

В. І. Савуляк

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ
СКЛАДУ, СТРУКТУРИ
ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ**

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. І. Савуляк

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ,
СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2021

УДК 669.017.11

C13

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 28.10.2021 р.)

Рецензенти:

Л. Г. Козлов, доктор технічних наук, професор

В. А. Матвійчук, доктор технічних наук, професор

П. В. Каплун, доктор технічних наук, професор

Савуляк, В. І.

C13 **Методи та засоби дослідження складу, структури та властивостей матеріалів : навчальний посібник / Савуляк В. І. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 73 с.**

ISBN 978-966-641-882-4

Навчальний посібник підготовлено відповідно до програми навчальної дисципліни «Методи та засоби дослідження складу, структури та властивостей матеріалів», яку внесено до навчального плану підготовки доктора філософії зі спеціальності 132 «Матеріалознавство».

У посібнику розглянуто найбільш широко вживані у машинобудуванні та матеріалознавстві методи визначення хімічного складу матеріалів, ідентифікації складових їх структури та основних практично значущих властивостей.

Посібник розрахований для здобувачів та викладачів закладів вищої освіти, що виконують дослідження за спеціальністю 132 «Матеріалознавство».

УДК 669.017.11

ISBN 978-966-641-882-4

© ВНТУ, 2021

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ	6
1.1 Основні терміни та положення	6
1.2 Розроблення плану-програми експерименту	8
1.3 Статистичні методи оцінення вимірювань	9
2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЇ, ПОХИБОК ТА ДЕФЕКТІВ НАПЛАВЛЕННЯ ПОКРИТТІВ	13
2.1 Матеріали для досліджень.....	14
2.2 Визначення величин та характеру спрацювання отворів деталей .	16
2.3 Підготовлення зразків для експериментальних досліджень	17
2.4 Визначення якості нанесення покриття наплавленням.....	18
2.5 Вимірювання температури на поверхні матеріалу	25
2.6 Вимірювання залишкових деформацій.....	26
2.7 Методика експериментального визначення похибок отворів, що спричинені температурними деформаціями деталі та інструменту в процесі розточування наплавлених отворів	26
3 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ СКЛАДУ ТА ПАРАМЕТРІВ МАТЕРІАЛІВ І НАНЕСЕНИХ ПОКРИТТІВ	27
3.1 Дослідження контактної взаємодії в системах «тверда поверхня – металевий розплав	27
3.2 Метод диференційно-термічного аналізу.....	29
3.3 Методи дослідження структури, фазового і хімічного складу композиційних порошків, керметів і газотермічних покриттів	30
3.4 Методики дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів і покриттів	31
4 ТРИБОТЕХНІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ	32
4.1 Методика та визначення коефіцієнтів тертя спокою	32
4.2 Методика та визначення зносостійкості металокарбідних матеріалів і покриттів	38
4.3 Конструкція експериментальної установки	39
4.4 Результати досліджень на зносостійкість	41
4.5 Дослідження зносостійкості в процесі абразивного зношування композиційних покриттів з використанням багатофакторного експерименту	43

4.6 Методика дослідження триботехнічних властивостей газотермічних покриттів.....	49
4.7 Зносостійкість високовуглецевих шарів, нанесених методом електродугового наплавлення з використанням вуглецевих волокнистих матеріалів	51
4.8 Статистична залежність «зносостійкість – твердість» високовуглецевого покриття за вибіркою експериментальних даних ...	54
5 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТВОРЕННЯ МЕТАЛОКАРБІДНИХ МАТЕРІАЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕКЗОТЕРМІЧНИХ СУМІШЕЙ	59
5.1 Обґрунтування основних методів дослідження.....	59
5.2 Методика та результати визначення характеристик порошкових компонентів.....	60
5.3 Методика проведення термічного аналізу зразків порошкових сумішей	61
5.4 Результати досліджень результатів екзотермічних процесів... ..	63
6 СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАТЕРІАЛІВ	66
6.1 Дослідження поверхні твердих матеріалів на електронному мікроскопі	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70

Вступ

Основою світу, сучасного виробництва та побуту є матеріали. Призначення, як і властивості, матеріалів безпосередньо пов'язане зі сферами їх використання. Якщо це стосується виробництва машин та конструкцій, а також їх експлуатації, то у цьому випадку широкого вжитку знайшли терміни: службове призначення, технічні характеристики, технічне завдання, довговічність, надійність тощо. Ці терміни підкріплюються конкретними числовими показниками, які мають бути забезпечені під час всього життєвого циклу машини. На основі цих показників машина чи інший технічний виріб проектується, виготовляється, експлуатується та утилізується. Важливе значення мають показники екологічного впливу на середовище, економічність виготовлення, експлуатації та утилізації. Без такого системного підходу неможливо досягти успіху у сфері механічної інженерії.

У матеріалознавстві давно встановилось чітке бачення єдності тріади: *склад – структура – властивості* в баченні сутності матеріального світу. Дослідження існуючих матеріалів, визначення причин аварій, втрати технічних характеристик, зовнішнього вигляду та інших показників починають, як правило, з визначення складу матеріалу. Водночас враховують, що властивості матеріалу залежать не тільки від основних складових, але і від мікродобавок чи забруднень, які потрапили в матеріал під час його виробництва, обробки чи експлуатації.

Історичний досвід та дані сучасної науки вказують, що навіть для матеріалів з однаковим хімічним складом може існувати величезна кількість варіантів їх внутрішньої будови – структури. Зерна, субзерна, кристали, кристаліти, вид і розташування дислокацій, границі зерен, когезія, властивості поверхонь та багато інших питань, які суттєво впливають на властивості матеріалів та виробів з них.

Відповідно до питань, які вирішують спеціалісти в процесі виробництва матеріалів, виробів з них та їх застосування, науковці та виробничники створили велику кількість приладів і складної сучасної апаратури для дослідження та контролю за компонентами тріади *склад – структура – властивості*. Основою визначення характеристик цих компонентів є експеримент.

1 МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

1.1 Основні терміни та положення

Найбільш складною та проблематичною частиною наукових досліджень є фізичні та математичні експерименти. Вони є одним з основних способів отримання нових знань. **Експеримент** є науково поставленим дослідом або спостереженням процесів, явищ з можливістю керування ними, для певних умов, які можуть бути відтворені. У разі повторення дослідів в аналогічних умовах результати мають відтворюватися. На відміну від звичайного спостереження під час експерименту дослідник активно впливає на процес або явище.

Під час експерименту виявляються закономірності процесів чи явищ або перевіряються теоретичні постулати, гіпотези, а також враховуються впливи нових факторів, умов та зовнішніх чинників. З економічного погляду експеримент бажано провести в найкоротші терміни з найменшими витратами. Важливо якісні результати отримати в короткі терміни, поки зберігається актуальність теми.

Експерименти класифікують на природні і штучні. **Природні** експерименти частіше виконують в умовах діючого виробництва чи експлуатації машин або технологічних процесів і под. **Штучний** експеримент застосовується під час розв'язання фізико-технічних проблем прикладних наук (насамперед у технічних). Це дає можливість уникнути впливу другорядних факторів, які створюють різні шуми, що важко фільтруються. У цьому випадку створюється можливість поступового ускладнення або спрощення дослідження та виявлення всіх факторів впливу.

За результатами попереднього експерименту розробляється повна програма досліджень.

Розрізняють лабораторні та виробничі експериментальні дослідження.

Лабораторні дослідження виконують на спеціальних установках або стендах з використанням універсальних чи створених давачів, приладів, реєструвальних засобів тощо. Достовірність та точність таких досліджень дозволяють досягти найбільш якісних результатів. Важливу роль відіграє математичне планування експерименту та автоматична фіксація результатів в сукупності з використанням математичної статистики.

Для врахування виробничих факторів та умов виконують виробничі експериментальні дослідження.

Виробничі експериментальні дослідження вивчають процеси в реальних умовах впливу різних випадкових або не врахованих факторів виробництва. Їх виконують на виробництвах, що будуються, діючих заводах, дорогах, будівлях і спорудах. Через значні обсяги досліджень потрібним є чітке планування та організація досліджень.

Доцільно організовувати виробничий експеримент шляхом збирання матеріалів у випробувальних лабораторіях, організаціях державної статистичної служби. Ця інформація збирається та накопичується багато років за єдиною методикою та з використанням одних блоків запитань. Це дозволяє прослідкувати динаміку зміни певних явищ та процесів. Дані експериментів можна обробляти статистично та отримувати рівняння трендів.

Важливо розробляти методику очищення таких матеріалів від шумів та похибок, які викликані зміною умов вимірювань або зміною вимірювальних інструментів.

У низці випадків результат можна отримати застосуванням методу анкетування.

Виробничі експерименти можуть бути замінені дослідженнями на спеціальних стендах. Ці стенди часто організовують через дооснащення промислового обладнання спеціальним вимірювально-реєструвальним комплексом, який дозволяє виконувати досліди без втручання у діючий технологічний процес, що підвищує достовірність результатів та ефективність використання обладнання, машин і приладів.

Залежно від проблеми, яка вирішується, обсяг досліджень може значно відрізнятись. Інколи для підтвердження передбачень достатньо лабораторного експерименту, в несприятливому випадку доводиться виконувати їх цілу серію: попередні (пошукові), лабораторні, стендові на виробничому обладнанні.

Часто на експеримент витрачається багато фінансів та матеріальних ресурсів, часу без позитивного результату. Причина цього захована у недостатньо кваліфіковано поставлених завданнях, коли питання завчасно не вивчено достатньо повно за літературними джерелами та патентами, не враховано досвід виробництва. Не добре, якщо результати тривалих досліджень експерименту неповністю підтверджують робочу гіпотезу наукового дослідження. Часто це теж є наслідком недбалої підготовки експерименту, невдалого обґрунтування мети і завдань. Першочергово перед початком експериментальних досліджень розробляють їх методологію.

Методологія експерименту містить загальні постулати, структуру, постановку та послідовність виконання досліджень. Основні складові методології експерименту такі: розроблення плану-програми експерименту; оцінювання похибок вимірювань та вибір комплексу інструментів і приладів для проведення експерименту; проведення експерименту; обробка і аналіз результатів, визначення адекватності. Така схема експериментальних досліджень є традиційною. Використання математичної теорії експерименту дозволяє значно підвищити точність за менших обсягів досліджень. Для цього випадку методологія містить такі етапи: розроблення плану-програми експерименту, оцінення і вибір засобів вимірювань для проведення експерименту, математичне планування з одночасним прове-

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савуляк В. І. Побудова та аналіз моделей металевих сплавів / В. І. Савуляк, А. О. Жуков, Г. О. Чорна. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 1999. – 200 с.
2. Савуляк В. І. Синтез зносостійких композиційних матеріалів та поверхневих шарів з екзотермічних компонентів / В. І. Савуляк. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2002. – 160 с.
3. Жуков А. А. Расчет химической спинодали в системе аустенит-цементит и некоторые практические приложения / А. О. Жуков, В. И. Савуляк, Р. Л. Снежной, Т. Ф. Архіпова // Доклады РАН. Серия «Металлы». – № 5. – 1998.
4. Жуков А. А. О влиянии элементов на равновесные температуры эвтектических превращений / А. А. Жуков, В. И. Савуляк, Т. Ф. Архіпова // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallor. – № 2. – 2000.
5. Савуляк В. І. Деякі питання термодинаміки систем Fe-C-і, де і – третій сильно ліквуючий компонент / В. І. Савуляк // Вісник технічного університету «Поділля». – № 1. – 2001.
6. Жуков А. А. Об образовании карбина (цианополиина) и алмаза в Fe-C сплавах / А. О. Жуков, В. И. Савуляк // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallor. – № 3. – 2001.
7. Савуляк В. І. Термодинаміка синтезу композиційних матеріалів на основі тугоплавких металів / В. І. Савуляк, Г. О. Чорна // Вісник Сумського державного університету. – № 9. – 2002. – С. 83-87.
8. Савуляк В. І. Термодинаміка утворення сполук під час легування розплаву системи Fe-Cr-Ni-Si-C-O манганом / В. І. Савуляк, О. В. Поступайло, О. В. Шаповалова // «Наукові нотатки» : міжвузівський збірник. – Луцьк. – 2015. – Вип. 50. – С. 194-198.
9. Савуляк В. І. Економічні технології високоміцних графітізованих сплавів заліза / В. І. Савуляк, О. Б. Янченко. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 160 с.
10. Савуляк В. І. Наплавлення високовуглецевих зносостійких покриттів / В. І. Савуляк, В. Й. Шенфельд. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 124 с.
11. Савуляк В. І. Ремонт та локальне зміцнення рам транспортних машин : монографія / В. І. Савуляк, Д. В. Бакалець. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 122 с.

12. Кузнецов Ю. М. Прогнозування розвитку технічних систем / Ю. М. Кузнецов, Р. А. Склярів. – Київ-Тернопіль : ТОВ «ЗМОК», 2004. – 323 с.
13. Струтинський В. Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки : підручник / Струтинський В. Б. – Житомир : ЖІТІ, 2001. – 612 с.
14. Радченко С. Г. Математическое моделирование технологических процессов в машиностроении / Радченко С. Г. – К. : ЗАО Укрспецмонтажпроект, 1998. – 258 с.
15. Кузнецов Ю. М. Теорія технічних систем : навчальний посібник / Ю. М. Кузнецов, І. В. Луців, С. А. Дубиняк. – Тернопіль : ТДТУ, 1997. – 624 с.
16. Голубенко А. Л. Теория технических систем : учебное пособие / А. Л. Голубенко, А. С. Петров, А. Л. Кашура. – К. : Аристей, 2005. – 240 с.
17. Бялік О. М. Структурний аналіз металів. Металографія. Фрактографія : підручник / О. М. Бялік, С. Є. Кондратюк, М. В. Кіндрачук, В. С. Черненко. – К. : ВПІ ВПК «Політехніка», 2006. – 328 с.
18. ДСТУ ISO 6508-1:2013 Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T). Держстандарт України, 2014.
19. Гультьєв А. Имитационное моделирование в среде Windows / Гуляев А. – С-Пб. : КОРОНАпринт, 1999. – 288 с.
20. Ермаков С. М. Математическая теория оптимального эксперимента / С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский. – М. : Наука, 1987. – 320 с.
21. Геллер Ю. А. Материаловедение. Методы анализа, лабораторные работы и задачи : учеб. пособие для вузов / Ю. А. Геллер, А. Г. Рахштадт. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1989. – 456 с.
22. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 11 с.
23. ГОСТ 23273-78. Металлы и сплавы. Измерение твердости методом упругого отскока бойка. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 11 с.
24. ГОСТ 10708-82. Копры маятниковые. Технические условия. – М. : Издательство стандартов, 1982. – 6 с.

25. ГОСТ 1050-88. Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. Общие технические условия. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 24 с.
26. ДСТУ 2444-94. Розрахунки та випробування на міцність. Опір втомі. Терміни та визначення. – К. : Держстандарт України, 1994. – 70 с.
27. ДСТУ 2631-94 (ГОСТ 380-94). Сталь вуглецева звичайної якості. Марки. – К. : Держстандарт України, 1994. – 9 с.
28. ДСТУ 2651 – 2005. Режим доступу <http://dstu-biblio.3dn.ru/load/1-1-0-16>
29. Гурвич А. К. Ультразвуковой контроль сварочных швов / А. К. Гурвич, И. Н. Ермолов. – Киев : Техника, 1972. – 460 с.
30. Ермолов И. Н. Теория и практика ультразвукового контроля / Ермолов И. Н. – М. : Машиностроение, 1981. – 240 с.
31. Ващенко О. П. Методичні основи та результати експериментальних досліджень опору конструкційних матеріалів високошвидкісній деформації за різних напружених станів : навчальний посібник / Ващенко О. П. – Київ : УТУ, 1999. – 52 с.
32. Новицкий П. Г. Оценка погрешностей результатов измерений / Новицкий П. Г. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
33. Рего К. Т. Метрологічна обробка результатів технічних вимірювань : довідковий посібник / Рего К. Т. – К. : Техніка, 1997. – 28 с.
34. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология : учебник для вузов / Шишкин И. Ф. – М. : Издательство стандартов, 1991. – 492 с.
35. Костенко О. М. Методологія оптимального планування експериментів при дослідженні технологічних процесів, пристроїв і систем / О. М. Костенко // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Вип. 1 (29). – 2011.– ПолтНТУ. – С. 57 – 60.

Навчальне видання

Валерій Іванович Савуляк

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ,
СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ**

Навчальний посібник

Рукопис оформлено *В. Савуляком*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовлено *О. Кушнір*

Підписано до друку 26.11.2021 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 4,38.
Наклад 50 (1-й запуск 1–21) пр. Зам. № 2021-126.

Видавець та виготовлювач
Вінницький національний технічний університет,
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.