є мовний бар'єр, оскільки для глобальної видимості важливими є англійські назви, анотації, ключові слова та коректно оформлені метадані.

Google Scholar - некомерційна спеціалізована пошукова система, яка індексує наукові публікації та надає інформацію про їх цитування. Google Scholar дає змогу знаходити цифрові або фізичні копії статей в онлайн-ресурсах, репозитаріях, бібліотеках і на сайтах наукових установ. Крім автоматично проіндексованих джерел, автори можуть самостійно поповнювати власні профілі

відомостями про наукові праці, зокрема ті, що не представлені у відкритому доступі.

В Україні профілі науковців у Google Scholar разом із показниками Scopus і Web of Science використовуються як джерела даних для інформаційно-аналітичних систем, призначених для моніторингу розвитку національної науки, оцінювання результативності науковців і дослідницьких колективів.

На формування наукового рейтингу вченого впливають такі чинники:

- загальна кількість наукових публікацій;
- індекс цитування наукових праць;
- індекс Гірша;
- імпакт-фактор журналів, у яких опубліковано праці дослідника;
- кількість отриманих грантів, стипендій і премій;
- участь у міжнародній науковій співпраці;
- участь у редакційних колегіях наукових журналів;
- наукова репутація та видимість досліджень у міжнародному академічному середовищі.

Індекс Гірша, або h -індекс, - це наукометричний показник, запропонований у 2005 році американським фізиком Хорхе Гіршем для оцінювання наукової продуктивності дослідника. Він одночасно враховує кількість публікацій і кількість їх цитувань. Індекс Гірша дорівнює h , якщо науковець має h публікацій, кожна з яких процитована не менше ніж h разів. Наприклад, h -індекс 5 означає, що автор має щонайменше 5 праць, кожна з яких процитована не менше 5 разів. Перевагою h -індексу є те, що він поєднує оцінювання кількісної продуктивності та впливовості публікацій. Водночас цей показник має певні обмеження: він залежить від галузі науки, тривалості наукової кар'єри, особливостей цитування в різних дисциплінах і не завжди відображає реальну якість окремої праці. h -індекс може бути низьким як у дослідника з однією дуже популярною статтею, так і в автора великої кількості робіт із низькою цитованістю.

Авторський профіль - це персоналізована сторінка дослідника в наукометричній або бібліографічній базі даних, яка об'єднує інформацію про його публікації, цитування, індекс Гірша, місце роботи, роки публікаційної

активності, галузь досліджень, співавторство та інші наукометричні показники. Авторський профіль сприяє ідентифікації науковця, підвищує видимість його досліджень і забезпечує коректне зарахування цитувань.

Одним із найважливіших інструментів ідентифікації дослідника є **ORCID** — міжнародний унікальний ідентифікатор автора, що складається з 16 цифр і дає змогу однозначно ідентифікувати науковця незалежно від зміни місця роботи, транслітерації прізвища або варіантів написання імені. Обліковий запис ORCID може містити інформацію про ім'я дослідника, його електронну адресу, афіліацію, публікації, гранти, професійну діяльність і дослідницьку біографію. Наявність ORCID забезпечує науковцю низку переваг: коректне зарахування публікацій і цитувань, зменшення ризику втрати статей у пошукових системах, можливість подавати рукописи до міжнародних журналів, участь у грантових конкурсах, формування наукового рейтингу та інтеграцію з міжнародними дослідницькими платформами.

У сучасному науковому середовищі значну увагу також приділяють імпакт-фактору журналу. Імпакт-фактор - це чисельний показник впливовості наукового журналу, який відображає середню кількість цитувань статей, опублікованих у цьому журналі протягом певного періоду. Журнали з високим імпакт-фактором зазвичай мають суворішу систему рецензування, вищі вимоги до якості рукописів і більшу міжнародну видимість. Водночас імпакт-фактор характеризує насамперед журнал, а не автоматично якість кожної окремої статті, тому його доцільно використовувати разом з іншими критеріями оцінювання.

Періодичні наукові видання з матеріалознавства - це журнали, які регулярно публікують результати досліджень у галузі матеріалознавства, фізики та хімії матеріалів, наноматеріалів, композитів, металів, кераміки, полімерів та інших функціональних матеріалів. До авторитетних міжнародних журналів у цій галузі належать:

- **Nature Reviews Materials** — один із провідних оглядових журналів у галузі матеріалознавства;
- **Bulletin of Materials Science** — міжнародний журнал, що публікує статті з різних напрямів матеріалознавства;

- **Diamond and Related Materials** — журнал, присвячений дослідженням алмазу, графену, нанотрубок та інших вуглецевих матеріалів;
- **Sensors and Materials** — видання, що висвітлює дослідження матеріалів для сенсорних технологій;
- **Advanced Materials**;
- **Journal of Materials Science**;
- **Materials Today**;
- **Acta Materialia**;
- **Journal of Materials Research**.

У базах Scopus і Web of Science індексуються також окремі українські періодичні видання з окремих напрямків матеріалознавства, зокрема:

- **Успіхи фізики металів**;
- **Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології**;
- **Надтверді матеріали**;
- **Фізика і хімія твердого тіла**;
- **Хімія, фізика та технологія поверхні**;
- **Функціональні матеріали**.

Розвиток комп'ютерних технологій і мережевих комунікацій став однією з головних передумов переходу від традиційних бібліотечних каталогів до електронних інформаційних систем. Інтернет-технології створили новий рівень наукового спілкування, який забезпечує оперативне поширення наукової інформації, доступ до електронних ресурсів, підтримку міжнародної співпраці та задоволення інформаційних потреб дослідників.

До найпоширеніших форм організації наукового спілкування в мережі Інтернет належать відеоконференції, форуми, блоги, електронна пошта, наукові соціальні мережі, репозитарії, електронні бібліотеки та спеціалізовані платформи для обміну дослідницькими даними.

Відеоконференція - це форма онлайн-комунікації в режимі реального часу, яка дає змогу проводити наукові конференції, семінари, захисти проєктів, дискусії та робочі наради незалежно від територіального розташування учасників.

Форуми - це мережеві сервіси, призначені для тематичного обговорення питань, обміну повідомленнями та накопичення інформації в межах певної спільноти. Повідомлення на форумах групуються за темами, а їх адміністрування здійснюють модератори або адміністратори.

Блог - це форма електронної публікації, у якій автор або група авторів регулярно розміщує матеріали з певної тематики. Блоги можуть використовуватися як для індивідуальної наукової комунікації, так і для обговорення проблем у межах професійної спільноти. Можливість коментування й оцінювання матеріалів сприяє формуванню зворотного зв'язку між автором і читачами.

Електронна пошта - один із базових сервісів інтернету, що забезпечує передавання повідомлень у текстовій, графічній, звуковій або відеоформі. Вона широко використовується для професійного листування, надсилання рукописів, рецензій, організаційних повідомлень і матеріалів наукових заходів.

Одним із перспективних напрямів цифровізації матеріалознавства є застосування методів оброблення природної мови - **Natural Language Processing, NLP**. Такі методи відкривають нові можливості для автоматизованого аналізу наукової літератури. Сучасні NLP-моделі здатні вилучати структуровану інформацію з великої кількості публікацій, формуючи бази знань про методи синтезу, параметри оброблення матеріалів, експериментальні умови та отримані результати. Це сприяє прискоренню оглядових досліджень, виявленню прихованих закономірностей і формуванню нових наукових гіпотез.

Однією з найвпливовіших платформ у сфері цифрового матеріалознавства є **Materials Project**, створена у США на базі Національної лабораторії Лоуренса в Берклі. Платформа функціонує як відкритий репозитарій матеріалознавчої інформації та містить дані про велику кількість матеріалів, для яких розраховано електронні, механічні, магнітні, термодинамічні та інші властивості. Використання таких ресурсів сприяє розвитку матеріалознавства, прискорює пошук перспективних матеріалів і підтримує впровадження цифрових методів у наукові дослідження.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 11

1. Що таке науково-технічна інформація і яку роль вона відіграє у розвитку науки, техніки та виробництва?
2. У чому полягає сутність наукової комунікації та які її основні функції?
3. Які основні форми науково-технічної інформації використовуються в сучасній науковій діяльності?
4. Назвіть основні елементи процесу наукової комунікації та коротко охарактеризуйте кожен із них.
5. Чим відрізняється формальна наукова комунікація від неформальної?
6. Яке значення має зворотний зв'язок у процесі наукової комунікації?
7. Що вивчає бібліометрія і які основні аспекти бібліометричного аналізу вона охоплює?
8. Що таке наукометрична база даних і для чого вона використовується в оцінюванні наукової діяльності?
9. Які основні наукометричні показники впливають на науковий рейтинг ученого?
10. Що таке індекс Гірша, ORCID та імпакт-фактор, і яке значення вони мають для сучасного дослідника?

РОЗДІЛ 12. НАУКОВО - ДОСЛІДНИЦЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ СТУДЕНТІВ

Науково-дослідницька діяльність студентів є важливим складником професійної підготовки висококваліфікованих фахівців. Її розвиток у закладах вищої освіти України створює умови для активного залучення здобувачів освіти до наукового пошуку, що сприяє підвищенню якості освітнього процесу відповідно до сучасних вимог науки, техніки, виробництва та суспільного розвитку. Науково-дослідницька робота є логічним продовженням освітньої діяльності, оскільки забезпечує поєднання теоретичної підготовки студентів із практичним застосуванням методів наукового пізнання.

Науково-дослідницька діяльність сприяє формуванню в студентів дослідницьких умінь, зокрема здатності до аналізу, узагальнення, критичного оцінювання, експериментування та інтерпретації отриманих результатів. Водночас вона розвиває важливі організаційні якості: відповідальність, самодисципліну, вміння планувати власну роботу, дотримуватися встановлених термінів і раціонально використовувати час.

Основними завданнями залучення студентів до наукової діяльності є розвиток творчого й аналітичного мислення, розширення наукового світогляду, формування стійких навичок самостійної науково-дослідницької роботи, підвищення якості засвоєння навчальних дисциплін, а також вироблення вміння застосовувати теоретичні знання та сучасні методи дослідження у практичній діяльності.

Наукова робота студентів може здійснюватися у кількох основних формах.

Першою з них є навчально-дослідницька робота, яка проводиться в межах навчального часу відповідно до освітніх програм, навчальних планів і робочих програм дисциплін. Вона передбачає включення елементів наукового пошуку до різних видів навчальних занять, виконання навчально-дослідницьких завдань, підготовку рефератів, курсових та інших письмових робіт під керівництвом науково-педагогічних працівників.

Другою формою є науково-дослідницька діяльність студентів у період виробничої практики. Вона часто пов'язана з виконанням конкретних завдань за тематикою науково-дослідних робіт кафедри, удосконаленням технологічних процесів, обладнання чи організації праці, а також зі збиранням фактичного матеріалу та його первинною обробкою для подальшого використання у курсовому, кваліфікаційному або дипломному проєктуванні.

Третьою формою є власне науково-дослідницька робота, що здійснюється у позанавчальний час. Вона передбачає участь студентів у наукових гуртках, проблемних групах, індивідуальних і колективних дослідженнях, госпдоговірних темах, студентських наукових товариствах, конференціях, конкурсах наукових робіт і предметних олімпіадах.

Основними формами навчально-дослідницької роботи, що проводиться в межах освітнього процесу, є підготовка рефератів за науковими джерелами, виступи з доповідями на семінарських заняттях, виконання курсових робіт з елементами дослідження, проведення досліджень під час практичної підготовки, а також підготовка кваліфікаційних робіт, пов'язаних із науковою тематикою кафедр.

У процесі підготовки рефератів студенти набувають умінь працювати з джерельною базою, здійснювати пошук, відбір і критичний аналіз наукової інформації, оформлювати посилання, логічно викладати матеріал і дотримуватися вимог наукового стилю мовлення. Така діяльність формує культуру академічного письма та сприяє засвоєнню основ наукової комунікації. Позанавчальна науково-дослідницька діяльність студентів спрямована на поглиблене оволодіння методологією наукових досліджень, формування навичок самостійної наукової роботи, розвиток умінь оформлювати результати дослідження у вигляді звітів, тез, статей, презентацій та інших форм наукової продукції. Особливе значення має участь студентів у наукових гуртках, оскільки вона дає змогу виявити дослідницький потенціал здобувачів освіти, сформувати інтерес до певного наукового напрямку та залучити їх до системної наукової роботи.

Зміст і характер науково-дослідницької діяльності студентів визначаються науковою проблематикою кафедр, матеріально-технічною базою закладу вищої освіти, доступом до інформаційних ресурсів, рівнем наукового керівництва та організаційною підтримкою з боку закладу освіти. Важливою умовою ефективності такої діяльності є послідовність і наступність форм наукової підготовки, що забезпечує поступове ускладнення дослідницьких завдань і підвищення рівня самостійності студентів.

Комплексна реалізація науково-дослідницької діяльності студентів забезпечує формування наукового світогляду, розвиток творчого потенціалу, набуття дослідницьких компетентностей, розширення наукової ерудиції та підготовку кадрового резерву для наукової, педагогічної й інноваційної діяльності.

Тема студентського дослідження зазвичай визначається науковим керівником відповідно до наукового напрямку кафедри, однак можлива також ініціатива самого студента. Виконання дослідження потребує чіткого планування, дотримання логіки наукового пошуку, вміння формулювати мету й завдання роботи, добирати методи дослідження, аналізувати й узагальнювати матеріал, формулювати висновки та рекомендації, а також належним чином оформлювати результати.

Особлива увага приділяється підготовці студентських наукових робіт до участі в конференціях, конкурсах, олімпіадах та інших науково-організаційних заходах. Студенти, які демонструють високий рівень наукової активності, можуть залучатися до поглибленої індивідуальної наукової роботи, навчатися за індивідуальним графіком, брати участь у міжнародних академічних програмах і рекомендуватися до вступу в аспірантуру.

Важливим аспектом сучасної науково-дослідницької діяльності є дотримання принципів академічної доброчесності. Вона передбачає самостійне виконання навчальних і наукових завдань, коректне цитування використаних джерел, дотримання норм авторського права, об'єктивне представлення результатів дослідження та недопущення фальсифікації, фабрикації чи плагіату.

Для дотримання принципів академічної доброчесності здобувачі освіти мають самостійно й сумлінно виконувати навчальні та наукові завдання, коректно посилаючись на джерела інформації, з яких запозичено окремі положення, твердження або фактичні дані, а також надавати об'єктивну інформацію про власні результати навчальної, науково-дослідної та творчої діяльності. Щодо студентів з особливими освітніми потребами ці вимоги реалізуються з урахуванням їхніх індивідуальних можливостей і потреб.

Організаційна структура науково-дослідницької діяльності студентів у закладі вищої освіти охоплює адміністрацію, наукові ради, кафедри, студентські наукові товариства та інші структурні підрозділи, які координують дослідницьку роботу студентів, організовують наукові заходи, забезпечують методичний супровід і сприяють публікації результатів досліджень.

Відповідно до Закону України «Про вищу освіту», у закладах вищої освіти функціонують наукові товариства студентів, аспірантів, докторантів і молодих учених, діяльність яких спрямована на захист прав та інтересів молодих дослідників, підтримку інноваційної активності, розвиток наукової творчості й залучення студентської молоді до наукової діяльності.

Керівництво закладу вищої освіти створює належні умови для діяльності таких товариств, зокрема забезпечує організаційну, матеріально-технічну, інформаційну та, за можливості, фінансову підтримку, а також сприяє участі студентів у наукових заходах різного рівня.

Таким чином, науково-дослідницька діяльність студентів є важливою складовою освітнього процесу. Вона забезпечує інтеграцію навчання, науки та практики, сприяє розвитку дослідницьких компетентностей, формуванню академічної культури й підготовці конкурентоспроможного фахівця, здатного до професійного саморозвитку та інноваційної діяльності.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 12

1. Яке значення має науково-дослідницька діяльність студентів у підготовці висококваліфікованих фахівців?
2. Які основні дослідницькі та організаційні вміння формуються у студентів під час наукової роботи?
3. Які основні форми науково-дослідницької діяльності студентів виділяють у закладах вищої освіти?
4. У чому полягає роль наукових гуртків, конференцій, конкурсів і студентських наукових товариств у розвитку студентської науки?
5. Які принципи академічної доброчесності мають дотримуватися студенти під час виконання навчальних і наукових завдань?

Список використаної та рекомендованої літератури

1. Азарова А. О., Біліченко Н. О., Міронова Ю. В., Ткачук Л. М. **Методологія і організація наукових досліджень** : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2022. 117 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Azarova_2022_117.pdf
2. Антонюк В. С., Полонський Л. Г., Аверченков В. І., Малахов Ю. А. **Методологія наукових досліджень** : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 276 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/70a59bb7-ec14-4ad7-8ea4-f2f4b154223f/content>
3. Архіпова Т. Ф., Осадчук А. Ю. **Прикладне матеріалознавство** : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2013. 60 с.
4. Бармін О. Є., Вуєць О. Є., Зубков А. І. та ін. **Комп'ютерні технології в матеріалознавстві** : навч.-метод. посіб. / за ред. О. В. Соболя, І. М. Колупаєва. Харків : НТУ «ХПІ», 2018. 272 с.
5. Білецький В. С. **Методологія наукових досліджень технічних об'єктів та їх оптимізація** : навч. посіб. Київ : ФОП Халіков Р. Х., 2023. 115 с.
6. Бірта Г. О., Бургу Ю. Г. **Методологія і організація наукових досліджень** : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2014. 142 с.
7. Болтянська Н. І., Маніта І. Ю. **Технології наукових досліджень у технічному сервісі** : навч.-метод. посіб. для самостійної роботи. Мелітополь : Люкс, 2020. 196 с.
8. Бондарев С. В. Роль матеріалознавства в сучасному світі та історії людства. **Металознавство та термічна обробка металів**. С. 15–18.
9. Борисенко В. Д., Устенко С. А., Устенко І. В. **Основи комп'ютерного моделювання в інженерній діяльності** : навч. посіб. Миколаїв : МНУ, 2016. 276 с.
10. Важинський С. Е., Коссе А. Г. **Методологія та організація наукових досліджень** : конспект лекцій. Харків : НУЦЗУ, 2020. 143 с.
11. Важинський С. Е., Щербак Т. І. **Методика та організація наукових досліджень** : навч. посіб. Суми : Вид-во СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2016. 260 с.

12. Гулай Л. Д. **Кристалографія і рентгенографія** : метод. рек. до лабораторних робіт для студентів V курсу. Луцьк : ПП Іванюк В. П., 2023. 48 с.
13. Гутник М. В. Особливості розвитку матеріалознавчих досліджень у добу Відродження та ранньомодерний час. **Дослідження з історії і філософії науки і техніки**. 2022. Т. 31, № 1. С. 28–35.
14. Дзєбань О. П. **Методологія, організація та технологія наукових досліджень** : навч. посіб. для аспірантів. Київ ; Одеса : Фенікс, 2025. 284 с.
15. **Діагностика технологічних систем і виробів машинобудування** : монографія / С. В. Ковалевський, О. С. Ковалевська, Є. О. Коржов, А. О. Кошевой. Краматорськ : ДДМА, 2016. С. 183.
16. Зав'ялова Т. В., Непша О. В. **Глосарій термінів та понять з курсу «Основи наукових досліджень»** : навч.-метод. вид. Мелітополь : ТОВ «Колор Принт», 2019. 84 с.
17. Івасишин О. М., Лень Є. Г., Надутов В. М., Татаренко В. А. Етапи розвитку та напрями досліджень в Інституті металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України. **Металофізика і новітні технології**. 2016. Т. 38, № 1. С. 1–18.
18. **Історія науки і техніки** : навч. посіб. / О. О. Мельник, О. І. Лобода. Мелітополь : ФОП Одноріг Т. В., 2018. 304 с.
19. Ковальов Ю. Г., Аулін В. В., Ковальов С. Г., Кузик О. В., Гриньків А. В. Цифровізація матеріалознавства й напрями використання штучного інтелекту. **Вісник ХНАДУ**. 2025. Вип. 111. С. 67–74.
20. Конверський А. Є. **Основи методології та організації наукових досліджень** : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2010. 352 с.
21. Корягін М. В., Чік М. Ю. **Основи наукових досліджень** : навч. посіб. 2-ге вид. Київ : Алерта, 2019. 492 с.
22. Костик В. О. Історичні аспекти діаграми залізо–цементит. **Technology Audit and Production Reserves**. 2014. № 1/3(15). С. 17–19.
23. Кшнякін В. С., Опанасюк А. С., Дядюра К. О. **Основи фізичного матеріалознавства** : навч. посіб. : у 2 ч. Суми : Сумський державний університет, 2015. Ч. 1. 329 с.

- 24.Медведовська Т. П. Науково-дослідницька діяльність студентів закладів вищої освіти. **Proceedings of the International Scientific Conference.** Cambridge, United Kingdom, October 18, 2024. Section 24. Pedagogy and Education. С. 335–339. URL: <https://www.logos-science.com>
- 25.Методичні рекомендації для закладів вищої освіти з підтримки принципів академічної доброчесності. URL: https://univd.edu.ua/files/generaldocs/guidelines_academic_integrity.pdf
- 26.Методологія та організація наукових досліджень : курс лекцій для самостійної підготовки здобувачів другого (магістерського) рівня у галузі знань 26 «Цивільна безпека» / уклад.: Н. В. Рашкевич, Ю. А. Отрош. Харків : НУЦЗУ, 2021. 124 с.
- 27.Мітев Д. О., Кропівний В. М. Методичні основи створення вимірювального комплексу для реєстрації сигналів акустичної емісії при механічній обробці. **Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки.** 2024. Вип. 11(42), ч. I. С. 92–100.
- 28.Мокін Б. І., Мокін О. Б. **Методологія та організація наукових досліджень** : навч. посіб. 2-ге вид., змін. та допов. Вінниця : ВНТУ, 2015. 317 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2023/Mokin_2015_317.pdf
- 29.Невлюдов І. Ш., Олександров Ю. М., Андрусевич А. О., Чала О. О. **Основи наукових досліджень** : навч. посіб. Prague : OKTAN PRINT, 2024. 468 с.
- 30.**Основи наукових досліджень** : глосарій / упоряд.: Н. Ю. Рекова, А. Гетьман, М. А. Держевецька ; ТОВ «ТУ «Метінвест Політехніка»». Одеса : Олді+, 2024. 128 с.
- 31.Плугін А. А., Калінін О. А., Плугін О. А. **Основи наукових досліджень** : навч. посіб. / за ред. А. М. Плугіна. Харків : УкрДАЗТ, 2011. 291 с.
- 32.Стадниченко А. П., Мороз В. В. **Тестові завдання для самоконтролю з оволодіння аспірантами основами курсу «Методологія підготовки, представлення та оформлення наукових досліджень».** Житомир : Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2020. 92 с.

- 33.Строкань О. В., Мірошніченко М. Ю. **Методологія та організація наукових досліджень з основами інтелектуальної власності** : конспект лекцій. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2021. 152 с.
- 34.Толочко С. В., Бордюг Н. С., Міронєць Л. П. Академічна доброчесність та штучний інтелект в освітній і науковій діяльності. **Інноваційна педагогіка**. 2023. Вип. 62, т. 2. С. 25–32.
- 35.Томашевський О. В., Рисіков В. П. **Комп’ютерні технології статистичної обробки даних** : навч. посіб. Запоріжжя : Запорізький національний технічний університет, 2006. 175 с.
- 36.Федотова О., Кудлай В. **Методологія та організація наукових досліджень** : конспект лекцій для здобувачів вищої освіти другого (магістерського) рівня ОПП «Керування документаційними процесами та розвиток цифрової громади», спеціальності 029 «Інформаційна, бібліотечна та архівна справа». Київ : МДУ, 2024. 122 с.
- 37.**Фізико-хімічний аналіз об’єктів історико-культурної спадщини** : навч. посіб. для студентів спеціальності 032 «Історія та археологія» / В. М. Кропивний, В. М. Орлик, О. В. Кузик, А. В. Кропивна ; за заг. ред. В. М. Кропивного. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. 265 с.
- 38.**Філософський енциклопедичний словник** / НАН України, Ін-т філософії імені Г. С. Сковороди ; редкол.: В. І. Шинкарук та ін. Київ : Абрис, 2002. VI, 742 с.
- 39.Чепков І. Б. Роль і місце матеріалознавства у створенні новітнього озброєння та військової техніки Збройних Сил України. **Вісник НАН України**. 2023. № 6. С. 73–83.
- 40.Шарпан О. Б. **Основи наукових досліджень** : курс лекцій : навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 89 с.
- 41.Cahn R. W. **The Coming of Materials Science**. Oxford : Elsevier Science Ltd, 2001. URL: <https://www.sciencedirect.com/bookseries/pergamon-materials-series/vol/5/suppl/C>

42. Shang X., Liu Z., Lyu T., Zhang J. Tailoring the mechanical properties of 3D microstructures: A deep learning and genetic algorithm inverse optimization framework. **Materials Today**. 2023. Vol. 70. P. 71–81.

Нормативні та правові джерела

1. Конституція України : Закон України від 28.06.1996 р. № 254к/96-ВР. Відомості Верховної Ради України. 1996. № 30. Ст. 141.
2. Про науково-технічну інформацію : Закон України від 25.06.1993 р. № 3322-ХІІ. Відомості Верховної Ради України. 1993. № 33. Ст. 345.
3. Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки : Закон України від 11.07.2001 р. № 2623-ІІІ. Відомості Верховної Ради України. 2001. № 48. Ст. 253.
4. Про вищу освіту : Закон України від 01.07.2014 р. № 1556-VII. Відомості Верховної Ради України. 2014. № 37–38. Ст. 2004.
5. Про наукову і науково-технічну діяльність : Закон України від 26.11.2015 р. № 848-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2016. № 3. Ст. 25.
6. Про академічну доброчесність : Закон України від 18.12.2025 р. № 4742-ІХ.
7. Про присудження ступеня доктора філософії : постанова Кабінету Міністрів України від 06.03.2019 р. № 167.
8. Про затвердження Вимог до оформлення дисертації : наказ Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 р. № 40.
9. Про затвердження Порядку присвоєння вчених звань науковим і науково-педагогічним працівникам : наказ Міністерства освіти і науки України від 14.01.2016 р. № 13.
10. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. Чинний від 2016-07-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.
11. ДСТУ 3017:2015. Інформація та документація. Видання. Основні види. Терміни та визначення. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

12. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. Чинний від 2016-07-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
13. Положення про підготовку здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у Національному університеті цивільного захисту України : рішення Вченої ради НУЦЗУ, протокол № 3 від 29.11.2019 р.
14. Щодо рекомендацій з академічної доброчесності для закладів вищої освіти : лист Міністерства освіти і науки України від 23.10.2018 р. № 1/9-650. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v-650729-18#Text>

Електронні інформаційні ресурси

1. Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: <https://www.rada.gov.ua>
2. Національна академія наук України. URL: <https://www.nas.gov.ua>
3. Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського. URL: <https://www.nbuv.gov.ua>
4. Харківська державна наукова бібліотека імені В. Г. Короленка. URL: <https://korolenko.kharkov.com>
5. Google Академія. URL: <https://scholar.google.com.ua>
6. Elsevier. ScienceDirect Freedom Collection. URL: <https://www.elsevier.com>
7. ResearchGate. URL: <https://www.researchgate.net>
8. Scopus. URL: <https://www.scopus.com>
9. World Library of Science. URL: <https://www.nature.com/wls>