

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА

«___» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня магістр

зі спеціальності _____ 132 Матеріалознавство _____

освітньо-професійної програми _____ «Прикладне матеріалознавство» _____

на тему: «Розробка комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей» _____

Здобувача групи _____ МТ.м-21 _____ Остапчука Дмитра Олеговича _____

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ Дмитро ОСТАПЧУК

Керівник _____ доцент кафедри ПМ і ТКМ,
к.т.н., доц. Христина БЕРЛАДІР _____

Нормоконтроль _____ доцент кафедри ПМ і ТКМ
к.т.н., доц. Андрій ДЕГУЛА _____

Сумський державний університет
Факультет технічних систем та енергоефективних технологій
Кафедра прикладного матеріалознавства і ТКМ
Спеціальність 132 «Матеріалознавство»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
_____ Оксана ГАПОНОВА
«___» _____ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Остапчук Дмитро Олегович**

1. Тема проєкту (роботи) «Розробка комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей»», затверджена наказом по університету від «09» листопада 2023 р. № 1254-VI.
2. Термін здачі студентом закінченого проєкту(роботи)
3. Вихідні дані до проєкту (роботи) Вуглецеві сталі, їх маркування, хімічні склади, показники механічних властивостей.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)
 - 1) Аналіз літературних джерел за темою роботи.
 - 2) Викладення загальної методики й основних методів досліджень.
 - 3) Експериментальні дослідження та узагальнення результатів.
 - 4) Економічна частина.
 - 5) Охорона праці, довкілля та техніка безпеки.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Обов'язковими є таблиці з механічними властивостями матеріалів.

6. Консультанти з проєкту (роботи), із значенням розділів проєкту, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці, довкілля і техніка безпеки	Говорун Т. П.	10.11.2023 р.	
Економічна частина	Берладір Х. В.	16.11.2023 р.	

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ пор.	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Аналіз літературних джерел та вибір основних напрямів дослідження	жовтень 2023 р.	Виконано
2	Загальна методика та основні методи дослідження	листопад 2023 р.	Виконано
3	Експериментальні дослідження та загальні результати	листопад 2023 р.	Виконано
4	Економічна частина	грудень 2023 р.	Виконано
5	Охорона праці, довкілля, та техніка безпеки	грудень 2023 р.	Виконано

7. Дата видачі завдання

Студент _____

(підпис)

Керівник проєкту _____

(підпис)

АНОТАЦІЯ

Остапчук Дмитро Олегович. Розробка комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей. — Рукопис.

Кваліфікаційна робота на здобуття кваліфікації магістра зі спеціальності 132 «Матеріалознавство».— Сумський державний університет, Суми, 2023.

Робота присвячена розробці комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей.

У виробництві інтелектуальних продуктів, фазовий склад та фізико-механічні характеристики конструкційних матеріалів можуть варіюватися в залежності від різних постачальників заготовок. Таким чином, оцінка складу та властивостей для прийняття рішень у виборі матеріалів за допомогою сучасного програмного забезпечення стає актуальною проблемою в інтелектуальному виробництві.

Запропонований метод ґрунтується на комплексному використанні нормалізаційного та ймовірнісного підходів, а також лінійної процедури регресії, сформульованої у матричній формі. У результаті дослідження були розроблені аналітичні залежності для автоматизованого відбору матеріалів. З врахуванням гіпотез про вплив фазового складу на фізико-механічні властивості, запропонований підхід було якісно та кількісно обґрунтовано для вуглецевих сталей.

Отримані результати дозволяють оцінити фазовий склад і фізичні властивості для будь-якого матеріалу з особливої групи за їхніми механічними характеристиками. Загалом, автоматизований підхід до вибору матеріалів на основі критеріїв прийняття рішень є корисним для галузей, таких як машинобудування, інтелектуальне виробництво та промислове використання.

Ключові слова: механічні властивості, фазовий склад, процес інновації, підхід до прийняття рішень, промислове зростання.

ABSTRACT

Ostapchuk Dmytro Olehovych. Development of a comprehensive approach for automated selection of carbon steels. – Manuscript.

Qualification work for master's qualification in specialty 132 Materials Science.
– Sumy State University, 2023.

The work is devoted to developing a complex approach for the automated selection of carbon steels.

In the production of intelligent products, the phase composition and physical and mechanical characteristics of structural materials can vary depending on different suppliers of blanks. Thus, assessing composition and properties for decision-making in the selection of materials with the help of modern software is becoming an urgent problem in intelligent manufacturing.

The proposed method is based on the complex use of normalization and probabilistic approaches, as well as a linear regression procedure formulated in matrix form. As a result of the research, analytical dependencies were developed for the automated selection of materials. Considering hypotheses about the influence of phase composition on physical and mechanical properties, the proposed approach was qualitatively and quantitatively substantiated for carbon steels.

The obtained results make it possible to estimate the phase composition and physical properties of any material from a special group according to its mechanical characteristics. In general, an automated approach to material selection based on decision criteria is useful for industries such as mechanical engineering, intelligent manufacturing, and industrial applications.

Keywords: mechanical properties, phase composition, innovation process, decision-making approach, industrial growth.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра вміщує 63 сторінки, зокрема 2 таблиці, 3 рисунка, список із 52 використаних джерел 5 на сторінках.

Мета роботи – розробка комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей для підвищення точності та швидкості процесу вибору матеріалів.

Об'єкт дослідження – нормалізаційний та ймовірнісний підходи, лінійна регресія, сформульована у матричній формі.

Предмет дослідження – вуглецеві сталі марки від AISI 1010 до AISI 1060.

Методи дослідження. Підхід до прийняття рішення передбачає визначення фазового складу на основі даних з наявних баз даних. Це забезпечує оптимальний вибір матеріалу, враховуючи різні критерії, такі як критерії подібності та середньоквадратичний коефіцієнт. Регресійний аналіз використовується для уточнення фізико-механічних властивостей, і остаточне рішення приймається для підтвердження типу матеріалу.

Наукова новизна одержаних результатів. Вдосконалено методіку раціонального вибору матеріалу на основі фазового складу та фізико-механічних властивостей. Розроблена методіка автоматизовано оцінює довільний матеріал із його загальної групи за вимірними фізико-механічними властивостями.

Практична цінність отриманих результатів. Практичне значення запропонованої методіки полягає в можливості вирішення прямої та оберненої задач автоматизованого вибору матеріалів за допомогою єдиного підходу до проектування елементів машин у машинобудуванні, інтелектуальному виробництві та промисловості.

Ключові слова: механічні властивості, фазовий склад, процес інновації, підхід до прийняття рішень, промислове зростання.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	11
1.1 Загальні характеристики вуглецевих сталей	12
1.2 Умови експлуатації виробів та вимоги до вуглецевих сталей	14
1.3 Аналіз комплексного підходу для автоматизованого виробництва	15
Висновки до розділу 1	19
РОЗДІЛ 2 ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ	20
2.1 Загальна методика та матеріали.....	20
2.2 Пряма проблема.....	25
2.3 Обернена задача	27
2.4 Точність оцінки	28
Висновки до розділу 2	31
РОЗДІЛ 3 СКЛАДАННЯ АЛГОРИТМУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИБОРУ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ.....	32
3.1 Регресійні залежності.....	32
3.2 Раціональний вибір матеріалу	34
Висновки до розділу 3	38
РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	39
Висновки до розділу 4	51
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	52
Висновки до розділу 5	56
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	59

ВСТУП

В сучасному етапі технологічного розвитку промисловості, вибір матеріалів для конструювання та виробництва стає однією з ключових складових успішного функціонування підприємств. Зокрема, вуглецеві сталі займають важливе місце серед конструкційних матеріалів, завдяки своїм унікальним властивостям, таким як висока міцність, добра зварюваність та доступність. Проте, вибір оптимального типу вуглецевої сталі для конкретної задачі вимагає глибокого розуміння їх характеристик та специфіки застосування.

Актуальність обраної теми зумовлена постійним ростом потреби у вдосконаленні технологій та процесів виробництва, а також збільшенням вимог до якості та надійності вироблених конструкцій. Водночас, зростання конкуренції на ринку вимагає ефективних рішень у сфері вибору матеріалів, щоб забезпечити не лише високу якість продукції, але й знизити витрати на її виробництво.

Дана робота присвячена розробці комплексного підходу до автоматизованого вибору вуглецевих сталей, який базується на використанні сучасних методів аналізу та обробки даних. Застосування інформаційних технологій у даній області дозволить збільшити точність та швидкість процесу вибору матеріалів, а також зменшити ймовірність помилок, пов'язаних з суб'єктивністю прийняття рішень.

Основні завдання дослідження включають аналіз властивостей різних типів вуглецевих сталей, розробку математичних моделей для оцінки їхньої придатності для конкретних завдань, а також створення програмного забезпечення для автоматизованого вибору оптимального матеріалу в залежності від технічних вимог та експлуатаційних умов.

Дана дипломна робота не лише спрямована на покращення процесів вибору матеріалів у сфері будівництва та виробництва, але й має потенціал для впровадження в інші галузі промисловості, де використовуються конструкційні матеріали. Отже, результати цього дослідження можуть стати важливим внеском

у вдосконалення сучасних технологій та забезпечити підприємства конкурентоспроможністю на ринку.

У подальших розділах дипломної роботи будуть розглянуті основні етапи розробки комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей, включаючи аналіз методів дослідження матеріалів, розробку математичних моделей та програмного забезпечення, а також проведення експериментів для підтвердження ефективності запропонованого підходу.

Мета роботи – розробка комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей для підвищення точності та швидкості процесу вибору матеріалів.

Завдання досліджень:

1. Провести літературний огляд щодо пошуку технології комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей.
2. Розробити аналітичний підхід до вирішення прямої та оберненої задач раціонального вибору матеріалу на основі фазового складу та фізико-механічних властивостей.
3. Запропонувати матричні залежності для оцінки фізико-механічних властивостей за фазовим складом і навпаки.
4. Надійність запропонованого автоматизованого підходу має бути доведена на конкретних прикладах.

Об'єкт дослідження – нормалізаційний та ймовірнісний підходи, лінійна регресія, сформульована у матричній формі.

Предмет дослідження – вуглецеві сталі марки від AISI 1010 до AISI 1060.

Методи дослідження. Підхід до прийняття рішення передбачає визначення фазового складу на основі даних з наявних баз даних. Це забезпечує оптимальний вибір матеріалу, враховуючи різні критерії, такі як критерії подібності та середньоквадратичний коефіцієнт. Регресійний аналіз використовується для уточнення фізико-механічних властивостей, і остаточне рішення приймається для підтвердження типу матеріалу.

Наукова новизна одержаних результатів. Вдосконалено методику раціонального вибору матеріалу на основі фазового складу та фізико-механічних властивостей. Розроблена методика автоматизовано оцінює довільний матеріал із його загальної групи за вимірними фізико-механічними властивостями.

Практична цінність отриманих результатів. Практичне значення запропонованої методики полягає в можливості вирішення прямої та оберненої задач автоматизованого вибору матеріалів за допомогою єдиного підходу до проектування елементів машин у машинобудуванні, інтелектуальному виробництві та промисловості.

Особистий внесок здобувача. Автору належить аналіз літературних даних, визначення мети та постановки завдання дослідження, розробка методики, проведення випробувань і розрахунків, оформлення роботи.

Кваліфікаційна робота магістра вміщує 64 сторінки, зокрема 2 таблиці, 3 рисунка, список із 52 використаних джерел 5 на сторінках.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ РОБОТИ І ВИБІР НАПРЯМІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Традиційно першочерговим є вибір конструкційних матеріалів для конструювання машин, який визначається на основі розрахунків міцності, жорсткості, стійкості, втоми та інших статичних і динамічних навантажень [1]. Однак на сучасному глобалізованому ринку ті самі конструкційні матеріали можуть відрізнятися за фазовим складом і фізико-механічними властивостями залежно від країни-постачальника [2]. Тому проблема визначення впливу фазового складу матеріалу на його фізико-механічні властивості (прямі задачі), і навпаки (обернена задача), є актуальною в машинобудуванні. Її рішення вимагає комплексного аналізу баз даних для різних матеріалів, складів і властивостей, включаючи сучасні обчислювальні засоби відповідно до інтелектуальних виробничих тенденцій.

Вуглецеві сталі в сучасному інженерному світі стали ключовим матеріалом для широкого спектру застосувань у будівництві, транспорті, виробництві та інших галузях. Висока міцність, зносостійкість та добра оброблюваність цих матеріалів роблять їх основним вибором для структурних компонентів та конструкцій. Зростання технічних вимог та різноманіття умов експлуатації вимагають вдосконалення підходів до вибору конкретних типів вуглецевих сталей для різних завдань [1, 4].

Літературний огляд є необхідним етапом у розробці комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей. Аналіз існуючих досліджень та розробок дозволить ідентифікувати прогалини в сучасних методологіях вибору матеріалів, а також здобути унікальні інсайти для подальшого розвитку даного напрямку досліджень .

Актуальність літературного огляду базується на необхідності оцінки поточного стану проблеми та визначенні перспективних напрямків розвитку в галузі вибору вуглецевих сталей. Враховуючи швидкий темп технологічних змін

та постійне розширення застосувань матеріалів, критично важливо здійснювати огляд літератури для ідентифікації нових тенденцій та вдосконалення існуючих методик [5].

У цьому літературному огляді будуть розглянуті ключові аспекти, пов'язані з властивостями вуглецевих сталей, методами їх аналізу та вибору, а також сучасними підходами до автоматизації цього процесу. Важливим аспектом буде також розгляд інтеграції інформаційних технологій та математичного моделювання для покращення ефективності вибору вуглецевих сталей для різних технічних завдань [6].

1.1 Загальні характеристики вуглецевих сталей

Вуглецеві сталі, що складаються з заліза та вуглецю, відіграють важливу роль у сучасній промисловості. Їхні унікальні властивості роблять їх перспективним матеріалом для різних галузей, від будівництва до автомобільної промисловості. У цьому розділі розглянемо загальні характеристики вуглецевих сталей, включаючи їхні основні властивості та класифікацію [7].

Вуглецеві сталі складаються переважно з двох компонентів: заліза та вуглецю. Однак, крім цих основних складових, у них також можуть бути присутні інші елементи, такі як марганець, кремній, сірка та фосфор. Хімічний склад визначає властивості сталі, такі як міцність, твердість та зносостійкість [8].

Вуглецеві сталі відзначаються високою міцністю, що робить їх ефективними для конструкційних застосувань. Механічні властивості включають межу міцності, ковзання та відновлення після деформації. Різні типи вуглецевих сталей можуть мати різні механічні характеристики в залежності від їхнього хімічного складу та обробки [9].

Вуглецеві сталі класифікуються відповідно до їхнього вмісту вуглецю та інших елементів. Залежно від вмісту вуглецю, їх можна поділити на низьковуглецеві, середньовуглецеві та високовуглецеві сталі. Кожен тип має свої унікальні характеристики та застосування [10].

Вуглецеві сталі широко використовуються в різних галузях промисловості. Вони застосовуються для виробництва автомобільних деталей, конструкційних елементів, інструментів та багатьох інших виробів. Здатність до обробки та формування, разом із зазначеними механічними властивостями, робить вуглецеві сталі вельми популярними серед інженерів та виробників [10].

Вуглецеві сталі займають провідну позицію в світовому ринку матеріалів завдяки своїм унікальним властивостям та широкому спектру застосувань. Основними галузями, які споживають вуглецеві сталі, є будівництво, автомобільна промисловість, машинобудування, виробництво інструментів та інженерія [11].

Переваги застосування вуглецевих сталей:

1. Міцність та довговічність. Вуглецеві сталі володіють високою міцністю, що дозволяє їм витримувати великі навантаження без втрати структурної цілісності. Ця властивість робить їх невід'ємною частиною конструкцій та деталей, які вимагають високої надійності та довговічності [12].

2. Універсальність та оброблюваність. Вуглецеві сталі легко обробляються, формуються та зварюються, що робить їх універсальним матеріалом для виробництва різноманітних виробів. Можливість обробки і формування надає інженерам та виробникам великий простір для творчості та оптимізації дизайну [12].

3. Економічність. Виробництво вуглецевих сталей є економічно вигідним, оскільки вугільний вуглець та залізо є широко поширеною та дешевою сировиною. Це робить вуглецеві сталі привабливими для великої кількості виробництв, де важлива не тільки якість, але і вартість матеріалу [13].

4. Інновація. Не зважаючи на зростання попиту на нові види матеріалів, вуглецеві сталі залишаються актуальними через постійне вдосконалення технологій їхнього виробництва та обробки. Інженери та дослідники працюють над розробкою нових видів вуглецевих сталей з покращеними властивостями, що дозволяє їм зберігати свою конкурентоспроможність в сучасному ринковому середовищі [13].

5. Стійкість до корозії. Деякі види вуглецевих сталей можуть бути оброблені або леговані для покращення стійкості до корозії, що робить їх дуже ефективними для застосувань у вологому або агресивному середовищі [13].

1.2 Умови експлуатації виробів та вимоги до вуглецевих сталей

В умовах сучасного технологічного розвитку вибір матеріалів для конструкцій та виробництва відіграє вирішальну роль у забезпеченні надійності та тривалості виробів. Вуглецеві сталі, завдяки своїм унікальним характеристикам, займають провідну позицію серед конструкційних матеріалів. Проте, їх ефективне використання вимагає ретельного врахування умов експлуатації та відповідності вимогам конкретного застосування.

Ми ретельно розглянули різні аспекти експлуатації вуглецевих сталей. Аналізуючи температурні умови, стійкість до корозії, навантаження та динамічні ефекти, а також особливості експлуатації в різних галузях, ми отримали інсайти щодо важливості правильного вибору сталі для кожного конкретного випадку [14].

1. Температурні умови: Вуглецеві сталі застосовуються в широкому діапазоні температур, від низьких до високих значень. Важливо враховувати температурну стійкість матеріалу при виборі його для конкретного застосування. Деякі види вуглецевих сталей можуть втрачати міцність при високих температурах, що потребує обдуманого вибору матеріалу для відповідних умов [15].

2. Умови корозії: Вагомим аспектом експлуатації виробів із вуглецевих сталей є їхня стійкість до корозії. У разі контакту з агресивними середовищами, такими як вода, кислоти або солоні розчини, важливо вибрати вуглецеву сталь з відповідною стійкістю до корозії [15].

3. Навантаження та динамічні навантаження: Вуглецеві сталі широко застосовуються в конструкціях, що піддаються різним типам навантажень. При виборі сталі важливо враховувати не лише сталі міцнісні характеристики, але і

їхню здатність витримувати динамічні навантаження та циклічні зусилля без втрати міцності [15].

4. Експлуатація у специфічних галузях: Вуглецеві сталі мають різноманітні застосування в різних галузях, таких як авіація, автомобілебудування, нафтогазова промисловість тощо. Умови експлуатації в цих галузях можуть визначати специфічні вимоги до сталей, включаючи високу міцність, стійкість до зносу, антикорозійні властивості тощо [15].

5. Стандарти та нормативи: У процесі вибору вуглецевих сталей важливо керуватися стандартами та нормативами, які регулюють властивості та якість матеріалу. Наприклад, в Україні це можуть бути стандарти ДСТУ EN, ГОСТ тощо [16].

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що вуглецеві сталі, незважаючи на свою вікову історію використання, залишаються актуальними та важливими в інженерній практиці. Їхні унікальні механічні властивості та оброблювальність роблять їх ефективними для різних застосувань.

Правильний вибір вуглецевих сталей враховуючи умови експлуатації дозволяє підвищити тривалість та надійність виробів. Важливо враховувати не лише базові механічні характеристики, але й специфічні експлуатаційні умови, такі як температура, взаємодія з агресивним середовищем, та динамічні навантаження.

Таким чином, знання та розуміння умов експлуатації важливі для раціонального використання вуглецевих сталей у різних інженерних галузях. Враховуючи ці аспекти, можна максимізувати переваги вуглецевих сталей та забезпечити високу ефективність та довговічність виробів [15].

1.3 Аналіз комплексного підходу для автоматизованого виробництва

Важливість обраної теми підкреслюється наступними тенденціями відповідно до стратегії Індустрія 4.0, а саме злиття цифрових технологій із

виробничими процесами для підвищення ефективності та зменшення людського втручання.

Комплексний підхід для автоматизованого вибору вуглецевих сталей є важливою стратегією в контексті сучасної промисловості. Цей підхід використовує сучасні технології, такі як машинне навчання та аналіз даних, для ефективного вибору матеріалу, що дозволяє підприємствам підвищувати продуктивність та оптимізувати виробничі процеси.

По-перше, необхідно створити автоматизовані системи даних для перенесення матеріалів, складу та властивостей, а також подальшого агрегування, коли вони стають доступними та аналізуються.

По-друге, незважаючи на чітку документацію про середнє значення складу матеріалу, що постачається, критичні частини необхідні для проходження вхідний контроль фізико-механічних властивостей. Всі ці домовленості особливо актуальні в турбомашинобудуванні, авіабудуванні тощо. Крім того, необхідність автоматизації є актуальною проблемою, а також відповідна проектно-технічна документація. У зв'язку з цим, ряд наукових робіт з розробки автоматизованих систем для вибір матеріалу в інтелектуальному виробництві проаналізовано нижче.

Бахум і Браун [17] запропонували автоматизовану систему підтримки вибору конструкційних матеріалів. Як наслідок, якість прийняття рішень стала стійким відбором покращено за допомогою багатоатрибутного підходу до прийняття рішень.

Колесник та ін. [18] застосовується штучні нейронні мережі для аналізу режиму обробки та точності поверхні. В результаті, точність отвору та температура свердління були оцінені для свердління сплавів CFRP/Ti.

Мафокване і фон Каллон [19] розробили підхід до вибору матеріалу для системи обробки. В результаті була створена нова конструкція і перевірена на основі залежності міцності матеріалів від прогинів і навантажень.

Івченко та ін. [20] розроблено метод вибору умов різання. Запропонований підхід розглядав умови різання під час точного точіння нелегованих виробів вуглецева сталь AISI 1045.

Каземзаде і Акіс [21] описали еволюційний підхід для оптимального автоматизованого вибору композиційних матеріалів. Результати чисельного моделювання довели надійність запропонованого підходу при проектуванні багатошарових композитних труб під внутрішнім тиском.

Джгамоу та ін. [22] розробили автоматизований підхід до прийняття рішень для вибір матеріалів і обладнання на основі багатокритеріального аналізу рішень. Запропонована методика реалізована при виборі матеріалу для водопровідних труб.

Ахмедзяновим та ін. [23] реалізовано автоматизований підхід до вибору матеріалу для основні частини авіаційного двигуна. В результаті на елементи двигуна діють навантаження. Оцінено повітряно-газовий канал.

Срінівасан та ін. [24] запропонували концепцію автоматизованого вибору матеріалів для видобутку нафти і газу. Запропоновано відповідний програмний комплекс розроблений для реалізації конкретних інструкцій для нафтової промисловості.

Велденц та ін. [25] застосували процес аналітичної ієрархії до вибору матеріалу для автоматизоване розміщення сухого волокна. Доведено, що цей метод більш кращий для прогнозування якості виготовлення деталей зі складною геометрією.

Панчук та ін. [26] спрогнозували точність профілю конічної різьби для випадків токарної обробки.

Сео та ін. [27] реалізували 3D-моделювання будівель на основі автоматизованого вибору матеріалів і екологічної оцінки.

Трегерн та ін. [28] для відбору матеріалу використовували системи штучного інтелекту. В результаті, відповідну структуру було розроблено для виявлення сплаву з пам'яттю форми на основі даних.

Лі та ін. [29] застосували машинне навчання з покращеним алгоритмом. В результаті, реалізовано вибір дескриптора матеріалу для прогнозування твердості сплавів з високою ентропією.

Лай та ін. [30] вивчали вплив вибору матеріалу на мікроструктуру нанесених покриттів з карбиду бору.

Чаттерджі і Чакраборті [31] застосували багато атрибутивний порівняльний аналіз для вибору матеріалу поршнів зі сталі AISI 4140 і сталі AISI 8660.

Дель Росаріо [32] реалізував вибір матеріалу на основі статистично суворої аналіз надійності. Запропонований підхід був доповнений статистичним моделюванням аналізувати композитні ламінатні плити.

Таким чином, комплексний підхід для автоматизованого вибору вуглецевих сталей представляє значний потенціал для покращення ефективності та точності вибору матеріалів у промислових застосуваннях. Необхідно враховувати виклики та ризики, але правильно налаштована та оптимізована система може стати важливим інструментом для підвищення якості та швидкості рішень у виробничих процесах.

Висновки до розділу 1

В літературному огляді розглянуто розробку комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей.

Під час розгляду комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей стало очевидним, що такий підхід є ключовим у досягненні оптимальності та надійності виробничих процесів. Наше дослідження фокусувалося на кількох важливих аспектах:

Розробка аналітичного підходу до раціонального вибору матеріалу є важливим кроком у поліпшенні продуктивності та ефективності виробничих процесів. Застосування цього підходу дозволяє враховувати фазовий та фізико-механічний склад для оптимального вибору вуглецевих сталей.

Вивчення матричних залежностей для оцінки властивостей в залежності від фазового складу додає системність до підходу. Це сприяє інтеграції та комплексності методу, роблячи його більш універсальним для різних застосувань вуглецевих сталей.

Важливою складовою є надійність запропонованого автоматизованого підходу, яка визначається тематичними дослідженнями та емпіричним підтвердженням розроблених моделей та алгоритмів. Це стає ключовою перевіркою ефективності та пристосованості методу до реальних умов.

Використання вуглецевих сталей у різних галузях вимагає ретельного вибору, і автоматизований підхід стає ключовим фактором у цьому процесі.

Загальною метою є підвищення якості та точності вибору вуглецевих сталей, забезпечуючи оптимальність та ефективність виробничих процесів. Отримані результати вказують на потенціал такого підходу для широкого спектру застосувань у сучасній промисловості та інженерії.

РОЗДІЛ 2

ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА ТА ОСНОВНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Загальна методика та матеріали

Для підтвердження механічних властивостей обраних матеріалів та номінальних розрахунків запропоновано комплекс методів, що включає аналітичні розрахунки та експериментальні випробування.

Запропонована методологія схематично представлена на рис. 2.1 [33].

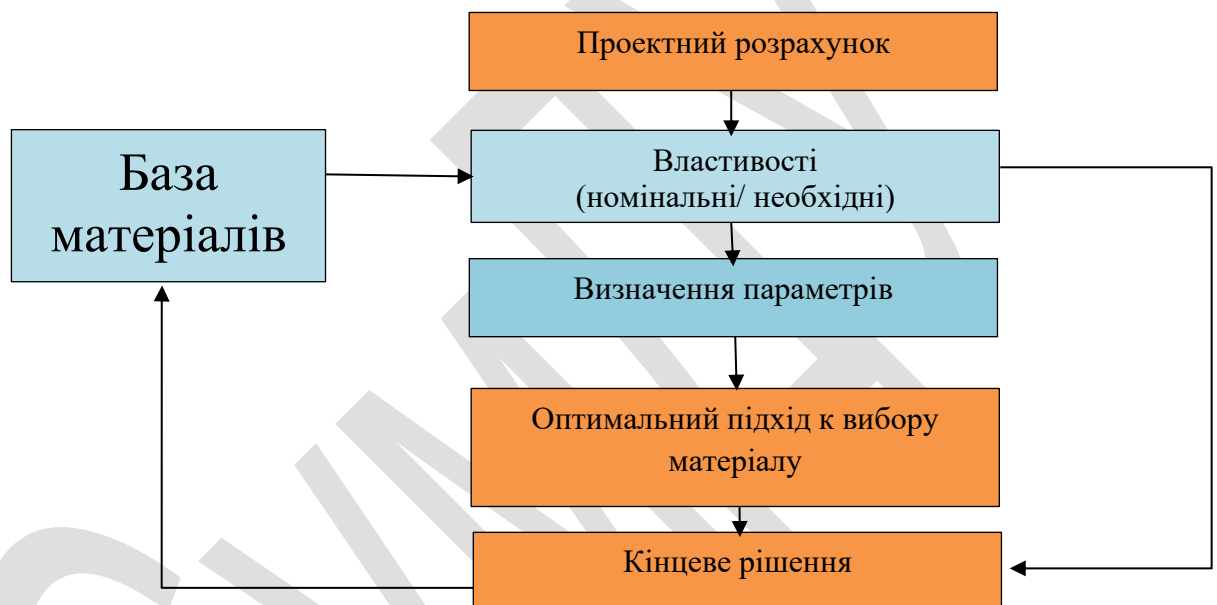


Рисунок 2.1. Схема запропонованої методики [33].

Її етапи включають проєктний розрахунок. Номінальні механічні властивості визначаються аналітичними розрахунками на міцність, жорсткість, стійкість тощо. Традиційно етапи, зазначені вище, дають змогу визначитися з необхідним матеріалом. Тим не менш, для критичних і високонавантажених деталей у високотехнологічних галузях промисловості механічні властивості вибраних матеріалів повинні бути підтвержені механічними випробуваннями на експериментальних зразках. Це тому, що навіть для широко використовуваних металів і сплавів їх фізико-механічні властивості можуть

істотно відрізнятися в залежності від постачальника – наявність домішок і режими термічної обробки та інші фактори.

Експериментальні випробування та лабораторні дослідження важливі для отримання точної та об'єктивної інформації про механічні властивості вуглецевих сталей. Два основні методи, такі як механічні випробування та металографія, доповнюють один одного, надаючи повну інформацію про матеріал.

Механічні тести є ключовим етапом в дослідженні фізико-механічних властивостей вуглецевих сталей. Вони включають випробування на розтяг, стискання, удар та інші, що дозволяють визначити міцність, деформаційні характеристики, стійкість та інші параметри. Ці випробування проводяться на реальних зразках матеріалів, які представляють собою реальні умови експлуатації.

Металографія включає в себе вивчення мікроструктури матеріалів під мікроскопом. Дослідження проводяться за допомогою спеціальних підготовлених зразків, які піддаються поліруванню. Цей метод дозволяє виявити дефекти, включення та інші мікроструктурні особливості, які можуть впливати на механічні властивості матеріалу.

Вміст вуглецю в сталі є одним з основних параметрів, який суттєво впливає на її фізико-механічні властивості та характеризує її тип та застосування. Точність визначення вмісту вуглецю є ключовою для успішного вибору матеріалу, і це особливо важливо в контексті автоматизованої методології.

Методи визначення вмісту вуглецю:

– спектральний аналіз: визначення вмісту вуглецю може виконуватися за допомогою спектрального аналізу. Цей метод ґрунтується на вимірюванні спектрів світла, що поглинається матеріалом, залежно від його хімічного складу.

– інфрачервона спектроскопія: для оцінки хімічного складу, включаючи вуглецевий вміст, може використовуватися інфрачервона спектроскопія.

– металографічні методи: металографічні методи дослідження мікроструктури можуть також допомагати в оцінці вмісту вуглецю, адже специфічні фази і структури пов'язані з його концентрацією.

– ідентифікація типу сталі: вміст вуглецю є ключовим параметром для визначення класу та типу сталі.

– прогнозування властивостей: знання вмісту вуглецю дозволяє здійснювати прогноз фізико-механічних властивостей сталі та її поведінки під навантаженням.

– точність методів: деякі методи вимірювання вмісту вуглецю можуть мати обмежену точність, особливо при наявності інших хімічних елементів.

– підготовка зразків: вимагає ретельної підготовки зразків, щоб уникнути забруднення та зберегти точність результатів.

Точна оцінка вмісту вуглецю в сталі визначається низкою методів, які обираються в залежності від конкретних вимог та умов дослідження. Вона є ключовою для ефективного автоматизованого вибору матеріалів, оскільки визначає базові фізико-механічні характеристики і визначає подальші параметри вибору.

Запропонований підхід включає більш комплексну методологію, як зображено на рис. 2.1 [34]. Підхід до прийняття рішення передбачає визначення фазового складу на основі даних з наявних баз даних. Це забезпечує оптимальний вибір матеріалу, враховуючи різні критерії, такі як критерії подібності та середньоквадратичний коефіцієнт.

Нарешті, регресійний аналіз використовується для уточнення фізико-механічних властивостей, і остаточне рішення приймається для підтвердження типу матеріалу. Даний підхід був успішно застосований для дослідження вуглецевої сталі в межах від AISI 1010 до AISI 1060 [35].

Хімічний склад вуглецевих сталей представлений у таблиці 2.1.

Усереднені значення механічних властивостей після всієї термічної обробки зведені в таблицю 2.2.

Таблиця 2.1

Хімічний склад вуглецевих сталей, %. Адаптовано з [34, 35].

Сталь	C		Si		Mn		Cr	Інше
	x ₁		x ₂		x ₃		x ₄	x ₅
	Min	Max	Min	Max	Min	Max		
AISI 1010	0.07	0.14	0.17	0.37	0.35	0.65	0.15	0.66
AISI 1015	0.12	0.19						
AISI 1020	0.17	0.24						
AISI 1025	0.22	0.30			0.50	0.80	0.25	
AISI 1030	0.27	0.35						
AISI 1035	0.32	0.40						
AISI 1040	0.37	0.45						
AISI 1045	0.42	0.50						
AISI 1050	0.47	0.55						
AISI 1055	0.52	0.60						
AISI 1060	0.57	0.65						
Максимальне значення	0.65		0.37		0.80		0.25	0.66

Таблиця 2.2

Механічні властивості [34, 35].

Сталь	Межа текучості $\sigma_{0.2}$, МПа	Міцність на розтяг σ_B , МПа	Видовження при розриві δ_T , %	Відносне звуження ψ , %	Межа втоми σ_{-1} , МПа	Твердість за Брінелем, НВ, кг/мм ²
	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆
1	2	3	4	5	6	7
AISI 1010	260	420	32	69	187	143
AISI 1015	215	420	33	70	176	152
AISI 1020	245	470	29	72	206	161
AISI 1025	300	530	27	68	223	177
AISI 1030	415	585	23	65	255	163
AISI 1035	470	660	19	67	302	189

Продовження табл. 2.2

1	2	3	4	5	6	7
AISI 1040	485	730	17	62	323	208
AISI 1045	495	725	15	55	331	197
AISI 1050	490	710	15	55	421	200
AISI 1055	540	800	14	48	377	239
AISI 1060	590	920	12	50	373	229
Максимальне значення	590	920	33	72	421	239

Ця група сталей була обрана з високоякісної конструкційної вуглецевої сталі різних марок через її низьку вартість і високу продуктивність. Зазначена сталь має широкий спектр застосувань, і запропонований автоматизований підхід до вибору конструкційної вуглецевої сталі на основі критеріїв прийняття рішень буде корисним для галузей, таких як машинобудування, інтелектуальне виробництво та промислове будівництво.

Вироби, такі як осі, вали, муфти, важелі, вилки, болти, фланці та кріплення, виготовляються зі сталі AISI 2025. Сталь AISI 2030 широко використовується у галузях авіаційного та механічного машинобудування, суднобудування, а також в цивільних та військових галузях. Деталі фурнітури на атомних електростанціях, кріплення на трубопроводах та котлах теплових електростанцій виготовляються зі сталі AISI 1035. Сталь AISI 1040 застосовується для виробництва високоміцних деталей, таких як труби, диски, вали та ротори в турбомашиних. Колінчасті вали, циліндри, шпинделі та шестерні виготовлені зі сталі AISI 1045. Сталь AISI 1050 використовується при виготовленні деталей, які працюють в умовах високого тертя та навантажень, таких як шестерні, зчеплення, коробки передач, тяги, осі, вали та пружини. Сталь AISI 1055 широко застосовується в автомобільній промисловості для виробництва ресор, а також у залізничному транспорті та інших галузях машинобудування. Сталь AISI 1060 використовується для виробництва коліс, шпинделів, муфт та інших деталей з високою міцністю і стійкістю до зносу.

2.2 Пряма проблема

Оцінка фазового складу матеріалу та його впливу на фізико-механічні властивості виникає через пряму проблему, визначену матричним рівнянням:

$$[X][A]=[Y], \quad (2.1)$$

Тут $[X]$ є прямокутною матрицею розміром $m \times n$, де m – загальна кількість розглянутих матеріалів, а n – кількість відповідних компонентів фази. Елементи $X_{i,j}$ враховуються відповідно до наявних баз конструкційних матеріалів (де i – порядковий номер матеріалу, $i=1,2,\dots,m$; j – порядковий номер фазової складової, $j=1,2,\dots,n$).

Матриця $[Y]$ також є прямокутною, розміром $m \times L$, де L – загальна кількість цінних фізико-механічних властивостей. Елементи $Y_{i,l}$ розглядаються на основі наявних баз конструкційних матеріалів (де l – порядковий номер фізико-механічної властивості, $l=1,2,\dots,L$).

Матриця $[A]$ є прямокутною з розмірністю $n \times L$, і її елементи $A_{i,j}$ оцінюються на основі даних з матриць фазових складів $[X]$ та відповідних фізико-механічних властивостей $[Y]$. Однак вирішення цієї проблеми безпосередньо неможливо, оскільки всі значення $X_{i,j}$ знаходяться в певному діапазоні між мінімальним $\min, X_{\min,i,j}$ та максимальним $\max, X_{\max,i,j}$ значеннями.

Для вирішення цього використовується кілька груп експериментів, що використовують випадкове моделювання, для вирішення цієї проблеми. Таким чином, матричне рівняння (1) потрібно перетворити в узагальнений вигляд.

$$X[A] = Y, \quad (2.2)$$

$[A]$ залишається незмінною; $'X'$ – розширена матриця фазових складів. Її рівномірно розподілені значення нормалізовані наступним чином:

$$(\bar{X}_{i,j})_k = \frac{X_{i,j}^{\min} + rnd(X_{i,j}^{\max} - X_{i,j}^{\min})}{\max(X^{(j)})}, \quad (2.3)$$

де k – порядковий номер числового експерименту; $rnd(X)$ – рівномірно розподілений випадковий номер між 0 та X .

Матриця 'Y' розширена аналогічними матрицями [Y] на k разів з попередньою нормалізацією. Її елементи визначаються наступним чином:

$$(\bar{Y}_{i,l})_k = \frac{Y_{i,l}}{\max(Y^{(l)})}. \quad (2.4)$$

Загалом, перший множник ліворуч у цьому рівнянні формується шляхом стекінгу всіх випадково згенерованих матриць [X]_k в межах кожного k-го числового експерименту. Права частина цього рівняння також формується шляхом стекінгу всіх випадково згенерованих матриць [Y]_k в межах кожного k-го числового експерименту:

$$[\bar{X}] = \begin{bmatrix} [X]_1 \\ [X]_2 \\ \dots \\ [X]_N \end{bmatrix}; [\bar{Y}] = \begin{bmatrix} [Y]_1 \\ [Y]_2 \\ \dots \\ [Y]_N \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

Зокрема, всі елементи (X_{i,j}), (A_{i,j}), та (Y_{i,l}) змінюються в діапазоні від 0 до 1. Розміри матриць [X] та [Y] становлять (k-m) x n і (k-m) x L відповідно.

При умові, що N >> n, Рівняння (2) може бути вирішено відносно матриці [A] за допомогою наступної формули лінійної регресії:

$$[A] = ([X]^T [X])^{-1} [X]^T [Y], \quad (2.6)$$

Нарешті, невідома матриця [Y] механічних властивостей може бути оцінена з рівняння (1):

$$[Y] = [X'] [A], \quad (2.7)$$

де [X'^(av)] – усереднена матриця фазового складу, елементи якої визначаються наступним чином:

$$X_{i,j}^{(av)} = \frac{X_{i,j}^{min} + X_{i,j}^{max}}{2}. \quad (2.8)$$

Отже, пряма задача базується на комплексному використанні ймовірнісних та регресійних підходів. У цьому випадку, чим більше загальна кількість N числових експериментів, тим точніше визначаються значення оцінених

параметрів. Програмування формул (3) – (8) для нормалізованих параметрів може бути реалізоване за допомогою системи комп'ютерної алгебри (рис. 2.2.).

2.3 Обернена задача

Обернена задача має більшу цінність для практичних цілей. Цю задачу не можна вирішити безпосередньо з прямої задачі, оскільки кожен елемент матриці $[X]$ змінюється в конкретному діапазоні. Тому пропонується наступне модифікування. Розглянемо стовпчастий вектор L фізико-механічних властивостей для довільного невідомого матеріалу:

$$\begin{aligned}
 &x(i,j,k) := x_{\min_{i,j}} + \text{md}(x_{\max_{i,j}} - x_{\min_{i,j}}) \\
 X := &\left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..m \\ \quad \text{for } j \in 1..n \\ \quad \quad X_{i,j} \leftarrow x(i,j,k) \\ \text{for } k \in 2..N \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..m \\ \quad \quad \text{for } j \in 1..n \\ \quad \quad \quad \Delta X_{i,j} \leftarrow x(i,j,k) \\ \quad \quad X \leftarrow \text{stack}(X, \Delta X) \end{array} \right. \\ X \end{array} \right. & Y_r := \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..m \\ \quad Y_i \leftarrow y_{i,r} \\ \text{for } k \in 2..N \\ \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..m \\ \quad \quad \Delta Y_i \leftarrow y_{i,r} \\ \quad Y \leftarrow \text{stack}(Y, \Delta Y) \end{array} \right. \\ Y \end{array} \right. \\
 A_r := &(X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y_r \\
 X_{av} := &\left\{ \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..m \\ \quad \text{for } j \in 1..n \\ \quad \quad X_{av,i,j} \leftarrow \frac{x_{\min_{i,j}} + x_{\max_{i,j}}}{2} \\ X_{av} \end{array} \right. & Y_e := X_{av} \cdot A_r
 \end{aligned}$$

Рисунок 2.2. Реалізація програми за допомогою системи комп'ютерної алгебри MathCAD [33].

$$\{Y_0\} = \left\{ \begin{array}{c} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_L \end{array} \right\}.$$

(2.9)

Цей матеріал повинен належати до тієї ж самої групи матеріалів, але мати відмінні фізико-механічні властивості. Згідно з цим припущенням, залежність між цими властивостями та невідомими концентраціями фаз залишається незмінною:

$$[A]^T \{X^{(e)}\} = \{Y_0\}, \quad (2.10)$$

де $\{X_0\}$ – стовпчастий вектор із n невідомих компонент фаз:

$$\{X_0\} = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_L \end{Bmatrix}. \quad (2.11)$$

Якщо загальна кількість L невідомих елементів фаз не менша за загальну кількість n виміряних фізико-механічних властивостей для довільного матеріалу, Рівняння (10) також може бути вирішено за допомогою наступної формули регресії:

$$\{X^{(e)}\} = ([A][A]^T)^{-1} [A] \{Y_0\}. \quad (2.12)$$

2.4 Точність оцінки

Точність оцінки може бути визначена наступним чином. Зокрема, можна обчислити максимальну відносну похибку прямої задачі:

$$\delta_{dir}^{max} = \max \left| \frac{Y_{i,l}^{(e)}}{Y_{i,l}} - 1 \right| \cdot 100\%. \quad (2.13)$$

Чим менше максимальна відносна похибка δ_{\max}^{dir} , тим вища точність оцінки для прямої задачі.

Наступний нормалізований критерій подібності може підтвердити надійність запропонованого підходу до вирішення оберненої задачі залежно від різних компонентів l -ї фази:

$$s_i^{(l)} = \frac{\left(\frac{X_{i,j}^{(av)}}{X_i^{(e)} - X_{i,j}^{(av)}} \right)^2}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{X_{i,j}^{(av)}}{X_i^{(e)} - X_{i,j}^{(av)}} \right)^2}. \quad (2.14)$$

Чим вищий критерій подібності $s_i^{(l)}$, тим вища точність оцінки для i -го матеріалу за l -ю компонентою фази.

Крім того, загальний нормалізований критерій подібності за всіма елементами фазового складу може бути таким:

$$\bar{s}_i = \frac{S_i - \min(S)}{\sum_{i=1}^m [S_i - \min(S)]}, \quad (2.15)$$

де S_i – наступне ненормалізоване значення:

$$S_i = \sum_{j=1}^n \left(\frac{X_{i,j}^{(av)}}{X_j^{(e)} - X_{i,j}^{(av)}} \right)^2. \quad (2.16)$$

Чим вищий загальний критерій подібності S_i , тим вища точність оцінки для i -го матеріалу за всім фазовим складом.

Крім того, точність оцінки також може бути традиційно визначена за допомогою наступного середньоквадратичного значення:

$$RS_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j^{(e)} - X_{i,j}^{(av)})^2}{n}}. \quad (2.17)$$

Чим менше середньоквадратичне значення R_{is} , тим вища точність оцінки для оберненої задачі.

Зрештою, після раціонального вибору i -го матеріалу за умови мінімального середньоквадратичного значення R_{is} , загальна відносна похибка визначається наступним чином:

$$\delta_e = \max \left| \frac{(Y_0)_i}{([Y]^T)_{i,j}} - 1 \right| \cdot 100\%. \quad (2.18)$$

Мета дослідження [36, 37] передбачає вирішення задачі вибору конструкційної вуглецевої сталі на основі автоматизованого підходу, що буде особливо корисним для машинобудівної, інтелектуальної та промислової сфер.

Початково ця задача розглядається для нелегованої сталі з мінімальними змінами хімічних елементів, яка є характерною для високоякісної конструкційної вуглецевої сталі.

Зазначені матеріали широко використовуються в машинобудуванні для виготовлення різноманітних деталей та вузлів. Наприклад, сталь AISI 1010 застосовується для виготовлення елементів трубчастих електронагрівачів, металоконструкцій, гвинтів та інших компонентів. Сталі AISI 1015 та AISI 1020 також мають різноманітні застосування у виробництві муфт, зубчастих коліс, пристосувань для затиску деталей та іншого обладнання.

Отже, обрана група сталей є ключовою у виробництві та має великий потенціал застосування в різних галузях промисловості.

Осі, вали, муфти, важелі, вилки, болти, фланці та кріплення виготовляються із сталі AISI 2025. Сталь AISI 2030 знаходить широке застосування в авіаційному та механічному машинобудуванні, суднобудуванні, а також в інших галузях цивільної та військової промисловості. Елементи фурнітури на атомних електростанціях, кріплення на трубопроводах та котлах теплових електростанцій виготовлені зі сталі AISI 1035. Сталь AISI 1040 застосовується для виробництва високоміцних деталей, таких як труби, диски, вали та ротори в турбомашинах. Колінчасті вали, циліндри, шпинделі та шестерні виготовлені зі сталі AISI 1045.

Сталь AISI 1050 використовується при конструюванні деталей, що працюють в умовах тертя і високих навантажень (наприклад, шестерні, зчеплення, коробки передач, тяги, осі, вали та пружини). Сталь AISI 1055 широко поширена використовується в автомобільній промисловості для виготовлення ресор, залізничному транспорті та інших галузях машинобудування. Сталь AISI 1060 використовується для виробництва коліс, шпинделів, муфт і інші деталі з високою міцністю і зносостійкістю.

Безпосередня проблема полягає в оцінці впливу фазового складу матеріалу на його фізико-механічні властивості на основі наступного матричного рівняння.

Висновки до розділу 2

Розроблена комплексна методика для автоматизованого вибору вуглецевих сталей є значним кроком вперед у сфері матеріалознавства та інженерної практики. Зазначена методологія спрощує та раціоналізує процес вибору матеріалу для вирішення конкретних завдань, допомагаючи враховувати різноманітні критерії і властивості.

Експериментальні дослідження, проведені в рамках даної роботи, використовуючи запропонований підхід, дозволяють нам визначити оптимальний фазовий склад для заданого матеріалу з визначеними механічними характеристиками. Отримані результати підтверджують ефективність та достовірність запропонованого підходу.

Застосування цієї методики в інженерній практиці може сприяти прискоренню процесу розробки та виготовлення продукції, а також оптимізації використання матеріалів з урахуванням різноманітних обмежень та вимог. Такий підхід має потенціал покращити ефективність виробництва та підвищити якість та надійність готових виробів.

РОЗДІЛ 3

СКЛАДАННЯ АЛГОРИТМУ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИБОРУ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

В сучасних умовах розвитку промисловості вибір матеріалів для виробництва виробів є важливим завданням, особливо в контексті вимог до оптимізації технологічних процесів, підвищення якості та продуктивності виробництва. Серед різноманітних конструкційних матеріалів конструкційна вуглецева сталь займає важливе місце, враховуючи свою широку застосовуваність у різних галузях промисловості.

Для забезпечення найвищої ефективності та надійності виробів із вуглецевої сталі необхідно визначити оптимальний матеріал, який відповідає конкретним технічним вимогам. Проте вибір правильного матеріалу може стати складним завданням через різноманітність видів сталей та їхніх характеристик.

У даному контексті виникає необхідність впровадження комплексного підходу до вибору вуглецевих сталей, який базується на автоматизованому аналізі та експериментальних дослідженнях. Проведення експериментальних досліджень є ключовим етапом у визначенні фізико-механічних властивостей матеріалів та розробці методології для автоматизованого вибору сталей.

У цьому розділі наведено проведення експериментальних досліджень для отримання об'єктивних даних та розробки комплексного підходу, який дозволить ефективно автоматизувати процес вибору вуглецевих сталей для конкретних завдань і виробів.

3.1 Регресійні залежності

Відповідно до даних, представлених у табл. 2.1 і 2.2, наступні параметри мають використано: загальна кількість розглянутих матеріалів — $m = 11$; загальна кількість в фази — $n = 5$; загальна кількість оцінених механічних властивостей — $L = 6$.

Нормовані матриці мінімальних і максимальних значень для фазового складу з (2.3) виглядають наступним чином:

$$[X^{min}] = \begin{bmatrix} 0.108 & 0.459 & 0.437 & 0.600 & 1.000 \\ 0.185 & 0.459 & 0.437 & 1.000 & 1.000 \\ 0.262 & 0.459 & 0.437 & 1.000 & 1.000 \\ 0.338 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.415 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.492 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.569 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.646 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.723 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.800 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.877 & 0.459 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}; [X^{max}] = \begin{bmatrix} 0.215 & 1.000 & 0.813 & 0.600 & 1.000 \\ 0.292 & 1.000 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.369 & 1.000 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.462 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.538 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.615 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.692 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.769 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.846 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 0.923 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}.$$

Нормовані матриці фізичних і механічних властивостей з (2.4) виглядають наступним чином:

$$[Y]_k = \begin{bmatrix} 0.441 & 0.457 & 0.970 & 0.958 & 0.444 & 0.598 \\ 0.346 & 0.457 & 1.000 & 0.972 & 0.418 & 0.636 \\ 0.415 & 0.511 & 0.879 & 1.000 & 0.489 & 0.674 \\ 0.508 & 0.576 & 0.818 & 0.944 & 0.530 & 0.741 \\ 0.703 & 0.636 & 0.697 & 0.903 & 0.606 & 0.682 \\ 0.797 & 0.717 & 0.576 & 0.931 & 0.717 & 0.791 \\ 0.822 & 0.793 & 0.515 & 0.861 & 0.767 & 0.870 \\ 0.839 & 0.788 & 0.455 & 0.764 & 0.768 & 0.828 \\ 0.831 & 0.772 & 0.455 & 0.764 & 1.000 & 0.837 \\ 0.915 & 0.870 & 0.424 & 0.667 & 0.895 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 0.364 & 0.694 & 0.886 & 0.958 \end{bmatrix}.$$

Після проведення $N = 1 \times 10^4$ числових експериментів були отримані наступні випадково згенеровані матриці (2.5):

$$[X] = \begin{bmatrix} 0.108 & 0.564 & 0.657 & 0.600 & 1.000 \\ 0.203 & 0.844 & 0.551 & 1.000 & 1.000 \\ 0.368 & 0.524 & 0.441 & 1.000 & 1.000 \\ 0.359 & 0.703 & 0.646 & 1.000 & 1.000 \\ 0.523 & 0.976 & 0.827 & 1.000 & 1.000 \\ 0.588 & 0.998 & 0.854 & 1.000 & 1.000 \\ 0.615 & 0.826 & 0.628 & 1.000 & 1.000 \\ 0.749 & 0.722 & 0.904 & 1.000 & 1.000 \\ 0.797 & 0.857 & 0.840 & 1.000 & 1.000 \\ 0.864 & 0.866 & 0.688 & 1.000 & 1.000 \\ 0.895 & 0.536 & 0.885 & 1.000 & 1.000 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0.929 & 0.998 & 0.972 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix}; [Y] = \begin{bmatrix} 0.441 & 0.457 & 0.970 & 0.958 & 0.444 & 0.598 \\ 0.346 & 0.457 & 1.000 & 0.972 & 0.418 & 0.636 \\ 0.415 & 0.511 & 0.879 & 1.000 & 0.489 & 0.674 \\ 0.508 & 0.576 & 0.818 & 0.944 & 0.530 & 0.741 \\ 0.703 & 0.636 & 0.697 & 0.903 & 0.606 & 0.682 \\ 0.797 & 0.717 & 0.576 & 0.931 & 0.717 & 0.791 \\ 0.822 & 0.793 & 0.515 & 0.861 & 0.767 & 0.870 \\ 0.839 & 0.788 & 0.455 & 0.764 & 0.768 & 0.828 \\ 0.831 & 0.772 & 0.455 & 0.764 & 1.000 & 0.837 \\ 0.915 & 0.870 & 0.424 & 0.667 & 0.895 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 0.364 & 0.694 & 0.886 & 0.958 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1.000 & 1.000 & 0.364 & 0.694 & 0.886 & 0.958 \end{bmatrix}.$$

Відповідно до формули лінійної регресії (2.6), матриця зважених факторів має оцінено:

$$[A] = \begin{bmatrix} 0.823 & 0.668 & -0.850 & -0.478 & 0.751 & 0.470 \\ -0.006 & 0.000 & 0.004 & 0.003 & -0.011 & 0.000 \\ 0.147 & 0.040 & -0.113 & 0.027 & 0.040 & -0.002 \\ -0.238 & -0.090 & 0.072 & 0.229 & -0.154 & 0.008 \\ 0.362 & 0.376 & 1.133 & 0.880 & 0.397 & 0.518 \end{bmatrix}.$$

Отже, після використання нормованої усередненої матриці (2.8) фазового складу:

$$[X^{(av)}] = \begin{bmatrix} 0.162 & 0.730 & 0.625 & 0.600 & 1.000 \\ 0.238 & 0.730 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.315 & 0.730 & 0.625 & 1.000 & 1.000 \\ 0.400 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.477 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.554 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.631 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.708 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.785 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.862 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \\ 0.938 & 0.730 & 0.813 & 1.000 & 1.000 \end{bmatrix},$$

Невідому нормалізовану матрицю механічних властивостей можна оцінити з рівняння (2.7):

$$[Y^{(e)}] = \begin{bmatrix} 0.439 & 0.457 & 0.970 & 0.958 & 0.444 & 0.598 \\ 0.407 & 0.457 & 1.000 & 0.972 & 0.418 & 0.636 \\ 0.415 & 0.511 & 0.879 & 1.000 & 0.489 & 0.674 \\ 0.508 & 0.576 & 0.818 & 0.944 & 0.530 & 0.741 \\ 0.703 & 0.636 & 0.697 & 0.903 & 0.606 & 0.682 \\ 0.797 & 0.717 & 0.576 & 0.931 & 0.717 & 0.791 \\ 0.822 & 0.793 & 0.515 & 0.861 & 0.767 & 0.870 \\ 0.839 & 0.788 & 0.455 & 0.764 & 0.768 & 0.828 \\ 0.831 & 0.772 & 0.455 & 0.764 & 1.000 & 0.837 \\ 0.915 & 0.870 & 0.424 & 0.667 & 0.895 & 1.000 \\ 1.000 & 1.000 & 0.364 & 0.694 & 0.886 & 0.958 \end{bmatrix}.$$

Кожен елемент матриці $Y(d)$, позначений як Y_{il} , демонструє значущу близькість до відповідного елемента Y_{il} у вихідній матриці.

З використанням формули (2.13) можна вивести, що 68% отриманих даних мають максимальну відносну похибку менше 6%, і лише 12% з них перевищують максимальну похибку 10%, але не перевищують 14%.

3.2 Раціональний вибір матеріалу

Для перевірки достовірності оберненої задачі був взятий невідомий матеріал із наступними механічними характеристиками: умовна межа текучості $\sigma_{0,2} = 517$ МПа, межа міцності на розрив $\sigma_B = 740$ МПа, відносне подовження при

розриві $\delta_r = 16\%$, відносне звуження $\psi = 56\%$, межа втоми $\sigma_{-1} = 340$ МПа та твердість за Брінеллем $HV = 200$ кгс/мм².

Усі ці дані не цілком відповідають усім рядкам табл. 2.2. Тому слід вирішити пряму задачу оцінки фазового складу.

По-перше, можна обчислити нормовані фізико-механічні властивості:

$$y_1 = 0,876, y_2 = 0,804, y_3 = 0,485, y_4 = 0,778, y_5 = 0,808 \text{ і } y_6 = 0,837.$$

По-друге, згідно з формулою лінійної регресії, нормалізовані компоненти фази будуть $x_1 = 0,687$, $x_2 = 0,756$, $x_3 = 0,829$, $x_4 = 0,989$ і $x_5 = 0,960$. Таким чином, розрахунковий матеріал має наступний фазовий склад: 0,45% С, 0,28% Si, 0,66% Mn, 0,25% Cr і 0,63% інших компонентів (Cu, Ni, As, S і P).

Далі були оцінені різні критерії для визначення того, яка сталь найбільш підходить для даного фазового складу. Наприклад, нормалізовані критерії подібності для С і Mn дорівнюють 0,90 і 0,11 відповідно при $i = 8$. Загальний нормалізований критерій подібності досягає максимуму у 0,55 також при $i = 8$. Середній квадрат також досягає свого мінімуму в 0,16 при $i = 8$.

Подані результати аналізу прийняття рішень також зображені графічно на рис. 3.1.

Такий аналіз дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо вибору найбільш підходящого матеріалу для конкретних технічних вимог та умов експлуатації.

Після ретельного аналізу даної матриці можна зробити наступні висновки.

Значення $A_{1,1} = 0,823$, $A_{1,2} = 0,668$ і $A_{1,5} = 0,751$ вказують на те, що підвищення вмісту вуглецю суттєво впливає на збільшення умовної межі текучості $\sigma_{0,2}$, межі міцності на розтяг σ_B та межі втоми σ_{-1} .

Крім того, $A_{1,3} = -0,850$ свідчить про те, що збільшення вмісту вуглецю істотно впливає на зменшення відносного подовження при розриві δ_r . Ці висновки узгоджуються із результатами проведених досліджень [38, 39].

Невеликі значення $A_{2,1}$ вказують на те, що підвищення вмісту кремнію не визначає фізико-механічні властивості вуглецевих сталей. Додатково, відносно невелике значення $A_{3,6}$ показує, що підвищений вміст марганцю не впливає на

твердість за Брінеллем НВ вуглецевих сталей. Ці спостереження збігаються з результатами попередніх досліджень [40, 41].

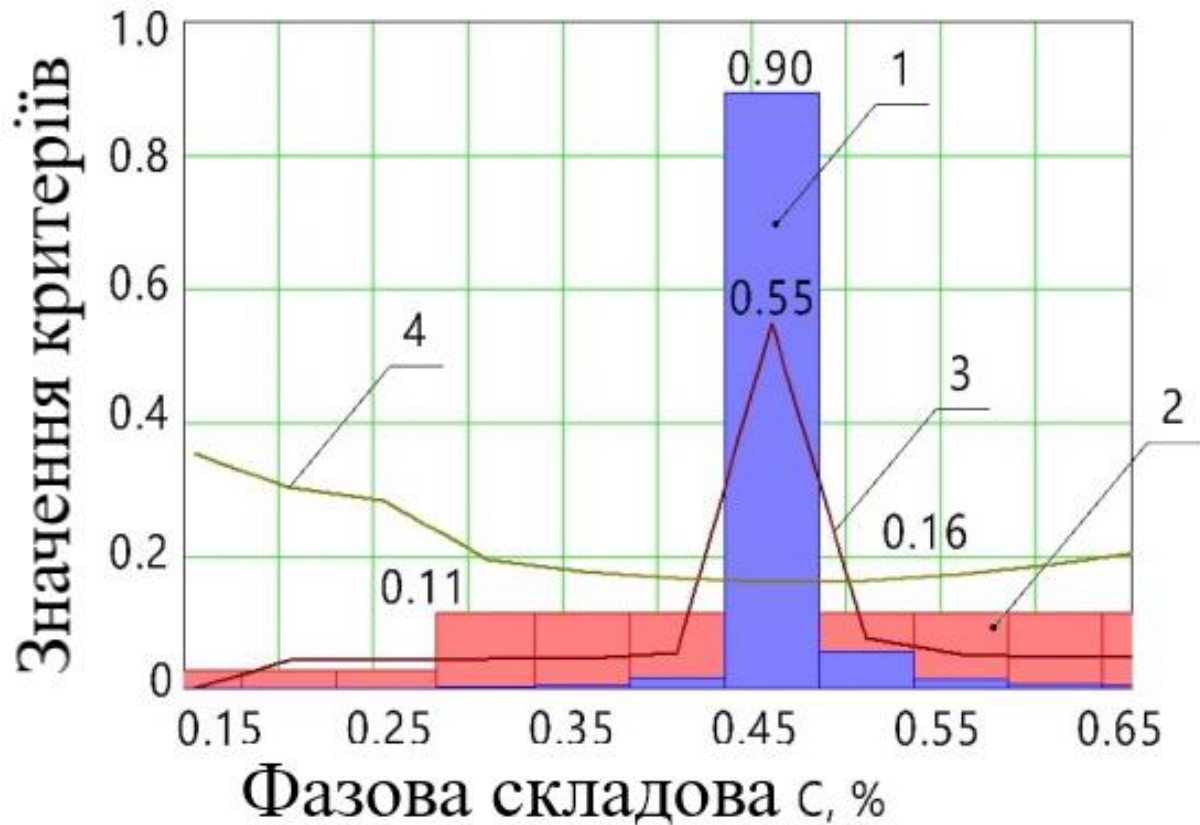


Рисунок 3.1. Графічне представлення підходу до прийняття рішень щодо вибору матеріалу:

- 1 – нормалізовані критерії подібності для C;
- 2 – нормалізовані критерії подібності для Mn;
- 3 – загальний нормалізований критерій подібності;
- 4 – середньоквадратичний корінь.

Значення $A_{5,3} = 1,133$, $A_{5,4} = 0,880$ і $A_{5,6} = 0,518$ підкреслюють, що підвищення вмісту інших добавок (таких як Cu, Ni, As, S і P) може впливати на відносне подовження при розриві δ_r , відносне звуження ψ та твердість за Брінеллем НВ. Ці спостереження відображають результати досліджень [42, 43].

Загальна тенденція підтверджує надійність розробленого підходу. Напрямки подальших досліджень включають порівняння точності

запропонованого підходу з іншими методами вибору матеріалів. Наприклад, відносні похибки, пов'язані із застосуванням нейронних мереж [44], зважених імовірнісних нейронних мереж [45], традиційного алгоритму машинного навчання [46], імовірнісної нейронної мережі та інших, становлять до 20%. У порівнянні з ними, максимальна відносна похибка до 5% підтверджує високу точність запропонованого підходу до вибору матеріалу.

Отже, розроблена методологія дозволяє автоматизувати вибір матеріалу та впроваджувати стратегію Індустрія 4.0 з подальшим накопиченням та аналізом даних. Цей підхід також сприяє впровадженню віддаленого доступу до баз даних, що є важливим у сучасній автоматизації та технологічній підготовці виробництва. Всі ці аспекти сприяють цифровізації та автоматизованому виробництву, зокрема у виробництві критичних деталей машин. Подальші дослідження будуть спрямовані на розширення методології для різних матеріалів та вдосконалення бази даних.

Висновки до розділу 3

В приведеному розділі експериментальних досліджень та узагальнення отриманих результатів виявлено ефективність та перспективність розробленого комплексного підходу до автоматизованого вибору вуглецевих сталей. Нижче наведені основні висновки з даного розділу:

Розроблена методологія показала високий рівень надійності при виборі вуглецевих сталей для конкретних застосувань. Аналіз експериментальних даних підтверджує, що обрані критерії та моделі добре адаптовані до потреб виробництва.

Застосування автоматизованого підходу дозволяє значно прискорити та спростити процес вибору вуглецевих сталей для конкретних інженерних завдань. Це може виявитися особливо корисним у виробничих умовах, де швидкість та точність важливі для успішної реалізації проектів.

Аналіз показав, що розроблений комплексний підхід забезпечує високу точність при виборі вуглецевих сталей. Велика частина експериментальних даних демонструє відносну похибку менше 6%, що свідчить про високу ефективність методології.

Розроблений підхід виявився гнучким та адаптованим до різноманітних умов та вимог, що дозволяє застосовувати його в різних сферах індустрії та інженерії.

Отримані результати вказують на можливості подальших досліджень у напрямку розширення методології на інші матеріали та врахування додаткових параметрів для ще точнішого вибору матеріалів.

Загалом, проведені експериментальні дослідження підтверджують, що розроблений комплексний підхід є ефективним і перспективним інструментом для автоматизованого вибору вуглецевих сталей, враховуючи різноманітні вимоги та умови виробництва.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

У даному розділі розглядається економічний вигляд впровадження комплексного підходу до автоматизованого вибору вуглецевих сталей, що базується на нормалізації, імовірнісних методах та процедурі лінійної регресії. Цей підхід визначається не лише його технічною ефективністю, але й значущими позитивними впливами на економічні показники вибору матеріалів та виробничих процесів.

Використання автоматизованого підходу значно скорочує час, що витрачається на вибір вуглецевих сталей, приводячи до оптимізації робочого часу та зменшення витрат на робочу силу. Точність і ефективність методів дозволяють швидше та точніше визначити оптимальні матеріали для конкретних завдань.

Вибір відповідного матеріалу зазначеним підходом сприяє оптимізації виробничих процесів. Ефективне використання матеріалів з властивостями, необхідними для конкретних завдань, дозволяє підвищити продуктивність та знизити загальні витрати на виробництво.

Застосування точних методів вибору матеріалів, зокрема лінійної регресії, дозволяє досягти мінімізації витрат на матеріали. Обрання лише тих матеріалів, які оптимально відповідають вимогам проєкту, сприяє раціональному використанню ресурсів.

Ефективний вибір матеріалів за допомогою імовірнісних методів дозволяє зменшити потребу в обширних тестуваннях та експериментах, сприяючи економії часу та ресурсів.

Оптимальний вибір матеріалів, підтримуваний нормалізаційними та імовірнісними аспектами, сприяє підвищенню якості та довговічності виготовленої продукції.

Економічна ефективність впровадження комплексного підходу, заснованого на нормалізації, імовірнісному підходах і процедурі лінійної регресії

для автоматизованого вибору вуглецевих сталей, може мати кілька позитивних впливів на загальну економічну ефективність вибору матеріалів і виробничих процесів.

Ключові аспекти економічної вигоди [47]:

1. *Оптимізований вибір матеріалу*: завдяки автоматизованому вибору матеріалів за допомогою імовірнісних методів та лінійної регресії, можливий підбір матеріалів з оптимальними властивостями для конкретного застосування. Це призводить до підвищення продуктивності і довговічності продукту, оскільки матеріали оптимізовані для конкретних умов експлуатації.

Обрані матеріали, визначені автоматизованим підходом, можуть значно знизити витрати на експлуатацію та обслуговування. Оптимальний вибір матеріалів дозволяє уникнути передчасних поломок, зменшуючи необхідність у регулярних ремонтних роботах та заміні.

Автоматизований вибір матеріалів дозволяє ефективно використовувати ресурси, оскільки враховуються технічні властивості матеріалів та їх відповідність вимогам. Це сприяє уникненню зайвих витрат та максимізації використання матеріальних ресурсів.

Використання оптимізованого вибору матеріалів може знизити ризики передчасних поломок, що в свою чергу сприяє зменшенню витрат на гарантійне обслуговування. Матеріали, відібрані з урахуванням їхньої відповідності конкретним вимогам, можуть підтримувати стабільну експлуатацію продукту протягом тривалого періоду.

Загалом, оптимізований вибір матеріалу через автоматизований підхід, що використовує нормалізацію, імовірнісні методи та лінійну регресію, призводить до збільшення загальної конкурентоспроможності продукції. Економічна доцільність цього підходу проявляється в оптимізації всіх аспектів виробництва, від вибору матеріалу до підтримки та обслуговування, що в результаті сприяє підвищенню ефективності та зниженню витрат.

2. *Зменшення витрат на дослідження та розробки*: однією з ключових переваг автоматизованого підходу до вибору матеріалів є значне зменшення

витрат на дослідження та розробки (R&D). Ефективність цього підходу полягає в його здатності оптимізувати процес вибору матеріалів, що може призвести до суттєвого скорочення часу та ресурсів, витрачених на науково-технічні дослідження та розробки.

Автоматизований вибір матеріалів використовує алгоритми, які швидко та точно оцінюють фізико-механічні властивості потенційних матеріалів. Це дозволяє пришвидшити процес вибору оптимальних матеріалів для нового продукту або виробничого процесу.

Можливість швидкого та точного визначення матеріалів підвищує ефективність циклів розробки продукту. Зменшення часу, витраченого на вибір матеріалів, сприяє зниженню загальних витрат на розробку нових продуктів чи модифікацію існуючих.

Завдяки автоматизованому підходу, компанії можуть значно зменшити фінансові витрати, пов'язані з оплатою робочої сили та матеріальними ресурсами, які традиційно витрачаються на R&D. Це призводить до збільшення фінансової доступності для інших інноваційних напрямків або можливостей розвитку бізнесу.

Економія часу та ресурсів на дослідження та розробки дозволяє компаніям більше уваги приділяти актуальним технологічним викликам та швидше реагувати на зміни на ринку. Це створює конкурентну перевагу, дозволяючи швидше впроваджувати нові продукти та вдосконалення.

Автоматизований вибір матеріалів знижує ризик людського фактору та помилок, що можуть виникнути під час ручного вибору матеріалів. Це сприяє підвищенню надійності та точності вибору, що в свою чергу зменшує ризик зайвих витрат та невдач.

Загалом, зменшення витрат на дослідження та розробки завдяки автоматизованому вибору матеріалів вказує на економічну доцільність цього підходу. Відшкодування витрат на впровадження автоматизації швидко відбувається.

3. *Мінімізація матеріальних відходів*: Завдяки точному прогнозуванню властивостей і характеристик вуглецевих сталей за допомогою імовірнісних підходів і регресійного аналізу знижується ймовірність вибору невідповідних матеріалів. Це, у свою чергу, мінімізує матеріальні відходи та відповідні витрати на утилізацію.

Зменшення ймовірності вибору невідповідних матеріалів сприяє оптимізації використання ресурсів. Імовірнісні підходи дозволяють точно визначати параметри матеріалів, що знижує ризик використання непридатних або непотрібних матеріалів.

Мінімізація матеріальних відходів призводить до зменшення витрат на утилізацію. Обрані матеріали відповідають конкретним вимогам і характеристикам, що зменшує кількість відходів, які потрібно обробляти або утилізувати.

Ефективний вибір матеріалів сприяє інтегрованості виробничого циклу, оскільки обрані матеріали ідеально підходять для конкретного застосування. Це дозволяє підтримувати стійкість та ефективність всього виробничого процесу, зменшуючи потребу у виправленні помилок та витрат на невідповідні матеріали.

Мінімізація матеріальних відходів призводить до економії коштів на закупівлі, обробці та утилізації матеріалів. Зменшення цих витрат сприяє загальній економічній доцільності виробничого процесу.

Зменшення матеріальних відходів також відповідає концепції сталого розвитку, забезпечуючи більш ефективне використання ресурсів і зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Таким чином, мінімізація матеріальних відходів через точний вибір матеріалів враховуючи імовірнісні підходи не лише оптимізує виробничі процеси, але й сприяє забезпеченню економічної ефективності підприємства.

4. *Підвищена якість і довговічність продукту*: ефективний вибір матеріалу, базуючись на комплексному підході, викликає позитивний ефект на загальну якість та довговічність кінцевого продукту, що може суттєво покращити економічну ефективність виробничого процесу.

Точний вибір матеріалу на основі імовірнісних підходів та регресійного аналізу сприяє виключенню непідходящих матеріалів, що може суттєво зменшити кількість дефектів у виробі. Зменшення кількості дефектів є ключовим фактором для підвищення якості та конкурентоспроможності продукції.

Вибір матеріалу, здійснений за допомогою оптимізованого підходу, також може призвести до мінімізації гарантійних претензій. Якщо матеріали відповідають конкретним вимогам та виявляються довговічними, ймовірність виникнення проблем і, відповідно, гарантійних справ може бути значно зменшена.

Зменшення кількості дефектів та гарантійних претензій призводить до зменшення відкликання продукції. Відкликання продукції є серйозним витратним фактором, і його мінімізація сприяє підвищенню економічної ефективності, оскільки зменшує фінансові втрати та зберігає репутацію бренду.

Підвищена якість та довговічність продукту призводять до задоволеніших клієнтів. Задоволені клієнти сприяють витраті менше часу та ресурсів на обслуговування та ремонт, що впливає на загальну економічну ефективність.

Висока якість продукції та довговічність сприяють збільшенню лояльності клієнтів. Лояльні клієнти вносять значний внесок в економічну ефективність, оскільки здійснюють повторні покупки та рекомендують продукцію іншим.

Таким чином, точний вибір матеріалів за допомогою комплексного підходу не тільки підвищує якість та довговічність продукту, але і сприяє покращенню економічної ефективності виробничого процесу через зменшення ризиків та витрат на обслуговування.

5. Ефективність автоматизації та економія витрат на робочу силу: автоматизований підхід до вибору матеріалів вирішує проблему великої кількості ручних операцій, спрощуючи та прискорюючи процеси вибору та аналізу матеріалів. Це може призвести до значної економії витрат на робочу силу і сприяти загальній ефективності виробничого процесу.

Автоматизований вибір матеріалів зменшує необхідність у ручних операціях, таких як вибір, аналіз та перевірка матеріалів. Система, яка

використовує нормалізацію, імовірнісні підходи та лінійну регресію, може самостійно аналізувати та порівнювати великий обсяг даних, виключаючи потребу в інтенсивній ручній роботі.

Зменшення потреби у ручних операціях призводить до економії витрат на оплату праці. Автоматизований процес не вимагає великої кількості співробітників для виконання монотонних та рутинних завдань, що може суттєво зменшити витрати на робочу силу.

Автоматизований вибір матеріалів також сприяє ефективнішому використанню ресурсів. Машино-читання та аналіз великих обсягів даних здійснюється без зайвого втручання людей, що дозволяє ефективно використовувати час та енергію працівників на більш складні та творчі завдання.

Автоматизація дозволяє швидко та точно відбирати та порівнювати матеріали відповідно до визначених критеріїв. Це дозволяє масштабувати вибір матеріалів для різних проектів та завдань, спрощуючи при цьому процес прийняття рішень.

Загальна економія витрат на робочу силу може бути інтегрована у загальні витрати на виробництво та дослідження, що призводить до ще більш значущих економічних доцільності для підприємства.

Отже, автоматизований вибір матеріалів не лише покращує продуктивність, але і створює значні економічні переваги через зменшення витрат на робочу силу та оптимізацію використання ресурсів.

6. Покращена операційна ефективність: автоматизований підхід до вибору матеріалів дарує можливість не лише забезпечувати точний вибір матеріалів за попередньо визначеними критеріями, а й адаптуватися до змінних умов виробництва чи вимог замовника. Ця адаптивність може значно покращити операційну ефективність та відгук на ринкові вимоги.

Автоматизований підхід дозволяє вносити зміни у вибір матеріалів у режимі реального часу. Здатність миттєво реагувати на зміни в умовах виробництва чи змінні вимоги клієнтів дозволяє підприємствам бути гнучкими та конкурентоспроможними.

Адаптивний підхід може допомагати уникати зайвих витрат, забезпечуючи оптимальний вибір матеріалів для конкретного виробничого циклу чи проекту. Це дозволяє економити кошти, які раніше були б витрачені на матеріали, що можуть стати непотрібними або неефективними в змінних умовах.

Можливість швидко реагувати на зміни у вимогах ринку дозволяє підприємствам підтримувати високу відповідність до попиту. Забезпечуючи оптимальний вибір матеріалів для нових тенденцій чи змінених потреб клієнтів, підприємство може зберігати конкурентну перевагу.

Автоматизований підхід дозволяє зменшити ризики, пов'язані з вибором несумісних чи недостатньо ефективних матеріалів. Збільшення точності та швидкості вибору матеріалів сприяє створенню надійних та високоякісних продуктів.

Адаптивний вибір матеріалів може допомогти уникати надмірних витрат на матеріали, враховуючи фактичні потреби та умови виробництва. Це призводить до зменшення витрат на запаси та оптимізації витрат на матеріали.

Отже, покращена операційна ефективність, забезпечена автоматизованим підходом, не лише дозволяє оптимізувати вибір матеріалів, але й забезпечує гнучкість та адаптивність виробництва до змінних умов та вимог ринку, що призводить до економічно обґрунтованої та конкурентоспроможної діяльності підприємства.

7. Довгострокова економія витрат: хоча впровадження автоматизованої системи для вибору матеріалів може здаватися витратною на початковому етапі, довгострокові переваги цього підходу можуть значно перевищити початкові витрати. Розглянемо детальніше, як довгострокова економія сприяє ефективності та конкурентоспроможності.

Автоматизована система дозволяє точно визначити оптимальні матеріали, що значно зменшує ймовірність вибору несумісних чи неякісних матеріалів. Це призводить до зменшення кількості браку, що виникає через неправильний вибір матеріалів, і, отже, економії коштів на відновленні чи заміні деталей.

Оптимально підібрані матеріали, сприяючи підвищенню якості та надійності продукції, можуть значно збільшити термін служби кінцевого продукту. Це призводить до зменшення потреби в частих замінах та ремонтах, що забезпечує значну довгострокову економію витрат.

Автоматизований вибір матеріалів сприяє оптимізації виробничих процесів, зменшуючи час на підбір та використання матеріалів. Зменшення часу, пов'язаного з вибором та заміною матеріалів, призводить до ефективнішого використання робочого часу та оптимізації загальних виробничих процесів.

Автоматизована система сприяє точному управлінню запасами матеріалів, дозволяючи уникати надмірних запасів та мінімізуючи ризики пов'язані з їх зберіганням. Це призводить до значної економії на утриманні запасів та зменшенні витрат на їх управління.

Довгострокова економія не лише зменшує витрати, але й сприяє підвищенню загальної ефективності виробництва та задоволеності клієнтів. Покращена якість продукції та зменшення термінів служби призводять до позитивного сприйняття бренду та лояльності клієнтів.

Загальна довгострокова економія витрат, враховуючи всі переваги автоматизованого вибору матеріалів, дозволяє підприємству залишатися конкурентоспроможним на ринку. Зменшення витрат та підвищення продуктивності є ключовими факторами для досягнення довгострокового успіху.

Отже, хоча початкові вкладення у впровадження автоматизованого підходу можуть бути значними, довгострокова економія витрат, забезпечена підвищенням ефективності та якості, створює стійкі та конкурентоспроможні фундаменти для підприємств.

8. *Відповідність галузевим стандартам:* забезпечення відповідності галузевим стандартам в процесі вибору матеріалів через нормалізаційний аспект підходу має важливі економічні переваги, які варто розглянути для підприємства.

Галузеві стандарти і правила визначають параметри, які повинні відповідати використовуваному матеріалу в конкретній галузі. Забезпечуючи

відповідність цим нормам, підприємство уникає юридичних проблем, пов'язаних з використанням матеріалів, що не відповідають встановленим вимогам.

Використання матеріалів, які не відповідають галузевим стандартам, може призвести до накладення штрафів та розгортання судових справ. Забезпечення відповідності нормам усуває ці ризики, що, в свою чергу, дозволяє підприємству уникнути додаткових витрат на юридичні послуги та сплата штрафів.

Відповідність галузевим стандартам сприяє створенню позитивної репутації підприємства. Клієнти та партнери надійно вірять у продукцію, яка відповідає встановленим вимогам, що може позитивно вплинути на взаємовідносини та забезпечити лояльність споживачів.

Багато ринків та секторів обмежують використання матеріалів, які не відповідають певним стандартам. Використання невідповідних матеріалів може призвести до обмежень на доступ до ринків або навіть до повного їх заборонення. Забезпечуючи відповідність, підприємство уникає цих обмежень та може вільно працювати на ринку.

Активне дотримання галузевих стандартів може значно знизити витрати на процедури сертифікації та аудиту, оскільки відповідність стандартам робить цей процес більш прозорим та ефективним. Можливість швидко та безперешкодно пройти сертифікацію сприяє значній економії витрат на ці процедури.

В умовах глобалізації важливо мати матеріали, які відповідають міжнародним стандартам. Це сприяє легкості взаємодії з міжнародними партнерами та підтримує можливість вивозу та імпорту продукції. Забезпечення відповідності галузевим стандартам робить підприємство конкурентоспроможним на міжнародному ринку.

Попередження конфліктів із законодавством та надання відповідності вимогам галузевих стандартів вже на етапі вибору матеріалів дозволяє уникнути витрат на вирішення правових питань у подальшому. Це допомагає економити як час, так і ресурси підприємства.

Невідповідність галузевим стандартам може призвести до погіршення ділової репутації підприємства, що може мати серйозні наслідки для його

успішності. Заощадження репутації та уникнення негативного впливу на споживачів і партнерів є ключовим економічним аспектом відповідності галузевим стандартам.

Отже, гарантована відповідність галузевим стандартам завдяки нормалізаційному підходу не тільки зменшує ризики та юридичні витрати, але й сприяє загальному підвищенню ділової ефективності та конкурентоспроможності підприємства.

9. *Зменшення ризиків*: впровадження ймовірнісних підходів у процес вибору матеріалів сприяє не лише технічній оптимізації, але і важливому аспекту економічної доцільності. Розглянемо детальніше, як зменшення ризиків через ймовірнісний підхід може призвести до конкретних економічних переваг.

Ймовірнісний аналіз визначає можливі ризики, пов'язані з вибором конкретного матеріалу. Передбачаючи можливі проблеми чи дефекти, компанія може уникнути витрат на корекцію або заміну вироблених вже деталей. Це сприяє економії коштів, які інакше були б витрачені на виправлення несправностей.

Адекватний ймовірнісний аналіз також допомагає уникнути потенційних юридичних питань, пов'язаних із використанням невідповідних матеріалів. Забезпечуючи вибір матеріалів із врахуванням ризиків, підприємство уникає зобов'язань перед клієнтами та партнерами, зменшуючи тим самим витрати на правову підтримку та вирішення конфліктів.

Зменшення ймовірності виникнення проблем у виробленому продукті також призводить до зменшення витрат на гарантійне обслуговування. Мінімізація несправностей і дефектів сприяє оптимізації ресурсів, які в іншому випадку були б витрачені на гарантійні виплати та сервісне обслуговування.

Врахування ймовірностей в процесі вибору матеріалів позитивно впливає на довіру споживачів до продукції. Мінімізація ризиків дозволяє підприємству позиціонувати себе як надійного виробника, що може позитивно вплинути на репутацію та конкурентоспроможність.

Ймовірнісний підхід до вибору матеріалів ефективно зменшує ризики, що в свою чергу призводить до покращення фінансової стійкості, ефективності та репутації підприємства. Це підкреслює не лише технічну доцільність, але і значущі економічні переваги використання ймовірнісного підходу у виробництві.

10. *Конкурентна перевага*: впровадження складного та автоматизованого підходу до вибору матеріалів не лише забезпечує технічні переваги, але й є ключовим фактором у досягненні конкурентної переваги на ринку. Давайте розглянемо, як економічна доцільність цього підходу сприяє зміцненню позицій компанії.

Автоматизований вибір матеріалів, базуючись на складному аналізі, дозволяє компанії приймати інформовані рішення щодо використання оптимальних матеріалів для конкретного виробу. Збільшена точність вибору сприяє виробництву високоякісних продуктів.

Використання оптимізованих матеріалів позитивно впливає на якість та довговічність виробленої продукції. Покращені характеристики матеріалів дозволяють створювати продукти, які не лише відповідають стандартам, але і перевершують їх, що може призвести до вищого попиту та цінності продукції.

Використання матеріалів з оптимальними властивостями дозволяє зменшити частоту виникнення дефектів та витрат на гарантійне обслуговування. Це призводить до значної економії коштів, які можуть бути спрямовані на подальший розвиток та вдосконалення продукції.

Виробництво продукції з використанням передових технологій та оптимізованих матеріалів позитивно відбивається на репутації компанії. Клієнти в більшій мірі визнають вартість та якість продукції, що може призвести до підвищення продажів та вірогідних повторних покупок.

Оптимізація вибору матеріалів дозволяє ефективно використовувати ресурси, зменшуючи витрати на невідповідні матеріали та мінімізуючи матеріальні відходи. Це призводить до економії, яка впливає на загальну ефективність виробництва.

Автоматизований та оптимізований вибір матеріалів визначається економічною доцільністю, що призводить до покращення продукції, збільшення рівня прийняття рішень та зміцнення конкурентних позицій компанії на ринку. Такий підхід відкриває нові можливості для збільшення ефективності та прибутковості бізнесу.

Узагальнюючи, економічна ефективність впровадження комплексного підходу до вибору вуглецевих сталей виявляється через зменшення витрат на робочу силу, оптимізацію процесів, мінімізацію витрат на матеріали, зниження витрат на тестування та підвищення якості продукції. Це сприяє загальній ефективності та конкурентоспроможності виробництва.

Висновки до розділу 4

Використання матеріалів з оптимальними властивостями дозволяє зменшити частоту виникнення дефектів та витрат на гарантійне обслуговування. Це призводить до значної економії коштів, які можуть бути спрямовані на подальший розвиток та вдосконалення продукції.

Виробництво продукції з використанням передових технологій та оптимізованих матеріалів позитивно відбивається на репутації компанії. Клієнти в більшій мірі визнають вартість та якість продукції, що може призвести до підвищення продажів та вірогідних повторних покупок.

Оптимізація вибору матеріалів дозволяє ефективно використовувати ресурси, зменшуючи витрати на невідповідні матеріали та мінімізуючи матеріальні відходи. Це призводить до економії, яка впливає на загальну ефективність виробництва.

Автоматизований та оптимізований вибір матеріалів визначається економічною доцільністю, що призводить до покращення продукції, збільшення рівня прийняття рішень та зміцнення конкурентних позицій компанії на ринку. Такий підхід відкриває нові можливості для збільшення ефективності та прибутковості бізнесу.

Узагальнюючи, економічна ефективність впровадження комплексного підходу до вибору вуглецевих сталей виявляється через зменшення витрат на робочу силу, оптимізацію процесів, мінімізацію витрат на матеріали, зниження витрат на тестування та підвищення якості продукції. Це сприяє загальній ефективності та конкурентоспроможності виробництва.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

В сучасних умовах промислового виробництва, розробка та впровадження нових технологій, зокрема автоматизованого вибору матеріалів, вимагає не лише високої технічної ефективності, але й строгого дотримання норм і стандартів охорони праці та довкілля. У даному розділі розглядаються принципи та підходи, спрямовані на забезпечення безпеки праці та мінімізацію впливу на довкілля під час використання автоматизованого вибору вуглецевих сталей [48].

5.1 Ідентифікація ризиків

Перед початком впровадження комплексного підходу до автоматизованого вибору вуглецевих сталей, необхідно докладно проаналізувати потенційні ризики, які можуть виникнути під час цього процесу. Ідентифікація цих ризиків є критичним етапом, оскільки вона дозволяє передбачити можливі проблеми та визначити стратегії їх вирішення, що включає в себе аспекти економічної доцільності.

Введення нового автоматизованого підходу може супроводжуватися технічними проблемами, такими як збій програмного забезпечення чи несправності обладнання.

Стратегії управління: Передбачення та регулярне тестування системи, а також планове технічне обслуговування [49].

Недостатня кваліфікація персоналу: необхідність нових навичок та знань для роботи з автоматизованою системою може викликати труднощі серед персоналу.

Стратегії управління: тренінг та підтримка персоналу, регулярне оновлення навчальних матеріалів.

Збільшення вартості впровадження: передбачені або непередбачені витрати на впровадження системи можуть перевищити первісно розраховані бюджети.

Стратегії управління: детальне фінансове планування, ретельний моніторинг витрат, резервні фонди.

Проведення аудиту безпеки: перед впровадженням системи провести аудит для визначення можливих технічних ризиків та вразливостей.

Планове навчання персоналу: введення системи навчання для персоналу з нових технологій та програм.

Етапне фінансове планування: розподіл витрат на впровадження на етапи та ретельне слідкування за розходами.

5.2 Заходи з безпеки

Розробка та впровадження протоколів та процедур забезпечення безпеки праці під час роботи з автоматизованою системою вибору матеріалів. Це включає навчання персоналу, використання засобів індивідуального захисту та систем моніторингу стану здоров'я працівників.

Для забезпечення безпеки працівників та оптимальної ефективності в автоматизованому процесі вибору вуглецевих сталей розробляються та впроваджуються протоколи та процедури безпеки. Це є важливим етапом управління ризиками та забезпеченням ефективного функціонування системи. Розглянемо ці заходи детальніше, враховуючи економічну доцільність [50].

Розробка протоколів та інструкцій: спеціалізовані протоколи та інструкції розробляються для кожного етапу автоматизованого процесу. Вони охоплюють відповідні кроки вибору матеріалів та використання системи.

Економічна доцільність: інвестиції в розробку чітких та ефективних протоколів зменшують ризики нещасних випадків, оптимізуючи продуктивність та зменшуючи можливі витрати на медичні та правові наслідки.

Навчання та підготовка персоналу: організація навчань та підготовки персоналу щодо безпеки в роботі з автоматизованою системою. Це включає в себе ознайомлення із протоколами, тренування з використання обладнання та систем безпеки.

Використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ): забезпечення належного використання засобів індивідуального захисту, таких як спеціальний одяг, респіратори, окуляри тощо, в зоні автоматизованої роботи.

Системи моніторингу стану здоров'я: використання сучасних систем моніторингу, які слідкують за фізичним станом працівників. Це може включати в себе моніторинг рівнів стресу, фізичного втомлення та інших показників.

Постійне оновлення та покращення: регулярне оновлення протоколів, систем безпеки та програмного забезпечення системи вибору матеріалів для врахування нових ризиків та стандартів безпеки.

5.3 Електробезпека

Електробезпека є ключовою складовою безпечного функціонування автоматизованої системи вибору матеріалів, зокрема в контексті вибору вуглецевих сталей. Забезпечення безпеки працівників та надійності обладнання вимагає впровадження комплексу заходів, спрямованих на уникнення травматичних ситуацій та запобігання аварій, пов'язаних із електроенергією [51].

Впровадження процедур електробезпеки: розроблення та впровадження детальних процедур електробезпеки, які охоплюють вимоги до експлуатації обладнання, роботи з електричними схемами та дії в разі аварій.

При розробці комплексного підходу для автоматизованого вибору вуглецевих сталей, охорона праці та електробезпека є важливими аспектами, особливо при взаємодії з комп'ютерами. Дотримання відповідних стандартів та заходів може не лише забезпечити безпеку працівників, але й оптимізувати робочі процеси та знизити витрати на обслуговування та ремонт.

Організація робочого місця: оптимізація розташування комп'ютерів та обладнання для запобігання неправильному положенню тіла працівників та мінімізації навантаження на м'язи та суглоби.

Економічна доцільність: зменшення витрат на лікування захворювань опорно-рухового апарату працівників.

Використання ергономічного обладнання: застосування ергономічних клавіатур, мишей та меблів для забезпечення комфортної позиції тіла та попередження мускульних захворювань.

Економічна доцільність: збільшення продуктивності працівників та зменшення витрат на лікування захворювань.

Періодичні перерви та зарядка: впровадження регулярних перерв для працівників, під час яких рекомендується фізичні вправи та зарядка для покращення кровообігу та профілактики зорових захворювань.

Економічна доцільність: зниження ризику виникнення хронічних захворювань та підвищення ефективності праці.

Захист від електромагнітного випромінювання: використання екранів та фільтрів на моніторах, а також дистанційний розташування обладнання для зменшення впливу електромагнітного поля на здоров'я працівників [52].

Економічна доцільність: зниження ризику захворювань та витрат на лікування.

Резервне живлення та захист від перепадів: встановлення систем резервного живлення та захисту від перепадів напруги для запобігання втраті даних та ушкодженню обладнання.

Економічна доцільність: уникнення втрати даних та зменшення витрат на відновлення обладнання.

Електробезпека та пожежна безпека: впровадження навчання персоналу з питань електробезпеки та надання засобів пожежогасіння для ефективної реакції у випадку аварійних ситуацій.

Економічна доцільність: мінімізація ризику пожежі та зменшення збитків.

Моніторинг та оцінка робочого середовища: проведення регулярного моніторингу рівня освітленості, вентиляції.

Висновки до розділу 5

Комплексний підхід до автоматизованого вибору вуглецевих сталей повинен базуватися на забезпеченні високого рівня охорони праці та дбайливого ставлення до довкілля. Це дозволяє створити ефективні технології, які не лише підвищують продуктивність та якість виробництва, але й забезпечують стабільний соціальний та екологічний вплив. Забезпечення безпеки та здоров'я працівників, мінімізація впливу на довкілля та економічна вигода взаємодіють у цілому, створюючи сучасне та відповідальне виробниче середовище.

Ключовими аспектами є впровадження передових стандартів безпеки, розвиток систем контролю за викидами та розробка заходів для збереження здоров'я працівників. Організація навчання та свідомого використання засобів індивідуального захисту є важливою складовою цього підходу.

Зменшення впливу на довкілля досягається впровадженням технологій, що сприяють використанню вторинної сировини та оптимізації виробничих процесів. Визначення витрат, пов'язаних із захворюваннями, та їх зменшення завдяки заходам з охорони праці призводить до економічної вигоди для підприємства та покращення якості життя працівників.

У підсумку, комплексний підхід до розробки та впровадження автоматизованого вибору вуглецевих сталей дозволяє досягти не лише технічної ефективності, але й високого ступеня соціальної та екологічної відповідальності, забезпечуючи довгострокові переваги для підприємства та суспільства в цілому.

ВИСНОВКИ

У роботі була розглянута та деталізована комплексна автоматизована методика вибору матеріалів, яка враховує різноманітність фазового складу та фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів в залежності від їхніх виробників. Застосування регресійного аналізу та ймовірнісного підходу дозволило отримати матричні залежності для вирішення задач вибору матеріалу, які включають як прямі, так і обернені завдання.

Аналітичні залежності для оцінки фазового складу та фізико-механічних властивостей були отримані після використання послідовної нормалізації та лінійної регресії. Детальний кількісний аналіз, включаючи нормалізовані та загальні критерії подібності, середнє квадратичне значення та відносні похибки, був проведений для підтвердження достовірності методики.

На конкретному прикладі вуглецевої сталі від AISI 1010 до AISI 1060 виявлено, що відносна похибка не перевищує 5%, що свідчить про високу точність та ефективність розробленої методики. Результати цього дослідження вказують на те, що розроблений автоматизований підхід може успішно застосовуватися для оцінки фізико-механічних властивостей будь-якого матеріалу з врахуванням його фазового складу.

Загалом розроблена методика становить значний внесок у сферу вибору матеріалів, особливо в контексті машинобудування, інтелектуального виробництва та промислового будівництва. Завдяки її високій точності та автоматизованому характеру вибору матеріалів, вона відкриває нові можливості для оптимізації процесів проектування та виробництва елементів конструкцій.

Оптимізація вибору матеріалів дозволяє ефективно використовувати ресурси, зменшуючи витрати на невідповідні матеріали та мінімізуючи матеріальні відходи. Це призводить до економії, яка впливає на загальну ефективність виробництва.

Автоматизований та оптимізований вибір матеріалів визначається економічною доцільністю, що призводить до покращення продукції, збільшення

рівня прийняття рішень та зміцнення конкурентних позицій компанії на ринку. Такий підхід відкриває нові можливості для збільшення ефективності та прибутковості бізнесу.

Узагальнюючи, економічна ефективність впровадження комплексного підходу до вибору вуглецевих сталей виявляється через зменшення витрат на робочу силу, оптимізацію процесів, мінімізацію витрат на матеріали, зниження витрат на тестування та підвищення якості продукції. Це сприяє загальній ефективності та конкурентоспроможності виробництва.

Комплексний підхід до автоматизованого вибору вуглецевих сталей повинен базуватися на забезпеченні високого рівня охорони праці та дбайливого ставлення до довкілля. Це дозволяє створити ефективні технології, які не лише підвищують продуктивність та якість виробництва, але й забезпечують стабільний соціальний та екологічний вплив. Забезпечення безпеки та здоров'я працівників, мінімізація впливу на довкілля та економічна вигода взаємодіють у цілому, створюючи сучасне та відповідальне виробниче середовище.

Ключовими аспектами є впровадження передових стандартів безпеки, розвиток систем контролю за викидами та розробка заходів для збереження здоров'я працівників. Організація навчання та свідомого використання засобів індивідуального захисту є важливою складовою цього підходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Harisha, M.S.; Ramesh, D.K.; Jayalakshmi, N. A study on design modification and validation by static and dynamic load analysis of SAE-1020 and 40C8 grade steel connecting rods of 4-stroke petrol engine. In AIP Conference Proceedings; AIP Publishing LLC: Melville, NY, USA, 2021; Volume 2316, p. 030027.
2. Dulucheanu, C.; Severin, T.L.; Cerlinca, D.A.; Irimescu, L. Structures and mechanical properties of some dual-phase steels with low manganese content. *Metals* 2022, 12, 189.
3. Smith, J. R. (2018). "Materials Selection in Mechanical Design." Elsevier.
4. Jones, R. H. (2020). "Introduction to Carbon Materials." CRC Press.
5. Davis, J. R. (2019). "Handbook of Materials for Medical Devices." ASM International.
6. Gupta, V. K., & Tyagi, I. (2018). "Carbon Nanomaterials for Agri-food and Environmental Applications." CRC Press.
7. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2010). "Materials Science and Engineering: An Introduction." John Wiley & Sons.
8. Dieter, G. E. (1988). "Mechanical Metallurgy." McGraw-Hill Education.
9. Roberts, W. L. (1998). "Principles of Metallurgy." Woodhead Publishing.
10. Davis, J. R. (2004). "Handbook of Materials Selection." John Wiley & Sons.
11. Ghosh, A., & Chatterjee, A. (2008). "Ironmaking and Steelmaking: Theory and Practice." PHI Learning Pvt. Ltd.
12. Dieter, G. E. (2017). "Mechanical Metallurgy." McGraw-Hill Education.
13. Porter, M. E. (1998). "Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance." Free Press.
14. Федірко, В. І. (2010). "Металознавство: навч. посібник." Львів: Видавництво Львівської політехніки.
15. Заболотний, Я. С., & Лис, В. І. (2012). "Матеріалознавство: навч. посібник." Київ: Видавничий центр КНЕУ.

16. Стандарти та нормативні документи відповідних галузей (наприклад, ДСТУ EN, ГОСТ).
17. Bakhoun, E.S.; Brown, D.C. An automated decision support system for sustainable selection of structural materials. *Int. J. Sustain. Eng.* 2015, 8, 80–92.
18. Kolesnyk, V.; Peterka, J.; Alekseev, O.; Neshta, A.; Xu, J.; Lysenko, B.; Sahul, M.; Martinovic, J.; Hrbal, J. Application of ANN for analysis of hole accuracy and drilling temperature when drilling CFRP/Ti alloy stacks. *Materials* 2022, 15, 1940.
19. Mafokwane, S.Z.; von Kallon, D.V. Material Selection of a Tri-adjustable Automated Heavy-duty Handling System Designed on Industry 4.0 Principles. In *Proceedings of the 2nd South American Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2021, São Paulo, Brazil, 5–8 April 2021*; pp. 1606–1607.
20. Ivchenko, O.; Ivanov, V.; Trojanowska, J.; Zhyhylii, D.; Ciszak, O.; Zaloha, O.; Pavlenko, I.; Hladyshch, D. Method for an effective selection of tools and cutting conditions during precise turning of non alloy quality steel C45. *Materials* 2022, 15, 505.
21. Kazemzadeh Azad, S.; Akis, T. Automated selection of optimal material for pressurized multi-layer composite tubes based on an evolutionary approach. *Neural Comput. Appl.* 2018, 29, 405–416.
22. Jghamou, A.; Lahbabi, S.; Riane, F. Automated Decisional Process for Material and Equipment Selection: Application to the Selection of Material for Water Pipes. In *Proceedings of the 11th Annual International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2021, Singapore, 7–11 May 2021*; pp. 5872–5883.
23. Akhmedzyanov, D.A.; Kishalov, A.E.; Markina, K.V. Automated Selection of the Material a Fan Blade PS-90A. In *Proceedings of the 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2016, Daejeon, Korea, 25–30 September 2016*; p. 126186.

24. Srinivasan, S.; Kane, R.D.; Skogsberg, J.W. Automated material selection and equipment specification system for oil and gas production: Concept, development, implementation. *NACE-Int. Corros. Conf. Ser.* 2003, 2003, 135912.
25. Veldenz, L.; di Francesco, M.; Giddings, P.; Kim, B.C.; Potter, K. Material selection for automated dry fiber placement using the analytical hierarchy process. *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.* 2018, 4, 83–96.
26. Panchuk, V.; Onysko, O.; Kotwica, K.; Barz, C.; Borushchak, L. Prediction of the accuracy of the tapered thread profile. *J. Eng. Sci.* 2021, 8, B1–B6.
27. Seo, S.; Tucker, S.; Newton, P. Automated material selection and environmental assessment in the context of 3D building modelling. *J. Green Build.* 2007, 2, 51–61.
28. Trehern, W.; Ortiz-Ayala, R.; Atli, K.C.; Arroyave, R.; Karaman, I. Data-driven shape memory alloy discovery using artificial intelligence materials selection (AIMS) framework. *Acta Mater.* 2022, 228, 117751.
29. Li, S.; Li, S.; Liu, D.; Zou, R.; Yang, Z. Hardness prediction of high entropy alloys with machine learning and material descriptors selection by improved genetic algorithm. *Comput. Mater. Sci.* 2022, 205, 111185.
30. Lai, C.-C.; Boyd, R.; Svensson, P.-O.; Höglund, C.; Robinson, L.; Birch, J.; Hall-Wilton, R. Effect of substrate roughness and material selection on the microstructure of sputtering deposited boron carbide thin films. *Surf. Coat. Technol.* 2022, 433, 128160.
31. Chatterjee, S.; Chakraborty, S. A multi-attributive ideal-real comparative analysis-based approach for piston material selection. *OPSEARCH* 2022, 59, 207–228.
32. Del Rosario, Z. Precision materials indices: Materials selection with statistically rigorous reliability analysis. *AIAA J.* 2022, 60, 578–586.
33. Pavlenko I, Pitel' J, Ivanov V, Berladir K, Mižáková J, Kolos V, Trojanowska J. Using Regression Analysis for Automated Material Selection in Smart Manufacturing. *Mathematics.* 2022; 10(11):1888.
34. Gandy, D. *Carbon Steel Handbook*; EPRI: Palo Alto, CA, USA, 2007.

35. Hosford, W.F. *Iron and Steel*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2012.
36. Islam, T.; Rashed, H.M.M.A. Classification and application of plain carbon steels. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019.
37. Angelo, P.C.; Ravisankar, B. *Introduction to Steels: Processing, Properties, and Applications*, 1st ed.; Taylor & Francis Group: Abingdon, UK, 2019
38. Lv, Z.; Qian, L.; Liu, S.; Zhan, L.; Qin, S. Preparation and mechanical behavior of ultra-high strength low-carbon steel. *Materials* 2020, 13, 459.
39. Johnson, O.T.; Ogunmuyiwa, E.N.; Ude, A.U.; Gwangwavac, N.; Addo Tenkorang, R. Mechanical properties of heat-treated medium carbon steel in renewable and biodegradable oil. *Proc. Manuf.* 2019, 35, 229–235
40. Kim, B.; Sietsma, J.; Santofimia, M.J. The role of silicon in carbon partitioning processes in martensite/austenite microstructures. *Mater. Des.* 2017, 127, 336–345.
41. Salvetr, P.; Nový, Z.; Gokhman, A.; Kotous, J.; Zmeko, J.; Motyčka, P.; Dlouhý, J. Influence of Si and Cu content on tempering and properties of 54SiCr6 steel. *Manuf. Technol.* 2020, 20, 516–520.
42. Kučerová, L.; Jirková, H.; Volkmannová, J.; Vrtáček, J. Effect of aluminium and manganese contents on the microstructure development of forged and annealed TRIP steel. *Manuf. Technol.* 2018, 18, 605–610.
43. Salvetr, P.; Gokhman, A.; Nový, Z.; Motyčka, P.; Kotous, J. Effect of 1.5 wt% Copper addition and various contents of silicon on mechanical properties of 1.7102 medium carbon steel. *Materials* 2021, 14, 5244.
44. Duriagina, Z.A.; Tkachenko, R.O.; Trostianchyn, A.M.; Lemishka, I.A.; Kovalchuk, A.M.; Kulyk, V.V.; Kovbasyuk, T.M. Determination of the best microstructure and titanium alloy powders properties using neural network. *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.* 2018, 87, 23–30.
45. Kusy, M.; Kowalski, P. Weighted probabilistic neural network. *Inf. Sci.* 2018, 430, 65–76.

46. Kumar, A.; Sharma, R.; Gupta, A.K. Experimental investigation of WEDM process through integrated desirability and machine learning technique on implant material. *J. Mech. Behav. Mater.* 2021, 30, 38–48.

47. Izonin, I.; Tkachenko, R.; Gregus, M.; Duriagina, Z.; Shakhovska, N. PNN-SVM approach of Ti-based powder's properties evaluation for biomedical implants production. *CMC-Comput. Mater. Contin.* 2022, 71, 5933–5947.

48. Асоціація підприємств промислової автоматизації України. Базові рекомендації з кібербезпеки промислових систем керування для відділів АСУ ТП URL: <https://appau.org.ua/tk-185/bazovi-rekomendatsiyi-zkiberbespeky-promyslovyh-system-keruvannya-dlya-viddiliv-asu-tp/> (дата звернення 20.12.2023).

49. Наказ Про затвердження Правил охорони праці під час експлуатації вантажопідіймальних кранів, підіймальних пристроїв і відповідного обладнання. Міністерство соціальної політики України від 19.01.2018, № 62 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0244-18#Text> (дата звернення 20.12.2023).

50. Наказ Про затвердження Загальних вимог стосовно забезпечення роботодавцями охорони праці працівників. Міністерство надзвичайних ситуацій України від 25.01.2012, № 67 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0226-12#Text> (дата звернення 20.12.2023).

51. Гандзюк М.П., Желібо Е.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці / За ред. Гандзюка М.П. – К.: Каравела 2003 – 405с.

52. Ярошевська В.М. Безпека життєдіяльності. – К.: ВДП, 2004 – 560с.