МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

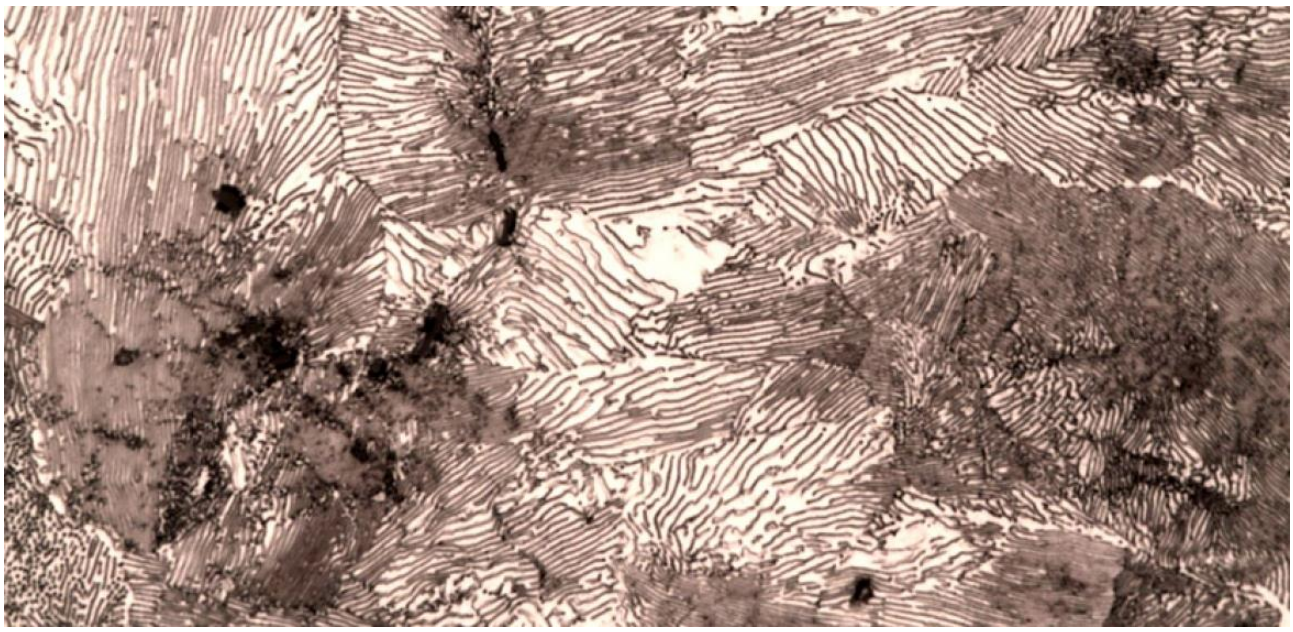
В.М. КРОПІВНИЙ, О.В. КУЗИК, А.В. КРОПІВНА, Д.О.МІТЄВ

ОСНОВИ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ

Навчальний посібник

2-ге видання, доповнене і перероблене

За редакцією професора Кропівного В.М.



Кропивницький 2026

Основи наукових досліджень у матеріалознавстві. Навчальний посібник 2-ге видання, доповнене і перероблене / В.М. Кропівний, О.В. Кузик, А.В. Кропівна, Д.О.Мітєв // Загальна редакція В.М. Кропівного. – Кропивницький: ЦНТУ, Електронне видання, 2026. – с. 341

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 науково-методичної 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 використання матеріалів та розвитку промислового виробництва	18
1.4. Становлення та сучасний розвиток матеріалознавства	26
1.5. Понятійно - категоріальний апарат науки	38
1.6. Основні наукові поняття в матеріалознавстві	52
2. ОРГАНІЗАЦІЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКОЇ РОБОТИ В УКРАЇНІ	56
2.1. Управління у сфері науки	56
2.2. Національна академія наук України	69
2.3. Суб’єкти наукової діяльності	74
2.4. Підготовка наукових кадрів в Україні	78
3. МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	87
3.1. Методи наукового дослідження	88
3.2. Визначення проблеми наукового дослідження	93
3.3. Формулювання об’єкта та предмета дослідження	95
3.4. Формулювання мети й завдань дослідження	97
3.5. Евристична функція науки	100
3.6. Загальнонаукові методи теоретичних досліджень	101
3.7. Застосування методів теоретичних досліджень	106
3.8. Проведення емпіричних досліджень	108
3.9. Експериментальні методи дослідження	111
3.10. Моделювання у наукових дослідженнях	115
3.11. Системний аналіз	120
3.12. Методи технічного прогнозування	123
3.13. Застосування технологій штучного інтелекту в матеріалознавстві	126
3.14. Планування наукових досліджень	131
4.ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	134
4.1 Вимірювання при проведенні експериментальних досліджень	134
4.2.Статистичні методи обробки результатів експериментальних досліджень	139
4.2.1.Кореляційний і дисперсійний аналіз	143
4.2.2. Регресійний аналіз	155
5. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	162
5.1.Етапи планування та реалізації повного факторного експерименту	170
5.2. Планування дробового факторного експерименту	178
5.3. Методи оптимізації експерименту	181
6. МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ	186

6.1. Спектрометричні методи аналізу хімічного складу речовин 195
6.1.1. Метод атомно-емісійного спектрального аналізу 197
6.1.2. Спектроскопія комбінаційного розсіювання 204
6.1.3. Рентгеноструктурний аналіз 208
6.2. Термічні методи аналізу 216
6.3. Дослідження структури металів і сплавів 227
6.3.1. Дослідження мікроструктури металевих матеріалів 229
6.3.2. Металографічні дослідження у поляризованому світлі 244
6.4. Електронна мікроскопія 246
6.4.1. Просвічувальна електронна мікроскопія 248
6.4.2. Сканувальна електронна мікроскопія 253
6.5. Визначення властивостей металів і сплавів 259
6.6. Аналіз акустичної емісії при випробовуванні матеріалів 270
7.ВВЕДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У НАУКОВИЙ ОБІГ 280
8.ЗБИРАННЯ ТА ВІДБІР НАУКОВО - ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ 303
9.НАУКОВА КОМУНІКАЦІЯ, БІБЛІОМЕТРІЯ ТА НАУКОМЕТРИЧНІ РЕСУРСИ В НАУКОВІЙ ДІЯЛЬНОСТІ 308
10.ВІДКРИТА НАУКА 317
11. АКАДЕМІЧНА ДОБРОЧЕСНІСТЬ У НАУКОВІЙ ТА ОСВІТНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ 322
12.НАУКОВО - ДОСЛІДНИЦЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ СТУДЕНТІВ 331
Список використаної та рекомендованої літератури 336

ВСТУП

Наука є одним із ключових чинників розвитку цивілізації, що забезпечує науково-технічний прогрес суспільства. Починаючи з другої половини XX 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. Так, упровадження композитних матеріалів у конструкцію літаків типу Boeing Dreamliner дало змогу суттєво зменшити їхню масу та знизити витрати палива приблизно на 25 % у розрахунку на одного пасажира. Поширення електромобілів стало можливим завдяки розробленню й удосконаленню електродних матеріалів для літій-іонних акумуляторів.

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 інтенсивної експлуатації.

Створення нових класів матеріалів вимагає розширення якісної підготовки висококваліфікованих фахівців у галузі матеріалознавства у закладах вищої освіти. Сучасний фахівець повинен володіти не лише фундаментальними та спеціальними знаннями, а й навичками творчого розв’язання практичних завдань, умінням застосовувати новітні наукові досягнення у професійній діяльності, постійно вдосконалювати кваліфікацію та адаптуватися до швидкої зміни умов сучасного виробництва.

Трансформаційні процеси в економіці України, які 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. Фахівці з матеріалознавства повинні володіти критичним і творчим мисленням, уміти проводити наукові дослідження, аналізувати та узагальнювати результати експериментальних і теоретичних робіт. Формування таких компетентностей значною мірою забезпечується активною участю студентів у науково-дослідній роботі.

Навчальна дисципліна «Основи наукових досліджень у матеріалознавстві» належить до циклу загальної підготовки здобувачів освіти спеціальності G8 «Матеріалознавство» та базується на положеннях фізико-математичних і технічних наук. 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.

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 проведення наукових досліджень в Україні;

– оволодіння сучасною методологією досліджень у матеріалознавстві;

– 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 навчальної дисципліни «Основи наукових досліджень у матеріалознавстві» студенти повинні знати:

– основні поняття й термінологію наукової діяльності;

– сучасну 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;

– обирати адекватні методи дослідження у матеріалознавстві;

– готувати наукові доповіді;

– оформлювати результати відповідно до вимог академічного письма.

електу.

У навчальному посібнику висвітлено сучасні методологічні та організаційні засади наукових досліджень, зокрема особливості виконання науково-дослідних робіт в галузі матеріалознавства. Матеріал посібника структуровано у дванадцяти 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 загальні 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 розглянуто застосування статистичних методів обробки результатів експериментальних досліджень. У п’ятому розділі розкриваються основи застосування методів планування експерименту на прикладі розв’язання прикладних задач в матеріалознавстві. У шостому розділі розглянуто підходи до раціонального застосування основних методів експериментальних досліджень та наведено приклади їх практичного застосування у вирішенні задач матеріалознавства. Сьомий розділ присвячено питанням упровадження результатів досліджень у науковий обіг. У восьмому розділі наведено методику пошуку, відбору та опрацювання наукової і науково-технічної літератури з використанням бібліотечних каталогів і сучасних комп’ютерних технологій. Дев’ятий розділ розкриває актуальні питання відкритої науки. У десятому розділі розглянуто питання академічної доброчесності під час виконання та представлення результатів наукових досліджень. розділ присвячено ролі та особливостям наукової комунікації. Одинадцятий розділ висвтлює питання наукової комунікації, ролі бібліометрії та наукометрії у науковій діяльності. У дванадцятому розділі висвітлено

особливості студентської науково-дослідної роботи, а також підготовки дослідницьких розділів кваліфікаційних робіт.

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 5,10 і 11 - кандидатом технічних наук доцентом Кузиком О.В., розділ 12 та підрозділ 6.6 – аспірантом Митовом Д.О. У процесі підготовки даного навчального посібника для наукового редагування тексту було використано інструменти штучного інтелекту.

Автори висловлюють щиру 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.

1.1. Характеристика науки

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

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, 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;
- прогностична - прогнозування результатів і наслідків наукового розвитку;
- практична - застосування наукових знань у різних сферах діяльності;
- 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.

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 визначають неможливість досягнення абсолютно завершеного знання.

Наука і релігія є важливими сферами людського пізнання, однак використовують різні способи пояснення світу. Предметний та об'єктивний підхід до пізнання дійсності відрізняє науку від інших форм осмислення світу, зокрема мистецтва, релігії та міфології. 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.

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, переглянуте 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.

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

1.2. Пізнавальна діяльність у процесі наукової діяльності

З перших етапів свого розвитку людина перебувала у постійній тісній залежності від рослинного і тваринного світу, його ресурсів, тому була змушена щоденно враховувати особливості поведінки тварин, риб і птахів. Уявлення первісної людини про навколишній світ не мали наукового характеру. Протягом тривалого часу основними джерелами знань під час створення знарядь праці були практичний досвід і спостереження. 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 відбувалися революційні зміни - наукові революції, які трансформували 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 відкрить практично опрацьовуються і 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. 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.

Починаючи з XVII століття, обсяг наукової інформації подвоюється приблизно кожні 10–15 років, що проявляється у зростанні кількості відкрить, 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.

Наукові знання - це перевірений практикою результат пізнання дійсності та її адекватного відображення у свідомості людини, який здобуто у процесі наукової діяльності. Наукова діяльність - це інтелектуальна творча діяльність, спрямована на здобуття нових знань, уточнення наявних наукових уявлень та пошук шляхів їх практичного застосування. 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.

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.

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.

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 композиційні матеріали; у мікроелектроніці роль - кремній основного напівпровідникового матеріалу виконує кремній.

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 використання матеріалів та розвитку 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 та створення матеріалів із наперед заданими характеристиками.

У різні історичні періоди переважали певні типи матеріалів, що зумовило умовний поділ розвитку цивілізації на відповідні епохи. 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, що дозволяло виготовити загострені знаряддя праці та зброю з кременю, обсидіану та інших гірських порід. Відбулося вдосконалення технологій механічної обробки (ударне розщеплення, шліфування, свердління). Наприкінці кам'яної доби 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.

Відкриття та освоєння металів стало одним із визначальних етапів розвитку людської цивілізації, зумовивши поступовий перехід від кам’яної доби до епохи широкого використання металевих матеріалів. Опанування технологій видобування руд, виплавлення та обробки металів істотно розширило можливості виготовлення знарядь праці, предметів побуту, інструментів і зброї. На відміну від традиційних кам’яних матеріалів, метали характеризуються комплексом фізичних, механічних і технологічних властивостей, зокрема

пластичністю, ковкістю, здатністю до плавлення та формоутворення, а за відповідних умов - високою міцністю і довговічністю. Можливість змінювати форму металевих заготовок шляхом пластичної деформації, лиття та інших способів обробки сприяла вдосконаленню конструкцій виробів, підвищенню їхніх експлуатаційних характеристик і розширенню сфер практичного застосування. Поступове впровадження металів і сплавів у господарську діяльність створило передумови для розвитку ремесел, металургійного виробництва та подальшого технічного прогресу.

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.

У період між 4000 і 3000 роками до нової ери в Європі тривала мідна доба, коли широко використовували чисту мідь без спеціального 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°С 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, а також насиченню вуглецем, що дозволяло виготовляти міцні вироби. Однак, металургія заліза розвивалася до сучасного рівня впродовж тривалого часу: від кричного заліза до високоміцних 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 відбулося 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 освоєння виробництва нового дешевого і технологічного металургійного матеріалу - чавуну (сплаву заліза з вмістом вуглецю понад 2,14%), що дозволило почати випускати більш складні за формою 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 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. 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. Наука дедалі більше стала привертати увагу підприємців, а технічні науки почали 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.

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 Агрікола - 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. Агрікола детально описав способи видобутку та плавлення металів, дослідив мідні, срібні та свинцеві сплави.

У XVIII столітті було створено доменні печі. Використання у якості палива коксу замість деревного вугілля зробило доменний процес більш ефективним і менш залежним від деревних ресурсів. Освоєння доменного виробництва допомогло зробити ривок у збільшенні випуску чавуну.

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 згоряння, 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 масового виробництва сталі та чавуну дозволила людям того часу використовувати ці матеріали для будівництва мостів, кораблів, поїздів, а пізніше й автомобілів.

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 знайшли розвиток у XX столітті у 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 полуменевих печах. Мартен прийняв за основу принцип регенерації теплової енергії в подовій

полум'яній печі, що забезпечило підвищення температур для плавлення сталі за рахунок нагріву повітря, що подається до печі. Мартенівський процес був основним способом виробництва сталі у світі до 70-х років XX століття.

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» у будь-якому періоді полягає в тому, що вчені роблять наукові відкриття, що дозволяють вносити корінні зміни у рівень пізнання.

Накопичення емпіричних знань упродовж тисячоліть забезпечувало поступове розширення використання дедалі складніших пристроїв. Досягнувши певної межі складності, емпіричні підходи вичерпували свої можливості. Це приводило 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 XVIII століття у світі налічувалося близько 10 тисяч осіб, які займалися наукою, то до кінця XIX століття кількість учених зросла до 100 тисяч.

У XX столітті активно розвивалися прикладні технічні дисципліни: будівельна механіка, опір матеріалів, технічна гідродинаміка, металургія тощо. Завдяки розвитку матеріалознавства 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 XX 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 XX 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 в цей період став головною рушійною силою розвитку виробництва. У світі на кінець XX століття налічувалося понад 6 мільйонів вчених. У розвинених країнах чисельність науковців наблизилася 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 (смарт) 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 XX 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, науковий пошук став переходити на індустріальну основу.

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 нові, легші та міцніші матеріали, придатні для вторинної переробки та адаптивні до умов

експлуатації. Розширюється застосування інтелектуальних матеріалів, які здатні самовідновлюватися або самоочищатися, металів з пам'яттю, які після нагрівання повертаються до своїх початкових форм, кераміки та кристалів, які перетворюють тиск на енергію, тощо.

Сучасне матеріалознавство проходить глибоку трансформацію за рахунок розширення використання цифрових технологій. 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.

1.4 Становлення та сучасний розвиток матеріалознавства

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, а матеріалознавство ще не набуло 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 матеріалознавства, 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 методик оптичної мікроскопії. Уперше оптичний мікроскоп для наукових спостережень застосував англійський учений Р. Гук, що було описано у його праці «Мікрографія» (1665 рік). У подальшому, у 1702 році, голландський дослідник А. ван Левенгук почав використовувати оптичний мікроскоп для вивчення металів і вперше графічно зобразив дендритні утворення у сталевих злитках.

У 1722 році французький учений Р. Реомюр дослідив зернисту будову металів та описав такі показники, як зернистість, твердість після кування і пластичність. Англійський інженер Грігнон у 1775 році звернув увагу на формування стовпчастої структури під час затвердіння залізних розплавів. Йому також належить один із перших відомих рисунків дендритної структури литого заліза у злитках, 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. Наприкінці XIX століття мікрографічний метод Сорбі став інформаційною базою для побудови фазових діаграм металевих систем.

Важливу інформацію отримали А. Відманштеттен та Г. Сорбі при дослідженні структур залізних метеоритів. 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.

Теоретичні основи вчення про метали були закладені працями Р. Реомюра, М. Ломоносова, А. Лавуазьє та інших учених того часу. Вагомий внесок у розвиток теорії металургійних процесів у XIX 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.

Кристалографія охоплює методи визначення кристалічної структури речовин, фізику кристалів, кристалохімію та дослідження фазових перетворень у твердому стані. Формування кристалографії як науки розпочалося у XVIII 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. На сучасному етапі кристалографія та матеріалознавство є взаємопов’язаними науковими дисциплінами, що вивчають будову твердих тіл і їхні властивості з метою створення нових матеріалів із заданими характеристиками.

Вагомий внесок у розвиток матеріалознавства зробило відкриття німецьким ученим Е. Мітчерліхом у 1819 році явища ізоморфізму металів. Значний вплив на становлення теоретичних основ матеріалознавства мали 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 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 поштовх до 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 відіграли праці німецького ученого В. Оствальда, який зробив значний внесок у формування 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.К. 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 стальних заготовок. Було встановлено, що ці перетворення істотно впливають на структуру і властивості металу. Визначення критичних температур дало можливість раціонально обирати режими гартування, 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. Найважливіші дослідження з побудови діаграми стану системи Fe – C були виконані в останній чверті XIX століття Ф. Осмондом, який використовуючи пірометр Ле Шательє, визначив положення критичних точок, описав зміни в мікроструктурі під час проходження через них і ввів назви основних структур залізовуглецевих 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 французським вченим Ле Шательє у 1887 році та згодом удосконалений англійським металургом Робертс - Аустеном. Суть даного 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.

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 дозволило проводити прогнозування їхніх характеристик.

Важливим етапом розвитку металургії стало впровадження електричних дугових печей у перші роки XX століття. Використання таких печей забезпечило підвищення якості та експлуатаційних характеристик сталей. Електричні дугові печі дозволяли більш ефективно проводити металургійні процеси при виплавці легованих сталей, 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 цього класу інструментальних матеріалів дозволило суттєво підвищити продуктивність механічної обробки металів. Важливим досягненням стало створення у 1912 році німецькими металургами Е. Мауером і Б. Штраусом хромонікелевої аустенітної нержавіючої сталі, яка стала основою для розвитку корозійностійких конструкційних матеріалів.

У 1925 році німецька компанія Krupp розробила високоміцний кермет на основі карбіду вольфраму з кобальтовою зв’язувальною матрицею. Цей матеріал швидко набув важливого значення у якості інструментального матеріалу. Спочатку його використовували для виготовлення філь’єр при волочінні дроту, що дозволило замінити дорогі алмазні волоки, а згодом - для виробництва ріжучих елементів металорізальних інструментів.

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.

Використання рентгеноструктурного аналізу на початку XX століття забезпечило можливість детального дослідження кристалічної будови металів і сплавів. Це стало можливим після того, як німецький фізик 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.

Американський металознавець Едгар Бейн у 1924 році детально описав особливості будови аустеніту (високотемпературної фази залізо – вуглецевих сплавів) та процес його перетворення на мартенсит під час гартування сталі. Учений запропонував механізм мартенситного перетворення, відповідно до якого гранецентрована кубічна кристалічна ґратка аустеніту миттєво перебудовується в об’ємноцентровану тетрагональну ґратку мартенситу. 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.

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.

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 початку XX 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. На основі широких наукових досліджень С. Лебедєва вперше у світі було організовано промислове виробництво синтетичного каучуку. Одночасно значно розширилося використання нафти як основної сировини для органічного синтезу та хімічної промисловості.

В розвитку матеріалознавства важливим етапом стало формування уявлень про дислокаційну будову металевих матеріалів. Виникало питання значної невідповідністі між розрахунковими значеннями напружень, необхідних для пластичної деформації ідеального кристала, та значно меншими величинами напружень, які мали місце під час реальних механічних випробувань матеріалів. Додатковим підтвердженням необхідності введення поняття дислокацій стало явище деформаційного зміцнення, а саме підвищення міцності кристалічних матеріалів унаслідок пластичної деформації. Спочатку існування дислокацій було передбачене теоретично і, лише згодом, експериментально підтверджено.

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 принесло створення електронної мікроскопії. У 1937 році фірма Siemens оголосила про випуск

першого електронного мікроскопа з роздільною здатністю близько 7 нм. Розвиток електронної мікроскопії дозволив отримати експериментальні підтвердження існування точкових дефектів у кристалах, що було продемонстровано американським ученим Ер. Мюллером. У 1955 році розпочалося серійне виробництво електронних мікроскопів компанією Siemens. У подальшому просвічувальні електронні мікроскопи стали одним із найважливіших інструментів дослідження будови металевих матеріалів, забезпечуючи збільшення до 100 000 разів. За допомогою електронної мікроскопії було проведено вивчення різноманітних дефектів кристалічної будови, радіаційні пошкодження, стадії фазових перетворень, взаємну орієнтацію фаз, процеси рекристалізації, локальні текстури, тощо. 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 - засновником 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 мали низку суттєвих обмежень для використання, в значній мірі це пов'язано з їх підвищеною щільністю і недостатньою корозійною стійкістю. 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 в промисловому виробництві застосування сплавів на основі титану, магнію та алюмінію, які поєднують високу міцність із меншою щільністю 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 стала приділятися дослідженню поведінки матеріалів в екстремальних умовах - за високих і низьких температур, підвищеного тиску, агресивних середовищ та інтенсивних механічних навантажень.

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 проведення мікролегування. 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.

Наприкінці 1960-х років керамічні матеріали здійснили вагомий прорив у використанні, 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 та агресивних середовищ. Це також обумовлено практично невичерпною сировинною базою, відносно низькою енергоємністю виробництва таких матеріалів.

Сучасні керамічні матеріали характеризуються жаростійкістю, надтвердістю, електропровідністю, надпровідністю, хімічною стійкістю та іншими цінними експлуатаційними характеристиками, що забезпечує широкі перспективи їх практичного використання. Особливого розвитку набули напрями створення

спеціалізованої кераміки, зокрема надпровідної, матеріалів броньового захисту військової техніки, а також теплозахисних покриттів для головних частин ракет і космічних апаратів.

Новітні досягнення матеріалознавчої науки стали основою створення матеріалів нового покоління - наноматеріалів, металевого 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.

На сучасному етапі матеріалознавство сформувалося як високотехнологічна міждисциплінарна галузь, що динамічно розвивається та відіграє важливу роль у науково-технічному прогресі. 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 промислового розвитку. Удосконалення механічних, теплових, електричних, магнітних, корозійних, напівпровідникових, надпровідних та інших експлуатаційних характеристик матеріалів здійснюється на основі впровадження інноваційних технологій синтезу, обробки та модифікації. Реалізація наведених напрямків стала можливою за рахунок використання принципово нових методів і апаратури для дослідження та обладнання для реалізації процесів їх формування у заготовки.

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.

До основних наукових напрямків, що визначають прогрес матеріалознавства в XXI 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.

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.

Сучасний поняттєво-категоріальний апарат науки є результатом багатовікового розвитку наукової та філософської думки. Його витоки сягають античної філософії, насамперед праць Арістотеля, який уперше систематизував основні категорії буття: сутність, кількість, якість, відношення та інші.

- У період наукової революції XVII–XVIII століть поняттєво-категоріальний апарат науки зазнав суттєвих змін. Саме в цей період:
    - посилилася роль емпіричного та раціонального методів дослідження;
- утвердився експеримент як основний метод наукового пізнання;
- активно розвивалася математизація науки;
- сформувалися точні наукові поняття, зокрема простір, час, рух і причинність.

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 понятєво-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.

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.

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.

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.

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 матеріалознавстві гіпотези розглядають як фундаментальні наукові припущення та концептуальні підходи, що пояснюють будову матеріалів, механізми формування їхніх властивостей і поведінку під впливом зовнішніх чинників.

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. Зернограничная 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.

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 Ґріффітса, 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.

4. Фазові та структурні закони. До них належить правило фаз Ґіббса, 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 аналізу фазових діаграм стану.

5. 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 пізнання:

- 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 та вдосконалення 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 розкриває певні аспекти будови та функціонування матеріалів.

1. 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.

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

- типи кристалічних ґраток (ОЦК, ГЦК, ГЩУ);
- 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 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 - 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 дає пояснення зміни структури та властивостей матеріалів унаслідок фазових перетворень і дифузії атомів під час нагрівання та охолодження. У результаті термічної обробки змінюються фазовий склад, структура 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, її 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.

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. 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. Характерним прикладом емпіричного відкриття є полімерний матеріал тефлон, 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 поєднаним 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** 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. 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.

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 доповнюючими 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 вищий рівень пластичності, 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 істотні ознаки та властивості предметів, явищ і процесів, а також зв’язки між ними. Поняття є основою узагальнення, систематизації та теоретичного осмислення знань про об’єкти дослідження. Сукупність взаємопов’язаних понять, категорій і термінів, що використовуються в певній галузі науки, формує її понятійний апарат.

Понятійний апарат матеріалознавства охоплює систему основних понять, термінів і визначень, за допомогою яких характеризують хімічний склад, структуру, властивості матеріалів, закономірності їх формування та зміни під впливом технологічних процесів і умов експлуатації. До основних понять матеріалознавства належать кристалічна ґратка, дефекти кристалічної будови, аморфний стан, пластична деформація, міцність, твердість, в'язкість та інші. Використання єдиного понятійного апарату забезпечує термінологічну однозначність, наукову точність, логічну послідовність викладення матеріалу та узгодженість результатів досліджень.

Основні поняття матеріалознавства поділяються 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, іонів 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 початкові 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?

2. ОРГАНІЗАЦІЯ НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКОЇ РОБОТИ В УКРАЇНІ

2.1 Управління у сфері науки

Наукова діяльність є інтелектуальною та творчою діяльністю, яка спрямована 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-дослідницька діяльність - проведення фундаментальних і прикладних досліджень, експериментів, спостережень;
- науково-технічна діяльність - розроблення нових технологій, матеріалів, приладів і технічних рішень;
- науково-педагогічна діяльність - поєднання наукових досліджень із викладанням і підготовкою наукових кадрів;
- науково-організаційна діяльність - організація дослідницьких проєктів, конференцій, семінарів і наукових колективів;
- науково-інформаційна діяльність - підготовка наукових статей, монографій, доповідей, поширення результатів досліджень;
- науково-експертна діяльність - рецензування наукових праць, оцінювання досліджень, проведення наукових експертиз.

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 виконання прикладних досліджень та експериментальних розробок.

Організація науки в Україні 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 виробництво, 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.

Безпосередню наукову діяльність в Україні здійснюють:

– науково-дослідні та проєктні установи Національної академії 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 напрямами 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.

Для української науки початку XXI 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 в Україні 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.

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 % наукових результатів.

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 стають основою для подальшого практичного використання та розвитку інноваційних технологій.

До основних видів наукової та науково-технічної діяльності належать науково-дослідні, дослідно-конструкторські, проєктно-конструкторські, дослідно-технологічні, технологічні, пошукові та проєктно-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 проєктно-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.

Госпдоговірні 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.

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.

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

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.

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.

Відповідно до Конституції України та чинного законодавства Верховна Рада України 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 постійно діючий консультативно-дорадчий орган - Національна рада України з питань розвитку науки і технологій. До основних функці Національної ради відноситься:

- 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;

- 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;

- 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.

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.

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 напрямами 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.

В Україні встановлюються 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 напрямами здійснюється державна підтримка наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності.

Для України особливе 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. Головна 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.

Середньострокові пріоритетні напрями формуються на основі ключових і спрямовуються на їх поетапну реалізацію на загальнодержавному, галузевому та регіональному рівнях. Вони забезпечують формування ефективного сектору наукових досліджень і створюють умови для практичного впровадження отриманих результатів.

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 напрямами 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. Основними напрямами роботи цього відділення 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 різнорідних матеріалів, фізики фаз високого тиску, а також керамічних і наноструктурованих матеріалів. Упродовж останніх років вченими цієї наукової установи створено нові жароміцні та жаростійкі матеріали, матеріали для електроніки, систем накопичення енергії та сонячної енергетики.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України спеціалізується на дослідженні, синтезі та створенні надтвердих матеріалів і високоефективного інструментального оснащення. Вченими цього Інституту розроблено нові надтверді речовини, а також матеріали на основі алмазів,

кубічного нітриду бору та карбідів, які широко застосовуються в машинобудуванні, металообробці тощо.

Одним із провідних наукових центрів у сфері зварювальних технологій і матеріалознавства є Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України. В цій науковій установі 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 напрямами 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 вирощування кристалів, створення 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 цієї наукової установи здійснюються за такими основними напрямами:

- 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.

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.

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 Національної академії наук України, в нашій державі 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 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 мають можливість створювати тимчасові наукові колективи, науково-дослідні, проєктно-конструкторські, експертні, консалтингові та пошукові структури, співпрацювати з міжнародними й іноземними науковими установами, а також та входити до складу міжнародних наукових об'єднань. Прикладом такої організації є Академія наук вищої школи України, заснована у 1992 році.

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.

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 наукової діяльності 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.

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 розробляють експериментальні методи. Представником цієї групи був Чарльз Вільсон - винахідник методу візуального виявлення траєкторій електрично заряджених частинок за допомогою конденсації пари. 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 відмовлятися від непідтверджених гіпотез і здатність переосмислювати напрями дослідження. Історія свідчить, що багато видатних відкриттів були здійснені вченими у молодому віці, коли їхнє мислення залишалося максимально гнучким і відкритим до нових ідей. Надмірна консервативність мислення є фактором, що стримує розвиток науки.

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 та 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.

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 використовуємих 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.

Науковий ступінь є кваліфікаційним рівнем, що засвідчує наявність у здобувача глибоких фахових знань, сформованих дослідницьких компетентностей і вагомих наукових результатів. 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. Відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 23 березня 2016 року «Про затвердження Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії (PhD) та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах)», сучасна система підготовки наукових кадрів передбачає здобуття двох наукових ступенів: доктора філософії та доктора наук.

Доктор філософії (PhD) - це освітній і водночас науковий ступінь, який здобувається на основі ступеня магістра. Здобуття наукового ступеня доктор філософії 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. Він присуджується після успішного виконання освітньо-наукової програми та публічного захисту дисертації. Ступінь доктора філософії (PhD) є першим науковим ступенем, тоді як доктор наук становить найвищий рівень наукової кваліфікації, що здобувається на основі ступеня доктора філософії.

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. Виконане 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 вищої освіти належать критичне й системне мислення, дотримання принципів академічної доброчесності, здатність до самостійної наукової роботи, комунікація українською та іноземними мовами, уміння презентувати результати дослідження фаховій спільноті, брати участь у науковій дискусії. 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.

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.

Згідно із Законами України «Про вищу освіту» та «Про наукову і науково-технічну діяльність», основними формами підготовки наукових кадрів вищої кваліфікації є аспірантура. 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.

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 (PhD). 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.

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).

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

Підготовка здобувачів наукових ступенів передбачає систематичне виконання освітніх і науково-дослідницьких завдань, дотримання принципів академічної доброчесності, реалізацію індивідуального плану наукової роботи та регулярне звітування про результати досліджень. Важливою складовою такої підготовки є формування здатності до самостійного наукового пошуку, критичного аналізу інформації, обґрунтування наукових положень та представлення результатів дослідження науковій спільноті.

Підготовка на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти завершується атестацією здобувача ступеня доктора філософії (PhD), яка передбачає публічний захист дисертації. Дисертація є самостійною кваліфікаційною науковою працею, що містить нові науково обґрунтовані результати дослідження, спрямовані на розв’язання конкретного наукового завдання, яке має істотне значення для відповідної галузі знань. У роботі мають бути чітко визначені особистий внесок здобувача, наукова новизна отриманих результатів, їх теоретичне та практичне значення.

Обов’язковими вимогами до дисертації є самостійність її виконання, достовірність результатів дослідження та дотримання принципів академічної доброчесності. Дисертація підлягає оприлюдненню відповідно до встановленого законодавством порядку, зокрема на офіційному вебсайті закладу вищої освіти або наукової установи. Виявлення академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації результатів дослідження є підставою для відмови у присудженні

наукового ступеня, а у визначених законодавством випадках — для позбавлення вже присудженого ступеня.

Після отримання позитивного висновку про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації здобувач звертається до вченої ради закладу вищої освіти або наукової установи із заявою про утворення разової спеціалізованої вченої ради. До її складу входять голова, рецензенти та офіційні опоненти, які повинні мати належну наукову компетентність за тематикою дисертаційного дослідження.

Захист дисертації проводиться публічно у формі відкритої наукової дискусії. Під час захисту оцінюють актуальність і науковий рівень дослідження, обґрунтованість та достовірність отриманих результатів, їх наукову новизну, теоретичне і практичне значення, повноту оприлюднення основних наукових результатів, особистий внесок здобувача та дотримання ним вимог академічної доброчесності. За результатами обговорення й відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада ухвалює рішення щодо присудження ступеня доктора філософії.

Наступним, найвищим науковим ступенем в Україні є доктор наук. Його здобуття передбачає виконання оригінальних наукових досліджень, результати яких забезпечують розв’язання важливої наукової або науково-прикладної проблеми, розроблення нових наукових положень, концепцій, теорій чи методологічних підходів і сприяють подальшому розвитку відповідної галузі науки.

Однією з форм підготовки науковців до здобуття ступеня доктора наук є докторантура. Докторантом є особа, яка має науковий ступінь доктора філософії або кандидата наук і здійснює підготовку докторської дисертації відповідно до встановлених вимог. Водночас законодавство передбачає можливість підготовки дисертації на здобуття ступеня доктора наук і поза докторантурою.

На відміну від дисертації на здобуття ступеня доктора філософії, яка передусім підтверджує здатність здобувача самостійно здійснювати наукові дослідження та отримувати нові наукові результати, докторська дисертація повинна характеризуватися вищим рівнем наукових узагальнень, вагомістю

отриманих результатів і значущістю їх внеску в розвиток науки. Її результати мають становити цілісну сукупність нових наукових положень, що забезпечують розв'язання важливої наукової проблеми або формування нових напрямів досліджень.

Основні результати докторської дисертації підлягають опублікуванню в рецензованих фахових наукових виданнях відповідно до встановлених нормативних вимог, зокрема у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних. Присудження ступеня доктора наук здійснюється за результатами публічного захисту дисертації у спеціалізованій вченій раді.

Поряд із системою наукових ступенів в Україні функціонує система вчених звань, призначена для офіційного визнання професійних досягнень наукових і науково-педагогічних працівників. На відміну від наукового ступеня, який засвідчує відповідний рівень наукової кваліфікації, вчене звання характеризує професійні досягнення особи в науковій, науково-педагогічній та навчально-методичній діяльності.

В Україні встановлено три вчені звання: старший дослідник, доцент і професор. Їх присвоєння здійснюється відповідно до нормативних вимог Міністерства освіти і науки України з урахуванням наукового ступеня здобувача, стажу професійної діяльності, результатів наукових досліджень, публікаційної активності, міжнародного досвіду та інших показників професійної кваліфікації.

Вчене звання доцента присвоюється науково-педагогічним працівникам закладів вищої освіти, які відповідають установленим кваліфікаційним вимогам та здійснюють викладацьку і наукову діяльність на належному професійному рівні.

Для присвоєння вченого звання доцента, за загальними вимогами, необхідні наявність наукового ступеня доктора філософії, кандидата наук або доктора наук; стаж науково-педагогічної роботи не менше п'яти навчальних років, зокрема протягом останнього календарного року на одній кафедрі; наявність наукових і навчально-методичних праць, опублікованих після захисту дисертації. Серед публікацій має бути щонайменше одна стаття у виданні, що

індексується міжнародними наукометричними базами даних Scopus або Web of Science.

Крім того, передбачено підтвердження володіння іноземною мовою на рівні не нижче B2 або відповідності встановленим альтернативним критеріям, наявність документально підтвердженого міжнародного досвіду наукової чи освітньої діяльності та викладання навчальних дисциплін на високому науково-методичному рівні, що засвідчується висновком кафедри.

Вчене звання старшого дослідника присвоюється науковим і науково-педагогічним працівникам, діяльність яких переважно пов’язана з проведенням наукових досліджень, розробленням науково-технічних рішень та організацією наукової роботи.

Для присвоєння цього звання здобувач повинен мати науковий ступінь доктора філософії, кандидата наук або доктора наук і стаж наукової роботи не менше п’яти років. Обов’язковою умовою також є успішна робота протягом щонайменше одного календарного року на визначених нормативними документами посадах, зокрема старшого, провідного або головного наукового співробітника, доцента, професора, керівника наукового підрозділу чи інших прирівняних до них посадах.

Важливим критерієм є наявність наукових і навчально-методичних праць, опублікованих після захисту дисертації у вітчизняних або іноземних рецензованих фахових виданнях. При цьому щонайменше дві публікації повинні бути представлені у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних Scopus або Web of Science.

Додатковими вимогами є підтвердження володіння іноземною мовою на рівні не нижче B2 або виконання передбачених нормативними актами альтернативних умов, а також наявність міжнародного досвіду. Такий досвід може підтверджуватися документами про навчання, стажування, роботу в закладах вищої освіти чи наукових установах держав — членів Європейського Союзу або Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР), участь у міжнародних наукових проєктах чи наукових конференціях, проведених у зазначених країнах.

Вчене звання професора є найвищим вченим званням в Україні. Воно присвоюється науковим і науково-педагогічним працівникам, які досягли вагомих результатів у науковій, педагогічній та науково-організаційній діяльності, мають належну професійну кваліфікацію і відповідають установленим вимогам.

Для науково-педагогічних працівників закладів вищої освіти, які мають ступінь доктора наук, основними умовами присвоєння вченого звання професора є наявність раніше присвоєного вченого звання доцента або старшого дослідника, стаж науково-педагогічної роботи не менше десяти років, зокрема протягом останнього навчального року на одній кафедрі на визначеній нормативними документами посаді.

Необхідною умовою є також наявність наукових і навчально-методичних праць, опублікованих після захисту докторської дисертації, серед яких щонайменше дві публікації мають бути представлені у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами даних Scopus або Web of Science.

Вимоги до професійної кваліфікації здобувача передбачають підтвердження володіння іноземною мовою на рівні не нижче B2 або виконання встановлених альтернативних умов, наявність документально підтвердженого міжнародного досвіду наукової чи освітньої діяльності, а також викладання навчальних дисциплін на високому науково-методичному рівні, що підтверджується відповідним висновком кафедри.

Система наукових ступенів і вчених звань в Україні забезпечує послідовне оцінювання та офіційне визнання наукової кваліфікації і професійних досягнень дослідників. Вона спрямована на підвищення якості наукових досліджень, розвиток науково-педагогічного потенціалу, інтеграцію української науки у світовий дослідницький простір та забезпечення підготовки висококваліфікованих наукових кадрів.

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?

3. МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Наукове дослідження - це форма наукової діяльності, спрямована на вивчення явищ, процесів або об'єктів за допомогою наукових методів з метою здобуття нових знань та їх подальшого практичного застосування. У процесі наукового дослідження отримують нові наукові результати, підтверджують або спростовують наукові концепції, перевіряють гіпотези, 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.

Наукові результати можуть, які отримані у процесі фундаментальних або прикладних досліджень мають бути зафіксовані на матеріальних носіях інформації та 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 наукових досліджень 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 наукових досліджень, 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, планування стратегії та організація етапів проведення дослідження, а також визначення перспектив практичного використання та впровадження результатів дослідження.

3.1 Методи наукового дослідження

Метод дослідження - це спосіб досягнення наукової мети, система принципів, прийомів і засобів дослідження, що застосовуються для отримання достовірних наукових результатів. 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 спостереження, експеримент, моделювання, статистичний аналіз, системний підхід тощо. В кожній галузі науки є сформований комплекс методів дослідження, з яких дослідник повинен

обирати найбільш доцільні 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 на загальнонаукові та спеціальні методи;
- за функціональним призначенням виділяють методи опису, пояснення та передбачення;
- за ступенем точності результатів - детерміновані та стохастичні методи.

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 конкретних властивостей і будови матеріалу в об’єктивній формі. Наприклад, під час рентгеноструктурного аналізу отримують дифрактограму, яка відображає положення та інтенсивність

дифракційних максимумів. На основі цієї інформації можна провести опис фазового складу матеріалу, параметри його кристалічної ґратки, наявність твердих розчинів або протікання структурних змін;

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

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

- вимірювальна 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 властивостей різних матеріалів або різних станів одного й того самого матеріалу;

- контрольна функція методу пов'язана з перевіркою відповідності матеріалу заданим нормативним документам 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 матеріалів з метою встановлення взаємозв’язку між їх складом, структурою та властивостями. Первинні методи дослідження в цій галузі включають комплекс експериментальних і теоретичних підходів, які спрямовані 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.

Результати дослідження в матеріалознавстві значною мірою залежать від обраного методу. 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 достовірну характеристику матеріалу.

Один і той самий матеріал може давати різні характеристики залежно від того, який саме метод застосовано, які параметри вимірювання використано і як підготовлено зразок. Відповідно, 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. Числове значення твердості одного й того ж самого матеріалу 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 посилити видимість меж зерен, тоді як недостатнє травлення може приховати важливі структурні особливості. 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, якщо у матеріалі є залишкові напруження, вони можуть спричиняти 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.

Пошук і вибір методики дослідження здійснюються шляхом аналізу сучасних наукових праць, теоретичних концепцій і практичних розробок у відповідній галузі науки. 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 шляхом проведення наукового дослідження. Точне формулювання проблеми визначає напрям дослідження, окреслює межі наукового пошуку та дає змогу відокремити ключові питання від другорядних.

Передумовою виникнення нової наукової проблеми є виявлення емпіричних фактів або закономірностей, які не можуть бути пояснені в межах чинної теорії. Готових розв'язків наукових проблем не можливо знайти у вже наявному масиві знань, також рішення не можуть бути знайдені шляхом простого узагальнення або опрацювання існуючої інформації. 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 подібних задач та результати суміжних досліджень.

Важливим етапом методологічного обґрунтування дослідження є узгодження наукової проблеми з сучасними науковими парадигмами. У матеріалознавстві парадигма визначає сукупність наукових підходів до пояснення властивостей матеріалів, принципів їх створення та методів керування їхньою структурою і властивостями.

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. 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.

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. 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:

- «Термодинамічне моделювання та експериментальне дослідження фазової стабільності багатокомпонентних 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»;
- «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, 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 елементом 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.

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».

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.

3.4. Формулювання мети і завдань дослідження

На основі визначення об’єкта та предмета наукового дослідження здійснюється формулювання його мети й завдань, які визначають змістову спрямованість, логіку організації та послідовність реалізації дослідницького процесу. Мета наукового дослідження відображає передбачуваний кінцевий результат наукового пошуку, визначає його цільову спрямованість і характеризує очікуваний внесок у розв’язання відповідної наукової проблеми.

Реалізація мети дослідження забезпечується шляхом постановки та послідовного розв’язання системи взаємопов’язаних науково-дослідницьких завдань, які конкретизують основні напрями, зміст і етапи дослідницької діяльності. Кожне завдання має відображати окремий аспект досліджуваної проблеми, передбачати отримання конкретного наукового результату та бути логічно узгодженим з іншими завданнями. Їх формулювання повинно характеризуватися змістовою визначеністю, науковою коректністю, послідовністю та лаконічністю.

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.

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.

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, яка характеризує ступінь їхньої відмінності від раніше отриманих і опублікованих наукових результатів та визначає внесок дослідника в розвиток відповідної галузі знань.

Наукова новизна може полягати у встановленні раніше невідомих закономірностей, формулюванні нових наукових положень, уточненні, розвитку або поглибленні існуючих теоретичних уявлень, розробленні нових моделей, методів, технологій і технічних рішень. Вона відображає оригінальність отриманих результатів, їхнє значення для розвитку наукових знань та обґрунтовує внесок дослідження у розв’язання відповідної наукової проблеми.

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.

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.

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.

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.

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

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 методом 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 наявність безпосереднього контакту дослідника з об’єктом дослідження за допомогою органів чуття. Емпіричне пізнання забезпечує отримання знань про зовнішні, видимі зв’язки між явищами та накопичення фактичного матеріалу. Теоретичний рівень, своєю чергою, забезпечує осмислення, узагальнення та систематизацію отриманих даних.

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. У взаємодії емпіричний і теоретичний рівні формують цілісну систему наукового пізнання, що є основою розвитку науки.

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.

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.

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.

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.

До основних методів теоретичних досліджень належать:

– абстрагування - свідоме відволікання від другорядних, випадкових ознак предмета чи явища та зосередження на його найважливіших, спільних чи суттєвих рисах;

- ідеалізація - формування уявлення про об’єкти, яких не існує в реальності, але які допомагають спростити складні розрахунки та зрозуміти закони природи;

– 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.

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.

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.

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.

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. Аксіоми 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. Аксіоматичний 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 прогартовуваності 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. 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.

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.

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 проєктування 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 прогнозування 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.

У результаті проведення такого аналызу 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.

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.

Схематично процес конкретизації у матеріалознавстві можна подати наступним 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 емпіричних досліджень

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.

Жодне наукове дослідження не може вважатися завершеним без експериментальної перевірки отриманих результатів. Необхідність проведення експерименту зумовлена наступними 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;

- ймовірністю 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. 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 деяких випадках теоретичному аналізу може передувати пошуковий експеримент, а подальше теоретичне узагальнення дозволяє пояснити отримані результати та встановити закономірності.

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.

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.

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.

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.

Аналіз і зіставлення результатів передбачають порівняння даних теоретичних і експериментальних досліджень. У результаті здійснюється остаточна перевірка гіпотези: вона або підтверджується, або потребує уточнення та формулювання нових положень.

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.

Емпірично встановлені закономірності 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 у якості відгуку 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 встановлює 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 результатів вимірювання.

Залежно від умов проведення активні експерименти поділяють на лабораторні, виробничі (натурні), природні і пошукові.

Лабораторні експерименти 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 проведення дослідів;
- широкі можливості варіювання факторів.

Наприклад, під час лабораторного дослідження процесу термічної обробки сталі температуру можна змінювати у широких межах, тоді як у виробничих 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 промислового (натурного) експерименту. Промислові експерименти здійснюють безпосередньо у виробничих умовах з урахуванням впливу зовнішніх факторів.

За таких умов 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 отримуємих 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. 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.

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 реального об'єкта чи 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.

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.

Фізичною моделлю ливарної форми може бути прозора полімерна модель з вирізаною всередині ливниковою системою. Заливання в таку модель води буде моделювати процес заливання розплавленого металу в ливарну форму.

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 ймовірнісний характер і описуються статистичними закономірностями. Наприклад, процеси руйнування матеріалів та зародження тріщин значною мірою залежать від мікродефектів і структурних неоднорідностей, тому часто описуються ймовірнісними моделями міцності.

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 спрощення і припущення, що буде знижувати точність опису реальних процесів.

Побудова математичної моделі включає такі етапи:

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.

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 натурного 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 натурного 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 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 напрямами 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 процесів 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 полімерних 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 багатокомпонентних 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.

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.

Ключовим методом при проведенні 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: багатокомпонентність; 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 є приклади застосування системного аналізу 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 корозійного руйнування, що враховують вплив температури, вологості, кислотності середовища (pH) 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 будови 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.

Метод екстраполяції базується на перенесенні 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 сьогоденні, 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 шляхом поширення 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 після тривалого періоду експлуатації.
- Термічна деградація полімерів: аналізуючи зміну властивостей полімерних матеріалів під впливом нагрівання 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 прогнозування методом 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 прогнозної 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, а також 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 обгрунтованої критики та оцінки висунутих ідей. Кожна ідея розглядається з точки зору можливих перешкод її реалізації та висуваються контрідеї.

6. Складання зведеної таблиці альтернатив із відповідними критичними зауваженнями та оцінкою практичного застосування. Після цього виключаються нереальні або малопридатні 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 у матеріалознавстві на початкових етапах науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт для визначення перспективних напрямків досліджень.

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 проєктування 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 дозволяє модель розвитку матеріалознавства, яка спрямована на створення матеріалів із покращеними та унікальними властивостями. 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.

Традиційні підходи до розроблення матеріалів є тривалими та дороговартісними, 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.

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.

Методи машинного навчання, зокрема глибинного навчання, суттєво 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.

Розширюється використання штучного інтелекту 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.

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 електронної растрової та трансмісійної, а також 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.

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.

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. Складні нейронні мережі 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.

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.

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.

Японські компанії Toshiba та Hitachi використовують штучний інтелект для оптимізації виробництва напівпровідників і контролю дефектів у кристалічних структурах. В Україні група Метінвест впровадила системи штучного інтелекту для автоматичного контролю якості металургійного виробництва, що дозволило зменшити кількість рекламацій 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.

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. 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 результанів 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.

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 плана 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.

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?

4.ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Вимірювання при проведенні експериментальних досліджень

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. Вимірювання є невід'ємною складовою будь-якого експериментального дослідження. Саме із початком застосування методів вимірювання дослідницька діяльність набула ознак точної науки.

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.

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 символьні 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. До основних елементів процесу вимірювання належать: об'єкт вимірювання; еталони; вимірювальні прилади; методи вимірювання.

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 - розрахункове визначення величини 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, м^2.

Відповідно до вимог метрології застосовують такі основні методи вимірювання:

– метод безпосереднього вимірювання, за якого значення величини зчитують безпосередньо зі шкали 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.

Будь-яке вимірювання виконується з певною точністю. Точність вимірювання - це ступінь близькості результату вимірювання до істинного значення величини. 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 з різною твердістю - 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. Точність експерименту значною мірою залежить від правильності проведення вимірювань та подальшої обробки результатів. 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.

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. Похибки вимірювання можуть виникати внаслідок:

– недосконалості методів і засобів вимірювання;

– недостатньо ретельного проведення експерименту;

– впливу зовнішніх факторів;

– суб'єктивних особливостей експериментатора.

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 рядк неконтрольованих чинників і проявляються при повторних вимірюваннях у вигляді випадкових відхилень результатів. За умови ретельного проведення експерименту результати вимірювань однієї й тієї самої величини зазвичай незначно відрізняються між собою саме через скорочення випадкових похибок.

Випадкові похибки можуть бути зумовлені неконтрольованими змінами умов проведення експерименту, обмеженою точністю вимірювальних приладів або суб'єктивними особливостями спостереження. Повністю усунути випадкові похибки неможливо. Вплив випадкових похибок можливо суттєво зменшити за умови багаторазового повторення дослідів та використання статистичних методів обробки даних. Випадкові похибки оцінюють і враховують методами теорії ймовірностей та математичної статистики, що дозволяє визначити найбільш достовірне значення вимірюваної величини.

До грубих похибок належать помилки, результати яких різко відрізняються за величиною або знаком від інших отриманих значень. Промахи та грубі похибки здебільшого пов'язані з помилками експериментатора або раптовим виходом з ладу вимірювальних приладів. Причинами таких похибок можуть бути описки у лабораторному журналі, порушення контакту підкллючення електричних датчиків, неправильне підключення або заміна блоків, несправність обладнання, механічні впливи на вимірювальну систему (наприклад, поштовх столу під час зважування) тощо.

У матеріалознавстві причиною таких відхилень може бути, наприклад, наявність внутрішнього дефекту у зразку, який не було виявлено до початку випробувань. Результати, що містять грубі похибки, підлягають виключенню на етапі попередньої обробки експериментальних даних. У разі виявлення грубих похибок результат вимірювання необхідно відхилити, а експеримент повторити.

Під час проведення експерименту для будь-якої фізичної величини зазвичай отримують набір результатів $x_i : x_1, x_2 ... x_n$. 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.

Загальна похибка вимірювання може бути подана у вигляді:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2, \tag{3}$$

де ε_1 – систематична похибка; ε_2 – випадкова похибка вимірювання.

Точність вимірювання характеризується абсолютною та відносною похибками.

Абсолютна похибка визначається як модуль різниці між істинним x_i і виміряним значеннями x величини:

$$\Delta x = |x_i - x| \tag{1}$$

Відносна похибка визначається за формулою:

$$\varepsilon = \pm \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\% . \tag{2}$$

Достовірність вимірювань характеризує ступінь довіри до отриманих результатів і відповідність виміряних значень дійсному значенню досліджуваної величини.

4.2.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 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 різних числових відхилень.

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 сформувати об’єктивне уявлення про досліджуване явище.

Обробка експериментальних даних спрямована на встановлення наявності 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 застосовують математичні методи, які ґрунтуються на методах теорії ймовірностей і математичної статистики. Ці методи дають змогу компактно та інформативно описувати результати дослідження, встановлювати ступінь подібності або відмінності досліджуваних об’єктів, аналізувати наявність залежностей між окремими показниками та кількісно характеризувати ці залежності.

Статистико-математична обробка результатів експерименту є обов’язковою складовою наукового дослідження. Основним завданням математичної обробки результатів експерименту є визначення найбільш імовірного значення вимірюваної величини з мінімально можливою похибкою. Найчастіше

застосовують дисперсійний і регресійний методи статистичного аналізу. 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 рівня взаємозв'язків між змінними, а також для побудови математичних моделей досліджуваних процесів.

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.

Якщо область можливих значень певної величини розділити 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 характеризує випадкову величину з ймовірнісної точки зору. Для узагальнення результатів використовують такі статистичні характеристики, як математичне сподівання, дисперсія, мода та медіана.

Для числової оцінки істинного значення вимірюваної величини випадкових величин використовують їх середнє арифметичне значення:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum x_i \,. \tag{4}$$

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:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \,. \tag{5}$$

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:

$$P(z) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}}. \qquad (6)$$

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. За достатньо великої кількості вимірювань випадкова похибка може перевищувати потрійне 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 ± 3σ.

Ймовірність того, що випадкова похибка перевищить потрійне значення середнього квадратичного відхилення, є вкрай малою. Тому, у якості діапазону істинного значення вимірюваної величини зазвичай приймають інтервал, обмежений середнім арифметичним значенням та потрійним середнім квадратичним відхиленням. Значення вимірювань, які відхиляються від середнього більш ніж на ±3σ, розглядають як такі, що містять грубі похибки, і виключають із подальшого аналізу.

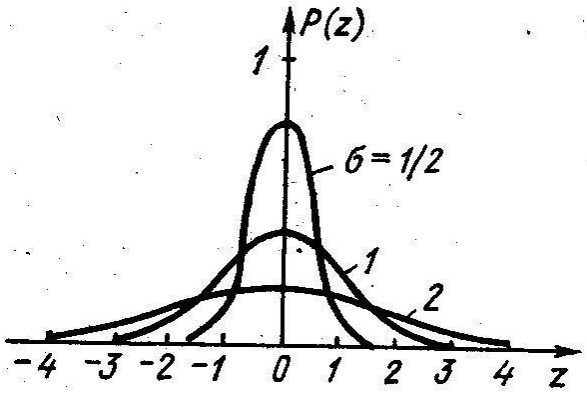


Рисунок 1 – Вигляд кривих нормального розподілу у залежності від значень дисперсії σ

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 статистико-математичної обробки результатів експерименту.

4.2.1.Кореляційний і дисперсійний аналіз

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 напрямах 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 мати високу 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. До завдань кореляційного аналізу належить встановлення наявності, напряму 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:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)\left(y_i - \bar{y}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(x_i - \bar{x}\right)^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \bar{y}\right)^2}}, \quad (7)$$

де x_i – і-те спостереження показника x; y_i - і-те спостереження показника y; x – вибіркове середнє показника x (центр угруповання); y – вибіркове середнє показника у (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.

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 трактують наступним чином.

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 ураховувати 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 аналізу доцільно застосовувати інші статистичні методи, зокрема нелінійну регресію, багатофакторний 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 $(x_1; y_1)$, $(x_2; y_2), \ldots, (x_i; y_i)$. 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 відображати загальну тенденцію зміни досліджуваної величини.

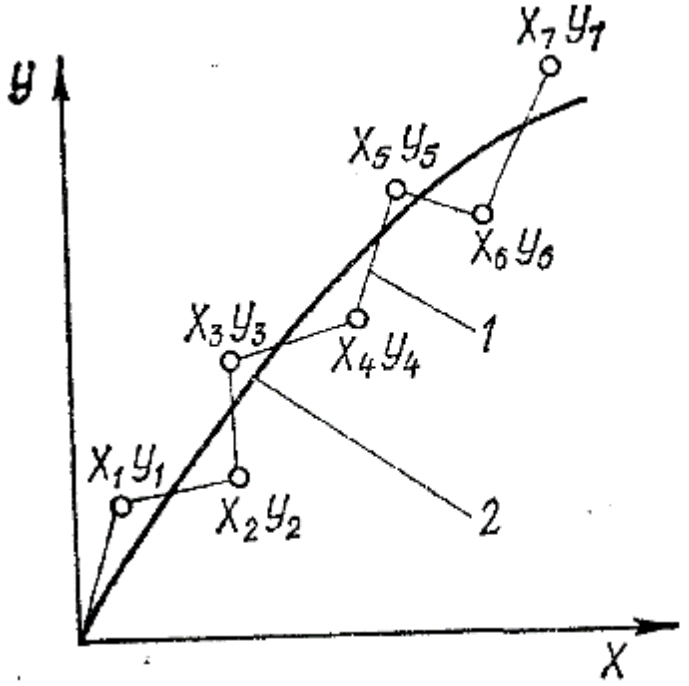


Рисунок 2 – Графічне зображення результатів експерименту: 1 - експериментальна ламана лінія, побудована за результатами вимірювань; 2 - згладжена крива, що відображає уявну апроксимуючу залежність

Сукупність таких точок, які отримані в результаті вимірювання певного параметра та відповідного вхідного 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 невипадковим 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.

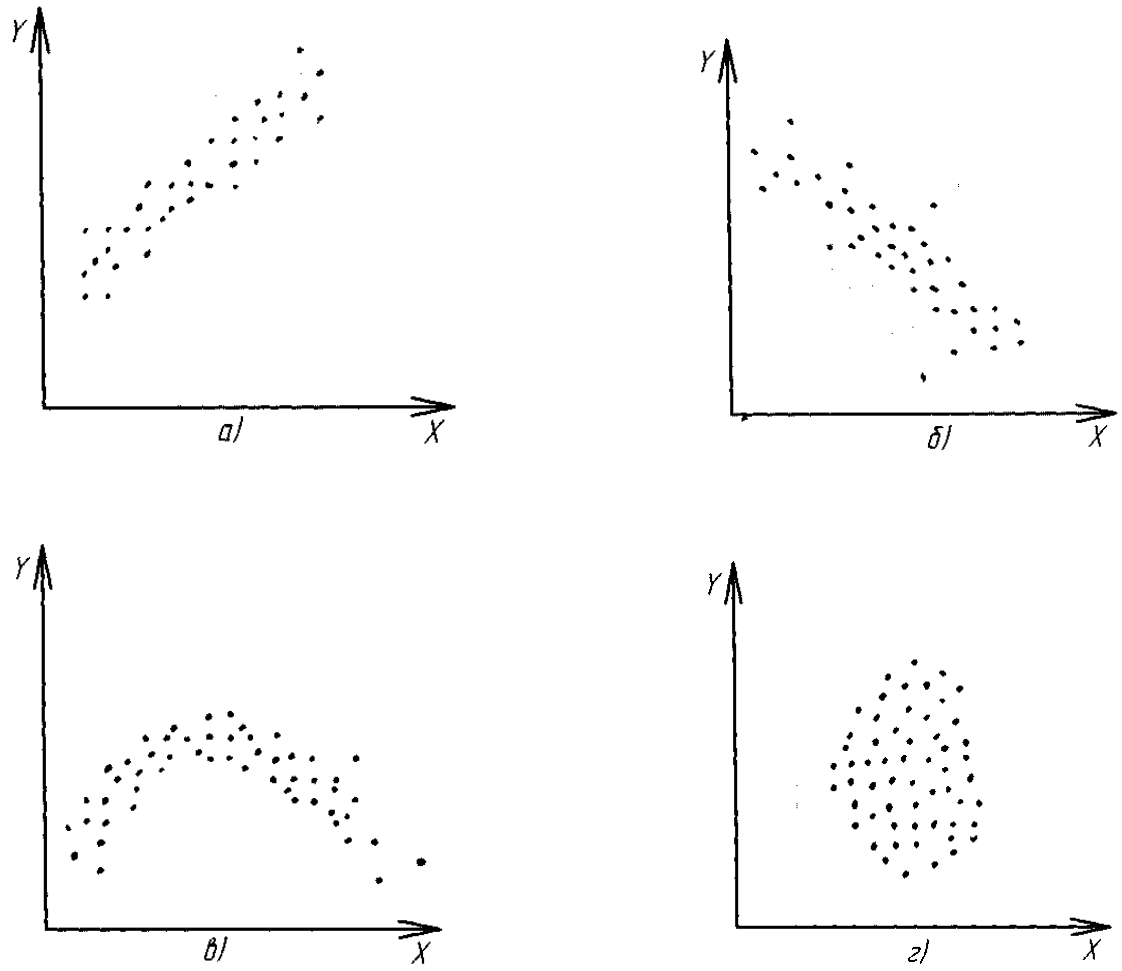


Рисунок 3 – Графічне зображення експериментальних даних з виявлення залежності *y* від *x*: а – наявна додатня (пряма) кореляція; б) наявна від'ємна (зворотня) кореляція; в) наявна параболічна залежність; зв'язок відсутній.; г) відсутність кореляції (залежності немає)

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.

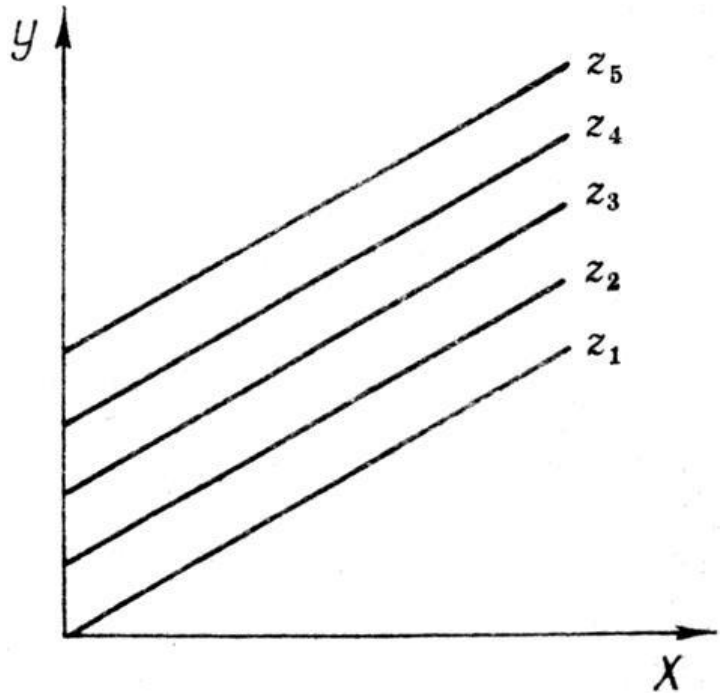


Рисунок 4 – Графічне відображення функції $y = f(x, z)$

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 значення з випадковими коливаннями.

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 проведення кореляційного аналізу по визначенню 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

Знаходимо суми:

$\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y}) = 5,9+1,72+0+1,28+5,76 = 14,66$

$\sum(x_i-\bar{x})^2=0,04+0,01+0+0,01+0,04=0,10$

$\sum(y_i-\bar{y})^2=870,25+295,84+23,04+163,84+829,44=2182,41$

Складаємо розрахункову таблицю 3.

Відповідно до проведеного розрахунку коефіцієнт кореляції дорівнює:

4,66 : 0,0016X687970,71=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.

Таблиця 3

Обчислення зв’язку між вмістом вуглецю в сталі та її твердістю

№	x_i	y_i	$x_i - x$	$y_i - y$	$(x_i - x)(y_i - y)$	$(x_i - x)^2$	$(y_i - y)^2$
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

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.

Цей метод дає змогу встановити, чи є відмінності між середніми значеннями досліджуваних вибірок статистично значущими та зумовленими впливом відповідних факторів, чи вони можуть бути пояснені випадковими коливаннями результатів спостережень.

Наприклад, дисперсійний аналіз використовують для оцінювання відмінностей у стійкості різального інструменту, виготовленого на різних підприємствах. У цьому випадку результативною ознакою є стійкість інструменту, а фактором впливу — підприємство-виробник. Застосування дисперсійного аналізу дає змогу визначити, чи є відмінності між середніми показниками стійкості інструментів статистично значущими.

Іншим прикладом є дослідження впливу модифікуючих добавок на властивості металевих сплавів. Для цього проводять експериментальні дослідження з використанням розплавів без добавки та з її внесенням, після чого порівнюють середні значення відповідного показника властивостей сплаву. На основі отриманих результатів визначають статистичну значущість виявлених відмінностей та оцінюють вплив досліджуваної добавки на властивості матеріалу.

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 °С: $\bar{x}_1=(170+172+168):3=170$

Для температури 850 °С: $\bar{x}_2=(185+188+182):3=185$

Для температури 900 °С: $\bar{x}_3=(200+198+202):3 = 200$

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:

$$SS_{між} n\sum\left(\overline{x_i}-\bar{x}\right)^2 \qquad (8)$$

де n – кількість зразків у кожній групі, $\overline{x_i}$ – 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 °С: $(170-170)^2+(172-170)^2+(168-170)^2=0+4+4=8$;

– для групи 850 °С: $(185-185)^2+(188-185)^2+(182-185)^2=0+9+9=18$;

– для групи 900 °С: $(200-200)^2+(198-200)^2+(202-200)^2=0+4+4=8$.

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:

$$d_{fміж}=k-1=3-1=2.$$

Ступені свободи всередині груп:

$$d_{fвнутр}=N-k=9-3=6.$$

Обчислюємо міжгруповий середній квадрат:

$$MS_{між}=\frac{SS_{між}}{df_{між}},\ MS_{між}=\frac{1350}{2}=675. \qquad (9)$$

Внутрішньогруповий середній квадрат:

$$MS_{внутр}=\frac{SS_{внутр}}{df_{внутр}},\ MS_{внутр}=\frac{34}{6}=5{,}67. \qquad (10)$$

Для перевірки статистичної значущості відмінностей між дисперсіями двох вибірок, а також оцінювання статистичної значущості регресійних моделей застосовують F-критерій Фішера. У разі порівняння дисперсій цей критерій дає змогу встановити, чи є виявлені відмінності статистично значущими, чи вони можуть бути зумовлені випадковими коливаннями вибіркових даних. Критерій Фішера визначається як відношення більшої дисперсії до меншої. Якщо $F_{факт} > F_{крит}$ (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	2,67
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:

$$F = \frac{MS_{між}}{MS_{внутр}},\ F = \frac{675}{5{,}67} = 119{,}05. \qquad (11)$$

Для рівня значущості p=0,05, при df_1=2 і df_2=6 , табличне значення критерію Фішера приблизно дорівнює: Fтабл.≈5,14 . Порівнюємо:119,05>5,14.

Оскільки розраховане значення критерію Фішера F=119,05 значно більше за табличне значення Fтабл.=5,14, різниця між середніми значеннями твердості сталі після обробки при 800 °С, 850 °С і 900 °С 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.

4.2.2.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 при проведенні регресійного аналізу визначають аналітичну форму цього зв’язку. Це дає можливість побудувати математичні моделі, які описують зміну залежної змінної під впливом однієї або кількох незалежних змінних. 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 емпірична лінія регресії починає згладжуватись, звільняючись від випадкових відхилень, і наближається до якоїсь плавної або прямої лінії.

Метою регресійного аналізу є визначення математичного рівняння найкращої лінії або кривої, яке відображає зв'язок між незалежними змінними та залежною змінною. Регресійний аналіз 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 залежність між змінними має аналітичний вигляд, таку форму подання називають рівнянням регресії. Найчастіше використовують лінійні, параболічні, гіперболічні, показникові та поліноміальні моделі. Тип регресійної моделі вибирають з урахуванням теоретичних уявлень про досліджуваний процес та характер емпіричних даних. Математичний опис цієї лінії відповідає теоретичній лінії регресії**.** У загальному вигляді рівняння регресії може бути подане як поліноміальна модель:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + ... b_k x_k + b_{12} x_1 x_2 + ... b_{k-1} x_{k-1} x_k + b_{11} x_1^{\ 2} + ... b_{kk} x_k^{\ 2} \qquad (13)$$

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.

У простій лінійній регресії передбачається, що залежна змінна *y* є лінійною функцією незалежної змінної *x*:

$$y = ax + b \qquad (12)$$

де *a* і *b* – параметри рівняння регресії.

Необхідно знайти такі значення параметрів a і b, за яких пряма $y = ax + b$ найкращим чином буде апроксимувати експериментальні точки: (x_1,y_1), $(x_2,y_2),\ldots,(x_n,y_n)$.

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.

Математичний опис цієї лінії відповідає теоретичній лінії регресії. У загальному вигляді вона може бути представлена рівнянням прямої. Коефіцієнти регресії *a* і *b* визначаються за формулами, які виведені на підставі метода найменших квадратів:

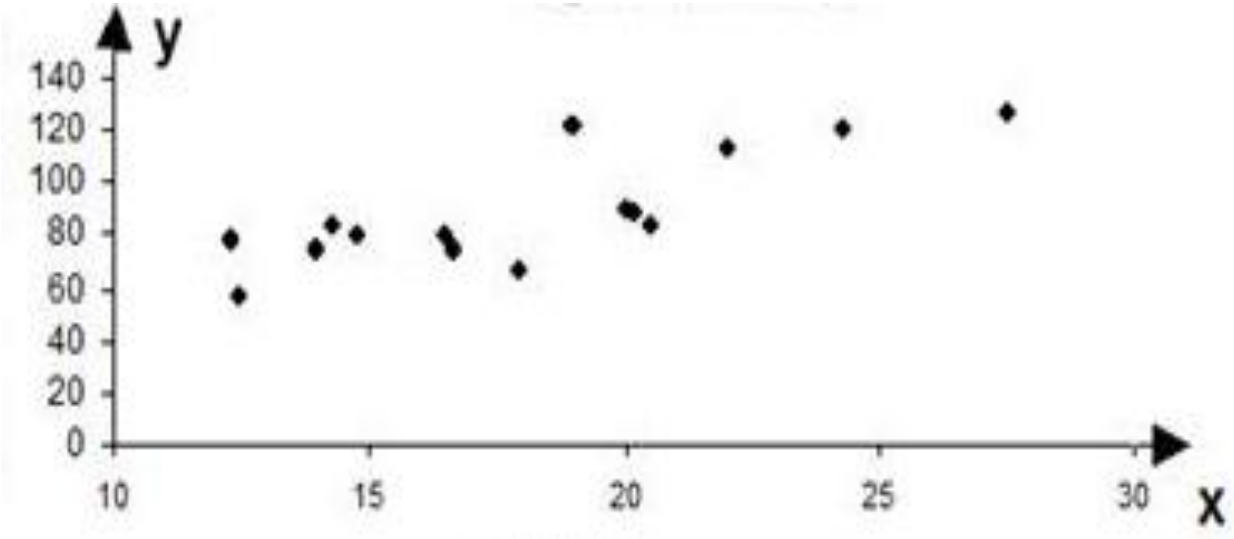
$$b = \frac{n\sum xy - \sum x \sum y}{n\sum x^2 - \left(\sum x\right)^2}, \qquad (14)$$

$$a = \frac{\sum y - b\sum x}{n}. \qquad (15)$$

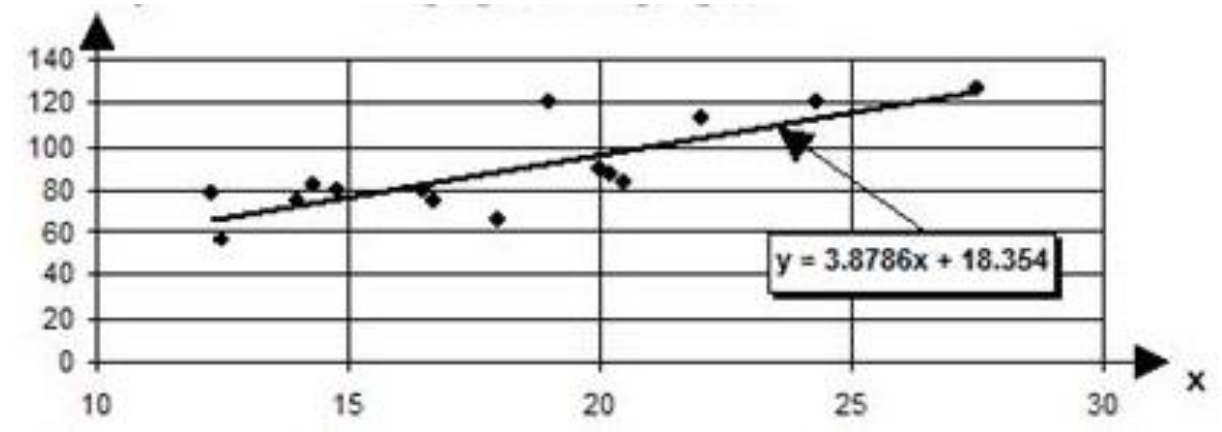
З даних співвідношень знаходять такі значення параметрів параметрів a і b, за яких пряма $y = ax + b$ найкращим чином апроксимує експериментальні точки: $(x_1,y_1),(x_2,y_2),\ldots,(x_n,y_n)$.

Регресійна модель, що апроксимує сукупність експериментальних результатів і дає змогу не лише описати вже отримані дані, а й здійснювати прогнозування. Вона дозволяє оцінити вплив окремих факторів на результат,

описати характер залежності між змінними та виконати прогнозування значень функції відгуку в межах досліджуваної області.



а)



б)

Рисунок 5 – Побудова регресійної моделі: а - кореляційне поле; б – побудова лінії регресії

Застосування регресійного аналізу 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 невипадковими величинами, тобто їх встановлення на заданому рівні та підтримання під час експерименту мають бути значно точнішими, ніж похибка відтворюваності результатів.

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 градуювальні 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 виникає можливість не розривати на розривній машині кожен зразок, а достатньо на твердомірі вдавити у зразок індентор і отримати 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 тісноти статистичного зв'язку, можна прогнозувати твердість матеріалу.

Розглянемо приклад проведення регресійного аналізу для встановлення залежності між твердістю за Брінеллем НВ і границею міцності σ_β вуглецевої сталі.

Було досліджено 6 зразків вуглецевої сталі. Для кожного зразка визначали твердість за Брінеллем та границю міцності при розтягуванні. Апріорно приймаємо, що залежність має вид $y = a + bx$,

де y - границя міцності сталі, МПа; x - твердість за Брінеллем НВ; a - вільний член рівняння; b - коефіцієнт регресії.

Коефіцієнт нахилу прямої регресії визначаємо за формулою (14):

$$b = \frac{6 \cdot 589600 - 1020 \cdot 3330}{6 \cdot 180400 - (1020)^2} = 3{,}36$$

Значення цього коефіцієнту свідчить, що при збільшенні твердості сталі на 1 одиницю НВ границя міцності в середньому зростає приблизно на 3,36 МПа.

Вільний член рівняння регресії визначаємо за формулою (15):

$$a = \frac{3330 - 3{,}36 \cdot 1020}{6} = -15{,}7$$

Отримане рівняння регресії має вигляд: σ_b=−15,7+3,36НВ,

де σ_β - прогнозована границя міцності сталі, МПа; НВ - твердість за Брінеллем.

Таблиця 6

Результати дослідів по визначенню залежності між твердістю за Брінеллем і границею міцності вуглецевої сталі

№ зразка	Твердість НВ, х	Границя міцності σ_β, МПа, у
1	120	390
2	140	450
3	160	520
4	180	590
5	200	660
6	220	720

Таблиця 7

Обчислення лінійної залежності між твердістю за Брінеллем і границею міцності вуглецевої сталі

№	х	у	$х^2$	ху
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

За результатами регресійного аналізу встановлено пряму лінійну залежність між твердістю за Брінеллем і границею міцності вуглецевої сталі. Отримане рівняння регресії підтверджує, що зі збільшенням твердості сталі зростає її границя міцності.

Методи статистичного аналізу, які раніше широко застосовувалися в наукових дослідженнях, були досить 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 Регресія орієнтований на побудову лінійних одно- та багатофакторних моделей за процедурою методу найменших квадратів. Програма дозволяє розраховувати коефіцієнти регресії та їхні стандартні помилки; масив значень, розрахований за рівнянням регресії; коефіцієнт детермінованості; стандартну похибку оцінки результативної змінної; суму квадратів та інші характеристики.

Одним із прикладів універсальних програмних засобів для операційного середовища Windows є STATISTICA. Її окремі модулі можуть ефективно застосовуватися для обробки результатів експериментальних досліджень, зокрема у галузі матеріалознавства. 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 кореляційного аналізу, підбір теоретичних розподілів до емпіричних даних, а також інші інструменти статистичної обробки.

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 обсяг інформації ускладнює її аналіз традиційними статистичними методами.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 4

1. Які основні елементи входять до процесу вимірювання?
2. Чим відрізняються абсолютні, відносні та непрямі вимірювання?
3. Які основні методи вимірювання застосовують у метрології?
4. Що таке точність вимірювання і чому результати вимірювань не можуть бути абсолютно точними?
5. Які види похибок вимірювання існують і чим вони відрізняються між собою?
6. Якими способами можна зменшити вплив систематичних і випадкових похибок?
7. Для чого під час експериментальних досліджень ведуть журнал спостережень?
8. Що таке генеральна сукупність і вибірка у статистичній обробці експериментальних даних?
9. Чим відрізняються кореляційний, дисперсійний і регресійний аналіз у статистичній обробці експериментальних даних?

5. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Незважаючи на різноманітність завдань, що виникають під час проведення експериментальних досліджень у галузі матеріалознавства, більшість із них можна об’єднати в кілька основних груп залежно від мети дослідження та застосовуваних методів математико-статистичного аналізу.

До першої групи належать завдання статистичного оцінювання характеристик досліджуваного об’єкта та перевірки гіпотез щодо їхніх значень і властивостей. Розв’язання таких завдань передбачає проведення вимірювань, оцінювання випадкових і систематичних складових похибки, визначення вибіркових середніх значень, дисперсій, довірчих інтервалів та інших статистичних характеристик. Застосування відповідних методів дає змогу оцінити точність і невизначеність результатів вимірювань, а також статистично обґрунтувати висновки щодо досліджуваних властивостей матеріалів.

Друга група охоплює завдання встановлення впливу вхідних змінних, або факторів, на вихідні характеристики досліджуваного об’єкта - відгуки системи. Основною метою таких досліджень є визначення статистичної значущості впливу окремих факторів на структуру, властивості або експлуатаційні характеристики матеріалу. Наприклад, експеримент може бути спрямований на з’ясування впливу введення певного легувального елемента на міцність сталі або впливу зміни хімічного складу сплаву на його корозійну стійкість. Для розв’язання цих завдань застосовують методи перевірки статистичних гіпотез, дисперсійного та регресійного аналізу.

Третя група передбачає встановлення кількісної залежності між відгуком досліджуваної системи та факторами, що визначають його зміну. Такі завдання пов’язані з побудовою математичної моделі об’єкта або технологічного процесу, яка з необхідною точністю описує вплив факторів на результати експерименту. Основним інструментом розв’язання цих завдань є регресійний аналіз, за допомогою якого визначають параметри математичної моделі, оцінюють вплив

окремих факторів та їхніх взаємодій, перевіряють статистичну значущість коефіцієнтів і адекватність отриманої залежності експериментальним даним.

Четверта група об'єднує завдання дослідження статистичного зв'язку між двома або кількома кількісними характеристиками матеріалу чи технологічного процесу. Зокрема, у металознавстві можуть досліджуватися зв'язки між твердістю сталі та швидкістю її охолодження під час гартування, між вмістом вуглецю і границею міцності, між розміром зерна та ударною в'язкістю. Для кількісного оцінювання сили й напряму таких зв'язків застосовують методи кореляційного аналізу. Водночас наявність статистичної кореляції сама по собі не доводить існування причинно-наслідкового зв'язку між досліджуваними величинами.

П'ята група охоплює завдання оптимізації технологічних процесів, які полягають у визначенні такого поєднання значень керованих факторів, за якого досягається найкраще значення вибраного критерію оптимізації з урахуванням установлених технологічних обмежень. Залежно від поставленої мети оптимізація може передбачати максимізацію або мінімізацію певної характеристики матеріалу. Наприклад, під час термічної обробки сталі методом нормалізації може визначатися оптимальне поєднання температури нагрівання та тривалості витримки, яке забезпечує максимальну ударну в'язкість, мінімальну схильність до крихкого руйнування або раціональне співвідношення міцності й пластичності. Для розв'язання таких завдань застосовують методи математичного моделювання, планування експерименту та оптимізаційного аналізу.

Розв'язання зазначених завдань потребує науково обґрунтованої організації експериментальних досліджень, раціонального вибору умов проведення дослідів і застосування відповідних методів статистичного опрацювання результатів. Методологічною основою такого підходу є теорія планування експерименту.

Теорія планування експерименту - це науковий напрям, що вивчає принципи та методи формування раціональних експериментальних планів, які забезпечують одержання необхідної кількості достовірної інформації про досліджуваний об'єкт за обґрунтованих витрат часу, матеріальних і трудових

ресурсів. Вона охоплює вибір досліджуваних факторів, визначення рівнів та інтервалів їх варіювання, формування експериментальної матриці, встановлення необхідної кількості дослідів і порядку їх проведення, а також статистичне опрацювання та інтерпретацію отриманих результатів.

Застосування методів планування експерименту в поєднанні з математичною статистикою дає змогу на основі обмеженої кількості дослідів побудувати математико-статистичну модель, яка описує залежність властивостей матеріалу від сукупності досліджуваних факторів. Такі моделі формують на основі експериментальних даних, отриманих під час дослідження конкретного матеріалу, об’єкта або технологічного процесу. У багатьох випадках їх подають у вигляді поліноміальних рівнянь регресії, які відображають вплив окремих факторів, їхніх взаємодій та нелінійних складових на вихідні характеристики системи.

Важливо враховувати, що математико-статистичні моделі, побудовані за результатами планованого експерименту, мають установлену область застосовності. Їхня достовірність обґрунтовується насамперед у межах дослідженої області факторного простору. Використання таких моделей поза межами експериментально досліджених значень факторів потребує додаткового обґрунтування та перевірки, оскільки екстраполяція може призводити до істотних похибок прогнозування.

При розробці методики планування експерименту застосовують терміни: функція відгуку і фактор.

Функція відгуку - це математична залежність, яка описує зміну очікуваного значення відгуку залежно від значень одного або кількох факторів. Наприклад, під час дослідження міцності матеріалу функція відгуку може описувати залежність міцності від температури обробки, тиску та хімічного складу. У плануванні експерименту функцію відгуку використовують для побудови математичної моделі процесу, оцінювання впливу факторів і визначення оптимальних умов проведення експерименту.

Фактор - це вхідна змінна, значення якої може впливати на перебіг досліджуваного процесу або на характеристики об’єкта дослідження. У

планованому експерименті переважно використовують керовані фактори, значення яких дослідник може цілеспрямовано встановлювати та змінювати відповідно до експериментального плану. У матеріалознавстві цілеспрямоване керування властивостями матеріалів здійснюється шляхом зміни їхнього хімічного складу, легування, модифікування, регулювання дисперсності структури, застосування термічної обробки, пластичної деформації та поверхневого зміцнення. Цілеспрямована зміна структури та властивостей матеріалів здійснюється шляхом регулювання їхнього хімічного складу, легування, модифікування, вибору режимів кристалізації, термічної та термомеханічної обробки, пластичної деформації й поверхневого зміцнення. До типових факторів металознавчих експериментів належать концентрація легувальних елементів, температура розплаву та заливання, температура нагрівання під час термічної обробки, тривалість витримки, швидкість нагрівання й охолодження, ступінь і швидкість пластичної деформації, а також інші технологічні параметри, що піддаються регулюванню. Варіювання зазначених факторів дає змогу досліджувати закономірності формування структури матеріалів та встановлювати їхній вплив на твердість, міцність, пластичність, ударну в’язкість, зносостійкість, корозійну стійкість та інші фізико-механічні й експлуатаційні характеристики.

Традиційний підхід до проведення експериментальних досліджень часто ґрунтується на послідовній зміні одного фактора за фіксованих значень інших. Такий спосіб організації дослідження називають однофакторним експериментом. Його застосування дає змогу встановити залежність відгуку від окремого фактора за конкретних значень решти параметрів і є доцільним для попереднього вивчення відносно простих процесів. Водночас однофакторний підхід має суттєві обмеження під час дослідження складних багатофакторних систем. Зокрема, він не забезпечує безпосереднього оцінювання взаємодій між факторами, а отримані окремо залежності не завжди можна коректно об’єднати в єдину математичну модель. Крім того, послідовне дослідження великої кількості факторів може потребувати значних витрат часу та матеріальних ресурсів. Для подолання зазначених обмежень застосовують багатофакторний

експеримент, який передбачає дослідження систематично сформованих комбінацій значень кількох факторів відповідно до заздалегідь розробленого плану. Такий підхід дає змогу одночасно оцінювати вплив факторів, виявляти їхні взаємодії та будувати математичні моделі, що з необхідною точністю описують поведінку досліджуваної системи.

У теорії планування експерименту досліджуваний процес подають у вигляді моделі «чорного ящика», в якій використовується функція відгуку, що встановлює математичну залежність між функцією відгуку та факторами впливу. 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, ...,x_k), а результати експерименту - як (y_1, y_2, ..., 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.

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 досліду. 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.

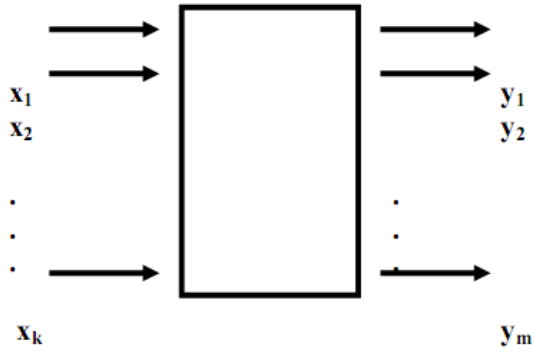


Рисунок 6 – Схема «чорного ящика»: x_1, x_2, … x_k – незалежні змінні чинники y_1, y_2, … y_p – відгук (результати експериментів)

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:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j + \sum b_{ii} x_i^2 \qquad (16)$$

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 існуючі закономірності, а й дає змогу визначати подальший напрям досліджень, обирати оптимальні режими технологічного процесу та оцінювати вплив окремих факторів на кінцеві властивості матеріалу.

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 фактору 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. На наступному етапі здійснюють аналіз літературних джерел, нормативних матеріалів і наявних експериментальних даних, що дає змогу уточнити вихідні умови дослідження та сформувати 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 фактору за умови підтримання інших факторів на заздалегідь установленому незмінному рівні. 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.

Сукупність усіх допустимих комбінацій значень досліджуваних факторів утворює факторний простір. Кожна конкретна комбінація рівнів факторів відповідає певній точці цього простору та визначає умови проведення окремого досліду. У межах планування експерименту сукупність вибраних точок факторного простору формує експериментальний план, а послідовність їх реалізації визначає порядок проведення досліджень.

Якщо кількість факторів становить k, а число рівнів кожного фактора - S, загальну кількість необхідних дослідів визначають за формулою:

$$N=S^k, \qquad (17)$$

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 є важливим при дослідженні 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.

У сучасних експериментальних дослідженнях для статистичної обробки отриманих даних широко застосовують спеціалізовані програмні пакети статистичного аналізу. Зокрема, компютерна 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 задачі оптимізації. Використання таких програмних засобів підвищує точність обробки експериментальних результатів і сприяє 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 (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 задає межі зміни фактора в експерименті та визначає діапазон досліджуваних умов.Інтервал варіювання має відповідати наступним вимогам. По-перше, він повинен бути більшим за похибку вимірювання рівня фактору, оскільки за надто малого інтервалу верхній і нижній рівні можуть виявитися такими, що практично не розрізнюються. По-друге, верхній і нижній рівні фактору 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 встановлюють в межах 3–10 % від ширини області визначення фактору, однак його конкретне значення залежить від природи досліджуваного процесу та точності вимірювань. 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}. Інтервал варіювання фактору визначають із співвідношення:

$$\Delta x_i = \frac{x_{i\,\max} - x_{i\,\min}}{2}. \qquad (18)$$

Наприклад, одним з факторів впливу є температура процесу. За основний рівень приймаємо t = 720°С, а інтервал варіювання ± 80° С. Тоді відношення кодованих і натуральних значень даного фактору можливо представити

формулою: $x = \frac{[t^oC] - 720}{80}$. Відповідно рівень +1 складає 800 ºС, а рівень - 1 дорівнює 640 ºС.

Інтервал варіювання повинен бути раціональним. Наприклад, зміна температури ± 0,5º - близька до похибки вимірів, а в межах ± 200º С – дуже широка, яка виходить за межі допустимого регулювання процесу.

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. Центрування полягає у перенесенні початку координат у точку x_{i0} дає змогу описувати відхилення рівнів факторів від основного значення в уніфікованій кодованій формі:

$$x_{i0} = \frac{x_{i\,\min} + x_{i\,\max}}{2}. \qquad (19)$$

Точку x_{i0} називають центром експерименту.

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 «−».

Перед початком експериментальних досліджень 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:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_k X_k \qquad (20)$$

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.)

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_{12} X_1 X_2 + \beta_{13} X_1 X_3 + \beta_{23} X_2 X_3 + \beta_{123} X_1 X_2 X_3 \qquad (21)$$

Для виконання планування експерименту будують матрицю експерименту. Рядки такої таблиці відповідають окремим дослідам, а стовпці - значенням факторів та параметра оптимізації. Для дворівневого фактору 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:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \overline{y_i}, \qquad (22)$$

де N - кількість дослідів; $\overline{y_i}$ - середнє арифметичне значення параметра оцінки кожного досліду.

Коефіцієнти при факторах визначають за формулою:

$$b_i = \sum_{u=1}^{N} x_{iн} \cdot y_u, \qquad (23)$$

де u – номер досліду; x_{iu} - кодоване значення і-го фактора в u-му досліді. Для повного факторного експерименту (2^2) коефіцієнти b_0, b_1, і b_2 визначають за співвідношеннями:

$$b_0 = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4};\ b_1 = \frac{y_1 - y_2 + y_3 - y_4}{4};\ b_2 = \frac{y_1 + y_2 - y_3 - y_4}{4}.$$

Таблиця 8

Матриця повного факторного експерименту (2^2)

Номер досліду	x_1	x_2	Параметр оптимізації, у
1	+	+	y_1
2	-	+	y_2
3	+	-	y_3
4	-	-	y_4

Таким чином, при визначенні 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. Величина коефіцієнта відповідає внеску фактору у зміну параметра оптимізації під час переходу фактору від нульового рівня до верхнього або нижнього рівня. Якщо коефіцієнт має додатний знак, то зі збільшенням значення фактору параметр оптимізації зростає; якщо коефіцієнт має від'ємний знак параметр оптимізації зменшується.

Оцінювання значущості коефіцієнтів виконують за допомогою критерію Стьюдента. Коефіцієнт вважають статистично значущим, якщо виконується умова:

$$\left|b_j\right| \geq t_{c,f} S_{b_j} \qquad (24)$$

де S_{b_j} – похибка коефіцієнта; $t_{q,f}$ – табличне значення критерію Стьюдента; q – рівень значущості.

Кількість ступенів свободи дисперсії відтворюваності визначають за формулою:

$$f = N(n-1) \qquad (25)$$

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: C - 3,0 %, Si - 1,0 %, Mn - 1,0 %, Cr - 13–19 %, Mo - 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. Центром досліду є точка Cr =16 %; Mo=1,0%; втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $У_0$= 18,5 г.

Фактори при плануванні експерименту мають такі значення:

– хром X_{1min}=13%, X_{1max}=19%,

– молібден X_{2min}=0,5%, X_{2max}=15%.

Матриця повного факторного експерименту при проведенні даного дослідження наведенав табл.8. Результати дослідів по визначенню впливу вмісту легуючих елементів (хрому та молібдену) на зносостійкість чавуних мелючих куль наведено в табл.9.

Таблиця 9

Результати дослідів по визначенню впливу вмісту легуючих елементів (хрому та молібдену) на зносостійкість чавуних мелючих куль.

Номер досліду	Вміст легуючих елементів	Втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру
Перший	Cr=19%; Mo=1,5%	$У_1$= 15,6 г
Другий	Cr =13%; Mo=1,5%;	$У_1$= 18,7 г
Третій	Cr =19%; Mo=0,5%	$У_1$= 17,4 г;
Четвертий	Cr =13 %; Mo=0,5%;	$У_1$= 20,6 г.

До кожного прийнятого поєднання факторів вимірюють значення параметра функції відгуку. На підставіких результатів за формулою (23) визначаємо коефіцієнти при факторах :

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=915,6+18,7-17,4-20,6):4=-0,975.

Лінійна математична модель впливу вмісту хрому і молібдену у чавуні на зносостійкість куль, що мелють, за результатами проведених розрахунків має наступний вигляд:

$$y=18,075-1,575x_1 -0,975 x_2.$$

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. Відповідно модель матиме наступний вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \qquad (26)$$

Для повного факторного експерименту (2^2) матрицю планування з урахуванням парної взаємодії факторів подано нижче.

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.

Таблиця 10

Матриця повного факторного експерименту (2^2) з урахуванням парної взаємодії факторів

Номер досліду	x_1	x_2	x_1 x_2	Параметр оптимізації, y
1	+	+	+	y_1
2	-	+	-	y_2
3	+	-	-	y_3
4	-	-	+	y_4

Незначущість коефіцієнтів у рівнянні регресії 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 побудові дробового факторного експерименту, для скорочення кількості 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 напівреплiку 2^{3-1}.

Як приклад, додаємо до попередньої задачі необхідність побудови математичної моделі впливу на зносостійкість мелючих куль вмісту двох легуючих елементів - хрому, молібдену та вмісту вуглецю у чавуні.

Таблиця 11

Матриця дробового факторного експерименту 2^{3-1} за умови лінійного характеру математичної моделі

Номер дослід у	x_1	x_2	X_3	Параметр оптимізації, у
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_{1min}=13%, x_{1max}=19%, молібден x_{2min}=0,5%, x_{2max}=15%. Додатково вплив вуглецю досліджується в межах: x_{3min}=2,5%, x_{3max}=3,5%. Відповідно:

перший дослід Cr=19%; Mo=1,5%; C=2,5%; втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $У_1$= 16,95 г;

другий дослід Cr =13%; Mo=1,5%; C=3,5%; втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $У_1$= 17,5 г;

третій дослід Cr =19%; Mo=0,5%; C=3,5%; втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $У_1$= 15,77 г;

четвертий дослід Cr =13 %; Mo=0,5%; C=2,5% втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $У_1$= 22,08 г.

Центром досліду є точка Cr =16 %; Mo=1,0%; C=3,0% втрата маси мелючих тіл при подрібненні 1 тони клінкеру $У_0$= 18,5 г.

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:

$$y=18,5-1,715x_4-0,850x_2+1,440x_3.$$

Таблиця 12

Рівні варіювання факторів дробового факторного експерименту 2^{3-1}

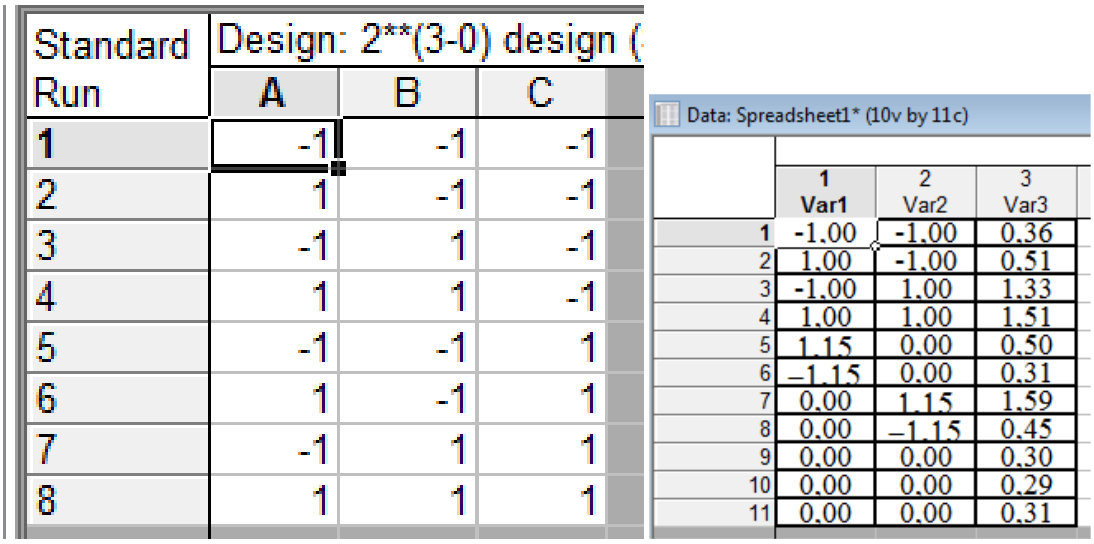
Фактори	x_1	x_2	x_3
Основний (нульовий),%	16,0	1,0	3,0
Нижній,%	13,0	0,5	2,5
Верхній,%	19,0	1,5	3,5
Інтервал варіювання,%	3,0	0,5	0,5

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. 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.

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.



Standard Run	Design: 2**(3-0) design (		
	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

Data: Spreadsheet1* (10v by 11c)

	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

5.3. Методи оптимізації експерименту

Важливим завданням планування експерименту є пошук області оптимальних значень функції відгуку за мінімально можливої кількості експериментальних дослідів. Для розв'язання цього завдання застосовують пошукові методи оптимізації, зокрема метод крутого сходження, який ґрунтується на послідовному цілеспрямованому переміщенні у факторному просторі в напрямку найшвидшого зростання функції відгуку.

Необхідність пошуку області екстремуму функції відгуку часто виникає під час розв'язання інженерних задач, зокрема оптимізації технологічних процесів у металургії та матеріалознавстві. Застосування традиційного методу «проб і помилок», за якого значення факторів змінюють на основі попереднього досвіду, інтуїтивних припущень або випадкового вибору, зазвичай не забезпечує достатньої ефективності експериментальних досліджень. Це зумовлено значною

кількістю факторів, які впливають на перебіг досліджуваних процесів, складним характером їхньої взаємодії та нелінійною залежністю функції відгуку від умов проведення експерименту.

Більш обґрунтованим підходом є використання пошукових методів оптимізації, які дають змогу скоротити кількість необхідних дослідів і забезпечити послідовне наближення до області оптимальних значень функції відгуку. На відміну від методу «проб і помилок», варіювання факторів у таких методах здійснюється цілеспрямовано, відповідно до визначеної процедури пошуку та з урахуванням результатів попередніх експериментів.

Пошукові методи оптимізації реалізуються у вигляді ітераційних процедур, за яких процес дослідження поділяють на послідовні етапи. На кожному етапі проводять серію дослідів, аналізують отримані результати, оцінюють характер зміни функції відгуку та визначають напрям і величину подальшого варіювання факторів. Таким чином, результати попереднього етапу є основою для планування наступного, що забезпечує послідовне уточнення умов експерименту та наближення до області екстремуму функції відгуку.

Одним із поширених градієнтних методів експериментальної оптимізації є метод крутого сходження, запропонований Дж. Боксом і К. Вілсоном. Його сутність полягає в послідовному переміщенні у факторному просторі в напрямку градієнта функції відгуку, який визначає напрям її найшвидшого локального зростання. Якщо метою оптимізації є максимізація функції відгуку, пошук здійснюють у напрямку градієнта, а якщо мінімізація — у протилежному напрямку, тобто в напрямку антиградієнта. Практична реалізація методу передбачає побудову математичної моделі функції відгуку в досліджуваній області факторного простору та використання її коефіцієнтів для визначення напрямку подальших експериментальних досліджень.

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. Якщо метою є пошук

максимуму, рух здійснюють у напрямку зростання параметра оптимізації. При цьому крок руху в напрямку градієнта може відрізнятися від інтервалу варіювання факторів, який застосовують у повному або дробовому факторному експерименті. 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 (рис.9).

В околиці знайденого локального екстремуму проводять нову серію дослідів з метою уточнення математичної моделі, визначення нових значень коефіцієнтів рівняння регресії та встановлення нового напряму градієнта, наприклад у напрямку (M_1N). Надалі ця процедура повторюється послідовно: після кожного етапу пошуку уточнюють рівняння регресії, визначають новий напрям руху та продовжують пошук до досягнення наступного локального екстремуму.

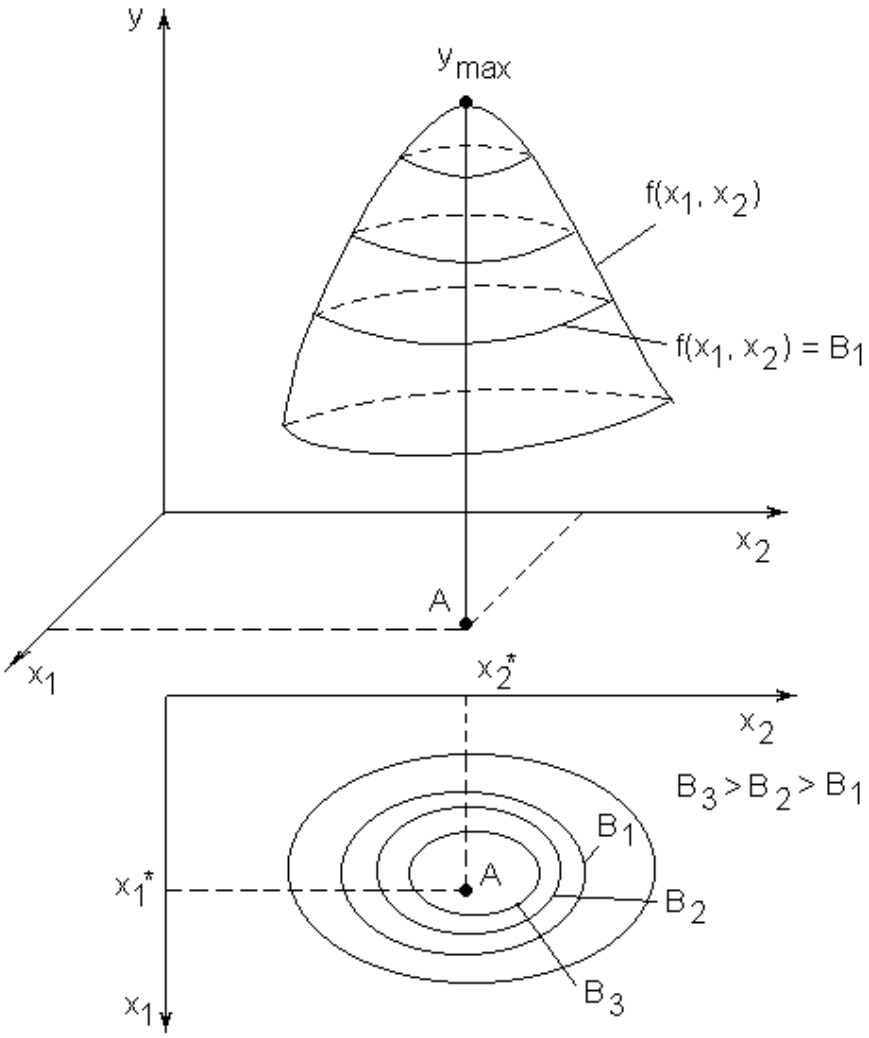


Рисунок 8 – Поверхня відгуку з точкою екстремуму (а) та лінії рівного рівня (б):$y=f(x_1,x_2)=B=const$ для $n=2$

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.

Процедуру руху до оптимуму повторюють доти, доки коефіцієнти лінійної моделі не стануть близькими до нуля. Це свідчить про те, що дослідження проводиться у 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. 9.

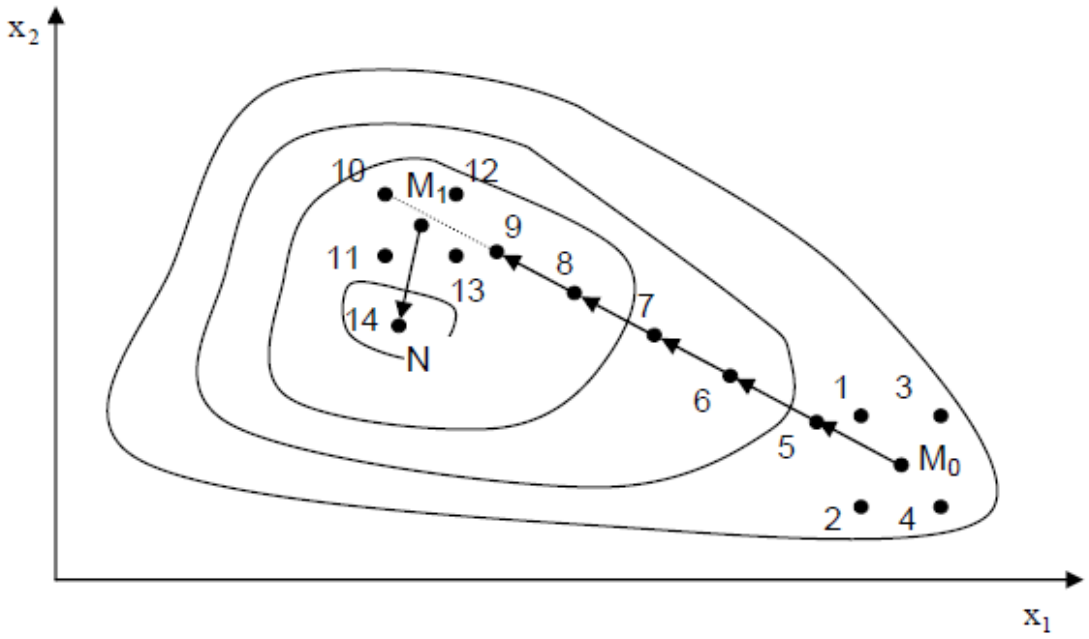


Рисунок 9 - Процедура оптимізації методом крутого сходження

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 багатофакторних систем?
7. Що таке багатофакторний 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?

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 виробництва, 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 у матеріалознавстві відбувався шляхом послідовного поглиблення масштабу аналізу: від макроскопічних спостережень до досліджень на атомному та нанорівнях. Кожен етап розвитку у розвитку рівня досліджень 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 повного комплексу характеристик матеріалу. Сучасне матеріалознавство ґрунтується на комплексному та міждисциплінарному підході, який охоплює різні структурні

рівні - від атомного до макроскопічного. Поєднання взаємодоповнювальних методів дає змогу сформувати цілісне уявлення про фазові, структурні, фізико-хімічні та механічні зміни, що відбуваються в матеріалах під час їх отримання, обробки й експлуатації.

Матеріалознавство є міждисциплінарною галуззю науки, теоретичні та прикладні основи якої формуються на перетині хімії, фізики, механіки й технології матеріалів. Кожна з цих галузей знань відіграє важливу роль у встановленні закономірностей формування структури, властивостей і поведінки матеріалів за різних умов їх одержання, обробки та експлуатації.

Хімія забезпечує теоретичні основи та експериментальні методи дослідження хімічного складу, будови, реакційної здатності й хімічних властивостей речовин і матеріалів. Фізика дає змогу встановлювати фундаментальні закономірності формування структури та фізичних властивостей матеріалів, досліджувати процеси, що відбуваються в них, а також розробляти теоретичні моделі для пояснення й прогнозування їхньої поведінки. Механіка забезпечує теоретичні засади та методи дослідження напружено-деформованого стану матеріалів, визначення їхніх механічних характеристик, аналізу процесів деформування й руйнування та кількісного оцінювання результатів механічних випробувань. Технологія матеріалів охоплює методи та процеси їх одержання, обробки й переробки, спрямовані на формування заданої структури, забезпечення необхідних властивостей і виготовлення напівфабрикатів та готових виробів.

Особливе значення для розвитку матеріалознавства мають положення фізики та хімії твердого тіла, які дають змогу встановлювати взаємозв’язки між хімічним складом, атомно-кристалічною будовою, просторовим розташуванням атомів, іонів і молекул, характером їхньої взаємодії та властивостями матеріалів. Зокрема, особливості будови й міжатомної взаємодії значною мірою визначають електричні, магнітні, оптичні та хімічні властивості твердих тіл. Важливим напрямом фізики твердого тіла є дослідження квантово-механічних закономірностей, що визначають електронну структуру та фізичні властивості матеріалів. Розуміння цих закономірностей має принципове значення для

розроблення й дослідження напівпровідникових, надпровідних, магнітних та інших функціональних матеріалів.

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. 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.

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. Дослідження полімерів поєднує елементи хімії високомолекулярних сполук, фізичної хімії, статистичної термодинаміки та механіки матеріалів. Такий міждисциплінарний підхід дає змогу здійснювати термодинамічний, структурний і фізико - механічний опис властивостей полімерних систем.

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 у 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 становить теоретичну основу дослідження швидкості перебігу хімічних реакцій та механізмів їх реалізації в нерівноважних умовах. Її положення дають змогу встановлювати закономірності впливу температури, тиску, концентрації реагентів та інших чинників на швидкість реакцій, а також досліджувати кінетичні закономірності наближення системи до стану рівноваги. У матеріалознавстві методи хімічної кінетики застосовують для дослідження швидкості хімічних реакцій, що супроводжують фазові перетворення, формування нових фаз і зміну хімічного складу матеріалів. У поєднанні з методами фізичної кінетики їх використовують для аналізу процесів зародження та росту фаз, росту зерен, дифузійного перенесення речовини, а також еволюції структури та властивостей матеріалів. Особливе значення має застосування законів кінетики для дослідження дифузійних процесів. Дифузія є одним із найважливіших механізмів, що зумовлюють структурні та фазові зміни в матеріалах, зокрема під час термічної, хіміко-термічної та термомеханічної обробки. Дифузійні процеси відіграють визначальну роль у перебігу багатьох технологічних операцій, зокрема дифузійного легування, цементації, азотування та гомогенізації, а також істотно впливають на процеси рекристалізації, старіння й фазових перетворень у твердому стані.

Історично розвиток методів експериментальних досліджень у матеріалознавстві був тісно пов’язаний зі становленням і вдосконаленням фізичних та хімічних методів аналізу, а також із загальним науково-технічним прогресом. Еволюція цих методів охоплює низку послідовних етапів - від візуального дослідження макроструктури матеріалів до застосування сучасних інструментальних методів, що забезпечують вивчення їхньої структури, хімічного складу та властивостей на мікро-, нано- й атомному рівнях.

Становлення наукових методів дослідження у XVII–XVIII столітті і винайдення оптичного мікроскопа створили передумови для перших спостережень мікроструктури матеріалів. У цей період відбувся 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 XX століття, після відкриття рентгенівського випромінювання, було розроблено метод рентгеноструктурного аналізу, який відкрив принципово нові можливості для дослідження внутрішньої будови кристалічних матеріалів. Завдяки використанню явища дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці цей метод дав змогу визначати фазовий склад матеріалів, параметри кристалічної ґратки, просторове розташування атомів та особливості кристалічної структури речовин. Таким чином, розвиток рентгеноструктурного аналізу став важливим етапом становлення експериментального матеріалознавства, оскільки забезпечив перехід від дослідження переважно макро- та мікроструктурних характеристик матеріалів до безпосереднього вивчення їхньої кристалічної будови на атомному рівні.

Розвиток електронної мікроскопії в середині XX століття став важливим етапом удосконалення експериментальних методів дослідження матеріалів, оскільки забезпечив можливість вивчення їхньої мікроструктури з нанометричною роздільною здатністю, зокрема виявлення та аналізу дефектів кристалічної ґратки. Водночас дослідження структурних особливостей матеріалів потребувало доповнення мікроскопічних спостережень методами, здатними визначати їхній хімічний склад, характер хімічних зв’язків і локальне атомне оточення. Це зумовило подальший розвиток і широке впровадження високочутливих фізико-хімічних методів аналізу, особливо в другій половині XX століття. Зокрема, мас-спектрометрія забезпечила можливість визначення елементного та ізотопного складу речовин, інфрачервона спектроскопія - дослідження коливальних характеристик хімічних зв’язків, а ядерний магнітний резонанс — отримання інформації про локальне атомне оточення та особливості хімічної структури. Подальшим розвитком методів безпосереднього дослідження поверхні матеріалів стало створення сканувальної тунельної

мікроскопії, яка дала змогу вивчати топографію електропровідних поверхонь з атомною роздільною здатністю. Таким чином, поєднання мікроскопічних, спектроскопічних і мас-спектрометричних методів сформувало комплексний підхід до дослідження матеріалів, за якого інформація про їхню морфологію та кристалічну будову доповнюється відомостями про хімічний склад, міжатомні взаємодії та локальні структурні особливості.

У XXI столітті розвиток цифрових та обчислювальних технологій зумовив широке впровадження в матеріалознавчі дослідження методів комп'ютерного моделювання, цифрового оброблення й аналізу експериментальних даних, машинного навчання та штучного інтелекту. Застосування цих методів забезпечило нові можливості для встановлення взаємозв'язків між складом, структурою та властивостями матеріалів, прогнозування їхніх характеристик, оптимізації хімічного складу й технологічних параметрів обробки, а також моделювання процесів структуроутворення та фазових перетворень. У результаті стало можливим поєднання експериментальних досліджень із чисельним моделюванням і методами аналізу даних, що сприяє підвищенню ефективності розроблення та вдосконалення матеріалів із заданими властивостями. Важливе місце серед сучасних дослідницьких підходів посідає комп'ютерне моделювання, яке дає змогу прогнозувати властивості матеріалів, досліджувати механізми деформації, дифузії, кристалізації та руйнування, а також аналізувати вплив різних чинників на формування їхньої 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 методи макроструктурного, мікроструктурного та електронно-мікроскопічного аналізу, які дають змогу вивчати особливості їхньої будови на різних масштабних рівнях. Макроструктурний аналіз передбачає дослідження будови матеріалу неозброєним оком або за незначного збільшення. Його використовують для

виявлення структурних неоднорідностей, тріщин, пор, ліквації, волокнистої будови та інших макроскопічних дефектів. Мікроструктурний аналіз здійснюють переважно за допомогою оптичної мікроскопії, що дає змогу детальніше досліджувати структурні особливості металів і сплавів. Цей метод застосовують для визначення розмірів і форми зерен, виявлення та ідентифікації структурних складових, оцінювання характеру їхнього розподілу, а також дослідження неметалевих включень і мікродефектів. У поєднанні з іншими методами дослідження мікроструктурний аналіз використовують для встановлення фазового складу матеріалів.

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.

Для визначення хімічного складу матеріалів застосовують комплекс хімічних і фізико-хімічних методів аналізу, вибір яких залежить від природи досліджуваного матеріалу, його складу, необхідної точності вимірювань та поставлених завдань дослідження. Важливе місце серед фізико-хімічних методів посідають спектроскопічні методи, що ґрунтуються на взаємодії речовини з електромагнітним випромінюванням. До них належать рентгенофлуоресцентний аналіз, атомно-абсорбційна та атомно-емісійна спектроскопія, які використовують переважно для якісного й кількісного визначення елементного складу матеріалів. Окрему групу становлять мас-спектрометричні методи, принцип дії яких ґрунтується на іонізації частинок речовини та розділенні утворених іонів за відношенням їхньої маси до заряду. Ці методи забезпечують високу чутливість визначення хімічних елементів, зокрема домішок, а також дають змогу досліджувати ізотопний склад речовини.

Для одержання додаткової інформації про особливості хімічних зв’язків і молекулярної будови матеріалів застосовують інфрачервону та раманівську спектроскопію. Інфрачервона спектроскопія дає змогу ідентифікувати функціональні групи та характерні типи хімічних зв’язків, тоді як раманівська

спектроскопія використовується для дослідження коливальних характеристик, молекулярної структури та структурного стану матеріалів.

Поряд з інструментальними методами важливе значення зберігають класичні хімічні методи аналізу, зокрема титриметричний і гравіметричний. Вони ґрунтуються на проведенні хімічних реакцій із подальшим кількісним визначенням компонентів досліджуваної речовини за об’ємом витраченого реагенту або масою виділеної сполуки.

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 сучасних високотехнологічних методів дослідження матеріалів належать методи аналізу структури на нанометричному та атомному рівнях, комп'ютерне моделювання і тривимірна томографія. Зокрема, атомно-силову мікроскопію застосовують для дослідження рельєфу та локальних властивостей поверхні матеріалів із високою просторовою роздільною здатністю, тоді як сканувальна тунельна мікроскопія дає змогу вивчати атомну будову та локальні електронні властивості поверхні електропровідних матеріалів.

Особливого значення набувають методи тривимірної томографії, які забезпечують просторову реконструкцію внутрішньої будови матеріалів переважно без їх руйнування. Їх застосування дає змогу досліджувати розподіл структурних складових, пор, включень і дефектів у об'ємі матеріалу. Зокрема, методи томографічного аналізу використовують для вивчення формування та еволюції внутрішньої структури металевих матеріалів під час кристалізації, у тому числі для спостереження за розвитком дендритної структури, формуванням включень графіту у чавунах, утворенням усадкової пористості та інших дефектів твердnення. Це має важливе значення як для дослідження закономірностей структуроутворення, так і для неруйнівного контролю якості складних виробів і композиційних матеріалів.

Одним із перспективних напрямів розвитку сучасного матеріалознавства є цифровізація досліджень і застосування технологій штучного інтелекту. Зокрема, методи машинного навчання використовують для автоматизованого розпізнавання фаз, структурних дефектів і меж зерен на мікроскопічних зображеннях, опрацювання великих масивів дифракційних і спектроскопічних даних, прогнозування властивостей матеріалів та оптимізації їхнього складу. Застосування цих методів дає змогу істотно прискорити оброблення й аналіз експериментальних даних, підвищити відтворюваність результатів і зменшити вплив суб'єктивних чинників на їх інтерпретацію. Одним із прикладів практичного використання штучного інтелекту є автоматизований аналіз

зображень, отриманих методом сканувальної просвічувальної електронної мікроскопії, для визначення локальної атомної структури, кристалографічних орієнтацій, структурних дефектів і міжфазних меж.

Таким чином, сучасне матеріалознавство ґрунтується на комплексному застосуванні експериментальних і розрахункових методів, які забезпечують всебічне дослідження хімічного складу, структури, властивостей матеріалів та закономірностей їхньої поведінки за різних умов експлуатації. Історичний розвиток цих методів відображає послідовне поглиблення наукових уявлень про природу матеріалів - від візуального спостереження їхньої макроструктури до високоточного дослідження атомно-кристалічної будови, комп'ютерного моделювання та прогнозування властивостей із використанням сучасних цифрових технологій. Водночас удосконалення методів дослідження сприяло переходу від переважно емпіричного вивчення матеріалів до встановлення кількісних взаємозв'язків між їхнім хімічним складом, структурою, технологією отримання та обробки, властивостями й експлуатаційними характеристиками. Саме інтеграція експериментальних досліджень, теоретичних підходів і цифрових технологій формує сучасну методологічну основу матеріалознавства, забезпечуючи можливість не лише досліджувати й пояснювати властивості існуючих матеріалів, а й цілеспрямовано розробляти нові матеріали із заданим комплексом функціональних та експлуатаційних характеристик.

6.1. Спектрометричні методи аналізу хімічного складу речовин

Для розв'язання завдань, пов'язаних із визначенням хімічного складу матеріалів, у сучасному матеріалознавстві широко застосовують комп'ютеризовані спектрометричні аналізатори. Використання такого обладнання забезпечує можливість швидкого, точного та відтворюваного визначення якісного й кількісного елементного складу досліджуваних зразків, що має важливе значення як для проведення наукових досліджень, так і для контролю складу та якості матеріалів у промисловому виробництві.

Принцип дії спектрометричних аналізаторів ґрунтується на фізичних і фізико-хімічних методах дослідження речовини, серед яких важливе місце посідають методи оптичної та рентгенівської спектроскопії. В їх основу покладено аналіз спектрів, що формуються внаслідок взаємодії атомів, молекул або іонів речовини з електромагнітним випромінюванням. Залежно від застосовуваного методу досліджуваний матеріал може зазнавати впливу випромінювання різних діапазонів, а також збуджуватися під дією електричного розряду чи потоку заряджених частинок. У результаті виникають характерні спектри випромінювання, поглинання або розсіювання, параметри яких залежать від хімічного складу та особливостей будови речовини.

Фізичною основою спектральних методів аналізу є процеси взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, які супроводжуються змінами енергетичних станів її структурних частинок. До основних явищ, що використовуються у спектроскопії, належать емісія - випромінювання електромагнітної енергії збудженими атомами, молекулами або іонами; абсорбція - поглинання випромінювання речовиною; а також розсіювання - зміна напряму поширення випромінювання, яка в окремих випадках супроводжується зміною його частоти. Кожне із зазначених явищ характеризується певними спектральними закономірностями, що становлять фізичну основу відповідних методів спектрального аналізу.

Реєстрація та математична обробка спектральних характеристик дають змогу встановлювати наявність певних хімічних елементів у складі матеріалу та визначати їхній кількісний вміст. Поєднання фізичних принципів спектрального аналізу із сучасними засобами автоматизації, цифрової реєстрації та комп’ютерної обробки даних забезпечує високу ефективність спектрометричних досліджень і розширює можливості їх використання в матеріалознавстві.

Методи спектрального аналізу характеризуються високою чутливістю, точністю та відтворюваністю результатів, оперативністю виконання досліджень, а також широкими можливостями автоматизації вимірювань і обробки експериментальних даних. Сукупність цих переваг зумовлює їх широке застосування для проведення масових аналітичних досліджень, визначення

хімічного складу матеріалів, контролю технологічних процесів, оцінювання відповідності продукції нормативним вимогам та розв’язання науково-дослідних завдань. Спектральні методи є важливим інструментом сучасного матеріалознавства, що забезпечує отримання достовірної аналітичної інформації, необхідної для оцінювання якості матеріалів, удосконалення технологій їх виробництва та розроблення нових матеріалів із заданими властивостями.

6.1.1. Метод атомно-емісійного спектрального аналізу

Атомно-емісійна спектроскопія ґрунтується на дослідженні електромагнітного випромінювання, що виникає внаслідок переходів електронів між дискретними енергетичними рівнями атомів та іонів. Фізичною основою методу є реєстрація емісійного спектра, який формується після атомізації та збудження досліджуваної речовини, з подальшим аналізом спектральних ліній, характерних для відповідних хімічних елементів.

Необхідною умовою проведення атомно-емісійного аналізу є переведення компонентів досліджуваної проби в газоподібний стан у вигляді вільних атомів та, залежно від умов збудження, іонів. Для цього використовують різні джерела енергії, зокрема полум’я, електричну дугу, іскровий розряд або плазму. Під їхнім впливом відбуваються процеси випаровування, атомізації та збудження речовини, а за достатньо високих енергій — також її іонізації. Унаслідок поглинання енергії частина атомів та іонів переходить у збуджені стани, які характеризуються підвищеною енергією електронів.

Збуджені енергетичні стани атомів та іонів зазвичай є нестійкими, тому через короткий проміжок часу відбуваються спонтанні переходи електронів на нижчі енергетичні рівні. Ці переходи супроводжуються випромінюванням фотонів, енергія яких відповідає різниці енергій початкового та кінцевого станів. Оскільки система дозволених енергетичних рівнів є характерною для кожного хімічного елемента, випромінювання відбувається на певних довжинах хвиль, утворюючи сукупність характерних спектральних ліній. Саме ця закономірність

забезпечує можливість якісної ідентифікації хімічних елементів за положенням їхніх спектральних ліній, а визначення інтенсивності випромінювання за відповідного калібрування дає змогу встановлювати їхній кількісний вміст у досліджуваному матеріалі.

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 інтенсивністю та довжиною хвилі. Подальший аналіз положення та інтенсивності спектральних ліній дає можливість визначити якісний і кількісний склад речовини.

Якісний аналіз ґрунтується на ідентифікації хімічних елементів шляхом зіставлення положення зареєстрованих спектральних ліній із довідковими спектральними даними. Кількісний аналіз передбачає вимірювання інтенсивності характерних спектральних ліній, яка за певних умов збудження пов’язана з концентрацією відповідного елемента в досліджуваній пробі. Визначення його кількісного вмісту здійснюють за допомогою попередньо встановлених калібрувальних залежностей. Аналіз багатокомпонентних матеріалів ускладнюється можливим перекриванням спектральних ліній різних елементів, а також впливом хімічного складу та фізичних властивостей проби на інтенсивність випромінювання. Ці явища можуть спричиняти спектральні та матричні інтерференції, що потребує застосування відповідних методів корекції для забезпечення точності й достовірності результатів аналізу. 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, що підлягає дослідженню. Наприклад, атоми заліза під

час випромінювання утворюють значну кількість спектральних ліній, тому вибір оптимальної аналітичної лінії для цього елемента має принципове значення.

Дискретний характер енергетичних переходів електронів між дозволеними енергетичними рівнями атомів та іонів зумовлює формування лінійчастих емісійних спектрів, характерних для відповідних хімічних елементів. Такі спектри зазвичай подають у графічній формі, відкладаючи на осі абсцис довжину хвилі випромінювання λ, а на осі ординат - його інтенсивність. Сукупність частот, на яких відбувається випромінювання атомів певного хімічного елемента, називають спектром випромінювання цього елемента. Положення спектральних ліній дає змогу ідентифікувати хімічні елементи, тоді як їхня інтенсивність за відповідного калібрування використовується для визначення кількісного вмісту цих елементів у досліджуваному матеріалі. Таким чином, лінійчасті емісійні спектри становлять фізичну основу якісного та кількісного аналізу елементного складу матеріалів методом атомно-емісійної спектроскопії.

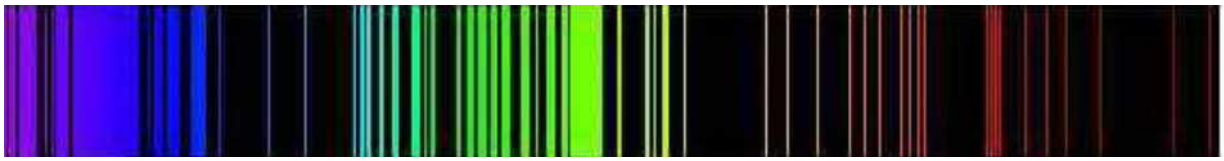


Рисунок 10 – Лінійчатий спектр випромінювання заліза

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 градуювальними залежностями.

Залежно від конструкції спектрометра й особливостей досліджуваної проби використовують електроди з вуглецевих, графітових, вольфрамових або інших електропровідних матеріалів. Електричні параметри розряду, зокрема напруга, сила струму та тривалість імпульсів, визначаються типом джерела збудження й умовами проведення аналізу. Під дією електричного розряду відбувається інтенсивне локальне нагрівання поверхні зразка, що спричиняє випаровування частини матеріалу та його подальшу атомізацію. Утворені атоми та іони збуджуються в плазмі розряду й під час переходів на нижчі енергетичні рівні випромінюють електромагнітну енергію на характерних для відповідних хімічних елементів довжинах хвиль. Під час аналізу суцільних електропровідних зразків, зокрема металів і сплавів, досліджуваний матеріал може безпосередньо виконувати роль одного з електродів розрядної системи.

Для підвищення стабільності процесів атомізації та збудження, особливо в іскровій атомно-емісійній спектрометрії металів, широко використовують захисну атмосферу інертного газу, переважно аргону. Його застосування дає змогу обмежити взаємодію нагрітої поверхні зразка з киснем та іншими компонентами атмосферного повітря, зменшити ймовірність утворення оксидів і знизити вплив сторонніх газів на характеристики розряду та зареєстрованого спектра. Це особливо важливо під час визначення елементів, схильних до окиснення, а також компонентів, аналітичний сигнал яких істотно залежить від умов атомізації та збудження. У результаті використання контрольованої газової атмосфери підвищується стабільність спектральних характеристик, відтворюваність вимірювань і достовірність визначення елементного складу матеріалів.

Спектрометр - це вимірювальний прилад, призначений для спектрального розділення електромагнітного випромінювання, реєстрації його спектральних характеристик та визначення інтенсивності випромінювання залежно від довжини хвилі. В атомно-емісійній спектроскопії випромінювання, що утворюється внаслідок збудження атомів та іонів досліджуваної речовини,

надходить до оптичної системи спектрометра, де відбувається його розкладання на окремі спектральні компоненти. Для цього використовують дисперсійні оптичні елементи, зокрема призми або дифракційні решітки, які забезпечують просторове розділення випромінювання за довжинами хвиль. Сформований спектр реєструється фотоприймальними пристроями, що перетворюють оптичні сигнали на електричні для подальшої цифрової обробки. Аналіз положення та інтенсивності спектральних ліній дає змогу ідентифікувати хімічні елементи й визначати їхній кількісний вміст у досліджуваному матеріалі.

Випромінювання, що утворюється в атомізаторі, проходить через вхідну щілину *S*, розташовану у фокальній площині лінзи Л1 (рис.11). Ця частина спектрометра називається коліматором і призначена для формування паралельного пучка променів. Після проходження через лінзу *Л1* 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 фокусуючої лінзи Л2 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.

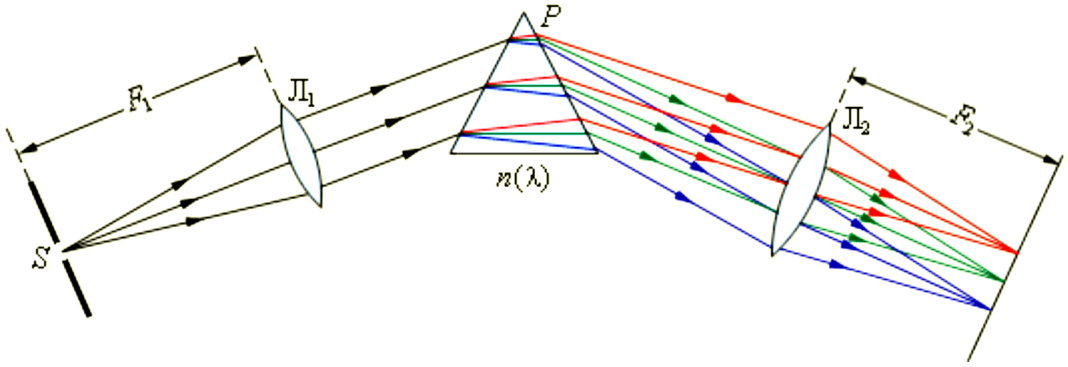


Рисунок 11 – Оптична схема спектрального приладу для проведення атомного емісійного аналізу

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 та тріщин;

– 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.

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 ряду хімічних 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 можуть відбуватися процеси відбивання, поглинання, пропускання та розсіювання світла (рис. 13). У разі опромінення зразка монохроматичним світлом переважна частина розсіяного випромінювання зберігає початкову частоту та енергію фотонів, змінюючи лише напрям поширення. Це явище називають пружним, або релеївським, розсіюванням. Водночас незначна частина випромінювання зазнає непружного розсіювання, яке супроводжується обміном

енергією між фотонами та речовиною. Таке явище називають комбінаційним, або раманівським, розсіюванням світла.

Фізична сутність комбінаційного розсіювання полягає у зміні енергії фотонів унаслідок їхньої взаємодії з коливальними, обертальними та іншими енергетичними збудженнями речовини. Якщо частина енергії падаючого фотона передається матеріалу, енергія розсіяного фотона зменшується, а його довжина хвилі збільшується. Цей процес називають стоксовим розсіюванням. У протилежному випадку, коли фотон отримує енергію від попередньо збудженого стану речовини, його енергія зростає, а довжина хвилі зменшується, що відповідає антистоксовому розсіюванню. Унаслідок цих процесів у спектрі виникають додаткові спектральні компоненти, зміщені за частотою відносно лінії збуджувального випромінювання.

Величина раманівського зміщення визначається різницею енергій відповідних станів речовини та залежить від особливостей її молекулярної або кристалічної будови. Важливою фізичною умовою виникнення раманівського розсіювання є зміна поляризовності речовини під час відповідного коливання. Під дією електричного поля падаючого випромінювання відбувається деформація електронної хмари атомів або молекул, унаслідок чого виникає індукований дипольний момент. Якщо під час коливань змінюється поляризовність, у розсіяному випромінюванні з’являються спектральні компоненти з частотами, відмінними від частоти збуджувального світла. Саме ця закономірність визначає можливість реєстрації характерних раманівських спектральних смуг.

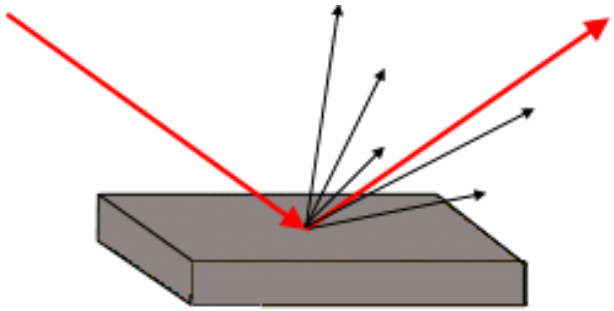


Рисунок 13 – Схема утворення комбінаційного розсіювання світла: червона стрілка - відбите світло; сині стрілки — компоненти розсіяного випромінювання, що формують раманівський спектр.

Сукупність спектральних смуг, їхнє положення, інтенсивність і форма характеризують особливості хімічних зв'язків, молекулярної та кристалічної будови досліджуваного матеріалу. Аналіз цих характеристик дає змогу ідентифікувати речовини, визначати їхній фазовий склад, досліджувати структурні зміни та особливості міжатомної взаємодії. Метод дослідження, заснований на реєстрації та аналізі спектрів комбінаційного розсіювання, отримав назву раманівської спектроскопії на честь індійського фізика Чандрасекара Венкати Рамана, який експериментально відкрив це явище у 1928 році.

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 поляризовності 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.

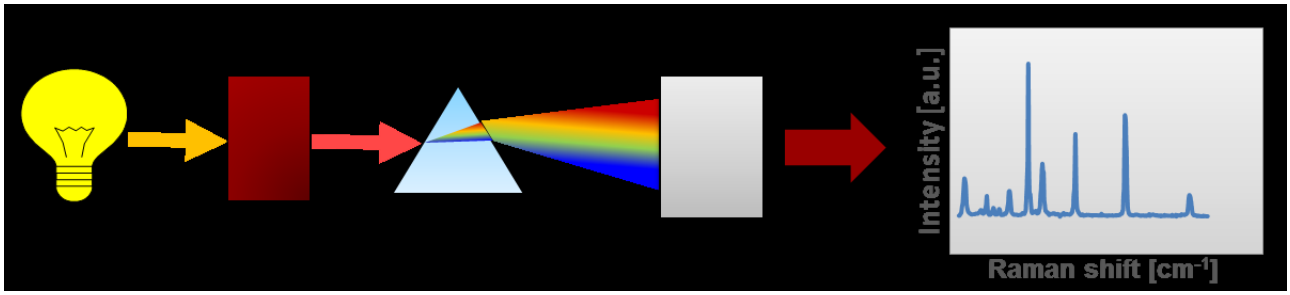


Рисунок 14 – Схема раманівського спектрометра 1 - джерело світла; 2 - досліджуємий зразок; 3 - дисперсійний елемент (призма); 4 - детектор комбінаційного розсіювання; 5 - раманівський спектр на екрані монітора

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. У сучасному матеріалознавстві раманівську спектроскопію широко застосовують для дослідження полімерів, лакофарбових покриттів, мінералів, кераміки, скла, напівпровідникових і вуглецевих матеріалів. Метод дає змогу вивчати особливості їхньої структури, ідентифікувати окремі фази, виявляти структурні неоднорідності та досліджувати зміни, що виникають під впливом температури, механічних навантажень або технологічної обробки. Таким чином, спектроскопія комбінаційного розсіювання є важливим інструментом неруйнівного дослідження матеріалів, який забезпечує отримання інформації про їхню хімічну будову, фазовий склад і структурний стан.

6.1.3. Рентгеноструктурний аналіз

Матеріали з однаковим або близьким хімічним складом можуть істотно відрізнятися за фізичними, механічними, оптичними, електричними та іншими властивостями. Такі відмінності значною мірою зумовлені особливостями їхньої атомно-кристалічної будови, зокрема просторовим розташуванням атомів,

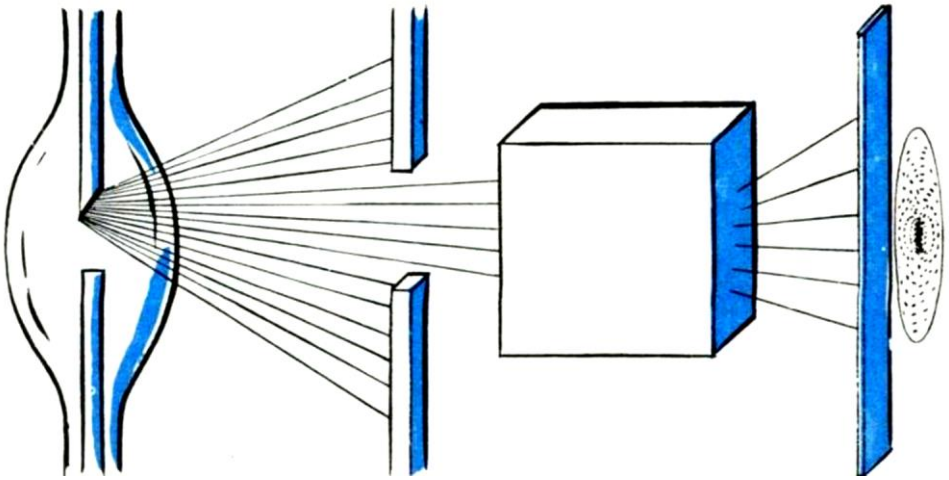
типом і параметрами кристалічної ґратки, наявністю структурних дефектів, внутрішніх напружень, а також існуванням різних поліморфних модифікацій. Це зумовлює необхідність застосування методів, які дають змогу безпосередньо досліджувати кристалічну структуру матеріалів і встановлювати її взаємозв'язок із властивостями.

Одним із найважливіших та найінформативніших методів дослідження кристалічної будови матеріалів є рентгеноструктурний аналіз. Його фізичною основою є дифракція рентгенівського випромінювання на періодично розташованих атомах кристалічної ґратки. Аналіз дифракційної картини дає змогу визначати тип кристалічної структури, параметри елементарної комірки, ідентифікувати кристалічні фази та досліджувати структурні зміни, пов'язані з поліморфними перетвореннями. Крім того, за відповідними характеристиками дифракційних максимумів можна оцінювати мікродеформації кристалічної ґратки, залишкові напруження та інші особливості структурного стану матеріалу.

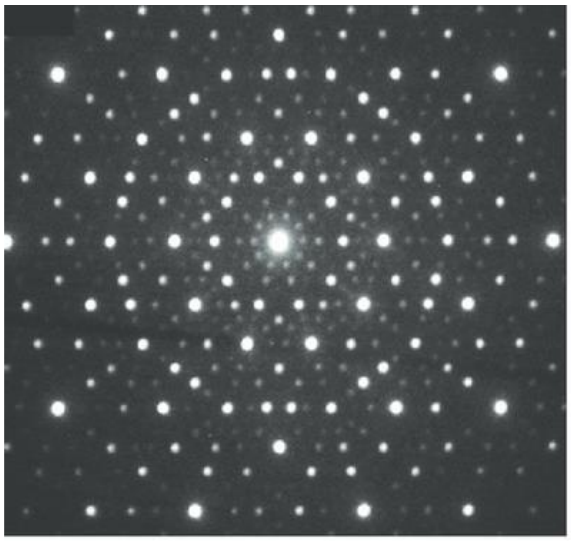
Важливою перевагою рентгеноструктурного аналізу є можливість дослідження кристалічної будови матеріалів без необхідності переведення їх у газоподібний, плазмовий або розчинений стан. Це дає змогу зберігати основні особливості структури твердого матеріалу та отримувати інформацію про його фазовий склад і кристалографічні характеристики безпосередньо в досліджуваному стані. Метод широко застосовують для аналізу кристалічних речовин, ідентифікації фаз у багатокомпонентних матеріалах, дослідження поліморфних і фазових перетворень, а також встановлення закономірностей впливу структурних змін на властивості матеріалів.

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.



а)



б)

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

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 ґратки, фазовий склад і особливості внутрішньої будови досліджуваного матеріалу.

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.

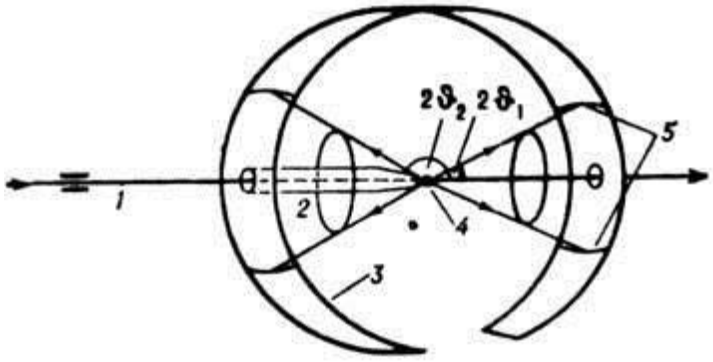


Рисунок 17 - Схема отримання рентгенограм за методом Дебая - Шеррера: 1 - первинний рентгенівський промінь; 2 - коліматор; 3 - рентгенівська плівка в циліндричній касеті; 4 - зразок, розташований на осі касети; 5 - дифракційні лінії, зафіксовані на рентгенівській плівці

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.

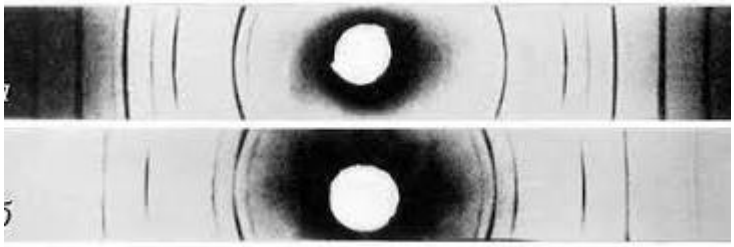


Рисунок 18 – Рентгенограми, які отримано за методом Дебая – Шеррера

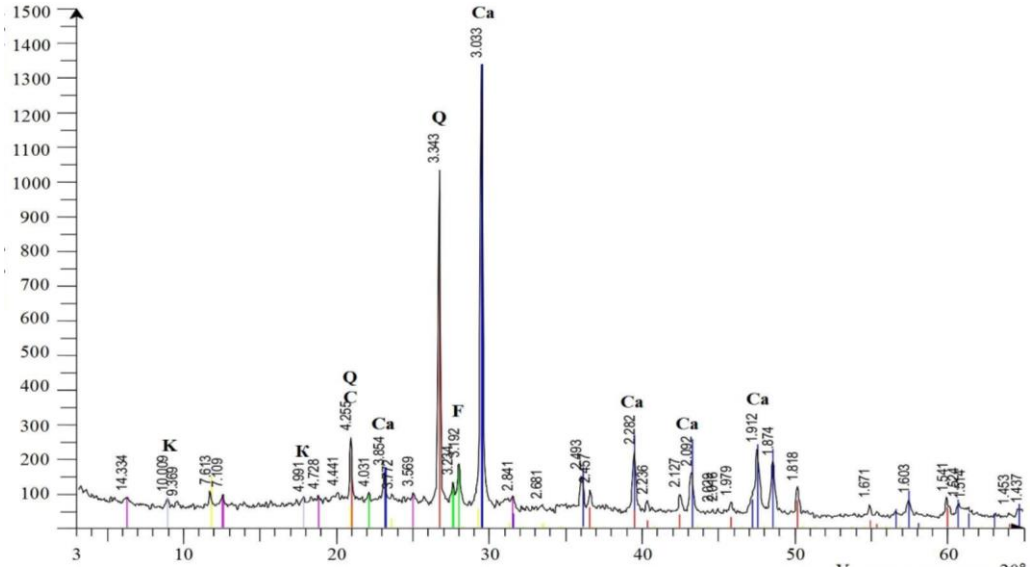


Рисунок 19 - Рентгенівська дифрактограма порошку металургійного шламу

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 20 - Рентгенівський дифрактометр призначений для рентгено-структурних досліджень кристалічних матеріалів

Метод рентгенівської дифрактометрії широко застосовують для дослідження кристалічної структури металів і сплавів, мінералів, неорганічних сполук, полімерів та органічних матеріалів. Його використання дає змогу визначати фазовий склад, параметри кристалічної ґратки, розміри областей когерентного розсіювання (кристалітів), переважну кристалографічну орієнтацію зерен (текстуру), ступінь кристалічності та інші характеристики структурного стану матеріалів. Сучасні дифрактометри забезпечують автоматизовану реєстрацію дифракційних картин та їх подальшу комп’ютерну обробку. Тривалість вимірювань залежить від характеристик обладнання, обраного режиму сканування, властивостей зразка та необхідної точності результатів. За оптимальних умов експресний аналіз основних кристалічних фаз може тривати 10–20 хвилин, тоді як детальні структурні дослідження потребують значно більшого часу.

Одним з основних напрямів використання рентгенівської дифрактометрії є рентгенофазовий аналіз, який ґрунтується на характерності дифракційної картини для кожної кристалічної фази. Сукупність положень та відносних інтенсивностей дифракційних максимумів визначається типом кристалічної структури, параметрами елементарної комірки й особливостями просторового розташування атомів. Порівняння експериментально отриманої дифрактограми з еталонними дифракційними даними дає змогу ідентифікувати кристалічні фази, присутні в досліджуваному матеріалі, та за використання відповідних методик оцінювати їхній кількісний вміст.

Особливості дифракційних картин твердих розчинів пов’язані зі зміною параметрів кристалічної ґратки внаслідок входження атомів розчиненого компонента до структури основної речовини. На відміну від вихідного матеріалу, дифракційні максимуми твердого розчину можуть зміщуватися в бік більших або менших кутів дифракції. Аналіз положення дифракційних максимумів дає змогу оцінювати зміни параметрів кристалічної ґратки, пов’язані з утворенням твердих розчинів та зміною їхнього складу.

Метод рентгенівської дифрактометрії застосовують для дослідження кристалічної структури металів і сплавів, мінералів, полімерів та органічних матеріалів. Його використання дає змогу визначати фазовий склад, параметри кристалічної ґратки, переважну кристалографічну орієнтацію зерен (текстуру) та інші характеристики структурного стану матеріалів.

Сучасні дифрактометри забезпечують автоматизовану реєстрацію дифракційних картин та їх подальшу комп’ютерну обробку.

Для ідентифікації кристалічних фаз використовують спеціалізовані бази еталонних дифракційних даних, у яких систематизовано результати експериментальних досліджень і кристалографічних розрахунків. Однією з найвідоміших є міжнародна база Powder Diffraction File (PDF), яку підтримує Міжнародний центр дифракційних даних (США). Історично ця база пов’язана з діяльністю Об’єднаного комітету зі стандартів порошкової дифракції (JCPDS), назва якого широко використовувалася для позначення картотеки еталонних дифракційних даних. Сучасна база PDF містить стандартизовані набори

дифракційних і кристалографічних характеристик великої кількості неорганічних та органічних сполук, мінералів, металів і сплавів. Залежно від повноти інформації окремий запис може містити значення міжплощинних відстаней, відносні інтенсивності дифракційних максимумів, хімічну формулу речовини, параметри елементарної комірки, просторову групу симетрії, умови отримання експериментальних даних, бібліографічні відомості та окремі фізичні характеристики матеріалу. Використання таких баз у поєднанні з програмними засобами пошуку та зіставлення дифракційних даних забезпечує автоматизовану ідентифікацію кристалічних фаз і підвищує ефективність рентгенофазового аналізу багатокомпонентних матеріалів.

6.2. Термічні методи аналізу

Діаграма стану - це графічне відображення фазових рівноваг у системі певних компонентів, яке характеризує залежність фазового складу та стану сплавів від температури, хімічного складу. Для двокомпонентних систем діаграму стану зазвичай будують у координатах «температура - концентрація», відкладаючи на осі ординат температуру, а на осі абсцис - концентрацію одного з компонентів сплаву. Така діаграма дає змогу визначати фазові області, температури та інтервали фазових перетворень, а також прогнозувати рівноважний фазовий склад сплавів залежно від їхнього хімічного складу та температури.

Інформація, отримана з діаграм стану, має важливе теоретичне та практичне значення для розроблення й удосконалення технологічних процесів виготовлення та обробки металевих матеріалів. Її використовують для обґрунтування температурних режимів плавлення й кристалізації, вибору температури заливання розплавів у ливарні форми, визначення умов нагрівання перед обробкою тиском, а також для розроблення режимів термічної обробки сплавів.

Експериментальне побудування діаграм стану ґрунтується на визначенні температур фазових перетворень у сплавах різного хімічного складу. Одним із традиційних методів отримання таких даних є термічний аналіз, що базується на

реєстрації теплових ефектів, які супроводжують фазові та структурні перетворення. Зокрема, під час плавлення, кристалізації та поліморфних перетворень відбувається поглинання або виділення теплоти, що впливає на характер зміни температури матеріалу. Під час кристалізації зазвичай виділяється прихована теплота, тоді як під час плавлення вона поглинається.

Методика класичного термічного аналізу передбачає нагрівання досліджуваного зразка до заданої температури з подальшим контрольованим охолодженням і безперервною реєстрацією температури в часі. За результатами вимірювань будують термічні криві охолодження, характер яких відображає теплові процеси, що відбуваються в матеріалі. Фазові перетворення можуть проявлятися у вигляді температурних зупинок, перегинів або змін нахилу кривих. Зокрема, під час рівноважної кристалізації чистих металів за сталого тиску температура залишається практично незмінною внаслідок виділення прихованої теплоти кристалізації. У сплавах, які кристалізуються в певному температурному інтервалі, фазові перетворення зазвичай супроводжуються зміною швидкості охолодження, що проявляється у вигляді характерних відхилень на термічних кривих.

Температури, за яких розпочинаються або завершуються фазові перетворення, називають критичними точками. Їх визначають за характерними особливостями термічних кривих нагрівання та охолодження. Для чистих металів рівноважні фазові перетворення першого роду відбуваються за певних температур, тоді як у багатокомпонентних сплавах вони часто охоплюють температурні інтервали. Водночас окремі перетворення у сплавах, зокрема евтектичні та евтектоїдні, за умов рівноваги також можуть відбуватися за сталої температури. Сукупність критичних температур, визначених для сплавів різного складу, використовують для встановлення меж фазових областей і побудування відповідних діаграм стану.

Під час термічного аналізу безперервну реєстрацію зміни температури досліджуваного сплаву в часі здійснюють за допомогою термоелектричних перетворювачів - термопар. Термопара є датчиком температури, що складається з двох провідників, виготовлених із різнорідних металів або сплавів, які з’єднані

між собою на одному кінці, зазвичай шляхом зварювання. Місце з'єднання утворює робочий спай, який розміщують у зоні вимірювання температури, протилежні кінці провідників під'єднують до вимірювального приладу (рис. 22).

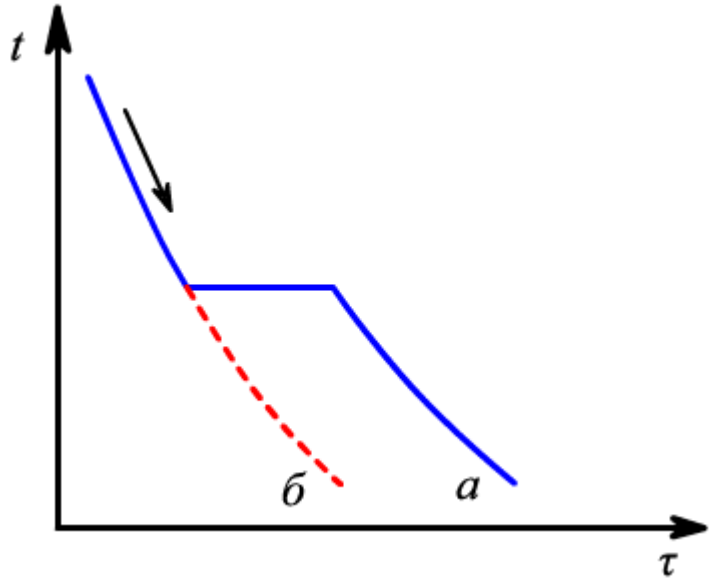


Рисунок 21- Криві охолодження сплавів за наявності фазового перетворення (а) та за його відсутності (б).

Принцип дії термопари ґрунтується на термоелектричному ефекті Зеєбека, який полягає у виникненні термоелектрорушійної сили в електричному колі, утвореному різнорідними провідниками, за наявності різниці температур між їхніми вимірювальним і опорним з'єднаннями. Величина термоелектрорушійної сили залежить від температурного перепаду та термоелектричних властивостей матеріалів термопари. За відомої температури опорного з'єднання виміряний електричний сигнал перетворюють на значення температури робочого спаю. Це забезпечує можливість безперервного вимірювання та реєстрації температури сплаву під час його нагрівання й охолодження.

Побудування діаграм стану на основі термічного аналізу передбачає експериментальне отримання серії кривих нагрівання або охолодження сплавів із різним співвідношенням компонентів. За характерними температурними зупинками, перегинами та змінами нахилу цих кривих визначають критичні температури, що відповідають початку або завершенню фазових перетворень.

Отримані значення наносять на діаграму в координатах «температура - концентрація», після чого точки, які характеризують однотипні фазові перетворення, з'єднують відповідними лініями. У такий спосіб установлюють межі фазових областей, які відображають закономірності зміни рівноважного фазового стану сплавів залежно від температури та хімічного складу.

Важливими характеристиками процесу кристалізації сплавів є температури ліквідусу та солідусу, які визначають температурні межі кристалізації та є основними орієнтирами для аналізу процесів формування первинної структури сплавів.

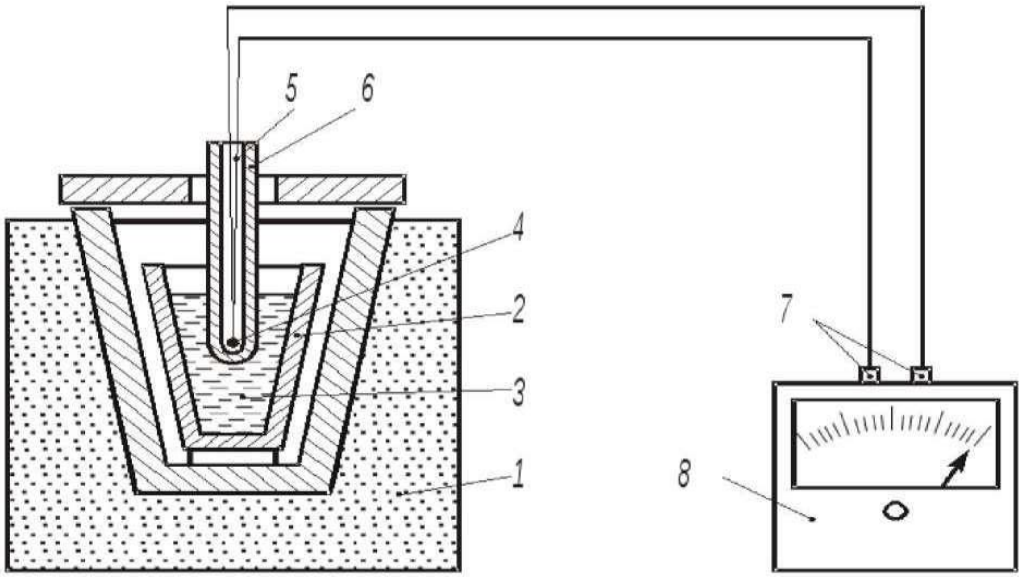


Рисунок 22. Схема установки для вимірювання температури металевого матеріалу в процесі в процесі проведення термічного аналізу: 1 - піч; 2 - тигель; 3 - розплавлений метал; 4 - спай термопари; 5 - термопара; 6 - кварцовий вогнетривкий захисний ковпачок; 7 - клеми вимірювального приладу; 8 - мілівольтметр

Метод диференціального термічного аналізу (ДТА) ґрунтується на порівнянні температурної поведінки досліджуваного зразка та термічно стабільної еталонної речовини за однакових умов нагрівання або охолодження. Як еталон використовують матеріал, у якому в межах досліджуваного температурного інтервалу не відбуваються фазові перетворення чи хімічні реакції, що супроводжуються помітними тепловими ефектами. Зразок і еталон

розміщують у відповідних вимірювальних комірках та піддають одночасному нагріванню або охолодженню за заданою програмою зміни температури, зазвичай зі сталою швидкістю. Для реєстрації температурної різниці використовують диференціальну термопару або відповідну систему термоелектричних датчиків, вимірювальні зони яких розташовані поблизу досліджуваного зразка та еталона.

Під час проведення аналізу безперервно реєструють різницю температур між зразком і еталоном залежно від температури або часу. За відсутності теплових перетворень ця різниця визначається переважно відмінностями теплофізичних характеристик досліджуваних матеріалів та особливостями вимірювальної системи. У разі перебігу фазових перетворень, хімічних реакцій або інших процесів, що супроводжуються поглинанням чи виділенням теплоти, температурна різниця змінюється, утворюючи характерні відхилення на диференціальній термічній кривій.

Під час ендотермічних процесів, зокрема плавлення або термічного розкладання з поглинанням теплоти, температура досліджуваного зразка за умов нагрівання стає нижчою за температуру еталона. Натомість екзотермічні процеси, наприклад кристалізація або окиснення, супроводжуються виділенням теплоти, внаслідок чого температура зразка може перевищувати температуру еталона. Такі теплові ефекти проявляються на кривій ДТА у вигляді характерних піків, напрям яких залежить від характеру процесу та прийнятого способу відображення температурної різниці. За положенням, формою та характерними точками цих піків визначають температурні інтервали й особливості перебігу відповідних перетворень.

Таким чином, диференціальний термічний аналіз забезпечує виявлення ендотермічних та екзотермічних процесів, визначення температур їх початку й завершення та дослідження закономірностей фазових і структурних перетворень у матеріалах. Завдяки підвищеній чутливості до теплових ефектів порівняно зі звичайною реєстрацією температурних кривих метод ДТА є важливим інструментом термічного аналізу металів, сплавів та інших матеріалів.

Диференційна термопара реєструє різницю температур між ними, яка визначається як:

$$\Delta T = Ts - Tr,$$

де Ts - температура досліджуваного зразка, Tr - температура еталона.

Реєстрованим параметром у методі диференціального термічного аналізу є різниця температур ΔT, яку подають як функцію температури еталона: ΔT(T). Така залежність відображається у вигляді диференціальної термограми, як показано на рис. 23.

У диференціальній схемі з'єднання термопар їхні електричні сигнали спрямовані назустріч один одному, тому результуюча термоелектрорушійна сила визначається різницею температур між зразком і еталоном. За однакових температур вимірювальних спаїв ці сигнали взаємно компенсуються, а різниця потенціалів на вході диференціального вимірювального приладу наближається до нуля. Одночасно окремий вимірювальний канал забезпечує реєстрацію температури зразка та еталона.

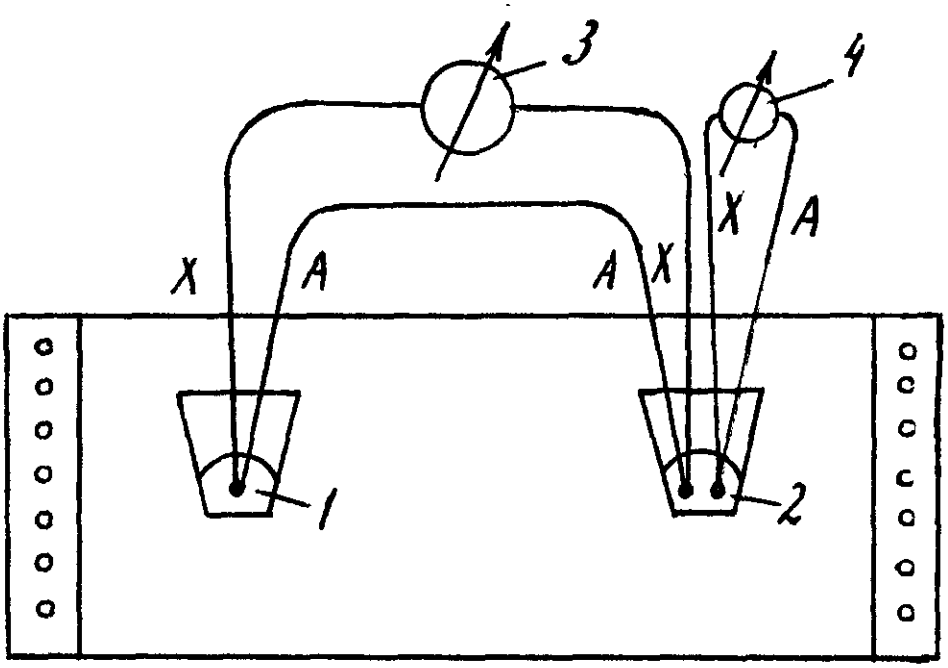


Рисунок 23 - Схема методу диференціального термічного аналізу: 1 - досліджуваний зразок, 2 – еталон; 3 - вимірювальний прилад диференціального термічного аналізу; 4 – прилад, який вимірює температуру еталона

За відсутності фазових перетворень, хімічних реакцій та інших процесів, що супроводжуються помітними тепловими ефектами, температури досліджуваного зразка й еталона змінюються відповідно до заданого режиму нагрівання або охолодження. При цьому різниця між ними залишається незначною або змінюється плавно, залежно від теплофізичних властивостей матеріалів та особливостей теплопередавання у вимірювальній системі. Унаслідок цього на диференціальній термічній кривій не виникають характерні піки, пов'язані з ендотермічними або екзотермічними перетвореннями.

Ділянку кривої диференціального термічного аналізу, що відповідає відсутності помітних теплових ефектів у досліджуваному матеріалі, називають базовою лінією. В ідеалізованому випадку, коли різниця температур між зразком і еталоном дорівнює нулю або залишається сталою, базова лінія на графіку $\Delta T(T)$ має вигляд прямої, паралельної осі абсцис. Відхилення диференціального сигналу від базової лінії свідчать про перебіг процесів, що супроводжуються поглинанням або виділенням теплоти, і використовуються для визначення температурних характеристик відповідних перетворень.

Диференціальна термограма складається з базових ділянок, на яких не спостерігаються виражені теплові ефекти, та характерних відхилень у вигляді піків, пов'язаних із фазовими перетвореннями, хімічними реакціями або іншими тепловими процесами в досліджуваній речовині. На рис. 24 прямолінійні ділянки *oa, ca і cd* відповідають температурним інтервалам, у межах яких диференціальний сигнал залишається практично сталим. Це свідчить про відсутність помітних ендотермічних або екзотермічних ефектів, унаслідок чого температури зразка й еталона змінюються узгоджено, а різниця між ними залишається незначною або близькою до сталого значення.

У разі виникнення в досліджуваному матеріалі фазового перетворення, хімічної реакції або іншого процесу, що супроводжується тепловим ефектом, змінюється температурна різниця між зразком і еталоном. Унаслідок цього на диференціальній термограмі формується характерний пік, положення, форма та інтенсивність якого залежать від природи й умов перебігу відповідного процесу. Під час нагрівання ендотермічні перетворення, що супроводжуються

поглинанням теплоти, спричиняють зниження температури зразка відносно еталона, тоді як екзотермічні процеси, пов’язані з виділенням теплоти, зумовлюють її підвищення. Напрям відхилення піка на термограмі визначається прийнятим знаком різниці температур і способом графічного представлення результатів вимірювання.

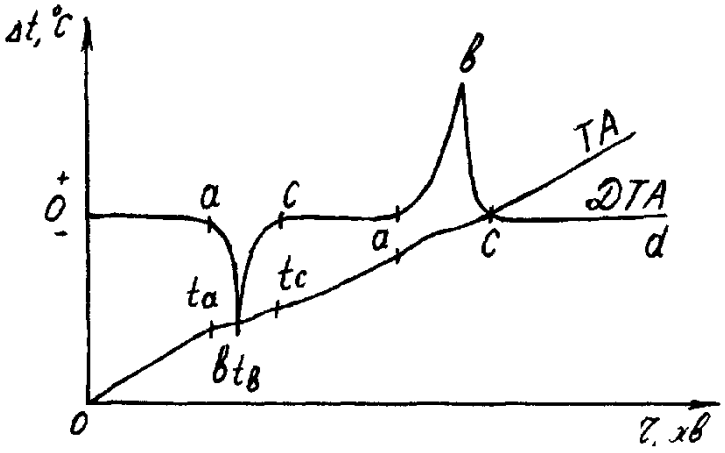


Рисунок 24 - Термограма диференціального термічного аналізу

Сукупність методів дослідження змін лінійних розмірів та об’єму тіл під впливом температури називають дилатометрією. Під час нагрівання або охолодження матеріалів відбуваються розмірні зміни, зумовлені тепловим розширенням чи стисканням, а також можливими фазовими та структурними перетвореннями. Дилатометричний метод ґрунтується на вимірюванні й реєстрації цих змін у процесі нагрівання, охолодження або ізотермічної витримки досліджуваного зразка.

У практиці матеріалознавчих досліджень найчастіше застосовують лінійну дилатометрію, яка передбачає визначення зміни довжини зразка залежно від температури та часу. Основними завданнями таких досліджень є визначення коефіцієнта лінійного теплового розширення, встановлення температур початку й завершення фазових перетворень, а також вивчення закономірностей структурних змін у металах, сплавах, полімерах та інших матеріалах.

Характер розмірних змін залежить від природи процесів, що відбуваються в матеріалі. За відсутності фазових і структурних перетворень зміна довжини

зразка переважно має плавний і зворотний характер та визначається його тепловим розширенням або стисканням. Натомість фазові перетворення й структурні зміни можуть супроводжуватися додатковими об'ємними ефектами, які проявляються у вигляді стрибкоподібних змін розмірів, перегинів або відхилень від звичайної температурної залежності. Такі особливості використовують для дослідження поліморфних перетворень, розпаду пересичених твердих розчинів, графітизації чавуну, рекристалізації, структурних змін під час відпуску сталі, а також ізотермічного розпаду переохолодженого аустеніту. Дилатометричні дослідження також дають змогу виявляти розмірні аномалії, пов'язані зі зміною магнітного стану матеріалу, зокрема з магнітооб'ємними ефектами.

Для проведення таких досліджень використовують спеціальні вимірювальні прилади - дилатометри, призначені для визначення малих змін лінійних розмірів зразка за заданих температурно-часових умов. Основними функціональними елементами дилатометра є система розміщення та фіксації зразка, пристрій для створення необхідного температурного режиму, вимірювальний перетворювач переміщення та система реєстрації й обробки отриманих даних. Залежно від конструкції приладу зміни довжини можуть визначатися контактними або безконтактними методами.

У контактних дилатометрах зразок розміщують у спеціальному утримувачі між нерухомою опорою та рухомим стрижнем-штовхачем, який контактує з його торцевою поверхнею із заданим зусиллям. Під час нагрівання або охолодження зміна довжини зразка спричиняє переміщення штовхача, яке передається на вимірювальний перетворювач. Отримані результати реєструють у вигляді дилатометричної кривої, що відображає залежність абсолютної або відносної зміни довжини зразка від температури чи часу. За відсутності внутрішніх перетворень така залежність зазвичай має плавний характер. Поява перегинів, різких змін нахилу або стрибкоподібних відхилень може свідчити про перебіг фазових, структурних чи магнітних перетворень, які супроводжуються зміною його коефіцієнта теплового розширення.

Історично перші дилатометри ґрунтувалися на механічних принципах вимірювання, зокрема використанні важільних систем та оптичних пристроїв для підсилення і реєстрації малих переміщень. Розвиток вимірювальної техніки зумовив появу високочутливих електронних, оптичних та індуктивних систем, які забезпечують автоматизоване вимірювання розмірних змін із високою роздільною здатністю.

В одній із поширених конструкцій контактних дилатометрів досліджуваний зразок розміщують у вимірювальній трубці, виготовленій із матеріалу з відомими характеристиками теплового розширення, зокрема кварцового скла (рис. 25). Один торець зразка контактує з нерухомою опорою, а другий - зі стрижнем-штовхачем, який передає розмірні зміни на вимірювальну головку. Під час нагрівання або охолодження реєструється відносне переміщення штовхача, що залежить не лише від зміни довжини зразка, а й від теплового розширення елементів вимірювальної системи. Зокрема, у схемі з кварцовою трубкою та штовхачем переміщення відповідного вимірювального елемента (стрижня 3 на рис. 25) визначається різницею між тепловим розширенням досліджуваного зразка та ефективним розширенням опорної системи на відповідній вимірювальній довжині. Для отримання фактичної зміни довжини зразка необхідно враховувати температурну залежність розмірів конструктивних елементів приладу шляхом відповідного калібрування та внесення поправок.

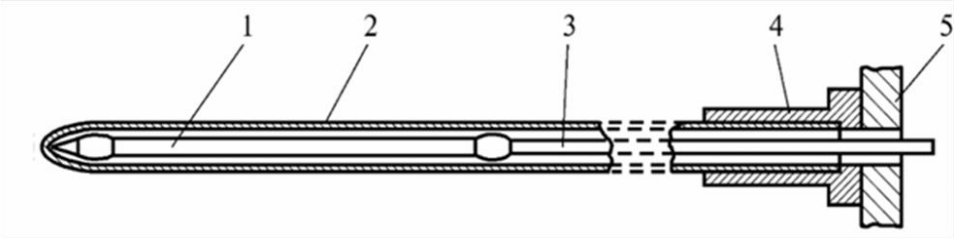


Рисунок 25 - Дилатометричний датчик: 1 - зразок, 2, 3 - кварцові трубки і стрижень (штовхач), 4- сполучна муфта, 5 - корпус дилатометра

Оскільки вимірювальна трубка та стрижень-штовхач виготовлені з одного матеріалу, їхнє теплове розширення на ділянках однакової довжини за близьких температурних умов взаємно компенсується. Завдяки цьому переміщення вимірювального елемента визначається переважно різницею між тепловим

розширенням досліджуваного зразка та відповідної ділянки опорної системи. Для виготовлення таких елементів широко застосовують кварцове скло, яке характеризується низьким коефіцієнтом лінійного теплового розширення та високою термічною стабільністю. Це дає змогу зменшити вплив власних розмірних змін вимірювальної системи на результати дилатометричних досліджень.

Рисунок 26 - Дилатометр з горизонтальним штовхачем

Водночас використання кварцового скла має певні температурні обмеження, пов’язані з його термомеханічними властивостями та можливістю кристалізації за тривалого високотемпературного впливу. За температур, близьких до 1100–1200 °C, залежно від складу матеріалу, наявності домішок і тривалості нагрівання можуть активізуватися процеси девітрифікації, що супроводжуються зміною структурного стану та фізичних властивостей кварцового скла. Тому верхню межу робочої температури кварцових елементів дилатометрів установлюють з урахуванням характеристик конкретного матеріалу та конструкції приладу. Для досліджень за вищих температур застосовують термостійкі керамічні матеріали, зокрема оксид алюмінію.

Для підвищення чутливості вимірювань і точнішого виявлення незначних розмірних змін, пов’язаних із фазовими та структурними перетвореннями, використовують диференціальні дилатометри. Принцип їхньої дії ґрунтується на одночасному вимірюванні зміни довжини досліджуваного зразка та еталонного матеріалу за однакових температурно-часових умов. Реєстрація різниці їхніх

видовжень дає змогу зменшити вплив спільних температурних чинників і виділити додаткові розмірні ефекти, зумовлені внутрішніми перетвореннями в досліджуваному матеріалі.

Для диференціальних дилатометричних досліджень еталон виготовляють із матеріалу, який характеризується стабільними теплофізичними властивостями та не зазнає фазових перетворень у заданому температурному інтервалі. Важливою вимогою є наявність відомої температурної залежності його лінійного теплового розширення. Для зменшення фонового диференціального сигналу використовують еталон, коефіцієнт теплового розширення якого близький до відповідної характеристики досліджуваного матеріалу.

Одним із матеріалів, які використовували як еталони для дилатометричних вимірювань, є нікелевий сплав «пірос» (Pyros). Його типовий хімічний склад становить приблизно 82 % Ni, 8 % Cr, 4 % W, 3 % Mn і 3 % Fe. Цей сплав характеризується добре дослідженою температурною залежністю лінійного розширення та високою відтворюваністю дилатометричних характеристик за відповідних умов вимірювання.

6.3. Дослідження структури металів і сплавів

Структурою металевого матеріалу 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.

Одним з основних напрямів експериментального дослідження структури металевих матеріалів є металографія - розділ металознавства, присвячений вивченню структурної будови металів і сплавів переважно за допомогою методів

макроскопічного та мікроскопічного аналізу. Металографічні дослідження дають змогу встановлювати особливості просторового розподілу зерен, фаз, структурних складових, неметалевих включень, пор та інших дефектів матеріалу.

Залежно від характеру отримуваної інформації розрізняють якісний і кількісний металографічний аналіз. Якісний аналіз передбачає ідентифікацію структурних складових, визначення їхньої форми, характеру розподілу та взаємного розташування. Кількісна металографія ґрунтується на вимірюванні й статистичному оцінюванні структурних характеристик, зокрема розміру зерен, об'ємної частки фаз, кількості та розмірів неметалевих включень, пористості й інших морфометричних параметрів. Такі дослідження забезпечують можливість встановлення кількісних взаємозв'язків між структурою матеріалу та його властивостями.

Залежно від масштабу досліджуваних структурних елементів і застосовуваних засобів спостереження в металографії традиційно розрізняють макроструктурний і мікроструктурний аналіз.

Макроструктурний аналіз, або макроаналіз, полягає у дослідженні будови металів і сплавів неозброєним оком або за допомогою оптичних засобів із невеликим збільшенням, зазвичай до 30 разів. Метод дає змогу виявляти макроскопічні дефекти та структурні неоднорідності, зокрема усадкові раковини, тріщини, пористість, великі неметалеві включення, порушення суцільності матеріалу, ліквацію, а також особливості формування волокнистої та дендритної структури.

Для підвищення контрастності структурних складових і виявлення прихованих неоднорідностей поверхню зразка за потреби піддають спеціальній підготовці та макротравленню. Макроструктурний аналіз широко застосовують для попереднього оцінювання структурного стану та якості литих, кованих, прокатних і зварних металевих виробів, а також для виявлення дефектів, що виникають у процесі їх виготовлення й обробки.

6.3.1. Дослідження мікроструктури металевих матеріалів

Матеріалознавство базується на дослідженні закономірностей взаємозв'язку між хімічним складом, структурою, технологією отримання й обробки матеріалів та їхніми властивостями. Встановлення цих закономірностей створює наукову основу для вдосконалення традиційних металевих матеріалів, розроблення нових конструкційних і функціональних матеріалів, а також цілеспрямованого формування необхідного комплексу їхніх експлуатаційних характеристик. Важливе місце у вирішенні цих завдань посідають експериментальні методи дослідження структури матеріалів, серед яких одним із найпоширеніших є оптична мікроскопія.

Оптична мікроскопія ґрунтується на формуванні збільшеного зображення досліджуваного об'єкта за допомогою оптичної системи мікроскопа. Залежно від способу освітлення зразка розрізняють мікроскопію у прохідному та відбитому світлі. Вибір відповідного способу визначається оптичними властивостями матеріалу, особливостями його структури та завданнями дослідження.

Мікроскопію у прохідному світлі застосовують переважно для дослідження тонких прозорих і напівпрозорих зразків, крізь які може проходити світлове випромінювання. Цей спосіб широко використовують у петрографічному аналізі мінералів, гірських порід і керамічних матеріалів. Зокрема, застосування поляризованого світла дає змогу виявляти відмінності оптичних властивостей кристалічних фаз, визначати особливості їхньої будови та взаємного розташування.

Мікроскопія у відбитому світлі передбачає дослідження поверхні спеціально підготовлених зразків за допомогою світла, відбитого від їхніх структурних складових. Саме цей спосіб є основним в оптичній металографії, оскільки більшість металів і сплавів непрозорі для видимого світла. Відмінності відбивної здатності окремих фаз, зерен та інших структурних елементів, а також особливості мікрорельєфу поверхні забезпечують формування контрастного зображення, необхідного для аналізу мікроструктури.

Мікроструктурний аналіз - це сукупність методів дослідження внутрішньої будови матеріалів на мікроскопічному рівні, що дають змогу визначати морфологічні характеристики структурних складових, особливості їхнього розподілу та взаємного розташування. У металографії для цього широко застосовують оптичні мікроскопи, які забезпечують дослідження структури за збільшень від кількох десятків до приблизно 1000–1500 разів. Для вивчення дрібніших структурних елементів і дефектів використовують електронно-мікроскопічні методи, що характеризуються значно вищою роздільною здатністю.

Основу оптичного металографічного аналізу становить дослідження поверхні спеціально підготовленого зразка - металографічного мікрошліфа. Підготовка мікрошліфа передбачає послідовне виконання операцій вирізання, за потреби закріплення в спеціальному матеріалі, шліфування, полірування та травлення. Після підготовки поверхні проводять мікроскопічне дослідження різних ділянок зразка за відповідних збільшень, здійснюють реєстрацію мікроструктурних зображень та їх подальший якісний або кількісний аналіз. Для ідентифікації структурних складових використовують характерні морфологічні ознаки, еталонні мікрофотографії, атласи мікроструктур і результати порівняльних досліджень.

Мікроструктурний аналіз є одним з основних методів експериментального дослідження металевих матеріалів і важливим етапом комплексного оцінювання їхнього структурного стану. Його застосовують для визначення форми, розмірів і характеру розподілу зерен, виявлення фаз та структурних складових, оцінювання змін мікроструктури після термічної, хіміко-термічної та деформаційної обробки. Крім того, метод дає змогу досліджувати неметалеві включення, пористість, мікротріщини, корозійні пошкодження та інші дефекти, що можуть впливати на механічні й експлуатаційні властивості матеріалів.

Важливою умовою достовірності металографічного аналізу є правильний вибір місця відбирання зразка та якісна підготовка його поверхні. Ділянку для виготовлення мікрошліфа визначають з урахуванням мети дослідження, характеру технологічної обробки матеріалу та можливого розташування

структурних неоднорідностей або дефектів. Шліфування й полірування забезпечують отримання рівної поверхні з мінімальною кількістю механічних пошкоджень, які можуть спотворювати результати мікроскопічного спостереження.

Для виявлення меж зерен, окремих фаз і структурних складових поліровану поверхню мікрошліфа зазвичай піддають хімічному або електролітичному травленню. Дія травильних реактивів ґрунтується на відмінностях хімічної та електрохімічної активності різних ділянок матеріалу, що зумовлює їхнє вибіркове розчинення, утворення поверхневого мікрорельєфу або зміну оптичного контрасту. Унаслідок цього стають помітними межі зерен, фазові складові та інші особливості мікроструктури, які неможливо або складно розрізнити на нетравленій поверхні. Водночас окремі дефекти, зокрема пори, тріщини та неметалеві включення, можуть бути виявлені без травлення, безпосередньо на полірованому мікрошліфі.

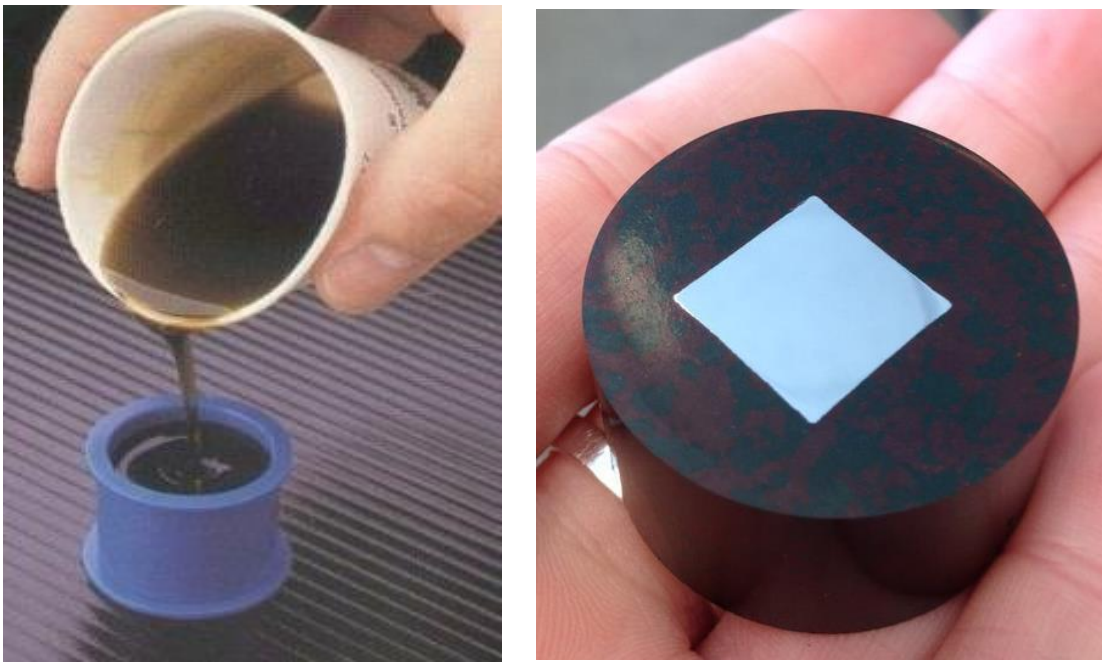
Підготовка зразка до металографічного аналізу включає кілька основних етапів.

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 темплета в оправці. Для зручності виготовлення мікрошліфа темплети 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 темплета 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 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.



а) б)

Рисунок 27 - Процес заливання темплета у формочці рідкою термореактивною смолою: а - заливання зразка; б - готовий мікрошліф

Етап 3. Шліфування та полірування мікрошліфа. Виготовлення шліфа починають із вирівнювання поверхні зразка на шліфувальному верстаті. Формування дзеркальної поверхні темплета досягається шляхом послідовного шліфування та полірування з поступовим зменшенням розміру абразивних частинок. Риски, що залишаються після завершального етапу шліфування, усувають під час полірування.

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 тюбиках 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 пасти 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. 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 непротравленому стані (рис. 63). Це пов’язано з тим, що під дією травильного реактиву окремі види включень можуть частково або повністю розчинятися, 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 вибіркове забарвлення різних структурних складових сплаву, що полегшує їх ідентифікацію під час мікроструктурного аналізу.

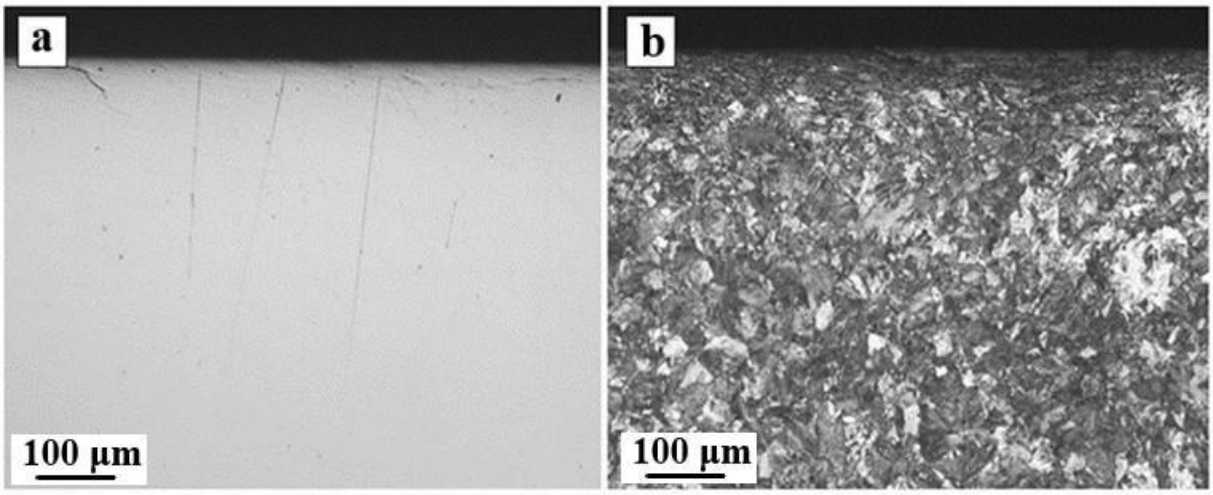
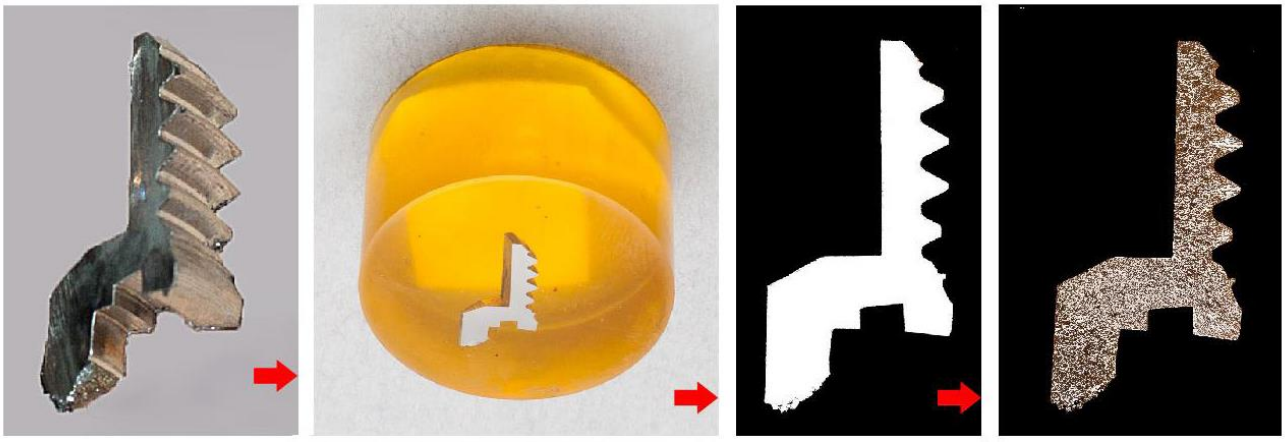


Рисунок 29 - Структура робочої поверхні сталевої заготовки: а - не протравлений мікрошліф; б - протравлений мікрошліф



а) б) в) г)

Рисунок 30. Послідовність виготовлення мікрошліфа: а - темплет, вирізаний із досліджуваної деталі; б - мікрошліф, закріплений шляхом заливання у полімерну термореактивну смолу; в - мікроструктура непротравленого мікрошліфа; г - мікроструктура протравленого мікрошліфа.

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.

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 – ексикатори (рис.31). Герметичність ексикатора 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’єктив на поверхню підготовленого мікрошліфа. Світло, відбите від досліджуваної поверхні, проходить у зворотному напрямку через об’єктив до окуляра, що дає змогу спостерігати мікроструктуру матеріалу.

В інверсійних металографічних мікроскопах об’єктив 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 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 розрізняти дві точки, відстань між якими є меншою приблизно за половину довжини хвилі видимого світла. Тому практичне збільшення оптичних мікроскопів обмежується приблизно 1500×, 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 мікродефектів. Для отримання достовірних результатів шкалу окуляра-мікрометра попередньо калібрують за допомогою об’єкт-мікрометра для кожного використовуваного збільшення.

Зображення мікроструктури досліджуваного матеріалу, сформоване оптичною системою мікроскопа, може бути зафіксоване за допомогою цифрової фотокамери або спеціалізованої мікроскопічної камери, під'єднаної через відповідний оптичний адаптер. У тринокулярних мікроскопах для цього зазвичай використовують окремий вертикальний тубус, призначений для встановлення фото- або відеореєстраційного обладнання. Отримане зображення може безпосередньо передаватися на монітор комп'ютера для візуалізації, цифрового збереження та подальшого аналізу. Застосування сучасних систем цифрової реєстрації забезпечує можливість документування результатів металографічних досліджень, кількісного оцінювання структурних характеристик і порівняння мікроструктурних зображень.

а) б)

Рисунок 33 - Окуляр - мікрометр: зовнішній вигляд (а); вимірювальна шкала (б)

Для забезпечення точності кількісного аналізу мікроструктури необхідно попередньо виконати калібрування системи цифрової реєстрації зображень. Із цією метою в оптичній мікроскопії використовують спеціальний вимірювальний еталон - об'єкт-мікрометр (рис. 34). Він зазвичай являє собою скляну пластину стандартного формату предметного скла, на поверхню якої нанесено високоточну калібрувальну шкалу. Поширеним є об'єкт-мікрометр зі шкалою завдовжки 1 мм, поділеною на 100 рівних інтервалів, кожен із яких відповідає 10 мкм.

Калібрування здійснюють шляхом отримання цифрового зображення шкали об’єкт-мікрометра за встановлених параметрів оптичної системи мікроскопа. За відомою відстанню між поділками визначають масштаб зображення, тобто співвідношення між кількістю пікселів і відповідною реальною довжиною на поверхні зразка. Цю процедуру виконують окремо для кожного використовуваного об’єктива або конфігурації оптичної системи, що впливає на масштаб реєстрації. Отримані калібрувальні параметри застосовують під час подальшої комп’ютерної обробки мікрофотографій для визначення лінійних розмірів зерен, фазових складових, неметалевих включень, пор та інших структурних елементів.

Поєднання оптичної мікроскопії із цифровою реєстрацією та калібруванням зображень забезпечує перехід від якісного спостереження мікроструктури до кількісного оцінювання її геометричних характеристик, підвищуючи точність, відтворюваність та об’єктивність металографічних досліджень.

а)

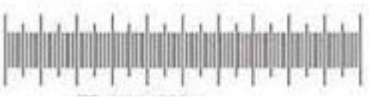

б)

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.

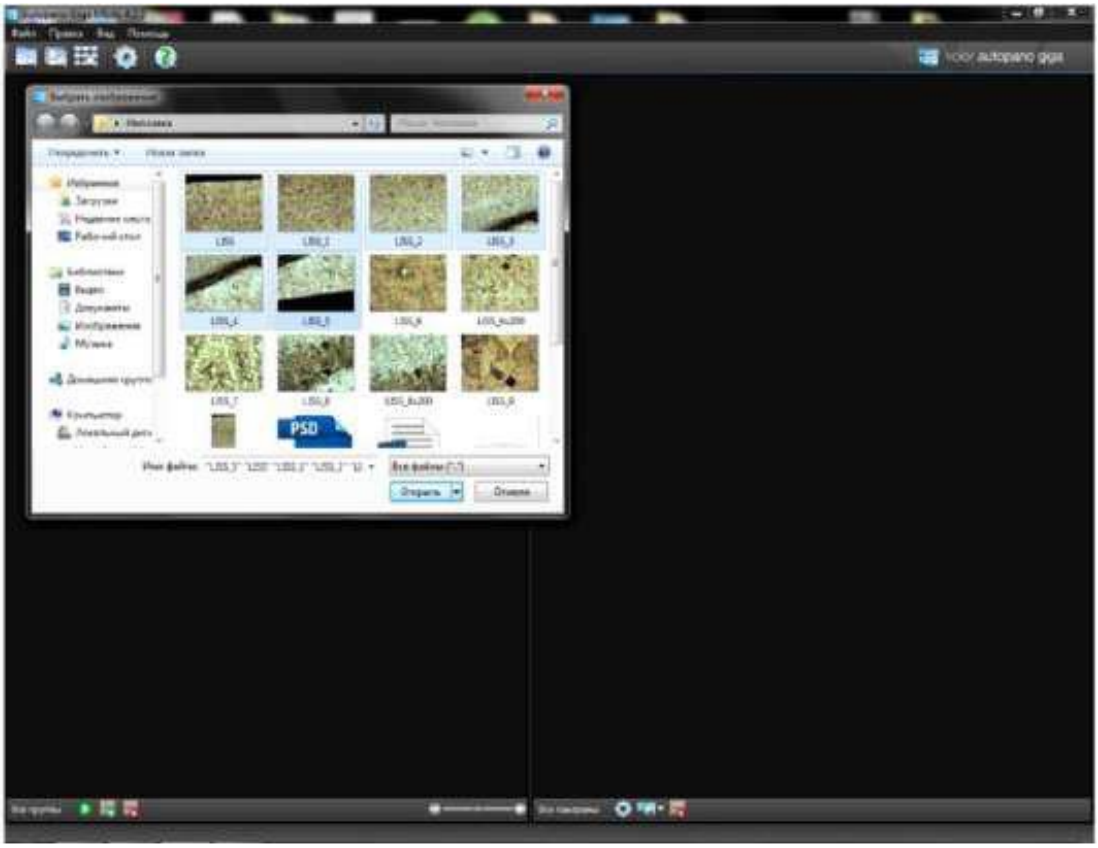


Рисунок 35 - Зображення мікроструктури на екрані компютера

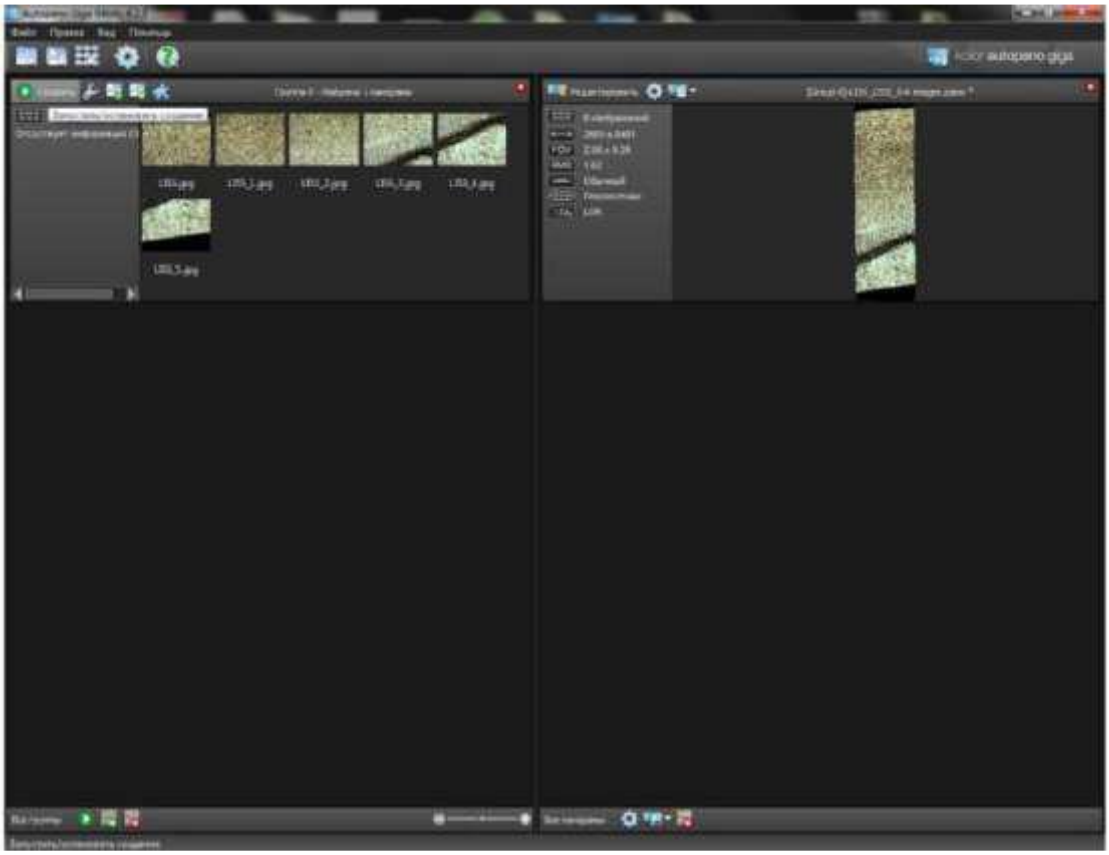


Рисунок 36 – Створення панорамного зображення на екрані комп’ютера шляхом об’єднання окремих фотографій мікроструктури

6.3.2. Металографічні дослідження у поляризованому світлі

У деяких випадках хімічне травлення поверхні металографічних мікрошліфів не забезпечує достатньої контрастності для надійного виявлення та ідентифікації окремих структурних складових матеріалу. Це спостерігається, зокрема, тоді, коли фази характеризуються високою хімічною стійкістю до травильних реактивів або мають близькі оптичні характеристики у звичайному світлопольному режимі. Для підвищення інформативності металографічного аналізу в таких випадках застосовують мікроскопію у відбитому поляризованому світлі. Використання поляризованого світла дає змогу підвищити контрастність зображення та виявити структурні особливості, які складно розрізнити за звичайного освітлення.

У природному неполяризованому світлі напрям коливань вектора напруженості електричного поля змінюється випадковим чином у площині, перпендикулярній до напряму поширення хвилі. Поляризація полягає у формуванні певної впорядкованості цих коливань. Зокрема, лінійно поляризоване світло характеризується коливаннями вектора напруженості електричного поля в одному фіксованому напрямі, перпендикулярному до напряму поширення хвилі.

Лінійно поляризоване світло отримують із природного випромінювання за допомогою спеціальних оптичних елементів - поляризаторів. Лінійний поляризатор пропускає складову електричного поля, паралельну його осі пропускання, та блокує перпендикулярну складову. У результаті формується світловий пучок із визначеним напрямом поляризації, який використовують для дослідження особливостей взаємодії світла зі структурними складовими матеріалу.

Для проведення металографічних досліджень у поляризованому світлі використовують оптичні мікроскопи, оснащені двома поляризаційними елементами - поляризатором та аналізатором. Поляризатор розміщують у системі освітлення перед досліджуваним зразком, а аналізатор - на шляху відбитого світла перед окуляром. Конструкція поляризаційного блока зазвичай

передбачає можливість введення та виведення цих елементів з оптичного шляху, а також зміни їхньої взаємної орієнтації.

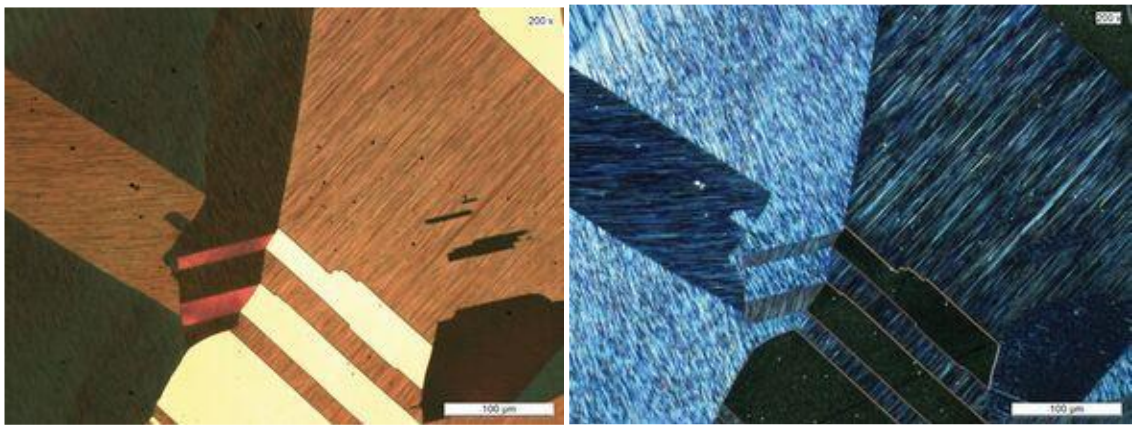
У разі встановлення осей пропускання поляризатора й аналізатора під кутом 90° їх називають схрещеними. За таких умов світло, що зберігає початковий стан лінійної поляризації, значною мірою блокується аналізатором, унаслідок чого відповідні ділянки зображення залишаються темними. Якщо ж відбите світло зазнає зміни поляризаційного стану внаслідок взаємодії з оптично анізотропною фазою, частина випромінювання проходить через аналізатор і формує світлі або контрастні ділянки зображення. Інтенсивність такого сигналу залежить від оптичних властивостей матеріалу, кристалографічної орієнтації зерен і взаємного положення поляризаційних елементів.

Оптична анізотропія характеризується залежністю оптичних властивостей речовини від напряму поширення та стану поляризації світла відносно кристалографічних осей. Завдяки цьому окремі зерна й фази набувають різної яскравості, а за певних умов - характерного забарвлення.

Важливою сферою застосування мікроскопії у відбитому поляризованому світлі є дослідження неметалевих включень, мінеральних фаз і продуктів корозії. У звичайному світлопольному режимі такі структурні складові часто мають близькі відтінки сірого кольору, що ускладнює їх розрізнення. Використання поляризаційного контрасту дає змогу виявляти відмінності їхніх оптичних властивостей, зокрема анізотропії відбивання та подвійного променезаломлення. У результаті окремі фази можуть спостерігатися у вигляді ділянок різної яскравості або забарвлення, що полегшує їхню попередню ідентифікацію та визначення особливостей просторового розподілу.

Поляризаційні ефекти можуть спостерігатися також під час дослідження металів і сплавів, кристалічна структура яких зумовлює оптичну анізотропію. До таких металів належать, зокрема, цинк, олово та сурма. Залежно від кристалографічної орієнтації окремі зерна можуть відрізнятися інтенсивністю відбитого світла та характером поляризаційного контрасту. Подібні ефекти використовують для вивчення особливостей зеренної структури, текстури та окремих структурних складових сплавів, зокрема деяких високоолов’янистих

бронз (рис. 37). У певних випадках поляризаційна мікроскопія також дозволяє більш чітко виявляти орієнтовані структурні елементи, двійники і морфологічні особливості дендритних утворень.



а) б)

Рисунок 37 – Різниця в зображенні мікроструктури мідного сплаву у світлому полі після кольорового травлення (а) та у поляризованому світлі (б)

Застосування мікроскопії у відбитому поляризованому світлі дає змогу підвищувати контрастність мікроструктурних зображень, виявляти особливості кристалографічної орієнтації зерен, розрізняти окремі неметалеві фази та досліджувати структурну неоднорідність металевих матеріалів. У поєднанні зі звичайною світлопольною мікроскопією, хімічним травленням та іншими методами структурного аналізу поляризаційна мікроскопія забезпечує повніше оцінювання внутрішньої будови металів і сплавів.

6.4. Електронна мікроскопія

Для поглибленого дослідження внутрішньої будови матеріалів у сучасному матеріалознавстві широко застосовують методи електронної мікроскопії. Завдяки високій роздільній здатності та можливості отримання інформації про структуру речовини на мікро- й нанометричному рівнях електронні мікроскопи є одними з найважливіших інструментів експериментального дослідження металів, сплавів та інших матеріалів.

Принципова відмінність електронної мікроскопії від оптичної полягає у використанні для формування зображення потоку прискорених електронів замість світлового випромінювання. За характерних для електронної мікроскопії прискорювальних напруг довжина хвилі електронів значно менша за довжину хвилі видимого світла. Це створює фізичні передумови для досягнення істотно вищої роздільної здатності, яка зумовлена малою довжиною хвилі прискорених електронів. Водночас фактична роздільна здатність приладу залежить не лише від довжини хвилі електронів, а й від аберацій електронних лінз, стабільності електронного пучка, характеристик зразка та умов формування зображення.

Фізичною основою електронної мікроскопії є взаємодія сфокусованого пучка прискорених електронів із речовиною досліджуваного зразка. Унаслідок пружного та непружного розсіювання електронів виникають різні сигнали, характер яких залежить від енергії електронного пучка, хімічного складу, товщини та структурного стану матеріалу. До основних сигналів належать електрони, що пройшли крізь зразок, вторинні та зворотно розсіяні електрони, а також характеристичне рентгенівське випромінювання. Реєстрація й аналіз цих сигналів дають змогу отримувати інформацію про морфологію поверхні, внутрішню будову, хімічний склад та окремі кристалографічні характеристики досліджуваного матеріалу.

Залежно від способу взаємодії електронного пучка зі зразком і принципу формування зображення розрізняють два основні типи електронних мікроскопів:

1. Просвічувальні електронні мікроскопи (ПЕМ) - прилади, у яких зображення формується переважно за допомогою електронів, що пройшли крізь спеціально підготовлений тонкий зразок.
2. Сканувальні електронні мікроскопи (СЕМ) - прилади, у яких сфокусований електронний пучок послідовно переміщується по поверхні зразка, а зображення формується на основі сигналів, що виникають унаслідок взаємодії електронів із матеріалом.

Просвічувальна та сканувальна електронна мікроскопія ґрунтуються на спільних фізичних принципах взаємодії електронного пучка з речовиною, проте відрізняються способами формування зображення, вимогами до підготовки

зразків та характером отримуваної інформації. Їхнє комплексне застосування істотно розширює можливості структурного аналізу матеріалів і забезпечує дослідження їхньої будови на різних масштабних рівнях.

6.4.1. Просвічувальна електронна мікроскопія

Просвічувальна, або трансмісійна, електронна мікроскопія ґрунтується на формуванні збільшеного зображення внутрішньої структури досліджуваного об’єкта за допомогою пучка прискорених електронів, що проходять крізь тонкий зразок. Для дослідження морфології поверхні матеріалів можуть також використовуватися тонкі репліки, які відтворюють особливості її рельєфу. На відміну від світлової мікроскопії, у якій зображення формується за допомогою світлового випромінювання та системи оптичних лінз, у просвічувальній електронній мікроскопії використовують потік електронів, рух і фокусування яких забезпечуються електромагнітними лінзами.

Просвічувальний електронний мікроскоп складається з електронної гармати, електронно-оптичної системи, системи реєстрації зображення, системи електроживлення та вакуумної системи. Електронна гармата забезпечує генерацію та прискорення електронів і залежно від принципу емісії може бути термоемісійною або автоемісійною (рис. 38). Електронно-оптична система містить сукупність електромагнітних лінз і діафрагм, призначених для формування, фокусування та спрямування електронного пучка, а також для одержання збільшеного зображення досліджуваного об’єкта. Реєстрацію зображення здійснюють за допомогою флуоресцентного екрана, фотографічних або сучасних цифрових детекторів. Для забезпечення стабільного руху електронів у колоні мікроскопа підтримують високий вакуум, який зменшує ймовірність зіткнення електронів із молекулами залишкових газів, запобігає небажаному розсіюванню пучка та сприяє підвищенню якості зображення.

Основним елементом системи генерації електронів є електронна гармата, до складу якої входять джерело електронів, прискорювальні електроди та елементи формування електронного пучка. У термоемісійних гарматах джерелом

електронів зазвичай є вольфрамовий катод. Під час нагрівання катода до високої температури відбувається термоелектронна емісія, унаслідок якої електрони залишають його поверхню. Під дією електричного поля між катодом і анодом електрони прискорюються та формують спрямований пучок. В автоемісійних джерелах вихід електронів із поверхні загостреного емітера відбувається переважно під дією сильного електричного поля, що забезпечує високу яскравість і малий розмір джерела електронів. Прискорювальна напруга в сучасних просвічувальних електронних мікроскопах найчастіше становить 80–300 кВ. Зі збільшенням прискорювальної напруги зростає енергія електронів і, як правило, підвищується їхня проникна здатність, що створює умови для дослідження внутрішньої структури тонких зразків.

Сформований електронною гарматою пучок надходить до конденсорної системи електромагнітних лінз, яка забезпечує його фокусування та спрямування на досліджуваний об’єкт. Конденсорна система дає змогу регулювати діаметр, інтенсивність і кут збіжності електронного пучка відповідно до умов спостереження. Зміна сили електричного струму в обмотках електромагнітних лінз приводить до зміни їхньої фокусної відстані, унаслідок чого змінюються параметри електронного пучка. Під час проходження крізь тонкий зразок електрони взаємодіють з атомами матеріалу, зазнаючи пружного та непружного розсіювання. Характер і ступінь розсіювання залежать від товщини зразка, його хімічного складу, кристалічної структури, орієнтації кристалічних зерен та наявності структурних дефектів. Унаслідок цих взаємодій формується контраст зображення, який дає змогу виявляти особливості внутрішньої будови матеріалу.

Електрони, що пройшли крізь досліджуваний зразок, надходять до об'єктивної електромагнітної лінзи, яка формує первинне збільшене зображення об'єкта або дифракційну картину залежно від режиму роботи мікроскопа. У режимі формування зображення на флуоресцентному екрані або цифровому детекторі отримують багатократно збільшене зображення досліджуваної структури. Світіння флуоресцентного екрана зумовлене взаємодією електронів із люмінофорним покриттям, яке перетворює енергію електронного пучка на видиме випромінювання.

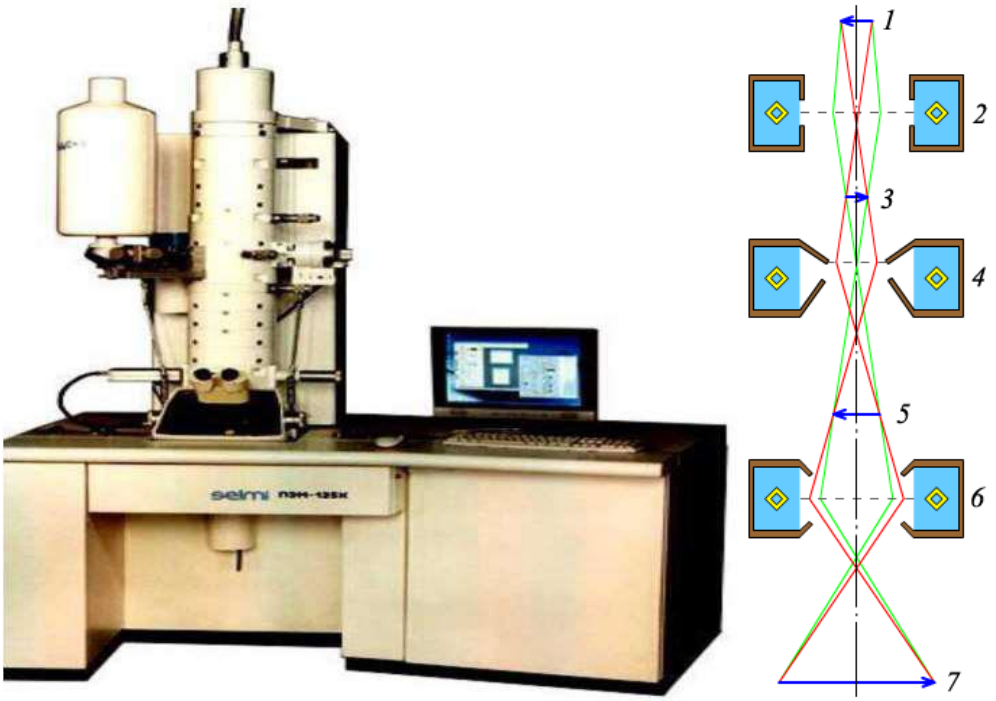


Рисунок 38 - Зовнішній вигляд (а) та схема роботи (б) просвічувального електронного мікроскопа: 1 - об'єкт дослідження; 2 - конденсорна лінза; 3 - оберт дослідження; 4 - об'єктивна лінза; 5 - проміжне зображення; 6 - проекційна лінза; 7 - остаточне збільшене зображення

Сучасні цифрові системи реєстрації забезпечують отримання електронно-мікроскопічних зображень із високою чутливістю, їх збереження, кількісне оброблення, порівняльний аналіз і документування результатів досліджень. Використання просвічувальної електронної мікроскопії у поєднанні з електронною дифракцією та аналітичними методами дає змогу комплексно досліджувати морфологію, фазовий склад, кристалічну структуру та дефекти матеріалів на мікро-, нано- й атомному рівнях.

Безпосереднє дослідження структури металевих зразків 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.

Репліку з поверхні мікрошліфа можна отримати кількома способами - розрізняють лакові, напилені та окисні репліки.

Лакові репліки виготовляють методом реплікування попередньо підготовленої поверхні досліджуваного матеріалу. Для цього на поверхню металографічного шліфа наносять тонкий шар плівкоутворювального полімерного розчину, наприклад розчину колодію в амілацетаті. Після випаровування розчинника утворюється тонка полімерна плівка, яка відтворює мікрорельєф поверхні шліфа. Сформовану репліку обережно відокремлюють від поверхні зразка та переносять на спеціальну опорну сітку для подальшого дослідження у просвічувальному електронному мікроскопі.

Для підвищення контрастності зображення застосовують метод косокутового вакуумного напилення (металевого відтінення), за якого на поверхню репліки під заданим кутом осаджують тонкий шар металу з високим атомним номером. Внаслідок геометричного екранування окремих ділянок мікрорельєфу виникає

нерівномірний розподіл товщини металевого покриття, що забезпечує формування тіньового контрасту. Ділянки з більшою товщиною металевого шару інтенсивніше розсіюють електрони, унаслідок чого на електронно-мікроскопічному зображенні вони зазвичай мають меншу інтенсивність у режимі світлопольного спостереження. Це дає змогу виявляти й аналізувати топографічні особливості поверхні матеріалу, зокрема межі зерен, виступи, заглиблення та інші елементи мікрорельєфу.

Напилені репліки виготовляють методом вакуумного осадження тонких плівок безпосередньо на попередньо підготовлену поверхню досліджуваного матеріалу. Для формування репліки найчастіше використовують вуглець, який випаровують у вакуумі шляхом електричного нагрівання вуглецевих електродів. Унаслідок конденсації парів вуглецю на поверхні зразка утворюється тонка суцільна плівка, що відтворює особливості його мікрорельєфу. Для підвищення контрастності електронно-мікроскопічного зображення застосовують комбіноване металовуглецеве покриття, яке формують послідовним косокутовим осадженням тонкого шару металу та нанесенням вуглецевої плівки.

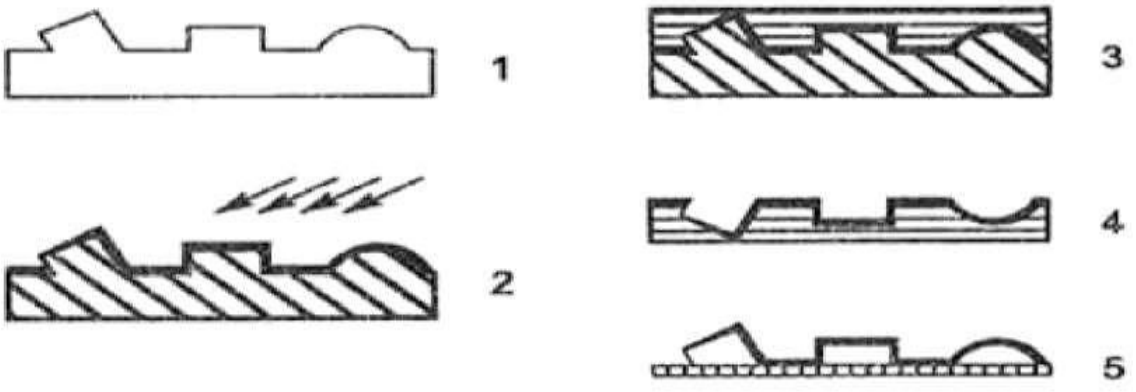


Рисунок 39 - Формування репліки з поверхні зразка: 1 - поверхня підготовленого мікрошліфа; 2 - нанесення відтінювального шару на поверхню мікрошліфа; 3 - нанесення шару колодію; 4 - відокремлення репліки від поверхні мікрошліфа; 5 - репліка, розміщена на несучій сітці.

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.

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.

6.4.2. Сканувальна електронна мікроскопія

Сканувальна електронна мікроскопія, яку також називають растровою електронною мікроскопією, є методом дослідження морфології, мікрорельєфу та структурно-композиційних особливостей поверхні матеріалів за допомогою сфокусованого електронного пучка. Метод дає змогу досліджувати топографію поверхні, виявляти неоднорідності структури та хімічного складу, а за наявності відповідного аналітичного обладнання - визначати локальний елементний склад матеріалу. На відміну від просвічувальної електронної мікроскопії, у якій зображення формується переважно за допомогою електронів, що пройшли крізь тонкий зразок або репліку, у сканувальній електронній мікроскопії використовують сигнали, які виникають унаслідок взаємодії первинного електронного пучка з речовиною зразка.

Однією з важливих переваг сканувальної електронної мікроскопії є значна глибина різкості, завдяки якій можна отримувати зображення поверхонь зі складним просторовим рельєфом. Ця особливість має особливе значення під час дослідження поверхонь руйнування матеріалів, пористих структур, порошків, покриттів, частинок складної форми та інших об'єктів із розвиненим мікрорельєфом.

Сканувальні електронні мікроскопи забезпечують широкий діапазон збільшень - від десятків до сотень тисяч разів, а в сучасних високороздільних системах і більше. У сучасних сканувальних електронних мікроскопах роздільна здатність за оптимальних умов може досягати субнанометрового рівня. Метод

широко застосовують для дослідження металів і сплавів, кераміки, скла, шлаків, мінералів, композиційних матеріалів, порошків, тонких плівок, захисних покриттів та інших матеріалів.

Принцип роботи сканувального електронного мікроскопа ґрунтується на послідовному скануванні поверхні досліджуваного зразка тонким сфокусованим електронним пучком. Електрони, що генеруються електронною гарматою, прискорюються електричним полем і проходять через електронно-оптичну систему. Лінзи забезпечують формування електронного зонда малого діаметра, а відхиляльна система - його послідовне переміщення поверхнею зразка за заданою растровою траєкторією. Формування та поширення електронного пучка відбуваються у вакуумі.

Під час взаємодії первинних електронів із речовиною зразка відбуваються процеси пружного та непружного розсіювання, унаслідок яких генеруються різні види електронних сигналів і електромагнітного випромінювання. Сигнали, що виходять зі зразка, реєструються відповідними детекторами, а їхня інтенсивність синхронізується з положенням електронного зонда на поверхні. У результаті формується растрове зображення, яскравість кожного елемента якого визначається інтенсивністю зареєстрованого сигналу у відповідній точці сканування.

Основними сигналами, які використовують у сканувальній електронній мікроскопії для дослідження матеріалів, є вторинні електрони, зворотнорозсіяні електрони та характеристичне рентгенівське випромінювання. Кожний із цих сигналів утворюється внаслідок певних фізичних процесів і характеризується різною глибиною виходу та інформативністю, що визначає можливості відповідних режимів дослідження. Використання різних сигналів у сканувальній електронній мікроскопії забезпечує отримання взаємодоповнювальної інформації про досліджуваний матеріал. Реєстрація вторинних електронів дає змогу аналізувати переважно топографію та морфологію поверхні, зворотнорозсіяних електронів - виявляти композиційні неоднорідності й особливості структурної будови, а характеристичного рентгенівського випромінювання - визначати локальний елементний склад. Поєднання цих

режимів розширює можливості комплексного дослідження структури, морфології та хімічної неоднорідності матеріалів.

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.

Аналітичні можливості сканувальної електронної мікроскопії істотно розширюються завдяки її поєднанню з електронно-зондовим рентгенівським мікроаналізом. 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. Для реєстрації характеристичного рентгенівського випромінювання використовують енергодисперсійні рентгенівські спектрометри. 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 будують карти розподілу окремих хімічних елементів на поверхні зразка (рис.43). 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 ліквації, дифузійних зон, корозійних продуктів, неметалевих включень і багатофазних структур.

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.

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.

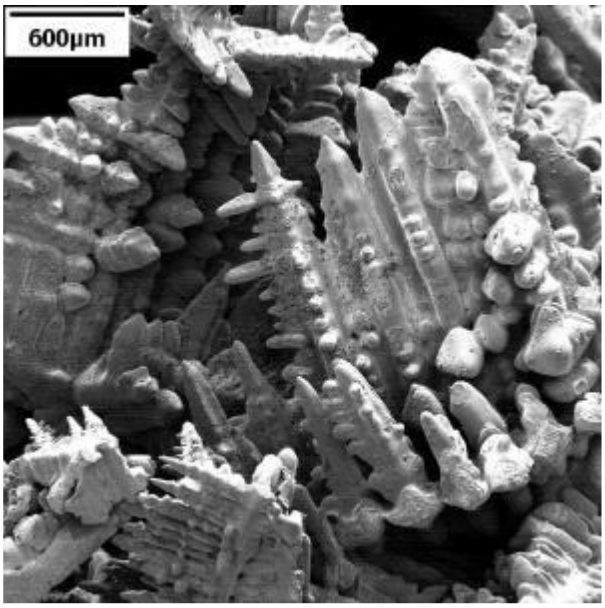


Рисунок 40 - Дендритні утворення на поверхні зламу усадкової порожнини всередині стального виливка, які виявлені методом сканувальної електронної мікроскопії, 200 х

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.

Рисунок 41 - Злом композитного матеріалу, 1500×

Рисунок 42 - Зовнішній вигляд сканувального електронного мікроскопа РЕМ-106И

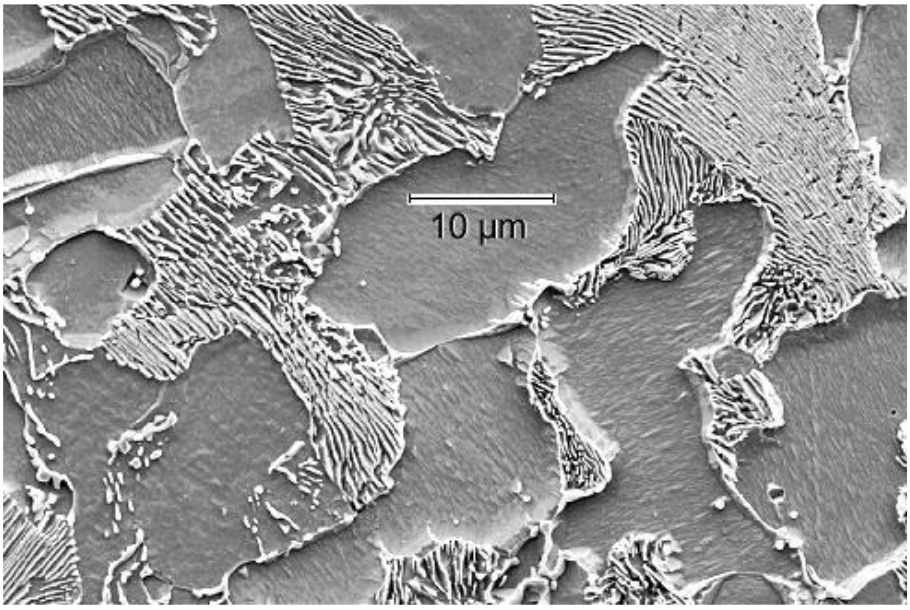


Рисунок 42 - Зображення мікроструктури доевтектоїдної сталі, що показує пластинчасту будову перліту, яке отримане при дослідженні на сканувальному електронному мікроскопі

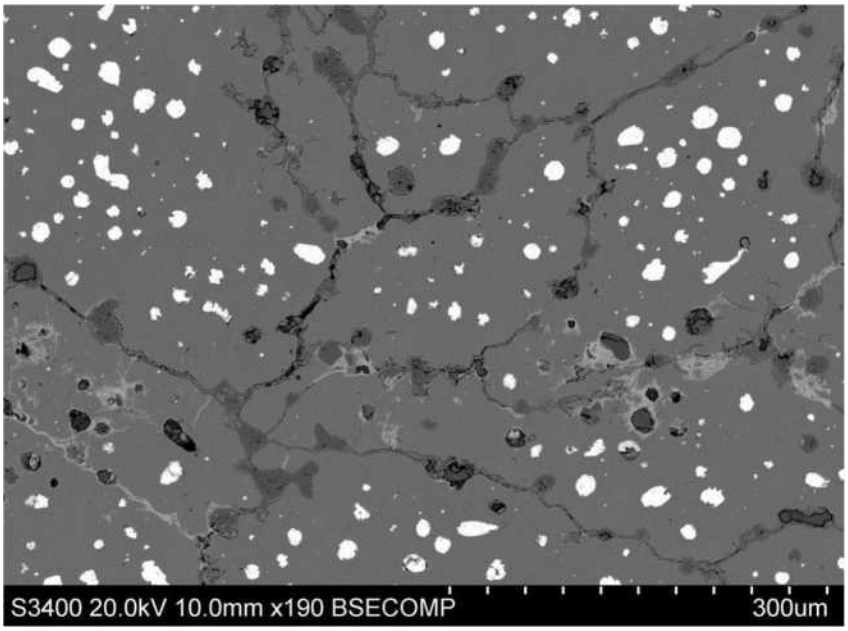


Рисунок 43 - Зображення структури зразка свинцевої бронзи, отримане за допомогою сканувального електронного мікроскопа

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

Важливим етапом експериментальних досліджень у матеріалознавстві є визначення та оцінювання властивостей досліджуваних матеріалів. Сукупність фізичних, хімічних, механічних і технологічних властивостей металів і сплавів визначає можливості їх практичного застосування, обґрунтованість вибору технологічних процесів і режимів оброблення, а також є основою для прогнозування експлуатаційних характеристик, надійності та довговічності виготовлених виробів.

До основних фізичних властивостей матеріалів належать густина, питомий електричний опір, температура плавлення, теплопровідність, коефіцієнт лінійного теплового розширення, теплоємність, магнітні та інші характеристики.

Хімічні властивості характеризують здатність матеріалів до хімічної взаємодії з навколишнім середовищем та іншими речовинами. До них належать хімічна активність, схильність до окиснення, корозійна стійкість та інші характеристики, що визначають поведінку матеріалів у різних середовищах.

Технологічні властивості характеризують придатність матеріалів до певних способів виготовлення й оброблення виробів. Зокрема, ливарні властивості оцінюють за рідкоплинністю, усадкою та схильністю до утворення ливарних дефектів; здатність до оброблення тиском - за пластичністю, ковкістю та іншими характеристиками деформівності; придатність до зварювання — за зварюваністю; до оброблення різанням - за оброблюваністю різанням. Технологічні властивості залежать від хімічного складу, структури, фізико-механічних характеристик матеріалу та умов реалізації відповідного технологічного процесу.

Особливе місце в системі характеристик матеріалів посідають механічні властивості, які визначають їхню поведінку під дією механічних навантажень за встановлених умов випробування. Вони характеризують здатність матеріалу чинити опір пружній і пластичній деформації, зародженню та поширенню тріщин, а також руйнуванню. Механічні властивості залежать від хімічного

складу, фазового стану, мікроструктури матеріалу, температури, швидкості деформування, характеру навантаження та інших чинників.

Для визначення механічних властивостей металів і сплавів застосовують різні методи випробувань, які класифікують за характером і тривалістю прикладання навантаження, видом напружено-деформованого стану та умовами проведення досліджень.

Статичні випробування проводять за умов відносно повільного прикладання навантаження, коли вплив інерційних сил на результати дослідження є незначним. До них належать випробування на розтяг, стискання, згин і кручення. За результатами таких випробувань визначають характеристики міцності, пружності та пластичності матеріалів. До поширених методів механічних досліджень належать також вимірювання твердості шляхом вдавлювання індентора та технологічні проби, які використовують для оцінювання здатності матеріалу до певних видів деформування.

Динамічні випробування характеризуються швидким прикладанням навантаження, за якого істотного значення набувають швидкість деформування та інерційні ефекти. Їх застосовують для оцінювання поведінки матеріалів за ударних навантажень, зокрема під час випробувань на ударний згин.

Циклічні випробування проводять за умов багаторазової зміни навантаження або напруження в часі, зокрема за знакозмінних і знакопостійних циклів. Такі випробування використовують для дослідження процесів накопичення втомного пошкодження, зародження та поширення втомних тріщин, а також для визначення характеристик опору втомі, зокрема границі витривалості за встановлених умов випробування. За видом деформації або способом прикладання навантаження механічні випробування поділяють на випробування на розтяг, стискання, згин, кручення та їх поєднання.

Випробування на зносостійкість використовують для оцінювання опору матеріалів поступовому пошкодженню та втраті речовини з поверхні внаслідок тертя й інших видів механічної взаємодії.

Під дією зовнішніх механічних навантажень у матеріалі виникають внутрішні сили, інтенсивність яких характеризують механічними

напруженнями. Під впливом напружень виникають деформації, які залежно від властивостей матеріалу та умов навантаження можуть бути пружними, пластичними або містити обидві складові. Пружна деформація зникає після зняття навантаження, тоді як пластична є незворотною і зберігається після його усунення. За досягнення критичних умов напружено-деформованого стану можливі зародження й розвиток пошкоджень, утворення тріщин і подальше руйнування матеріалу.

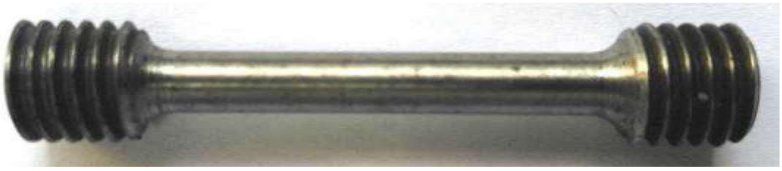
Вивчення закономірностей деформування, пошкодження та руйнування матеріалів становить один із фундаментальних напрямів сучасного матеріалознавства. Теоретичні положення механіки деформівного твердого тіла, механіки руйнування та фізичного матеріалознавства створюють наукову основу для встановлення взаємозв'язку між хімічним складом, структурою та механічними властивостями матеріалів. Використання цих закономірностей дає змогу обґрунтовано вибирати конструкційні матеріали, оптимізувати технологічні режими їх оброблення та формувати необхідний комплекс властивостей, що забезпечує працездатність, 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.



а)

б)

Рис. 44. Зразки для визначення міцності при розтягуванні та пластичності: а - до випробування; б - після випробування

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.

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.

Рис. 45. Випробовувальна розривна машина ZDM-10

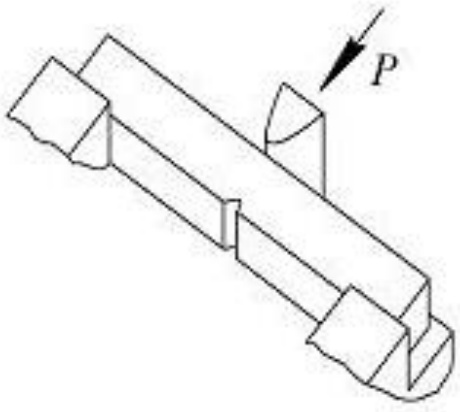


Рисунок 46 – Схема випробування на ударну в’язкість

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.

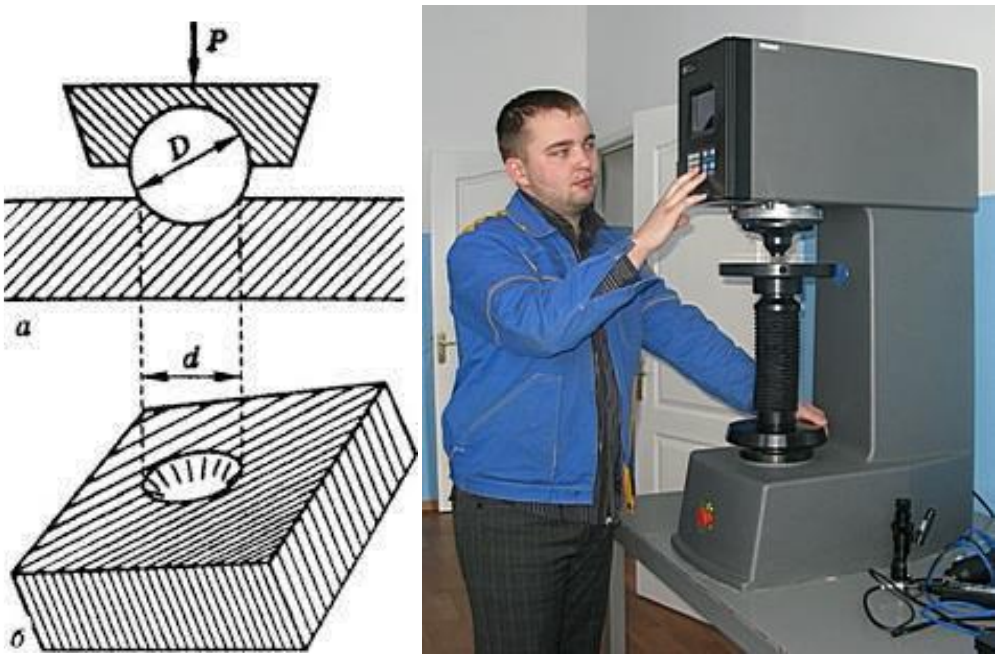


Рисунок 47 - Схема визначення твердості за методом Брінелля (а): утворення відбитку (б); твердомір (прес) Брінелля (в)

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.

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.

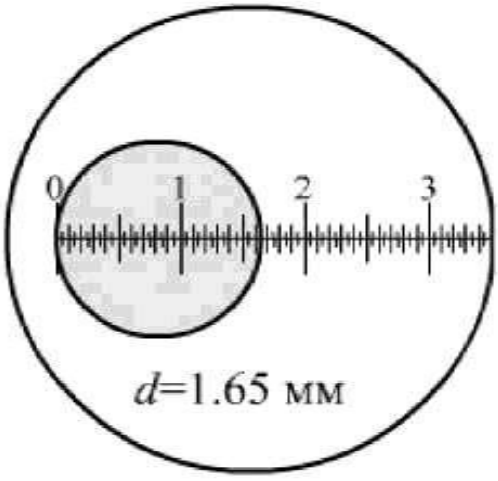
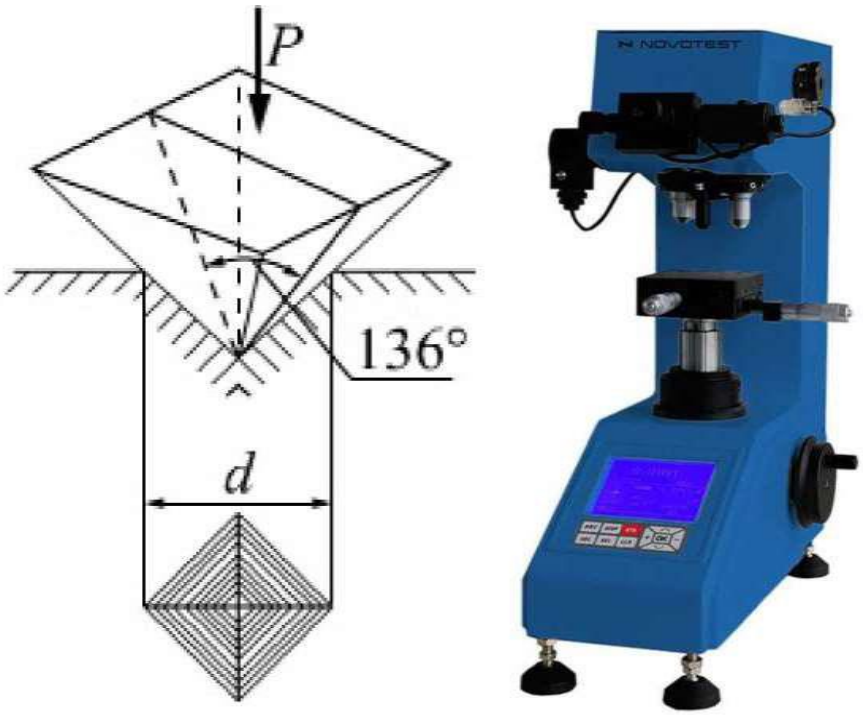


Рисунок 48 - Вимірювання діаметра відбитка при визначенні твердості за методом Брінелля

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 установленого 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.



а) б)

Рисунок 49 - Схема визначення твердості за методом Віккерса: а - утворений відбиток індентора на поверхні зразка; б - твердомір за методом Віккерса моделі NOVOTEST ТС-В-Ц

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.

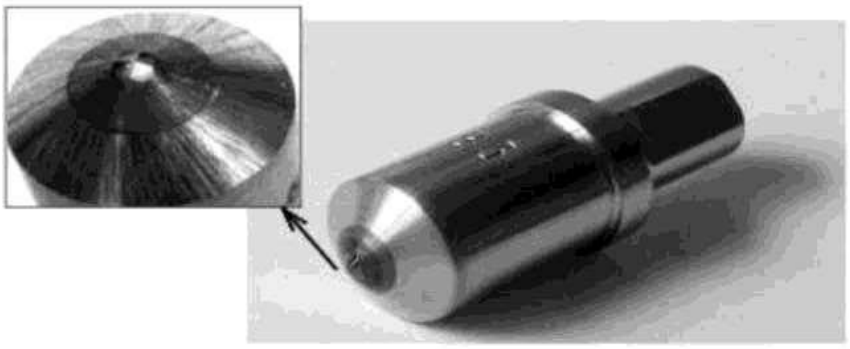


Рисунок 50 - Індентор з алмазною пірамідою для визначення твердості за методом Віккерса

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 або структурних складових сплавів 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 використовують правильну чотиригранну алмазну піраміду з

кутом між протилежними гранями 136°. Індентор плавно вдавлюється у поверхню зразка під заданим навантаженням. Зразки для вимірювання мікротвердості є мікрошліфами, які використовують у металографічному аналізі.

Під час визначення мікротвердості відбиток індентора отримують на заздалегідь вибраній ділянці: окремому зерні, фазі або поверхневому шарі. За виміряними 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 і металографічного мікроскопа. Вдавлювання алмазної піраміди відбувається протягом установленого часу витримки під статичним навантаженням. Розміри відбитка визначають після зняття навантаження. Металографічний мікроскоп, установлений на мікротвердомірі, забезпечує збільшення 130× і 487×. 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 досліджуваний мікрошліф установлюють 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 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

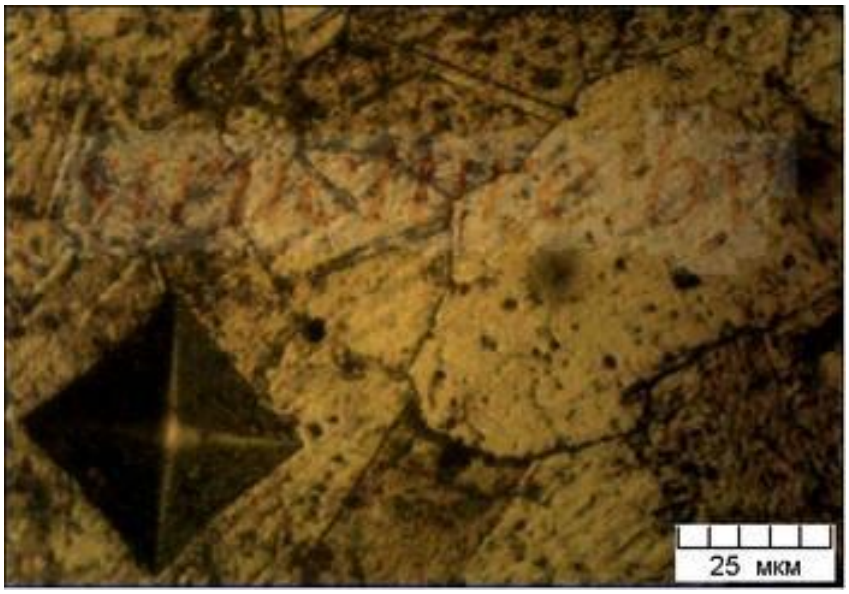


Рисунок 52 - Відбиток індентора при визначенні мікротвердості зерна мідного сплаву

6.6. Аналіз акустичної емісії при випробовуванні матеріалів

Важливим методом дослідження процесів деформування, накопичення пошкоджень і руйнування матеріалів під дією механічних навантажень є метод акустичної емісії. Акустична емісія - це фізичне явище виникнення та поширення в матеріалі пружних хвиль унаслідок швидкого локального вивільнення енергії під час перебігу внутрішніх структурних процесів. До основних джерел акустичної емісії належать рух дислокацій, локалізована пластична деформація, зародження та поширення тріщин, міжфазне розшарування й інші процеси, що супроводжуються швидкою перебудовою структури та перерозподілом внутрішніх напружень.

Характерною особливістю акустичної емісії є те, що джерелом пружних хвиль виступають локальні процеси, які відбуваються безпосередньо в досліджуваному матеріалі. На відміну від активних акустичних методів контролю, за яких пружні хвилі збуджуються зовнішнім випромінювачем, метод акустичної емісії ґрунтується на реєстрації сигналів, що самочинно виникають у матеріалі під дією механічних, термічних або інших зовнішніх впливів. При цьому зовнішнє навантаження є джерелом енергії, яка накопичується в матеріалі та частково вивільняється під час розвитку структурних змін.

У процесі деформування металів і сплавів відбуваються зміни їхнього структурного стану, пов'язані з виникненням, переміщенням і взаємодією дефектів кристалічної ґратки. До таких дефектів належать вакансії, міжвузлові атоми, дислокації, межі зерен та інші порушення кристалічної будови. Вони спричиняють локальні спотворення кристалічної ґратки, формування внутрішніх полів напружень і зміну запасеної енергії матеріалу. 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.

Під час подальшого навантаження локальна перебудова структури може супроводжуватися швидким вивільненням частини накопиченої пружної енергії. Унаслідок цього виникають короткочасні збурення напружено-деформованого стану, які поширюються в матеріалі у вигляді пружних хвиль. Джерелами таких хвиль можуть бути стрибкоподібний рух дислокацій, локальні зсувні процеси, зародження та поширення мікротріщин, руйнування міжфазних зв'язків та інші швидкоплинні процеси структурної перебудови. 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.

Пружні хвилі, що виникають у локальних джерелах акустичної емісії, поширюються в об'ємі матеріалу, зазнаючи відбиття, заломлення, розсіювання та загасання. Досягаючи поверхні зразка, вони спричиняють механічні коливання, які перетворюються акустичними перетворювачами, переважно п'єзоелектричними, на електричні сигнали. Після підсилення, фільтрації та цифрового оброблення ці сигнали використовують для виявлення й аналізу процесів деформування та розвитку пошкоджень. Реєстрація параметрів акустичної емісії, зокрема амплітуди, енергії, тривалості сигналів, кількості імпульсів і часу їх надходження, дає змогу оцінювати акустичну активність матеріалу, виявляти розвиток дефектів і за відповідної конфігурації датчиків визначати місцеположення активних джерел акустичної емісії.

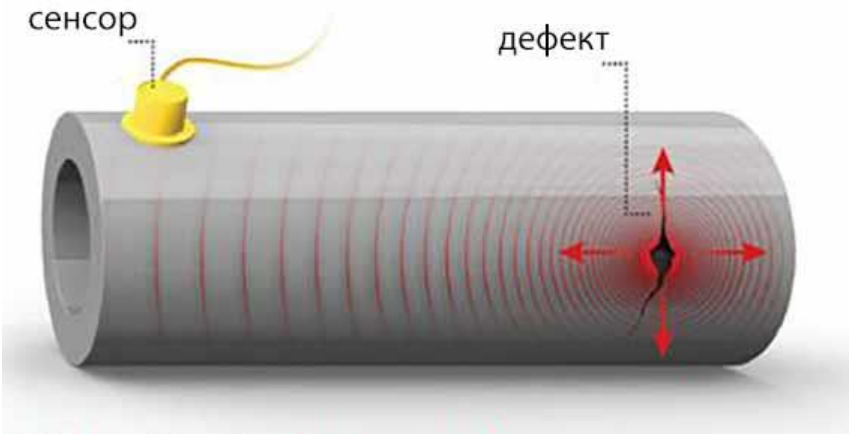


Рисунок 53– Розміщення датчика акустичної емісії на заготовці

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.

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 спричиняти 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 твердосплавних 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.

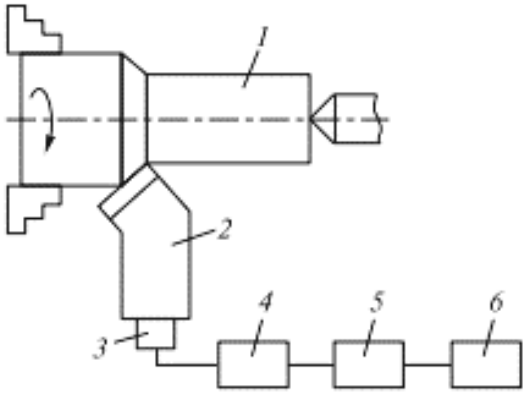


Рисунок 55 - Схема і блок-схема експериментальної установки: *1* – заготовка, *2* – різець; *3* – пьезоелектричний датчик; *4* – підсилювач; *5* – аналогово – цифровий перетворювач сигналу акустичної емісії; *6* – комп'ютер

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.

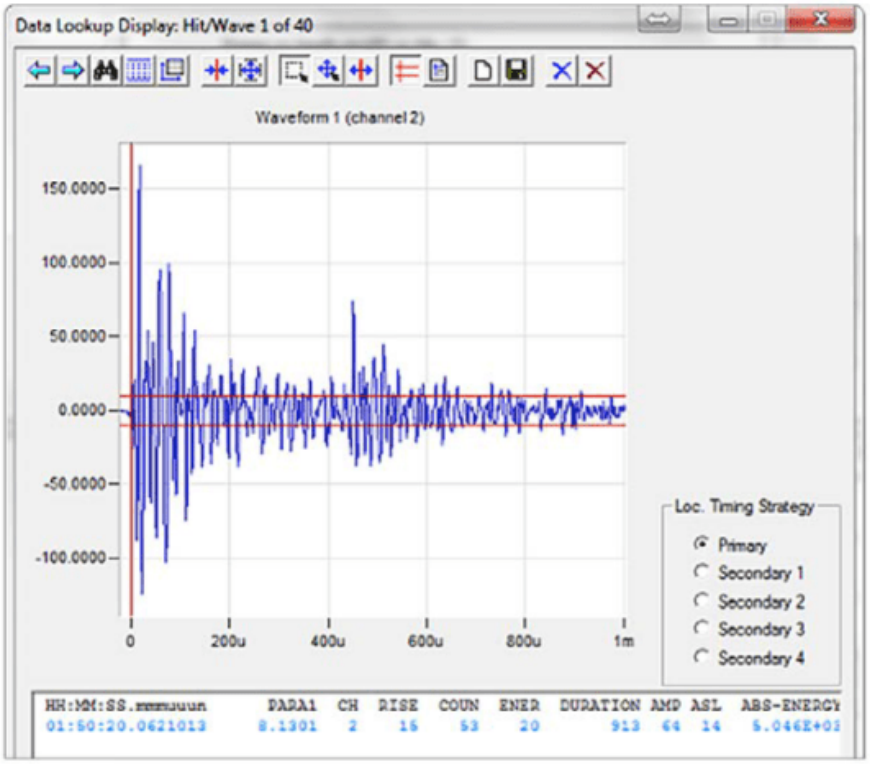


Рисунок 56 - Відображення на екрані монітора типової форми хвилі акустичної емісії

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.

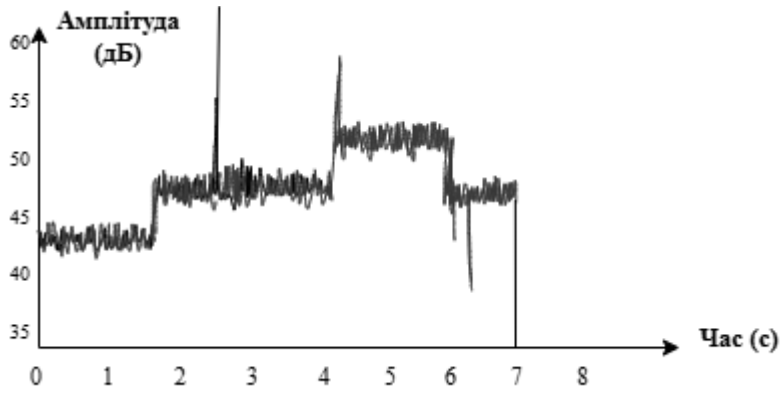


Рисунок 56 - Зміна амплітуди сигналу акустичної емісії (дБ) при зміна глибини різання

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.

Метод акустичної емісії широко застосовують у сучасній техніці для неруйнівного контролю, технічного діагностування та моніторингу стану матеріалів, виробів і конструкцій. Особливо ефективним є його використання для обстеження великогабаритного обладнання та об'єктів з обмеженим доступом до окремих ділянок поверхні, зокрема резервуарів із теплоізоляційними або захисними покриттями. Метод застосовують під час випробувань автомобільних і залізничних цистерн, посудин і балонів високого тиску, трубопроводів, резервуарів та інших відповідальних конструкцій. За його допомогою виявляють активні процеси розвитку тріщин, корозійного пошкодження, локального руйнування та інших дефектів, що супроводжуються

генерацією пружних хвиль. Окремим напрямом застосування є виявлення витоків рідин і газів у трубопроводах, арматурі, резервуарах та обладнанні, якщо вони супроводжуються утворенням акустичних сигналів. Результати акустико-емісійного контролю використовують для оцінювання технічного стану конструкцій, визначення ділянок із підвищеною активністю пошкодження, обґрунтування необхідності додаткових обстежень, а також для прогнозування працездатності та залишкового ресурсу обладнання в поєднанні з іншими методами діагностування.

Практичне значення методу акустичної емісії зумовлене можливістю його використання в енергетиці, зокрема на об'єктах атомної промисловості, авіаційній і ракетно-космічній техніці, суднобудуванні, на залізничному транспорті, у хімічній, нафтовій та газовій промисловості. До основних переваг методу належать висока чутливість до активних процесів деформування та руйнування, можливість виявлення розвитку дефектів на ранніх стадіях, локалізація джерел акустичних сигналів за допомогою системи датчиків, а також здатність здійснювати контроль значних об'ємів матеріалу та протяжних конструкцій за обмеженої кількості точок вимірювання. За сприятливих умов метод дає змогу реєструвати сигнали, пов'язані з мікроскопічними приростами тріщин, однак його фактична чутливість залежить від властивостей матеріалу, характеру джерела акустичної емісії, геометрії конструкції, загасання пружних хвиль, рівня акустичних завад і характеристик вимірювальної апаратури.

Акустико-емісійний контроль належить до пасивних методів неруйнівного контролю та зазвичай не потребує порушення цілісності досліджуваного об'єкта. Приймальні акустичні перетворювачі встановлюють на доступних ділянках поверхні конструкції із забезпеченням належного акустичного контакту, що в багатьох випадках дає змогу проводити діагностування без демонтажу обладнання. Контроль може здійснюватися без зупинення технологічного процесу або за спеціально створених режимів навантаження, необхідних для активізації джерел акустичної емісії.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 6

1. Які структурні рівні матеріалів вивчаються в сучасному матеріалознавстві?
2. Чому жоден окремий метод дослідження не може повністю охарактеризувати матеріал?
3. Які галузі знань лежать в основі матеріалознавства та яку роль відіграє кожна з них?
4. У чому полягає значення кристалографії для дослідження матеріалів?
5. Чим відрізняються макроструктурний, мікроструктурний та електронно-мікроскопічний аналіз?
6. Які методи застосовують для визначення хімічного складу матеріалів?
7. У чому полягає принцип атомно-емісійного спектрального аналізу?
8. Яке значення мають рентгеноструктурний аналіз, раманівська спектроскопія та термічний аналіз у дослідженні матеріалів?
9. Що називають структурою металевого матеріалу і які її основні елементи?
10. Як структура металу або сплаву впливає на його фізико-механічні, технологічні та експлуатаційні властивості?
11. У чому полягає різниця між макроструктурним і мікроструктурним методами дослідження металів і сплавів?
12. Які дефекти можна виявити за допомогою макроструктурного аналізу?
13. Що таке мікрошліф і які основні етапи його підготовки до металографічного дослідження?
14. Для чого проводять травлення мікрошліфа і як воно допомагає виявити мікроструктуру металу?
15. Які основні системи входять до складу металографічного мікроскопа і яку функцію виконує кожна з них?
16. У чому полягає перевага електронної мікроскопії порівняно з оптичною під час дослідження металів і сплавів?

7.ВВЕДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ У НАУКОВИЙ ОБІГ

Інформація є важливим засобом комунікації та обміну знаннями, що відображає суспільні, виробничі, науково-пізнавальні й інші зв'язки, а також відомості про явища, процеси та об'єкти навколишнього світу. Відповідно до Конституції України та Закону України «Про науково-технічну інформацію» громадяни, юридичні особи, органи державної влади та місцевого самоврядування мають право на доступ до відкритої науково-технічної інформації. Реалізація цього права передбачає можливість її одержання, зберігання, використання та поширення в процесі наукової, виробничої, освітньої, громадської та інших видів діяльності відповідно до вимог законодавства.

Наукова інформація становить інформаційну основу теоретичних і експериментальних досліджень, забезпечуючи накопичення, систематизацію, аналіз та узагальнення наукових знань. Її використання дає змогу обґрунтовувати актуальність дослідження, визначати ступінь розробленості наукової проблеми, формулювати мету й завдання роботи, обирати методи дослідження та оцінювати достовірність, наукову новизну і практичну значущість отриманих результатів. Якість наукової інформації характеризується такими основними критеріями, як достовірність, точність, повнота, актуальність, об'єктивність, наукова цінність і відповідність цільовому призначенню. Важливе значення мають також доступність, своєчасність надходження, регулярність оновлення, способи отримання та форми подання інформації.

Однією з основних форм поширення наукової інформації є наукові публікації, завдяки яким результати дослідницької діяльності стають доступними науковій спільноті. Вони забезпечують документальне закріплення нових знань, сприяють їх поширенню, науковому обговоренню та подальшому використанню в дослідницькій і практичній діяльності. Таким чином, наукова публікація перетворює індивідуальний результат дослідника на складову загального наукового надбання.

Під науковою публікацією розуміють оприлюднений у встановленій формі науковий твір, у якому викладено результати дослідження, їх теоретичне обґрунтування, аналіз або узагальнення. До основних видів наукових публікацій належать статті у фахових і наукових періодичних виданнях, тези доповідей, матеріали конференцій, монографії та інші опубліковані наукові праці.

Наукові публікації виконують низку взаємопов'язаних функцій. Насамперед вони забезпечують інформування наукової спільноти про нові результати досліджень, їх документальну фіксацію та поширення. Оприлюднення результатів сприяє встановленню наукового пріоритету автора або дослідницького колективу, визначенню особистого внеску в розв'язання відповідної проблеми та створює передумови для незалежної перевірки, критичного аналізу й подальшого розвитку отриманих знань. Крім того, публікації можуть засвідчувати апробацію результатів дослідження, а за наявності відповідних відомостей - їх практичне впровадження.

Основними завданнями наукових публікацій є систематизація, узагальнення та документальне закріплення результатів теоретичних і експериментальних досліджень, забезпечення їх доступності для наукової спільноти, стимулювання подальших досліджень і розвитку наукової дискусії. Важливим завданням є також поширення інформації про перспективні напрями науково-технічного розвитку та привернення уваги наукових установ, виробничих організацій, промислових підприємств і потенційних інвесторів до результатів, що мають прикладне значення.

Особлива цінність наукових публікацій полягає в можливості ознайомлення з різними теоретичними підходами до розв'язання наукових проблем, методами проведення досліджень, результатами їх критичного аналізу та оцінювання. Аналіз наукових праць дає змогу визначити сучасний стан розробленості проблеми, виявити суперечності й недостатньо досліджені питання, оцінити рівень наукової новизни та обґрунтувати напрями подальших досліджень. Саме тому отримані наукові результати потребують належного узагальнення, систематизації, оформлення та введення в науковий обіг.

Введення результатів дослідження в науковий обіг здійснюється шляхом їх оприлюднення та поширення в усній, письмовій або електронній формах. Усна наукова комунікація реалізується через доповіді, повідомлення, виступи та обговорення на наукових конференціях, семінарах, симпозіумах, конгресах і з'їздах. Письмовими формами представлення результатів є тези доповідей, наукові статті, монографії, дисертації, звіти про науково-дослідні роботи та інші наукові документи. Окрему категорію становлять патентні документи, які містять науково-технічну інформацію про винаходи та інші об'єкти промислової власності. Електронні засоби комунікації, зокрема наукові репозитарії, електронні журнали, інформаційні бази даних і спеціалізовані наукові платформи, істотно розширюють можливості поширення результатів досліджень та обміну інформацією між науковцями.

Важливе значення в системі наукової комунікації має дата оприлюднення результатів дослідження, оскільки вона є одним із документальних свідчень наукового пріоритету автора або дослідницького колективу. Наявність достовірно зафіксованої дати публікації дає змогу встановити хронологічну послідовність появи наукових результатів, визначити їх місце в розвитку відповідного напряму досліджень та оцінити внесок окремих науковців у формування нових концепцій, методів і технологій.

Науковий документ - це документ, у якому на матеріальному або електронному носії зафіксовано наукову інформацію, результати досліджень, теоретичні положення, методи або узагальнення, призначені для зберігання, використання та поширення наукових знань. Науковий документ є формою фіксації, зберігання та передавання наукової інформації. Його ідентифікацію забезпечують відповідні реквізити, зокрема назва, відомості про автора або відповідальну організацію, дата створення чи оприлюднення, а також інші бібліографічні дані залежно від виду документа.

Носіями наукової інформації є різноманітні види документів, у яких зафіксовано результати наукових досліджень, теоретичні положення, методичні розробки, технічні характеристики та інші відомості наукового й науково-технічного характеру. До них належать монографії, підручники, навчальні

посібники, наукові 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 та бібліографічні покажчики. Залежно від способу оприлюднення, періодичності виходу, змісту й характеру поданої інформації наукові документи поділяють на відповідні групи.

За періодичністю виходу видання поділяють на періодичні, продовжувані та неперіодичні. Періодичні видання виходять через визначені проміжки часу, мають сталу назву, послідовну нумерацію або датування випусків і, як правило, однотипне оформлення. До них належать журнали, газети, бюлетені та інші видання, випуски яких об'єднані спільною тематикою або цільовим призначенням. Продовжувані видання виходять у міру накопичення матеріалів, мають спільну назву та послідовну нумерацію випусків, але не обов'язково дотримуються встановленої періодичності. Прикладом таких видань можуть бути окремі серії збірників наукових праць.

Неперіодичні видання випускають одноразово, і вони, як правило, не передбачають регулярного продовження під тією самою назвою. До цієї групи належать монографії, підручники, навчальні посібники, збірники наукових праць, матеріали конференцій та інші книжкові видання.

За обсягом друковані неперіодичні видання традиційно поділяють на книги й брошури. Книгою вважають видання обсягом понад 48 сторінок, а брошурою — видання обсягом від 4 до 48 сторінок включно, без урахування обкладинки. Для кількісного оцінювання обсягу авторського текстового й ілюстративного матеріалу використовують поняття авторського аркуша. Один авторський аркуш відповідає 40 000 друкованих знаків прозового тексту, включаючи літери, цифри, розділові знаки та пробіли. Для інших видів матеріалів застосовують відповідні одиниці перерахунку, зокрема 700 рядків віршованого тексту або 3000 см² площі ілюстрацій. У традиційному машинописному оформленні один авторський аркуш орієнтовно відповідав 22–24 сторінкам тексту, надрукованого через два міжрядкові інтервали. Проте в сучасних електронних документах кількість сторінок залежить від формату аркуша, параметрів шрифту, міжрядкових

інтервалів і полів, тому не може бути універсальним показником обсягу авторського матеріалу.

За характером і способом формування змісту джерела наукової інформації поділяють на первинні та вторинні. Первинні документи містять оригінальні результати теоретичних, експериментальних або прикладних досліджень, нові наукові положення, методи, технічні рішення чи інші відомості, отримані безпосередньо в процесі наукової діяльності. До них належать оригінальні наукові статті, дисертації, дослідницькі монографії, звіти про науково-дослідні роботи та патентні документи.

Вторинні документи створюють у результаті аналітико-синтетичного опрацювання, систематизації, узагальнення та оцінювання інформації, представленої в первинних джерелах. До них належать реферативні та бібліографічні видання, наукові огляди, бібліографічні покажчики, інформаційні каталоги, рецензії та аналітичні матеріали. Їх основне призначення полягає в забезпеченні пошуку необхідних джерел, розкритті їхнього змісту, узагальненні наявних наукових результатів і визначенні сучасного стану розробленості певної проблеми. Водночас окремі види документів, зокрема монографії, статті та довідкові видання, можуть містити як первинну, так і вторинну інформацію залежно від характеру представленого матеріалу.

Важливою характеристикою наукової інформації є її актуальність, яка визначається відповідністю наведених відомостей сучасному стану наукових знань, розвитку технологій і практичним потребам відповідної галузі. У процесі науково-технічного прогресу частина інформації поступово втрачає актуальність унаслідок появи нових експериментальних даних, удосконалення методів дослідження, перегляду теоретичних положень та впровадження нових технологічних рішень. Цей процес характеризують як старіння наукової інформації.

Інтенсивність старіння інформації залежить від специфіки наукової галузі, темпів розвитку відповідного напряму досліджень і характеру отриманих результатів. У галузях, пов’язаних зі швидким розвитком цифрових технологій, програмного забезпечення та обчислювальних систем, окремі прикладні

відомості можуть втрачати актуальність протягом одного-двох років. У матеріалознавстві темпи оновлення знань істотно відрізняються залежно від напряму досліджень. Наприклад, відомості про новітні функціональні матеріали, нанотехнології або адитивне виробництво можуть досить швидко доповнюватися новими результатами, тоді як фундаментальні положення кристалографії, термодинаміки, теорії фазових перетворень і механіки матеріалів зберігають наукове значення протягом значно тривалішого часу.

Отже, під час добору та аналізу наукових джерел необхідно враховувати не лише рік їхнього оприлюднення, а й наукову достовірність, авторитетність видання, актуальність використаних методів, рівень новизни представлених результатів та їх відповідність меті дослідження. Водночас давніші публікації можуть мати фундаментальне значення, тому їх не слід виключати з наукового аналізу виключно за хронологічною ознакою.

Одним із найважливіших засобів поширення результатів досліджень і професійної комунікації є публікації в наукових журналах. Наукова стаття становить одну з основних форм письмового представлення результатів дослідницької діяльності, що дає змогу оперативно інформувати наукову спільноту про нові теоретичні положення, експериментальні дані, методичні підходи та практичні розробки. Її зміст має відповідати вимогам наукової обґрунтованості, достовірності, логічної послідовності викладу та належного документального підтвердження отриманих результатів. Автори наукових статей несуть відповідальність за достовірність представлених даних, коректність застосованих методів дослідження, обґрунтованість висновків і дотримання принципів академічної доброчесності.

Наукова стаття є однією з основних форм оприлюднення результатів наукових досліджень. Вона має містити нові наукові результати, висвітлювати недостатньо досліджені аспекти певної проблеми, виявляти суперечності в наявних наукових уявленнях або пропонувати нові підходи до розв’язання теоретичних і практичних завдань. Важливими вимогами до наукової статті є достовірність представлених даних, обґрунтованість висновків, логічна послідовність викладу та наявність елементів наукової новизни. Обсяг статті

залежить від характеру дослідження, вимог наукового видання та прийнятого формату публікації. Для традиційних дослідницьких статей він може становити орієнтовно 6–22 сторінки, однак ці межі не є універсальними та визначаються редакційною політикою конкретного журналу.

Підготовку наукової статті зазвичай розпочинають після завершення певного етапу дослідження, коли отримані результати систематизовано, проаналізовано та сформульовано попередні висновки, достатньо обґрунтовані для їх оприлюднення. Важливим організаційним етапом є вибір наукового журналу, тематика якого відповідає змісту дослідження. Оскільки наукові видання можуть встановлювати різні вимоги до структури, обсягу, оформлення рукопису, способів подання результатів і бібліографічних посилань, під час підготовки статті необхідно керуватися чинними правилами для авторів відповідного журналу. При цьому слід враховувати науковий профіль видання, його редакційну політику, процедуру рецензування та вимоги до академічної доброчесності.

Перед написанням рукопису дослідник має чітко визначити мету публікації, основну наукову ідею та внесок отриманих результатів у розвиток відповідного напряму досліджень. Особливу увагу необхідно приділити обґрунтуванню наукової новизни, тобто встановленню відмінностей між отриманими результатами та відомими науковими положеннями, методами або експериментальними даними. Такий підхід дає змогу визначити логіку викладу матеріалу, сформувати структуру статті та забезпечити змістову цілісність публікації.

Більшість наукових статей, присвячених оригінальним експериментальним дослідженням, будують за загальноприйнятою структурою, яка передбачає послідовне висвітлення вступу, методів дослідження, результатів та їх обговорення. З урахуванням редакційних вимог типова структура статті може містити назву, відомості про авторів, анотацію, ключові слова, вступ, матеріали та методи дослідження, результати, обговорення, висновки й список використаних джерел. Така структура забезпечує логічний зв’язок між постановкою наукової проблеми, методологією її дослідження, отриманими

результатами та сформульованими висновками. За принципами побудови вона близька до структури звіту про науково-дослідну роботу, хоча відрізняється ступенем деталізації матеріалу, обсягом і вимогами до його подання.

Анотація є стислим і змістовно завершеним викладом основних положень наукової статті, призначеним для швидкого ознайомлення читача з метою, методами, результатами та висновками дослідження. Її основне завдання полягає в тому, щоб надати достатньо інформації для попереднього оцінювання наукового змісту й значущості публікації без необхідності звернення до повного тексту. Анотація має відображати фактичний зміст статті, містити основні результати дослідження. Інформативність і точність анотації мають особливе значення, оскільки саме на її підставі читач часто приймає рішення щодо доцільності подальшого ознайомлення з публікацією.

Вступ наукової статті призначений для обґрунтування актуальності дослідження, визначення його наукового контексту та формулювання мети роботи. У цьому розділі характеризують сучасний стан розробленості проблеми, аналізують найважливіші результати попередніх досліджень, визначають їхні досягнення й обмеження, а також виявляють суперечності або питання, які залишаються недостатньо дослідженими. На підставі такого аналізу обґрунтовують необхідність проведення нового дослідження та визначають його місце в системі наявних наукових знань.

Логіка побудови вступу передбачає послідовний перехід від загальної характеристики наукової проблеми до конкретного дослідницького завдання. Спочатку розкривають сутність проблеми та її теоретичне або практичне значення, після чого аналізують сучасні підходи до її розв’язання, переваги й обмеження наявних методів. Далі визначають недостатньо досліджені аспекти проблеми, обґрунтовують доцільність обраного напряму дослідження та формулюють його мету. За необхідності у вступі також зазначають об’єкт і предмет дослідження, висувають наукову гіпотезу та визначають основні завдання роботи.

Матеріали та методи дослідження становлять розділ, у якому характеризують об’єкти дослідження, використані матеріали, обладнання,

експериментальні установки, методики вимірювання та умови проведення експериментів. Тут також описують послідовність виконання дослідницьких процедур, способи реєстрації результатів, методи математичного й статистичного опрацювання експериментальних даних та підходи до оцінювання похибок і невизначеності вимірювань. Наведена інформація має бути достатньо повною й точною для критичного оцінювання методології дослідження та, за можливості, відтворення експериментів іншими дослідниками.

У дослідженнях із матеріалознавства особливу увагу приділяють характеристиці хімічного складу й початкового структурного стану матеріалів, технологічним умовам виготовлення та обробки зразків, параметрам випробувань, методам структурного, фазового й фізико-хімічного аналізу. Важливим є також зазначення технічних характеристик вимірювального обладнання, умов проведення дослідів, кількості повторних вимірювань та методів оцінювання достовірності отриманих результатів.

Результати дослідження містять систематизований виклад отриманих експериментальних або теоретичних даних, які безпосередньо відповідають поставленій меті та завданням роботи. Результати доцільно подавати в логічній послідовності, використовуючи текстові пояснення, таблиці, графіки, діаграми, мікроструктурні зображення та інші засоби наочного представлення інформації. При цьому необхідно забезпечити узгодженість між текстом, табличними даними та ілюстративними матеріалами, уникати невиправданого дублювання інформації й чітко розмежовувати встановлені факти та їх подальшу інтерпретацію.

Обговорення результатів передбачає наукову інтерпретацію отриманих даних, встановлення причинно-наслідкових зв’язків, зіставлення результатів із відомими теоретичними положеннями та даними інших дослідників. У цьому розділі аналізують відповідність результатів висунутій гіпотезі, пояснюють виявлені закономірності, розглядають можливі причини розбіжностей із раніше опублікованими даними та оцінюють обмеження застосованих методів. Особливе значення має обґрунтування наукової новизни отриманих результатів і визначення їхнього внеску в розвиток відповідного напряму науки.

Висновки є завершальним змістовим розділом статті, у якому стисло узагальнюють основні результати дослідження відповідно до його мети та поставлених завдань. Вони мають відображати встановлені закономірності, підтверджені наукові положення, нові методичні підходи або практично значущі результати. Висновки повинні безпосередньо випливати з представлених даних і не містити тверджень, які не підтверджено результатами дослідження. За необхідності в цьому розділі окреслюють можливості практичного використання отриманих результатів і перспективні напрями подальших досліджень.

Наприкінці статті наводять список використаних джерел, який містить бібліографічні відомості про праці, на які зроблено посилання в тексті. Його оформлення має відповідати вимогам обраного наукового видання.

Опубліковані результати досліджень не завжди є беззаперечними. Наукові статті можуть містити методологічні недоліки, похибки вимірювань, недостатньо обґрунтовані висновки, помилкові інтерпретації або твердження, які потребують подальшої експериментальної перевірки. Одним із важливих механізмів забезпечення якості наукових публікацій є наукове рецензування. Воно передбачає незалежне експертне оцінювання рукопису фахівцями відповідної галузі знань з метою визначення його наукової новизни, актуальності, методологічної обґрунтованості, достовірності результатів, логічності викладу та відповідності профілю й редакційним вимогам видання. За результатами рецензування формулюють зауваження й рекомендації щодо вдосконалення рукопису, а також висновок про можливість його прийняття до друку, необхідність доопрацювання або відхилення.

Поряд із науковими статтями важливими формами письмового представлення та поширення результатів досліджень є тези доповідей, реферати й монографії, кожна з яких має відповідне призначення, структуру та особливості змістового наповнення.

Тези доповіді - це стислий, логічно послідовний виклад основних положень, наукових ідей і результатів дослідження, призначений для представлення на науковій конференції, семінарі, симпозіумі або іншому науковому заході. Їх основна мета полягає в оперативному інформуванні наукової спільноти про зміст

і результати проведеної роботи. Зазвичай тези містять коротке обґрунтування актуальності досліджуваної проблеми, формулювання мети, загальну характеристику використаних методів, виклад основних результатів і висновків. На відміну від повноформатної наукової статті, тези передбачають значно стисліше представлення матеріалу без детального опису всіх етапів дослідження та розгорнутого обговорення отриманих результатів. Їх часто публікують у збірниках матеріалів конференцій до початку або після завершення відповідного наукового заходу.

Реферат - це стислий систематизований виклад змісту одного або кількох наукових документів, який відображає основні положення, фактичні відомості та висновки першоджерел. За своїм призначенням реферати можуть виконувати інформаційну або навчально-аналітичну функцію. Інформаційний реферат призначений для ознайомлення з основним змістом наукової праці без необхідності її повного прочитання. Навчальний реферат передбачає самостійне опрацювання літературних джерел із певної теми, їх порівняльний аналіз, систематизацію та узагальнення.

У навчально-дослідницькій діяльності підготовка реферату сприяє формуванню навичок пошуку, критичного оцінювання та аналітичного опрацювання наукової інформації. Його зміст зазвичай охоплює обґрунтування актуальності обраної теми, характеристику сучасного стану розробленості проблеми, виклад основних теоретичних положень, аналіз наукових підходів і результатів досліджень, а також узагальнювальні висновки. За потреби розглядають історію розвитку відповідного наукового напряму, методи дослідження та можливості практичного використання отриманих знань. Завершальним елементом реферату є список використаних джерел. Його обсяг і структура визначаються цільовим призначенням роботи та встановленими вимогами.

Монографія - це наукове книжкове видання, присвячене поглибленому й системному дослідженню однієї наукової проблеми або комплексу тісно пов’язаних між собою питань. Її зміст ґрунтується на всебічному аналізі теоретичних положень, результатів попередніх досліджень, експериментальних

даних і практичного досвіду. Монографія може містити нові наукові концепції, методологічні підходи, теоретичні узагальнення, експериментально встановлені закономірності та обґрунтовані висновки, які поглиблюють наукові уявлення про досліджуваний об'єкт або процес. Характерною особливістю монографії є комплексність розгляду наукової проблеми, що передбачає послідовне висвітлення її теоретичних засад, сучасного стану досліджень, застосованих методів, отриманих результатів та їх наукової інтерпретації. На відміну від статті, яка зазвичай присвячена окремому аспекту наукової проблеми, монографія дає змогу системно представити результати досліджень, узагальнити накопичений матеріал і сформулювати цілісну наукову концепцію. Основу монографії можуть становити як нові результати досліджень автора або авторського колективу, так і раніше опубліковані наукові положення, систематизовані, критично переосмислені та доповнені новими узагальненнями. При цьому використання раніше оприлюднених матеріалів має супроводжуватися належними бібліографічними посиланнями та дотриманням вимог академічної доброчесності й авторського права. У разі використання результатів досліджень інших авторів, їхніх наукових ідей, теоретичних положень, експериментальних даних, методик, рисунків, таблиць або текстових фрагментів необхідно зазначати відповідні першоджерела. Це дає змогу встановити походження використаної інформації, перевірити обґрунтованість наведених тверджень і визначити внесок попередніх дослідників у розроблення відповідної наукової проблеми. Коректне цитування, достовірне відображення результатів дослідження та недопущення привласнення чужих наукових здобутків є основоположними вимогами академічної доброчесності.

Для книжкових видань застосовують міжнародний стандартний книжковий номер ISBN, а їх бібліографічне й технічне оформлення здійснюють відповідно до чинних стандартів видавничої справи.

За результатами завершених наукових досліджень або окремих етапів науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, виконаних за державним замовленням, договорами з юридичними чи фізичними особами або з ініціативи наукових установ, складають відповідний звіт. Науково-технічний звіт - це

документ, у якому систематизовано відомості про мету, завдання, методологію, перебіг і результати проведеного дослідження, наведено їх аналіз, наукове обґрунтування, висновки та рекомендації щодо подальшого використання. Звіт забезпечує документальну фіксацію результатів наукової діяльності, створює інформаційну основу для оцінювання виконаної роботи та визначення перспектив її практичного застосування.

В Україні структуру та основні правила оформлення науково-технічних звітів установлено національним стандартом ДСТУ 3008:2015 «Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання». Стандарт визначає вимоги до побудови звіту, послідовності розміщення його структурних елементів, викладу текстового матеріалу, оформлення таблиць, рисунків, формул, посилань і додатків.

Відповідно до загальних принципів побудови науково-технічний звіт умовно поділяють на три складові: вступну частину, основну частину та додатки. Вступна частина охоплює титульний аркуш, список авторів, реферат, зміст, перелік скорочень та умовних познак і передмову. Основна частина містить вступ, змістову частину звіту, висновки, рекомендації та перелік джерел посилання. Додатки призначені для розміщення допоміжних матеріалів, які доповнюють основний текст, але через значний обсяг або специфічний характер недоцільні для безпосереднього включення до його змістової частини. Наявність окремих структурних елементів визначається вимогами стандарту та особливостями конкретного дослідження.

Вступ містить обґрунтування актуальності дослідження, характеристику сучасного стану наукової або науково-технічної проблеми та визначення передумов виконання роботи. У ньому висвітлюють основні тенденції розвитку відповідного напряму науки й техніки, аналізують наявні підходи до розв’язання проблеми, зазначають підстави для проведення дослідження, формулюють його мету та основні завдання. За необхідності характеризують зв’язок роботи з іншими дослідженнями, визначають очікувані результати й можливі сфери їх використання. Вступ має забезпечувати логічний перехід від загальної характеристики проблеми до конкретного змісту виконаної роботи.

Змістова частина звіту становить його основний інформаційний компонент, у якому послідовно розкривають теоретичні, методологічні й експериментальні аспекти проведеного дослідження. У ній характеризують об’єкт дослідження, вихідні матеріали, методи та засоби виконання роботи, використане обладнання, умови проведення експериментів, методики вимірювання й способи опрацювання отриманих даних. Залежно від характеру дослідження наводять відомості про конструкцію, принцип дії та технічні характеристики розроблених об’єктів, метрологічне забезпечення, результати випробувань і розрахунків, а також їх теоретичне обґрунтування та наукову інтерпретацію.

У дослідженнях із матеріалознавства особливу увагу приділяють характеристиці хімічного складу матеріалів, їхнього початкового структурного стану, технологічних умов виготовлення та обробки зразків, методів структурного й фазового аналізу, визначення фізичних, механічних та експлуатаційних властивостей. Важливими складовими змістової частини є аналіз впливу технологічних параметрів на формування структури й властивостей матеріалів, оцінювання похибок і невизначеності вимірювань, встановлення закономірностей досліджуваних процесів та порівняння отриманих результатів із відомими науковими даними. Для забезпечення логічної послідовності викладу змістову частину поділяють на розділи, підрозділи, пункти й за необхідності підпункти.

Висновки містять узагальнену оцінку найважливіших наукових і практичних результатів виконаної роботи. У них визначають ступінь досягнення поставленої мети та розв’язання сформульованих завдань, характеризують наукову новизну, достовірність і практичну значущість отриманих результатів. Висновки повинні ґрунтуватися на фактичних результатах дослідження та не містити положень, які не підтверджено матеріалами звіту.

Рекомендації призначені для обґрунтування напрямів подальшого розвитку й практичного використання отриманих результатів. У них можуть формулюватися пропозиції щодо продовження теоретичних або експериментальних досліджень, проведення дослідно-конструкторських і

дослідно-технологічних робіт, створення та випробування дослідних зразків, розроблення нових матеріалів, технологічних процесів, приладів або методик.

Перелік джерел посилання є складовою науково-технічного звіту, яка забезпечує документальне підтвердження використаних наукових положень, методів, експериментальних даних та інших запозичених відомостей. Його розміщують наприкінці основної частини звіту перед додатками. До переліку включають джерела, на які зроблено посилання в тексті, із наведенням необхідних бібліографічних відомостей. Джерела розташовують у порядку їх першого згадування в тексті, а посилання оформлюють відповідно до встановленої системи нумерації та вимог чинних стандартів.

Додатки використовують для розміщення допоміжних матеріалів, необхідних для повнішого розкриття змісту дослідження, але таких, що можуть ускладнювати сприйняття основного тексту. До них можуть належати великі таблиці експериментальних даних, допоміжні розрахунки, алгоритми, програмні коди, протоколи випробувань, методики досліджень, технічні характеристики обладнання, кресленики, схеми та інші документи.

Графічні матеріали, зокрема ескізи, графіки, діаграми, схеми, фотографії, мікроструктурні зображення та кресленики, оформлюють як рисунки. Кожний рисунок повинен мати відповідне позначення, порядковий номер і, за потреби, назву та пояснювальні дані. Рисунок розміщують безпосередньо після тексту, у якому на нього вперше посилаються, або на наступній сторінці. Його назву подають під графічним матеріалом відповідно до встановлених правил.

Невіддільною складовою підготовки науково-технічного звіту є дотримання принципів академічної доброчесності та правил цитування. У разі використання наукових ідей, теоретичних положень, експериментальних даних, методик, рисунків, таблиць або текстових фрагментів інших авторів необхідно зазначати відповідні джерела. Це дає змогу встановити походження використаної інформації, перевірити обґрунтованість наведених тверджень і розмежувати власні результати дослідника та здобутки інших науковців. Дослівне відтворення фрагментів чужого тексту оформлюють як цитату із зазначенням джерела. Короткі цитати зазвичай беруть у лапки, тоді як розгорнуті можуть подавати

окремим текстовим блоком відповідно до прийнятого стилю оформлення. Скорочення цитованого тексту допускається за умови збереження його первинного змісту та належного позначення пропущених фрагментів, наприклад трикрапкою у квадратних дужках.

Дотримання встановлених вимог до структури, змісту й оформлення звіту забезпечує повноту та достовірність представленої інформації, підвищує її доступність для наукової спільноти й створює необхідні передумови для відтворення результатів дослідження та їх практичного впровадження.

Процес формування нового наукового знання нерозривно пов’язаний із пошуком, накопиченням, аналізом і систематизацією значних обсягів інформації. Наукове дослідження передбачає не лише отримання нових результатів, а й ґрунтовне вивчення попередніх наукових досягнень, які становлять теоретичну та інформаційну основу подальшої дослідницької діяльності. Постійне зростання обсягів наукової інформації зумовлює необхідність удосконалення методів її пошуку, опрацювання та зберігання. Важливу роль у забезпеченні цих процесів відіграють бібліотечні каталоги, бібліографічні покажчики, реферативні й наукометричні бази даних, електронні бібліотеки, інституційні репозитарії та спеціалізовані інформаційно-пошукові системи.

Інформаційний пошук є невіддільною складовою наукового дослідження і становить цілеспрямований процес виявлення, відбору та отримання документів і відомостей, необхідних для розв’язання поставлених наукових завдань. На початковому етапі дослідник формулює основні питання, що потребують вивчення, визначає ключові поняття й терміни, встановлює доцільний період охоплення літератури та обирає джерела вітчизняної й зарубіжної наукової інформації.

Пошук необхідної інформації здійснюють із використанням різноманітних джерел і каналів наукової комунікації. До них належать бібліотечні фонди й електронні каталоги, спеціалізовані бази даних, наукові журнали, монографії, підручники, навчальні посібники, нормативні документи, патентні бази та електронні інформаційні ресурси. Додатковими засобами отримання наукової

інформації є участь у конференціях, семінарах і симпозіумах, професійне спілкування з фахівцями відповідної галузі, вивчення статистичних матеріалів, технічної та виробничої документації. Комплексне використання різних інформаційних джерел дає змогу повніше охопити досліджувану проблему, виявити наявні наукові підходи та визначити недостатньо вивчені аспекти.

Важливим етапом інформаційного забезпечення дослідження є критичне опрацювання відібраних джерел. Воно передбачає оцінювання їхньої тематичної відповідності, достовірності, актуальності, наукової новизни та методологічної обґрунтованості. У процесі аналізу дослідник зіставляє результати різних авторів, виявляє спільні положення й суперечності, визначає обмеження застосованих методів і встановлює ступінь розробленості наукової проблеми. Опрацювання джерел має бути систематичним і здійснюватися протягом усього періоду дослідження, оскільки поява нових наукових результатів може потребувати уточнення вихідних положень, методів або напрямів подальшої роботи. Завершальним етапом інформаційного аналізу є систематизація отриманих відомостей і формування обґрунтованих узагальнень, необхідних для розроблення власної наукової концепції.

Процеси отримання, збирання, опрацювання, систематизації, зберігання, пошуку, використання та поширення інформації становлять основу інформаційної діяльності. У сфері науки й техніки ці процеси забезпечуються відповідною системою інформаційних ресурсів, установ, організацій, технічних засобів, каналів комунікації та нормативно-правових механізмів.

Відповідно до Закону України «Про науково-технічну інформацію» науково-технічна інформація охоплює відомості та дані про вітчизняні й зарубіжні досягнення науки, техніки та виробництва, отримані в процесі науково-дослідної, дослідно-конструкторської, проєктно-технологічної, виробничої та громадської діяльності, які можуть бути зафіксовані на матеріальних носіях або представлені в електронному вигляді.

Інформаційні ресурси науково-технічної інформації становлять систематизовані зібрання науково-технічної літератури, документації та інших інформаційних матеріалів, призначених для зберігання, пошуку, опрацювання й

використання. До їх складу належать книги, брошури, наукові періодичні видання, патентна й нормативно-технічна документація, промислові каталоги, конструкторські матеріали, звіти про науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи, депоновані рукописи, переклади науково-технічної літератури та інші документи.

Важливе місце в системі науково-технічної інформації посідає нормативно-технічна документація, яка встановлює вимоги до продукції, матеріалів, технологічних процесів, методів випробувань, вимірювань, контролю якості та інших аспектів виробничої й науково-технічної діяльності. До цієї групи належать національні та міжнародні стандарти, технічні умови, технічні регламенти, методики вимірювання, інструкції та інші документи нормативного або регламентувального характеру. Використання таких джерел забезпечує узгодженість технічних вимог, порівнюваність результатів досліджень, належний рівень метрологічного забезпечення та відповідність застосованих методів установленим нормам.

Окрему категорію інформаційних ресурсів становить патентна інформація, що містить відомості про винаходи, корисні моделі, технічні рішення та результати інноваційної діяльності. Основними джерелами такої інформації є описи до патентів, опубліковані заявки, патентні реєстри, офіційні бюлетені й спеціалізовані патентні бази даних. Патент на винахід або корисну модель є охоронним документом, який засвідчує пріоритет, авторство та права на відповідний об’єкт інтелектуальної власності відповідно до законодавства. Патентні документи часто містять докладні відомості про конструкцію, склад, принцип дії або спосіб виготовлення технічного об’єкта, а також характеристику його відмінностей від відомих аналогів.

Організаційною основою формування, зберігання та поширення таких ресурсів в Україні є національна система науково-технічної інформації. Відповідно до законодавчого визначення вона становить організаційно-правову структуру, за допомогою якої формується державна інформаційна політика та здійснюється координація діяльності зі створення, використання, зберігання й поширення національних ресурсів науково-технічної інформації з урахуванням

інтересів національної безпеки. Її функціонування спрямоване на забезпечення доступності науково-технічних знань, розвиток інформаційної інфраструктури та створення умов для ефективного використання результатів наукової й інноваційної діяльності.

Основними завданнями національної системи науково-технічної інформації є формування й розвиток довідково-інформаційних фондів на основі вітчизняних і зарубіжних джерел, забезпечення інформаційних потреб громадян, наукових установ, підприємств та органів державної влади, а також організація збирання, аналітико-синтетичного опрацювання, зберігання, пошуку й поширення науково-технічних відомостей.

Важливу роль у функціонуванні національної системи науково-технічної інформації відіграє Український інститут науково-технічної експертизи та інформації (УкрІНТЕІ) - державна наукова установа, що належить до сфери управління Міністерства освіти і науки України. Основні напрями його діяльності охоплюють інформаційно-аналітичне забезпечення наукової та інноваційної діяльності, організацію науково-технічної експертизи, формування спеціалізованих баз даних, державну реєстрацію та облік науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, а також інформаційне супроводження результатів наукової діяльності. Інститут сприяє поширенню відомостей про перспективні наукові розробки, інноваційні технології та можливості їх практичного використання.

Складником сучасної інформаційної інфраструктури є Національний репозитарій академічних текстів, функціонування якого забезпечує можливість накопичення, систематизації, збереження та пошуку результатів академічної діяльності. Його інформаційні ресурси охоплюють дисертації, наукові статті, монографії, звіти про науково-дослідні роботи, навчальні й науково-методичні видання та інші академічні тексти. Використання репозитаріїв сприяє розширенню доступу до наукової інформації, підвищенню прозорості дослідницької діяльності, поширенню результатів досліджень і дотриманню принципів академічної доброчесності.

Однією з провідних установ інформаційного забезпечення наукової й науково-технічної діяльності є Державна науково-технічна бібліотека України (ДНТБ України). Її діяльність спрямована на формування, збереження, систематизацію та надання доступу до національних і зарубіжних інформаційних ресурсів у галузях науки, техніки та виробництва. Бібліотека забезпечує бібліографічне й інформаційно-довідкове обслуговування користувачів, здійснює опрацювання науково-технічної літератури, формує електронні каталоги та спеціалізовані інформаційні фонди. Інформаційні ресурси ДНТБ України охоплюють наукові книжкові й періодичні видання, патентну та нормативно-технічну документацію, промислові каталоги, довідкові матеріали, бібліографічні покажчики та інші джерела науково-технічної інформації. Важливе значення мають електронні каталоги, цифрові інформаційно-пошукові засоби та доступ до спеціалізованих наукових ресурсів, які сприяють ефективному пошуку й використанню необхідних відомостей.

Особливим способом документального збереження та введення результатів наукових досліджень в інформаційний обіг є депонування наукових робіт. Депонування передбачає передавання наукового рукопису на зберігання до уповноваженої установи або спеціалізованого інформаційного фонду з метою забезпечення його обліку, збереження та можливості подальшого інформаційного використання. Традиційно цей спосіб застосовували для наукових праць вузькоспеціалізованого характеру, видання яких окремим друкованим тиражем було недоцільним. Депонування дає змогу документально зафіксувати факт існування наукової роботи на певну дату, зберегти її зміст та забезпечити бібліографічний облік. Відомості про депоновані рукописи можуть поширюватися через бібліографічні покажчики, реферативні видання, електронні каталоги й інформаційні бази даних.

У сучасних умовах функції довготривалого збереження й поширення наукових результатів дедалі ширше реалізуються за допомогою електронних репозитаріїв, цифрових архівів і платформ відкритого доступу. Такі ресурси забезпечують документальну фіксацію наукових матеріалів, їх бібліографічну ідентифікацію, пошук і використання відповідно до встановлених умов доступу.

Основними завданнями інституційних репозитаріїв є забезпечення довготривалого збереження результатів наукової діяльності, підвищення їх доступності, можливостей подальшого використання.

Подальший розвиток цифрових інформаційних ресурсів сприяв широкому впровадженню електронних бібліотек. На відміну від традиційних бібліотечних фондів, доступ до яких часто потребує безпосереднього відвідування установи, електронні бібліотеки забезпечують можливість дистанційного використання інформаційних ресурсів. Їх важливими перевагами є оперативність отримання документів, розширені засоби інформаційного пошуку, можливість одночасного звернення багатьох користувачів до цифрових матеріалів і зручність інтеграції інформаційних ресурсів у наукову та освітню діяльність. Завдяки використанню метаданих, систем індексування й інформаційно-пошукових засобів користувач може здійснювати пошук за тематикою, ключовими словами, автором, назвою документа, роком видання, типом публікації та іншими характеристиками. Це сприяє скороченню витрат часу на виявлення необхідних джерел, підвищенню повноти інформаційного пошуку та полегшенню подальшого аналітичного опрацювання знайдених матеріалів. Використання електронних бібліотек надає дослідникам можливість працювати з інформаційними ресурсами незалежно від географічного розташування установ, у яких вони зберігаються. Особливого значення це набуває під час опрацювання рідкісних, архівних і спеціалізованих видань, доступ до оригіналів яких може бути обмеженим. Цифрові колекції також забезпечують зручне використання матеріалів, створених безпосередньо в електронній формі та полегшують систематизацію великих обсягів наукової інформації.

Прикладом національного інформаційного ресурсу є Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського, яка забезпечує доступ до електронних каталогів, бібліографічних баз даних, цифрових колекцій та інших науково-інформаційних ресурсів. Її електронні системи охоплюють відомості про книжкові й періодичні видання, дисертації, автореферати, наукові статті та інші документи. Наявність розвиненого електронного довідково-пошукового апарату

сприяє використанню бібліотечних фондів у фундаментальних і прикладних дослідженнях.

Поряд із письмовими й електронними формами поширення наукових результатів важливу роль у розвитку науки відіграє безпосередня професійна комунікація, зокрема наукові дискусії, конференції, симпозіуми, семінари, конгреси та з'їзди. Такі форми наукового спілкування забезпечують оперативний обмін результатами досліджень, їх колективне обговорення, критичне оцінювання та формування нових наукових підходів. Наукова дискусія є важливим засобом перевірки обґрунтованості висунутих положень, виявлення суперечностей у наявних уявленнях і визначення перспективних напрямів подальших досліджень.

Наукова конференція - це організований захід, під час якого дослідники, фахівці-практики та інші учасники представляють і обговорюють результати наукової діяльності, актуальні проблеми певної галузі знань та можливі напрями їх розв'язання. За тематикою розрізняють спеціалізовані конференції, присвячені окремим науковим проблемам, і міждисциплінарні заходи, що об'єднують представників різних галузей науки.

Науковий семінар є формою колективного обговорення певної наукової проблеми, результатів дослідження або підготовлених доповідей у порівняно невеликому колі фахівців. На відміну від конференцій, семінари зазвичай передбачають докладніший аналіз представленого матеріалу, активну участь слухачів у дискусії та безпосередній обмін науковими аргументами. Їх проведення сприяє поглибленню професійних знань, удосконаленню методологічних підходів і формуванню спільних напрямів дослідницької діяльності.

Важливою формою представлення результатів дослідження під час наукових заходів є наукова доповідь - підготовлений усний виклад основних положень, методів, результатів і висновків наукової роботи. За змістом і логікою побудови наукова доповідь має багато спільного з науковою статтею, однак характеризується особливостями, зумовленими усною формою комунікації та обмеженим часом виступу. Її структура зазвичай охоплює коротке

обґрунтування актуальності проблеми, формулювання мети дослідження, характеристику застосованих методів, представлення найважливіших результатів та узагальнювальні висновки. Для супроводження виступу використовують презентації, графіки, діаграми, таблиці, схеми, фотографії, мікроструктурні зображення та інші ілюстративні матеріали.

Цифровізація наукової комунікації також сприяла розвитку електронних наукових журналів, платформ попереднього оприлюднення рукописів, електронних архівів, репозитаріїв, професійних наукових мереж і персональних цифрових профілів дослідників. Електронні наукові видання, цифрові архіви, репозитарії та дистанційні форми професійної взаємодії істотно розширюють можливості поширення й обговорення результатів досліджень.

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?

8.ЗБИРАННЯ ТА ВІДБІР НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Одним із важливих етапів наукового дослідження є збирання, відбір, аналіз і систематизація науково-технічної інформації. Результативність цієї роботи залежить від належної організації інформаційного пошуку: визначення його тематичних і хронологічних меж, вибору інформаційних ресурсів та встановлення критеріїв оцінювання джерел відповідно до теми, мети й завдань дослідження. Пошук здійснюють із використанням бібліотечних фондів і каталогів, спеціалізованих баз даних, електронних бібліотек, репозитаріїв та інших інтернет-ресурсів. За обсягом охоплення він може бути комплексним, спрямованим на виявлення максимально повного кола джерел із певної проблеми, або вибірковим, орієнтованим на окремі види документів: статті, патенти, дисертації, матеріали конференцій, монографії чи навчальні видання.

Бібліотеки забезпечують формування, опрацювання, зберігання документів та інформаційне обслуговування користувачів. Основу їхньої діяльності становить бібліотечний фонд - упорядкована сукупність документів на різних носіях, сформована відповідно до профілю бібліотеки. Для пошуку документів використовують бібліотечні каталоги - систематизовані сукупності бібліографічних записів, що відображають склад окремого фонду або об’єднаних фондів кількох бібліотек.

За способом упорядкування записів розрізняють алфавітні, систематичні та інші каталоги. Алфавітний каталог дає змогу знайти документ за прізвищем автора, найменуванням організації або назвою видання. Систематичний каталог об’єднує документи за галузями знань відповідно до прийнятої бібліотечно-бібліографічної класифікації. Він особливо корисний на початкових етапах дослідження, коли необхідно окреслити проблематику, визначити напрями пошуку й сформувати попередній список літератури.

У сучасних бібліотеках поряд із традиційними картковими каталогами використовують електронні каталоги, які забезпечують пошук за сукупністю бібліографічних і тематичних ознак. Однією з найпоширеніших міжнародних

систем класифікації документів є Універсальна десяткова класифікація (УДК). Її перше повне видання опубліковано 1905 року. УДК - ієрархічна аналітико-синтетична система, що охоплює галузі знань і сфери практичної діяльності. Її використовують для індексування та систематизації документів у бібліотеках, інформаційних центрах, наукових установах, видавництвах і бібліографічних базах даних. Цифрові індекси дають змогу формалізовано відображати тематику документів, у тому числі міждисциплінарних; система періодично оновлюється відповідно до розвитку науки й техніки.

Десятковий принцип УДК передбачає поділ сукупності знань на десять основних класів, позначених цифрами від 0 до 9. Кожен клас послідовно деталізується на підкласи. Для зручності запису довгих індексів цифри групують по три, відокремлюючи групи крапками. Основні класи УДК:

0 - Загальний відділ.

1 - Філософія. Психологія.

2 - Релігія. Теологія.

3 - Суспільні науки.

4 - Вільний клас (резерв).

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 кожного класу застосовують принцип переходу від загального до конкретного. Наприклад, машинобудування належить до класу 6; відповідний тематичний напрям представлений у межах індексу 621 «Машинобудування. Електротехніка. Ядерна техніка». Для точнішої характеристики документа застосовують деталізовані й, за потреби, складені індекси, утворені за правилами УДК із поєднанням основних та допоміжних позначень. Практичне використання УДК передбачає визначення теми пошуку, вибір відповідних рубрик і встановлення індексів, за якими здійснюють пошук документів. Так, навчальному посібнику «Методологія наукових досліджень»

може відповідати індекс 001.8(07): 001 позначає науку та знання загалом, 001.8 - методологію наукового дослідження, а (07) - навчальне призначення видання. Конкретний індекс уточнюють з урахуванням змісту документа та чинних таблиць УДК.

Поряд із тематичною класифікацією застосовують стандартизовані ідентифікатори видань. ISBN (International Standard Book Number) - Міжнародний стандартний номер книги - призначений для ідентифікації окремих книжкових видань, у тому числі друкованих та електронних, відповідно до правил системи. Сучасний ISBN містить 13 цифр, об'єднаних у п'ять елементів: префікс, ідентифікатор реєстраційної групи, видавця, видання та контрольну цифру. Реєстраційна група може відповідати країні, регіону або мовній спільноті. Різним форматам і виданням книги за встановленими правилами можуть присвоювати окремі ISBN.

Для серіальних, зокрема періодичних, видань використовують ISSN (International Standard Serial Number) - Міжнародний стандартний номер серіального видання. На відміну від індексу УДК, який характеризує тематику документа, ISBN та ISSN виконують насамперед ідентифікаційну функцію.

Розвиток цифрових технологій розширив доступ до науково-технічної інформації та прискорив її пошук і опрацювання. Інтернет поєднує інформаційні ресурси університетів, наукових установ, бібліотек, архівів, видавництв та інших організацій. До основних інструментів пошуку належать електронні каталоги, наукові пошукові системи, бібліографічні й реферативні бази даних, цифрові репозитарії, електронні бібліотеки, патентні та нормативні інформаційні ресурси.

Електронні бібліотеки забезпечують організований доступ до цифрових колекцій документів, а інституційні репозитарії призначені для накопичення, збереження й поширення наукових та освітніх матеріалів установ. Залежно від правового статусу документів ресурси можуть надавати бібліографічний опис, анотацію або повний текст. Сам факт розміщення документа в електронній системі не засвідчує його наукової якості, тому знайдені матеріали необхідно критично оцінювати.

Пошук в електронних системах проводять за ключовими словами, прізвищами авторів, назвами публікацій, роками видання, видами документів, тематичними рубриками та класифікаційними індексами. Пошуковий запит доцільно формувати на основі основних понять дослідження, їхніх синонімів і термінологічних відповідників іншими мовами. Для підвищення точності застосовують логічні оператори, пошук за словосполученнями та доступні в конкретній системі фільтри.

Поширеним інструментом виявлення академічних документів є Google Академія (Google Scholar). Система здійснює пошук статей, монографій, дисертацій, матеріалів конференцій, препринтів та інших публікацій, розміщених на сайтах видавництв, університетів і в репозитаріях. Вона також відображає відомості про цитування, однак її автоматизоване охоплення і підходи до формування даних відрізняються від спеціалізованих реферативних і цитатних баз. Детальніше ці системи та їхні аналітичні функції розглянуто в розділі 9.

Відбір джерел здійснюють за критеріями тематичної відповідності, актуальності, достовірності, наукової новизни, методологічної обґрунтованості та повноти подання результатів. Важливо враховувати авторство, характер видання, наявність рецензування, коректність посилань і можливість перевірити наведені дані. Під час аналізу публікацій слід відрізняти первинні результати досліджень від оглядових та навчальних матеріалів, а також зіставляти висновки різних авторів. Отже, інформаційний пошук є не механічним накопиченням документів, а послідовним процесом виявлення, перевірки, відбору й систематизації джерел. Поєднання бібліотечних класифікацій, електронних пошукових засобів та критичного аналізу забезпечує формування надійної інформаційної основи наукового дослідження.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 8

1. Які основні етапи передбачає збирання, відбір і систематизація науково-технічної інформації?
2. Які джерела інформації можуть використовуватися під час наукового дослідження?
3. У чому полягає різниця між тематичним добором усіх релевантних джерел і добором джерел за видом документа?
4. Що таке бібліотечний фонд і яке його значення для наукової роботи?
5. Яке призначення має бібліотечний каталог?
6. Чим відрізняється алфавітний каталог від систематичного каталогу?
7. Які основні функції виконує систематичний бібліотечний каталог?
8. Що таке Універсальна десяткова класифікація документів і для чого вона використовується?
9. Яке значення має ISBN для ідентифікації книжкових видань?
10. Які можливості для пошуку наукової інформації надають Google Scholar, наукові бази даних і спеціалізовані наукові портали?

9.НАУКОВА КОМУНІКАЦІЯ, БІБЛІОМЕТРІЯ ТА НАУКОМЕТРИЧНІ РЕСУРСИ В НАУКОВІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

Створення нових наукових теорій, конкурентоспроможних зразків техніки, технологій і матеріалів ґрунтується на всебічному аналізі науково-технічної інформації.

Науково-технічна інформація - це документовані або публічно оприлюднені відомості про результати наукової, науково-технічної та виробничої діяльності, досягнення науки й техніки, нові технології, матеріали та способи їх застосування. Одним з основних результатів науково-дослідної діяльності є наукові публікації, у яких висвітлюють методи проведення досліджень, отримані результати, їх інтерпретацію та значення для подальшого розвитку відповідної галузі знань.

Ефективність наукової діяльності значною мірою залежить від своєчасного отримання дослідником достовірної інформації про сучасний стан і перспективні напрями досліджень у відповідній галузі, а також від можливості обговорення власних наукових ідей, проміжних і кінцевих результатів із представниками фахової спільноти. Ці процеси забезпечує наукова комунікація - обмін знаннями, ідеями, методами й результатами досліджень між науковцями, дослідницькими колективами, установами та іншими учасниками наукової діяльності. Її основними функціями є поширення наукових результатів, експертне оцінювання, організація дискусій, формування професійних зв’язків і розвиток наукового знання.

До основних документальних форм представлення наукових результатів належать статті, монографії, матеріали конференцій, дисертації, звіти про науково-дослідні роботи та патентні документи. Їх поширюють через наукові журнали, видавництва, конференції, семінари, бібліотеки, електронні платформи й професійні мережі.

Поряд із документальним обміном важливе значення має безпосередня взаємодія дослідників. У структурі наукової комунікації виокремлюють п’ять взаємопов’язаних елементів:

1. Комунікант - особа або група осіб, які формують і передають наукове повідомлення.

2. Комунікат - повідомлення, у якому представлено наукову інформацію (стаття, доповідь, монографія, дисертація, звіт, електронний документ тощо).

3. Канал комунікації - засіб або спосіб передавання повідомлення.

4. Реципієнт - особа або група осіб, які отримують та інтерпретують повідомлення.

5. Зворотний зв'язок - реакція реципієнта у формі рецензування, обговорення, цитування, використання результатів або продовження дослідження.

Комунікантами можуть бути окремі дослідники, наукові групи, лабораторії, університети й наукові установи. Їхній професійний авторитет залежить від кваліфікації, якості й значущості наукових результатів, досвіду, участі у спільних проєктах та визнання фаховою спільнотою. Результативність передавання повідомлення, своєю чергою, визначається точністю термінології, логічністю викладу й відповідністю способу подання підготовці реципієнта. Наукові повідомлення можуть включати текст, таблиці, графіки, схеми, зображення та математичні моделі.

За характером взаємодії розрізняють пряму й опосередковану наукову комунікацію. Пряма відбувається під час дискусій, семінарів і робочих зустрічей; опосередкована - через публікації, електронні ресурси та інші інформаційні засоби.

За організаційними зв'язками комунікація може бути вертикальною, наприклад між науковим керівником і виконавцем дослідження, або горизонтальною - між дослідниками й колективами приблизно однакового організаційного рівня.

За ступенем регламентації виокремлюють формальну й неформальну комунікацію. Формальна здійснюється через організовані процедури документування, експертного оцінювання та оприлюднення результатів: публікацію статей і монографій, захист дисертацій, оприлюднення звітів. Неформальна охоплює особисті фахові контакти, листування, бесіди, робочі

зустрічі та професійне спілкування в мережі; її перевагами є оперативність і можливість швидкого зворотного зв'язку.

За способом фіксації інформації розрізняють документну комунікацію, яка спирається на зафіксовані повідомлення, і недокументну, що відбувається переважно в усній формі. Зазначені класифікації характеризують різні аспекти одного процесу й можуть поєднуватися.

Розвиток комп'ютерних і телекомунікаційних технологій став важливою передумовою переходу від традиційних способів поширення наукової інформації до сучасних електронних інформаційно-комунікаційних систем. Інтернет-технології істотно розширили можливості доступу до наукових джерел, оперативного обміну результатами досліджень, міжнародної співпраці та організації спільної наукової діяльності.

Застосування електронних інформаційних ресурсів сприяє скороченню часу пошуку необхідних наукових відомостей, полегшує взаємодію між дослідниками та забезпечує доступ до значних масивів наукової інформації незалежно від територіального розташування користувачів.

До найпоширеніших електронних засобів наукової комунікації належать відеоконференції, форуми, блоги, електронна пошта, професійні соціальні мережі, інституційні репозитарії, електронні бібліотеки та спеціалізовані платформи для обміну дослідницькими даними.

Відеоконференція - це форма дистанційної комунікації в режимі реального часу, що забезпечує одночасну передачу аудіо- та відеоінформації між учасниками. Відеоконференції використовують для проведення наукових конференцій, семінарів, захистів наукових робіт, обговорення дослідницьких проєктів і робочих нарад незалежно від географічного розташування учасників.

Інтернет-форум - це електронний інформаційний ресурс, призначений для тематичного обговорення питань, обміну повідомленнями та накопичення інформації в межах певної спільноти. Повідомлення на форумах зазвичай систематизують за темами, а організацію та контроль обговорень здійснюють адміністратори або модератори. У науковому середовищі форуми можуть

використовуватися для обговорення методик досліджень, результатів експериментів і професійних проблем.

Блог - це форма електронної публікації, у межах якої автор або група авторів періодично розміщує матеріали певної тематики. Наукові блоги використовують для популяризації результатів досліджень, висвітлення актуальних наукових проблем, обміну професійним досвідом та обговорення нових ідей. Можливість коментування матеріалів забезпечує зворотний зв’язок між авторами й читачами.

Електронна пошта - один з основних засобів асинхронної електронної комунікації, який забезпечує передавання текстових повідомлень і файлів різних форматів. У науковій діяльності її використовують для професійного листування, надсилання рукописів, рецензій, результатів досліджень, організаційних повідомлень та матеріалів наукових заходів.

Сучасний етап розвитку наукової комунікації характеризується активним упровадженням цифрових технологій, автоматизованих методів пошуку інформації та інструментів штучного інтелекту. Особливого значення ці технології набувають у матеріалознавстві, де дослідження часто супроводжуються накопиченням значних обсягів експериментальних, розрахункових і бібліографічних даних.

Кількісне дослідження наукових документів та зв’язків між ними здійснюють методами бібліометрії, а ширше дослідження кількісних характеристик науки - методами наукометрії. Бібліометрія застосовує математичні й статистичні методи для аналізу публікацій, бібліографічних даних та інформаційних зв’язків. Вона дає змогу досліджувати публікаційну активність, тематичну структуру наукової літератури, авторство й співавторство, цитування та взаємодію дослідницьких колективів. До основних об’єктів бібліометричного аналізу належать бібліографічні характеристики документів, кількість публікацій і цитувань, мережі співавторства, співцитування та бібліографічного поєднання. Аналіз таких мереж допомагає виявляти структуру наукових напрямів, зв’язки між публікаціями й інтенсивність співпраці між дослідниками та установами.

Наукометрія вивчає закономірності розвитку науки, структуру й динаміку наукової діяльності, результати досліджень та взаємозв’язки між учасниками

наукового процесу. Вона широко використовує бібліометричні дані, але не обмежується аналізом публікацій: до її предмета можуть належати також інші кількісні характеристики дослідницької діяльності. Отримані результати застосовують для моніторингу наукових напрямів, інформаційного забезпечення планування досліджень і комплексного оцінювання наукової діяльності.

Розвиток цифрових технологій істотно розширив можливості проведення таких досліджень. Автоматизація пошуку й аналізу бібліографічних даних, створення електронних баз наукових публікацій і вдосконалення програмних засобів оброблення інформації забезпечили можливість дослідження великих масивів наукових документів та встановлення складних взаємозв'язків між ними.

Наукометричні показники - це кількісні характеристики, які використовують для аналізу публікаційної активності, цитованості, наукової співпраці та впливу результатів дослідницької діяльності. Вони можуть характеризувати окремих авторів, наукові колективи, установи, журнали, публікації та наукові напрями. Наукометричні показники широко застосовують під час оцінювання результативності наукової діяльності.

Одним із центральних понять бібліометрії є цитування - використання в науковій праці ідей, текстів, методів, формул, таблиць та інших результатів із належним посиланням на першоджерело. Воно забезпечує простежуваність джерел, зв'язок між дослідженнями й дотримання академічної доброчесності. Кількість цитувань відображає увагу до певної праці, проте не є безпосереднім доказом її достовірності або якості. Вона залежить від дисципліни, тематики, віку публікації, чисельності наукової спільноти й особливостей практики цитування.

Для поєднаної характеристики публікаційної активності й цитованості застосовують індекс Гірша (h-індекс), запропонований 2005 року фізиком Хорхе Гіршем. Індекс дорівнює h, якщо дослідник має щонайменше h публікацій, кожну з яких процитовано не менше ніж h разів. Наприклад, h-індекс 5 означає наявність принаймні п'яти праць із не менш ніж п'ятьма цитуваннями кожної. Показник залежить від тривалості наукової кар'єри, дисципліни й повноти охоплення джерел базою даних, а тому не може слугувати самостійним

критерієм якості досліджень. Комплексне оцінювання наукової діяльності може також враховувати загальну кількість публікацій, показники цитованості видань, міжнародну співпрацю, участь у дослідницьких проєктах, залучення грантів, наукові відзнаки та експертну репутацію.

Кількісні індикатори необхідно доповнювати аналізом наукової новизни, методологічної якості, достовірності результатів і їхнього практичного або теоретичного значення. Порівняння показників між різними дисциплінами без належного нормування може призводити до хибних висновків.

Для пошуку публікацій, аналізу цитувань і встановлення бібліографічних зв'язків широко використовують міжнародні інформаційно-аналітичні ресурси Web of Science, Scopus і Google Scholar. Вони відрізняються політикою охоплення джерел, методами індексації й аналітичними можливостями; відповідно, кількість публікацій і цитувань того самого автора в цих системах може бути різною.

Web of Science - комерційна інформаційно-аналітична платформа, основною цитатною базою якої є Web of Science Core Collection. Вона охоплює відібрані наукові журнали, книги й матеріали конференцій із різних галузей знань, забезпечує аналіз цитувань, публікаційних потоків і дослідницької співпраці.

Scopus - комерційна реферативна та цитатна база даних компанії Elsevier. Вона містить бібліографічні відомості про статті, матеріали конференцій, книги та інші документи, надає інструменти пошуку, аналізу цитувань, авторських профілів і публікаційної активності установ. Відмінності між Scopus і Web of Science необхідно враховувати під час порівняння результатів бібліометричних досліджень.

Google Scholar, розглянутий у розділі 8 як пошуковий інструмент, охоплює широкий спектр академічних документів за допомогою автоматизованої індексації. Його цитатні дані та авторські профілі корисні для орієнтовного аналізу видимості публікацій, але можуть містити дублікати або неточності; тому результати потребують перевірки.

Індексація журналу чи окремої публікації в певній системі свідчить про їх включення до її інформаційного масиву, а не гарантує якість кожної роботи.

Засобом систематизації відомостей про наукову діяльність є авторський профіль - персоналізований запис у бібліографічній, наукометричній або іншій інформаційній системі. Він може містити інформацію про публікації, цитування, індекс Гірша, афіліацію та наукову співпрацю. Такі профілі доступні, зокрема, у Google Scholar, Scopus та Web of Science Researcher Profiles; їхні функції й повнота даних відрізняються. Коректність профілю залежить також від усунення помилкових записів і дублікатів.

ORCID (Open Researcher and Contributor ID) - міжнародна система постійних цифрових ідентифікаторів дослідників. Ідентифікатор містить 16 символів, останній із яких є контрольною цифрою або літерою X. Він допомагає однозначно розрізняти авторів незалежно від збігів імен, варіантів транслітерації та зміни місця роботи. ORCID є засобом ідентифікації автора, а не показником його наукового рейтингу.

В Україні прикладом інформаційно-аналітичного використання бібліометричних даних є система «Бібліометрика української науки», започаткована 2014 року за участю фахівців Національної бібліотеки України імені В. І. Вернадського. Вона була створена для систематизації доступних бібліометричних відомостей про українських науковців, колективи та установи. Такі системи можуть допомагати відстежувати публікаційну активність і тенденції розвитку наукових напрямів; їхні результати залежать від повноти та якості вихідних даних.

Для характеристики цитованості наукових журналів використовують імпакт-фактор (Journal Impact Factor, JIF). За загальним принципом він відображає співвідношення цитувань у певному році публікацій журналу за два попередні роки до кількості визначених категорій публікацій у цих роках; точний розрахунок здійснюють за методикою постачальника показника. Імпакт-фактор застосовують переважно для порівняння журналів у межах споріднених предметних категорій. Він не є оцінкою якості конкретної статті чи автора, а відмінності між галузями обмежують можливість прямого порівняння.

Періодичні видання з матеріалознавства забезпечують поширення результатів досліджень складу, структури, властивостей, технологій одержання

та оброблення матеріалів. Серед міжнародних журналів цієї тематики можна назвати Nature Reviews Materials (оглядові праці), Bulletin of Materials Science, Diamond and Related Materials, Sensors and Materials, Advanced Materials, Journal of Materials Science, Materials Today, Acta Materialia та Journal of Materials Research. Вони охоплюють як широке коло матеріалознавчих проблем, так і окремі напрями - фізику та хімію матеріалів, функціональні покриття, наноматеріали, сенсорні системи й технології матеріалів.

До українських видань, що висвітлюють відповідні дослідження, належать «Успіхи фізики металів», «Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології», «Надтверді матеріали», «Фізика і хімія твердого тіла», «Хімія, фізика та технологія поверхні» та «Функціональні матеріали».

Наявність конкретного журналу в Scopus або Web of Science слід перевіряти за актуальними офіційними переліками цих систем. Під час вибору видання для публікації необхідно оцінювати його відповідність тематиці роботи, редакційну політику, рецензування, індексацію та вимоги до рукописів.

Сучасна наукова комунікація активно використовує цифрові канали: відеоконференції, форуми, блоги, електронну пошту, професійні соціальні мережі й спеціалізовані платформи обміну дослідницькими даними.

Нові можливості для наукової комунікації й аналізу інформації створюють засоби автоматизованої обробки текстів і штучного інтелекту. Зокрема, методи оброблення природної мови (Natural Language Processing, NLP) використовують для класифікації наукових документів, вилучення даних і виявлення зв’язків між поняттями. У матеріалознавстві такі методи дають змогу отримувати зі статей структуровані відомості про склад матеріалів, способи синтезу, режими оброблення, умови експериментів, структуру та властивості. Ці дані можуть слугувати основою для спеціалізованих баз знань, порівняння результатів і формування нових дослідницьких гіпотез. Прикладом цифрового дослідницького ресурсу в матеріалознавстві є Materials Project - платформа розрахункових даних про неорганічні матеріали, створена за участю Національної лабораторії імені Лоуренса в Берклі (США). Вона містить результати комп’ютерного моделювання кристалічних структур, електронних,

магнітних, термодинамічних та інших характеристик. Такі відомості використовують для порівняння матеріалів, попереднього відбору перспективних складів і планування експериментальних досліджень. Розрахункові прогнози при цьому необхідно перевіряти з урахуванням припущень моделей та експериментальних даних.

Наукова комунікація забезпечує поширення, критичне обговорення й подальше використання результатів досліджень, а бібліометрія та наукометрія надають інструменти кількісного аналізу відповідних інформаційних потоків. Поєднання цих інструментів із якісним експертним оцінюванням і сучасними цифровими технологіями сприяє обґрунтованій організації наукової діяльності та розвитку матеріалознавчих досліджень.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 9

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?

10.ВІДКРИТА НАУКА

Відкрита наука - це сучасний підхід до організації та здійснення наукової і науково-технічної діяльності, що ґрунтується на принципах відкритості, прозорості, доступності наукових знань, співпраці між дослідниками та широкого використання інформаційно-комунікаційних технологій. Його основною метою є забезпечення максимально широкого доступу до результатів наукових досліджень, насамперед тих, що фінансуються за рахунок державних та інших суспільних ресурсів, а також створення умов для їх перевірки, повторного використання й подальшого розвитку.

Концепція відкритої науки передбачає розгляд наукових знань як важливого суспільного ресурсу, що має використовуватися в інтересах розвитку науки, освіти, економіки та суспільства загалом. Водночас відкритість не заперечує авторства, наукової конкуренції, захисту інтелектуальної власності та відповідальності дослідників за результати своєї діяльності. Вона спрямована на формування такої системи наукової комунікації, у якій пріоритетного значення набувають поширення знань, незалежна перевірка наукових результатів, їх відтворюваність і можливість подальшого використання.

Важливою особливістю відкритої науки є перехід від традиційних моделей наукової комунікації, за яких доступ до значної частини результатів досліджень обмежується передплатою на комерційні наукові видання, до більш відкритих форм поширення наукових публікацій, дослідницьких даних, методик, програмного забезпечення та інших результатів наукової діяльності. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності використання наукового потенціалу, зменшенню дублювання досліджень, поглибленню міжнародної та міждисциплінарної співпраці, а також прискоренню науково-технічного розвитку.

Міжнародні засади розвитку відкритої науки визначено, зокрема, у Рекомендації ЮНЕСКО щодо відкритої науки, ухваленій у 2021 році. До її основних цінностей належать якість і доброчесність наукової діяльності, колективна користь, рівність і справедливість, різноманітність та інклюзивність.

Основними складниками відкритої науки є відкритий доступ до наукових публікацій, відкриті дослідницькі дані, відкрите програмне забезпечення, відкриті освітні ресурси, відкриті методології досліджень, практики відкритого рецензування та відкрита наукова інфраструктура. Їх поєднання забезпечує формування інтегрованого середовища для створення, поширення, збереження й повторного використання наукових знань.

Відкритий доступ до наукових публікацій передбачає можливість безоплатного ознайомлення з результатами досліджень. Відкриті дослідницькі дані забезпечують можливість незалежного аналізу отриманих результатів, перевірки наукових висновків і використання інформації в подальших дослідженнях.

Відкрита наука не передбачає безумовного оприлюднення всієї наукової інформації. Обмеження доступу можуть бути обґрунтованими у випадках, пов'язаних із захистом персональних даних, конфіденційної інформації, комерційної таємниці, прав інтелектуальної власності, а також вимогами безпеки. Тому одним із важливих положень цієї концепції є принцип максимальної відкритості результатів досліджень за умови дотримання необхідних обмежень.

Особливого значення набувають прозорість, перевірюваність і відтворюваність наукових результатів**.** Прозорість передбачає чіткий опис мети дослідження, використаних матеріалів, методів, джерел даних, процедур їх оброблення та підходів до інтерпретації результатів. Перевірюваність забезпечує можливість незалежного оцінювання обґрунтованості отриманих висновків, тоді як відтворюваність пов'язана з можливістю повторного виконання дослідження або відповідних аналітичних процедур за визначених умов. Реалізація цих принципів сприяє виявленню помилок, підвищенню достовірності наукової інформації та зміцненню довіри до результатів досліджень.

Відкрита наука є одним зі стратегічних напрямів наукової та інноваційної політики Європейського Союзу. Її принципи впроваджуються в межах європейських дослідницьких програм, зокрема через вимоги щодо відкритого

доступу до наукових публікацій, належного управління дослідницькими даними та використання відкритої дослідницької інфраструктури.

В Україні розвиток відкритої науки також належить до важливих напрямів державної наукової політики. Міністерство освіти і науки України реалізує заходи, спрямовані на розширення доступу до наукової інформації, розвиток цифрової дослідницької інфраструктури та впровадження принципів відкритої науки в діяльність закладів вищої освіти й наукових установ.

Важливим етапом розширення інформаційного забезпечення українських дослідників стало надання закладам вищої освіти та науковим установам доступу до міжнародних реферативних і бібліографічних баз даних Scopus і Web of Science**.** Починаючи з 2017 року здійснювалися заходи щодо організації такого доступу, а з 2019 року його забезпечували, зокрема, за механізмом національної передплати. Це сприяло розширенню можливостей пошуку наукової інформації, аналізу публікаційної активності та інтеграції українських дослідників у міжнародний науковий простір.

Подальшим напрямом розвитку інформаційного забезпечення науки стало надання доступу до повнотекстових електронних ресурсів провідних міжнародних видавництв. Зокрема, у 2020 році було організовано доступ до електронних книг і наукових журналів Springer Nature, а у 2021 році — до колекцій електронних книг видавництва Elsevier. Водночас необхідно розрізняти доступ до наукових ресурсів за передплатою та відкритий доступ. Перший передбачає використання матеріалів у межах ліцензійних угод, тоді як другий забезпечує вільне ознайомлення з публікаціями без передплатних обмежень.

Важливу роль у реалізації принципів відкритої науки відіграють інституційні та тематичні репозитарії, призначені для накопичення, систематизації, довготривалого зберігання й поширення наукових матеріалів. Розміщення результатів досліджень у репозитаріях сприяє підвищенню їх доступності та видимості. Однак саме по собі архівування публікацій не завжди забезпечує відкритий доступ, оскільки окремі репозитарії можуть встановлювати обмеження на перегляд або використання матеріалів. Тому ефективність таких

ресурсів значною мірою залежить від політики доступу, умов ліцензування та технічних можливостей повторного використання інформації.

Реалізація принципів відкритої науки створює суттєві переваги для дослідників, наукових установ і суспільства. Для окремого науковця вона сприяє підвищенню видимості публікацій, розширенню можливостей їх цитування, налагодженню міжнародної співпраці та залученню до спільних дослідницьких проєктів. Відкритість даних і методів полегшує незалежну перевірку результатів, виявлення можливих помилок і використання отриманих знань у подальших дослідженнях.

На інституційному рівні впровадження відкритої науки сприяє зміцненню академічної репутації, підвищенню міжнародної видимості наукових результатів, розвитку партнерських зв'язків і розширенню участі в міжнародних дослідницьких програмах. Для суспільства загалом відкритість наукової інформації створює додаткові можливості використання результатів досліджень в освіті, промисловості, державному управлінні та інноваційній діяльності.

Водночас розвиток відкритої науки супроводжується низкою ризиків і обмежень, пов'язаних із захистом інтелектуальної власності, забезпеченням якості наукової інформації, фінансуванням публікацій та дотриманням етичних і правових норм. Ризиком є поширення наукових матеріалів, які не пройшли належної експертної оцінки. Зокрема, препринти забезпечують оперативне ознайомлення наукової спільноти з результатами досліджень, однак на момент оприлюднення можуть ще не пройти незалежного рецензування. Тому використання таких матеріалів потребує критичного аналізу методології, отриманих результатів та обґрунтованості висновків.

Особливо небезпечним явищем є діяльність хижацьких наукових журналів, які використовують практику стягнення плати за публікацію без забезпечення належного рецензування, редакційного контролю та дотримання академічних стандартів. Такі видання можуть поширювати недостовірні або науково необґрунтовані матеріали, що негативно впливає на якість наукової комунікації.

Відкрита наука є важливим напрямом розвитку сучасної системи наукової діяльності, орієнтованим на підвищення доступності знань, прозорості

досліджень, достовірності результатів і ефективності наукової співпраці. Ефективна реалізація цієї концепції ґрунтується на поєднанні максимально можливої відкритості наукової інформації із захистом прав авторів, дотриманням принципів академічної доброчесності та забезпеченням високої якості наукових досліджень.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 10

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?

11. АКАДЕМІЧНА ДОБРОЧЕСНІСТЬ У НАУКОВІЙ ТА ОСВІТНІЙ ДІЯЛЬНОСТІ

Академічна доброчесність є однією з основоположних умов забезпечення якості освітньої, наукової та науково-технічної діяльності. Дотримання її принципів сприяє формуванню довіри до результатів навчання, наукових досліджень і творчих досягнень, а також утвердженню поваги до честі, гідності та інтелектуальної праці людини. У сучасній системі вищої освіти академічну доброчесність розглядають не лише як сукупність етичних норм, а й як важливу складову системи забезпечення якості освіти і науки.

Правові засади академічної доброчесності в Україні були закріплені у 2017 році Законом України «Про освіту». Відповідно до його положень 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.

Подальшим етапом розвитку нормативно-правового регулювання цієї сфери стало ухвалення Верховною Радою України 18 грудня 2025 року Закону України «Про академічну доброчесність», який Президент України підписав 29 січня 2026 року. Його основною метою є формування належних умов для забезпечення довіри до результатів освітньої, наукової, науково-педагогічної та творчої діяльності.

У Законі академічну доброчесність визначено як необхідну передумову провадження якісної освітньої та наукової діяльності, здобуття якісної освіти, забезпечення довіри до результатів навчання і наукових досягнень, а також утвердження поваги до честі й гідності людини. Нормативно-правовий акт установлює основні цінності, принципи та правила академічної доброчесності, визначає механізми її формування й забезпечення, види порушень і заходи відповідальності за їх учинення.

Дія Закону України «Про академічну доброчесність» поширюється на суспільні відносини, що виникають у процесі здійснення академічної діяльності. Положення Закону також охоплюють процедури присудження наукових ступенів і ступенів освіти, присвоєння вчених звань тощо.

Особливої актуальності питання академічної доброчесності набули в умовах стрімкого розвитку технологій штучного інтелекту. Їх використання відкриває нові можливості для навчання, наукового пошуку, опрацювання великих масивів даних і підготовки академічних текстів. Водночас поширення таких технологій супроводжується виникненням нових етичних, правових і методологічних проблем, пов'язаних із прозорістю авторства, самостійністю виконання академічних робіт, достовірністю отриманих результатів і неприпустимістю представлення згенерованих матеріалів як результатів власної інтелектуальної діяльності без належного зазначення факту використання штучного інтелекту.

Основу академічної доброчесності становлять такі цінності, як чесність, довіра, повага, справедливість, відповідальність, стійкість і рішучість у дотриманні доброчесної академічної поведінки.

Чесність передбачає правдивість, відкритість і недопущення свідомого введення в оману під час здійснення академічної діяльності. Довіра ґрунтується на переконанні, що результати навчання, наукових досліджень і творчої роботи інших осіб отримано доброчесним шляхом, із дотриманням установлених правил і стандартів. Повага означає визнання честі й гідності учасників академічної спільноти, врахування різноманітності поглядів, а також дотримання прав інтелектуальної власності.

Справедливість передбачає застосування об'єктивних і неупереджених підходів до оцінювання результатів академічної діяльності, забезпечення рівності вимог до всіх її учасників та послідовне реагування на встановлені порушення академічної доброчесності.

Відповідальність полягає в усвідомленні суб'єктами академічної діяльності наслідків власних дій перед академічною спільнотою і суспільством. Стійкість характеризує здатність дотримуватися принципів академічної доброчесності незалежно від зовнішніх обставин, особистих спонукань або наявності

контролю. Рішучість передбачає активну позицію щодо формування, підтримання та захисту культури академічної доброчесності.

Дотримання академічної доброчесності науково-педагогічними та науковими працівниками передбачає належне посилання на джерела інформації під час використання чужих ідей, розробок, тверджень і відомостей; дотримання законодавства про авторське право і суміжні права; надання достовірної інформації про методики та результати досліджень, використані джерела й власну професійну діяльність.

Для здобувачів освіти дотримання академічної доброчесності насамперед передбачає самостійне виконання навчальних завдань, а також завдань поточного й підсумкового контролю знань. Здобувачі освіти мають належним чином зазначати джерела запозичених ідей, тверджень і відомостей, дотримуватися законодавства у сфері авторського права та надавати достовірну інформацію про результати власної навчальної, наукової і творчої діяльності, застосовані методики та використані інформаційні джерела.

Закон України «Про академічну доброчесність» визначає понятійно-термінологічний апарат, необхідний для регулювання академічної діяльності та встановлення єдиних підходів до оцінювання дотримання її принципів.

Автор - фізична особа, яка своєю творчою або інтелектуальною працею створила академічний твір чи його частину, навчальну роботу або її частину.

Академічний твір - твір у сфері освіти або науки, представлений у формі дисертації, творчого мистецького проєкту, кваліфікаційної чи курсової роботи, наукової монографії, статті, підручника, навчального посібника або в іншій формі, передбаченій законодавством чи внутрішніми актами відповідної установи.

Внутрішній акт - документ закладу освіти, наукової установи або іншого суб'єкта академічної діяльності, затверджений у встановленому порядку уповноваженим колегіальним органом управління та спрямований на регулювання питань академічної доброчесності.

Джерело інформації - друковане або електронне видання, архівний матеріал, інтернет-ресурс, особиста комунікація чи інше джерело, з якого отримано відомості, використані в академічному творі або навчальній роботі.

Уповноважений орган - колегіальний орган закладу освіти або наукової установи, наділений повноваженнями розглядати повідомлення про порушення академічної доброчесності та застосовувати передбачені законодавством і внутрішніми актами заходи реагування.

Уповноважена особа - педагогічний, науково-педагогічний або науковий працівник закладу освіти чи наукової установи, якому надано повноваження щодо розгляду повідомлень про порушення академічної доброчесності та застосування відповідних заходів реагування в межах, визначених внутрішнім актом.

Суб'єкти наукової та науково-технічної діяльності зобов'язані дотримуватися встановлених цінностей, принципів і правил академічної доброчесності, забезпечувати прозорість досліджень та достовірність отриманих результатів. Важливою умовою цього є надання повної й об'єктивної інформації про вихідні дані, застосовані методи та методики, використані матеріали й обладнання, порядок проведення експериментів і результати дослідження. Наукові висновки й рекомендації мають ґрунтуватися на належних доказах і перевірених фактах.

Важливу роль у забезпеченні академічної доброчесності відіграють заклади освіти та наукові установи. До їхніх обов'язків належить перевірка академічних творів, які вони видають або рекомендують до опублікування, а також матеріалів, що розміщуються у заснованих ними наукових виданнях, з метою виявлення можливих ознак порушення академічної доброчесності.

Стаття 18 Закону України «Про академічну доброчесність» визначає основні види порушень, які можуть виникати під час здійснення освітньої, наукової, науково-педагогічної та творчої діяльності. До них належать відчуження авторства, академічний плагіат, приписування авторства, самоплагіат, фабрикація, фальсифікація, недоброчесне використання результатів, згенерованих штучним інтелектом, недоброчесне оцінювання, несамостійне

виконання завдань, недозволена допомога, академічний саботаж, схиляння до порушення академічної доброчесності та інституційні порушення.

Відчуження авторства полягає в передаванні автором або авторами створеного ними академічного твору чи його частини іншій особі для подальшого оприлюднення із зазначенням автором особи, яка фактично не брала участі у створенні відповідного твору.

Академічний плагіат передбачає оприлюднення наукових або творчих результатів, отриманих іншими особами, як власних, а також відтворення в академічному творі чи навчальній роботі чужих текстів, ідей, даних або перекладів без належного посилання на автора та джерело запозичення.

Приписування авторства полягає в зазначенні серед авторів академічного твору особи, яка фактично не брала участі в його створенні.

Самоплагіат передбачає повторне оприлюднення власних раніше опублікованих наукових результатів без зазначення джерела їхнього попереднього опублікування, що може створювати хибне уявлення про новизну представлених результатів.

Фабрикація - це вигадування даних, фактів або результатів, які подаються як такі, що були отримані під час здійснення академічної діяльності.

Фальсифікація полягає у свідомій зміні, спотворенні або модифікації наявних даних, матеріалів чи результатів дослідження, що призводить до формування завідомо неправдивої інформації про академічну діяльність.

Недоброчесне використання результатів, згенерованих штучним інтелектом, передбачає представлення текстів, зображень, моделей, даних або інших матеріалів, створених із використанням технологій штучного інтелекту, як результатів власної академічної діяльності без належного зазначення факту використання таких технологій в академічному творі або супровідних матеріалах.

Несамостійне виконання завдання передбачає виконання навчальних або конкурсних завдань із використанням недозволених джерел інформації, технічних засобів чи сторонньої допомоги.

Академічний саботаж охоплює умисні дії або бездіяльність, які перешкоджають реалізації прав, свобод і законних інтересів інших осіб у процесі здійснення академічної діяльності.

Схиляння до порушення академічної доброчесності передбачає спонукання іншої особи до відповідного порушення шляхом прохань, умовлянь, доручень, погроз, примушування, психологічного тиску або інших форм впливу.

Інституційні порушення академічної доброчесності пов'язані з неналежним виконанням закладами освіти, науковими установами та науковими видавництвами обов'язків щодо забезпечення академічної доброчесності. До таких порушень належать поширення недостовірної інформації про власну академічну діяльність або діяльність працівників і здобувачів освіти; бездіяльність щодо формування та функціонування системи забезпечення академічної доброчесності; безпідставне залишення без розгляду повідомлень про її порушення; невжиття необхідних заходів для виявлення порушень та реагування на встановлені факти.

Особливе місце серед порушень академічної доброчесності посідає самоплагіат, оскільки він безпосередньо пов'язаний із вимогами до наукової новизни, достовірності та належного представлення результатів дослідницької діяльності. Одним із поширених проявів самоплагіату є дублювання публікацій, тобто повторне оприлюднення тієї самої наукової роботи або роботи з незначними змінами в кількох виданнях без належного зазначення попередніх публікацій. До цієї категорії також належать представлення раніше опублікованих статей, монографій та інших наукових праць як нових результатів, повторне використання однакових результатів у різних публікаціях без відповідних посилань, а також включення до звітів про виконання наукових проєктів результатів, які вже були представлені раніше, без зазначення цього факту. Іншими можливими проявами самоплагіату є агрегування, доповнення або повторне використання раніше опублікованих даних без чіткого розмежування нових і попередніх результатів. До порушень також може належати повторний аналіз раніше опублікованих даних без зазначення попередніх досліджень і характеру отриманих нових результатів.

Водночас повторне використання власних матеріалів або даних саме по собі не обов'язково становить порушення академічної доброчесності. Визначальними умовами є прозорість такого використання, належне посилання на попередні публікації, чітке визначення наукової новизни та дотримання відповідних видавничих і академічних вимог.

Для виявлення можливих порушень академічної доброчесності застосовують різноманітні організаційні й технічні засоби контролю. До них належать програмні системи перевірки текстових збігів і виявлення можливих запозичень, інструменти аналізу достовірності експериментальних даних та зображень, електронні платформи проведення контрольних заходів, а також засоби аудіо- й відеофіксації, використання яких має відповідати встановленим правовим вимогам.

Важливе значення для забезпечення прозорості академічної діяльності має оприлюднення дисертацій і кваліфікаційних робіт у відкритому доступі на офіційних вебсайтах закладів освіти або в академічних репозитаріях відповідно до вимог законодавства.

Закон України «Про академічну доброчесність» передбачає застосування відповідних заходів реагування та відповідальності за порушення встановлених вимог. Залежно від характеру й тяжкості порушення, статусу особи та передбачених законодавством процедур наслідками можуть бути анулювання результатів академічної діяльності, зниження оцінки, застосування дисциплінарних заходів, позбавлення окремих академічних прав, скасування рішень щодо присудження наукових ступенів або присвоєння звань, а в установлених випадках - відрахування із закладу освіти чи звільнення з посади. Встановлення факту порушення академічної доброчесності та визначення відповідних заходів реагування мають здійснюватися уповноваженими органами або особами відповідно до законодавства та внутрішніх актів закладів освіти й наукових установ.

Окремим інструментом нормативно-правового забезпечення академічної доброчесності є передбачений законодавством Реєстр осіб, щодо яких застосовано обмеження за порушення академічної доброчесності. Його

створення спрямоване на підвищення прозорості академічного середовища, забезпечення відповідальності суб'єктів академічної діяльності та запобігання повторним порушенням.

Однією з основних проблем є можливість недоброчесного використання штучного інтелекту для створення навчальних і наукових робіт. Сучасні генеративні моделі здатні автоматично формувати тексти, реферати, аналітичні матеріали, програмний код, зображення та інші результати інтелектуальної діяльності. Це створює передумови для повного або часткового виконання академічних завдань без належної самостійної роботи здобувача освіти чи дослідника. Якщо автоматично згенерований матеріал подають як результат власної інтелектуальної праці без зазначення факту використання штучного інтелекту, виникає ризик порушення академічної доброчесності.

Іншою важливою проблемою є дотримання авторських прав та прав інтелектуальної власності. Навчання сучасних моделей штучного інтелекту здійснюється з використанням значних масивів інформації, що можуть містити наукові публікації, літературні твори, зображення, програмний код та інші матеріали, захищені авторським правом. У зв'язку з цим виникають правові й етичні питання щодо правомірності використання таких матеріалів для навчання моделей, умов доступу до них і можливості відтворення елементів захищених творів у результатах генерації.

Суттєву загрозу для достовірності наукової інформації становить генерування штучним інтелектом неправдивих або фактично необґрунтованих тверджень. Генеративні моделі можуть створювати помилкові за змістом відомості, зокрема неіснуючі бібліографічні посилання, вигадані наукові результати, неточні статистичні дані або некоректні інтерпретації досліджень. Використання неперевіреної інформації може спричинити поширення помилкових висновків і зниження якості наукових публікацій. Тому будь-які фактичні твердження, числові дані, бібліографічні відомості та наукові результати, отримані за допомогою штучного інтелекту, потребують критичного аналізу й перевірки за достовірними першоджерелами.

Технології штучного інтелекту мають значний потенціал для підвищення ефективності освітньої та наукової діяльності. Їх доцільно застосовувати як допоміжні інструменти для пошуку й систематизації інформації, структурування матеріалу, мовного та стилістичного редагування академічних текстів, попереднього аналізу даних, формування дослідницьких гіпотез і підтримки окремих етапів наукової роботи. Однак використання таких технологій не повинно підміняти самостійне мислення, критичний аналіз, наукове обґрунтування висновків і персональну відповідальність автора за достовірність та якість отриманих результатів.

ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ ПО ТЕМІ 11

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?

.

12. НАУКОВО - ДОСЛІДНИЦЬКА ДІЯЛЬНІСТЬ СТУДЕНТІВ

Науково-дослідницька діяльність студентів є важливим складником професійної підготовки висококваліфікованих фахівців і невіддільною частиною освітнього процесу в закладах вищої освіти. Вона забезпечує поєднання теоретичної підготовки з практичним застосуванням методів наукового пізнання, сприяє поглибленню фахових знань і залученню здобувачів освіти до розв'язання актуальних наукових та прикладних завдань відповідно до сучасних потреб науки, техніки, виробництва й суспільства.

Участь у наукових дослідженнях сприяє формуванню аналітичного та критичного мислення, розвитку творчих здібностей, розширенню наукового світогляду й набуттю дослідницьких компетентностей. У процесі наукової роботи студенти опановують методи пошуку, систематизації та аналізу інформації, експериментального дослідження, оброблення й інтерпретації отриманих результатів, формулювання обґрунтованих висновків. Водночас розвиваються організаційні якості, зокрема відповідальність, самодисципліна, уміння планувати власну діяльність, раціонально використовувати час і дотримуватися встановлених термінів.

Основними завданнями залучення студентів до науково-дослідницької діяльності є поглиблення та систематизація теоретичних знань, формування навичок самостійного наукового пошуку, оволодіння сучасними методами дослідження, розвиток здатності до постановки й розв'язання наукових проблем, а також підготовка до використання результатів досліджень у майбутній професійній діяльності.

Залежно від змісту, організаційних умов і характеру виконуваних завдань науково-дослідницька діяльність студентів може здійснюватися у трьох основних формах: навчально-дослідницька робота в межах освітнього процесу, дослідницька діяльність під час практичної підготовки та самостійна науково-дослідницька робота в позанавчальний час.

Навчально-дослідницька робота здійснюється відповідно до освітніх програм, навчальних планів і робочих програм навчальних дисциплін. Вона передбачає включення елементів наукового пошуку до лекційних, практичних, лабораторних і семінарських занять, виконання індивідуальних дослідницьких завдань, підготовку рефератів, наукових доповідей, курсових і кваліфікаційних робіт під керівництвом науково-педагогічних працівників. Важливе місце в цій формі діяльності посідає самостійна робота з науковими джерелами. Під час підготовки рефератів, доповідей та інших письмових робіт студенти набувають навичок інформаційного пошуку, критичного оцінювання наукових публікацій, систематизації матеріалу, аргументованого викладення результатів аналізу, належного оформлення бібліографічних посилань і дотримання вимог наукового стилю. Це сприяє формуванню культури академічного письма та засвоєнню основ наукової комунікації.

Науково-дослідницька діяльність під час практичної підготовки спрямована на застосування набутих знань і дослідницьких умінь у виробничих або інших професійних умовах. Вона може передбачати виконання окремих завдань за тематикою наукових досліджень кафедр, аналіз технологічних процесів, обладнання та організації праці, виявлення можливостей їх удосконалення, а також збирання, систематизацію й первинне оброблення експериментальних і виробничих даних. Отримані матеріали можуть використовуватися під час підготовки курсових, кваліфікаційних робіт та інших наукових досліджень.

Позанавчальна науково-дослідницька робота здійснюється студентами у вільний від обов’язкових навчальних занять час і передбачає їхню участь у наукових гуртках, проблемних групах, студентських наукових товариствах, індивідуальних і колективних дослідницьких проєктах, зокрема в межах наукової тематики кафедр. Важливими формами представлення результатів такої діяльності є участь у наукових конференціях, семінарах, конкурсах студентських наукових робіт, а також підготовка тез доповідей, наукових статей, звітів і презентацій.

Особливе значення має діяльність студентських наукових гуртків, які створюють умови для поглибленого вивчення окремих наукових проблем,

опанування методології досліджень і набуття досвіду самостійної та колективної роботи. Участь у таких гуртках сприяє виявленню дослідницьких здібностей студентів, формуванню стійкого інтересу до певного наукового напряму та поступовому залученню до систематичної наукової діяльності.

Зміст, спрямованість і результативність науково-дослідницької роботи студентів значною мірою залежать від наукової проблематики кафедр, рівня матеріально-технічного забезпечення, доступності сучасних інформаційних ресурсів, кваліфікації наукових керівників та організаційної підтримки з боку закладу вищої освіти. Важливою умовою ефективної наукової підготовки є забезпечення послідовності й наступності її форм, що передбачає поступове ускладнення дослідницьких завдань, розширення їхнього змісту та підвищення рівня самостійності студентів.

Організація індивідуального студентського дослідження розпочинається з вибору й обґрунтування теми, яка має відповідати науковому напряму кафедри, актуальним проблемам відповідної галузі та можливостям її практичного опрацювання. Тема може бути запропонована науковим керівником або обрана за ініціативою студента за погодженням із керівником. Подальше виконання роботи передбачає визначення мети й завдань, вибір методів дослідження, планування його основних етапів, збирання та опрацювання фактичного матеріалу, аналіз результатів, формулювання висновків і рекомендацій, а також оформлення результатів відповідно до встановлених вимог.

Важливим етапом наукової підготовки є оприлюднення та обговорення результатів досліджень. Підготовка наукових доповідей, тез і статей, участь у конференціях та конкурсах сприяють розвитку навичок наукової аргументації, публічного представлення результатів, ведення фахової дискусії та критичного оцінювання власних досліджень. Студенти, які виявляють високий рівень наукової активності та дослідницьких здібностей, можуть залучатися до поглибленої індивідуальної наукової роботи, міжнародних академічних і дослідницьких програм, а також розглядатися як потенційні кандидати для подальшої підготовки на третьому (освітньо-науковому) рівні вищої освіти.

Невіддільною умовою здійснення науково-дослідницької діяльності є дотримання принципів академічної доброчесності. Вони передбачають самостійне та сумлінне виконання навчальних і наукових завдань, коректне використання й цитування інформаційних джерел, дотримання авторського права, достовірне представлення методів і результатів дослідження, а також недопущення академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації та інших порушень академічної доброчесності. Для здобувачів освіти з особливими освітніми потребами виконання відповідних вимог забезпечується з урахуванням їхніх індивідуальних можливостей і потреб.

Організаційне забезпечення науково-дослідницької діяльності студентів здійснюється на різних рівнях управління закладом вищої освіти. У цьому процесі беруть участь адміністрація, вчені ради, кафедри, наукові підрозділи, студентські наукові товариства та інші організаційні структури. Їхня діяльність спрямована на планування й координацію студентських досліджень, забезпечення наукового та методичного керівництва, організацію наукових заходів, створення належних умов для проведення досліджень і сприяння оприлюдненню їхніх результатів.

Важливу роль у розвитку студентської науки відіграють наукові товариства студентів, аспірантів, докторантів і молодих учених. Вони сприяють розвитку наукової творчості й інноваційної активності молодих дослідників, представляють і захищають їхні права та інтереси, підтримують наукові ініціативи й залучення студентів до дослідницької діяльності. Заклади вищої освіти забезпечують організаційні умови для функціонування таких товариств, сприяють їхньому інформаційному, матеріально-технічному та фінансовому забезпеченню відповідно до законодавства і власних можливостей.

Науково-дослідницька діяльність студентів є важливим засобом інтеграції освіти, науки та практики. Її систематична організація забезпечує поглиблення фахових знань, розвиток дослідницьких компетентностей, формування академічної культури й підготовку фахівців, здатних до самостійного розв’язання професійних завдань, безперервного 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. Кропівний В. М., Кузик О. В., Кропівна О. В., Мітєв Д. О. **Основи наукових досліджень у матеріалознавстві** : навч. посіб. / за ред. В. М. Кропівного. Кропивницький : ЦНТУ, 2026. 339 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. Бондарєв 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. Дзебань 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. Ковалевский, 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. Мітєв 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. І. 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., Мірошниченко 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., Міронець 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. Кропівний, В. М. Орлик, О. В. Кузик, А. В. Кропівна ; за заг. ред. В. М. Кропівного. 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-XII. Відомості Верховної Ради України. 1993. № 33. Ст. 345.
3. Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки : Закон України від 11.07.2001 р. № 2623-III. 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-IX.
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