

Концепція моделі даних конструктивних елементів у прикладній механіці

Олег Юшкевич 

Purpose. To create the concept of a model of analytical and mathematical representation of structural elements in the space of quality indicators of steel grades. **Design / Method / Approach.** A theoretical-analytical approach is applied to the creation of a concept for solving the problem of forming a mathematical model of the data structure. **Findings.** Definitions of training sampling in non-traditional classification of structural elements and class of steels in the space of mechanical properties are formulated. The use of the formulated definitions has proved that the task of structuring data to structural elements can be reduced to the search in the derived array of quality indicators, training samples, around which rational mechanical properties can be formed. **Theoretical Implications.** The concept of analytical-theoretical representation of structural elements is a system of views on the creation of a mathematical description in a multidimensional space, in which the coordinate axes correspond to different types of mechanical properties. This allows us to proceed to the development of a mathematical apparatus designed to create a data structure. **Practical Implications.** The presentation of the steel grade assortment in the multidimensional space of service characteristics of structural elements is illustrative. With its help, it is possible to study the relationship and relationship between steel grades and structural elements, as information objects built on sets of quality indicators. **Originality / Value.** The concept proposes an original systematization of the derived information, taking into account the probability of statistical blurring of parameters, which increases the reliability of the comparative analysis of the characteristics of the structural element and the quality indicators of steels. **Research Limitations / Future Research.** The prospect of creating a mathematical apparatus for the quantitative analysis of various grades of steel by all possible characteristics, which can be proposed for the creation of new structural elements, opens up. This will make it possible to create an analytical system of non-traditional ranking and ordering of steel brands, on the basis of which it is possible to choose substitutes for expensive complex-alloyed steels and alloys. **Paper Type.** Conceptual Paper.

Keywords:

constructive elements, data structures, analytical and mathematical representation, rolled metal, steel grade, statistical characteristics

Contributor Details:

Oleh Yushkevych, Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA, e.yushkevich@i.ua



Для потреб машинобудівної промисловості часто виплавають сталі різних марок, рівноцінні за механічними властивостями, але різні за призначенням і собівартістю виробництва. Тому з'являється необхідність розробки моделей, за якими можна об'єднувати марки сталей в групи, далі в цих групах знаходити матеріали, які дуже близькі за властивостями. Таки сталі-двійники можуть бути взаємозамінними для розробки різних конструктивних елементів пристроїв прикладної механіки (Юшкевич & Ігнаткин, 2024). Було вивчено реальну номенклатуру сталей та виконано збір даних про механічні властивості металопродукату на 9 підприємствах України (Алчевський МК, «Запоріжсталь», МЗ ім. Петровського, Єнакіївський МЗ, Дніпровський МК ім. Дзержинського, Криворізький МК, Донецький МЗ, Макіївський МЗ, АТ «Дніпроспецсталь»). Для проведення аналітичного дослідження величезних масивів даних необхідно застосувати різні засоби з інформаційних технологій. Це обумовило створення основи для математичного представлення конструктивних елементів, яке стало базисом проведення таких робіт (Юшкевич & Ігнаткин, 2023):

- виявлення на промислових підприємствах марок сталей, близьких за механічними властивостями, тобто двійників та взаємозамінників;
- об'єднання в нетрадиційні групи та підвищення спеціалізованості класів сталей;
- упорядкування марочного сортаменту металопродукату за різними критеріями.

Крім досягнення цих результатів, запропонований підхід дозволяє вирішувати локальні проблеми, які неминуче виникають на етапі проектування або розробки нових конструктивних елементів і технологічних процесів їх зміцнювальної обробки. Аналіз літературних джерел за останні п'ять років свідчить, що аналітичним дослідженням, щодо розробки принципів математичного представлення марок сталей конструктивних елементів не було приділено належної уваги, тому наукова проблема досі потребує свого логічного вирішення. Одержані в роботі результати є новими, важливими і концептуально-теоретичними, які базуються на обробці даних одержаних з 9 провідних підприємств України, за завданнями провідних міністерств і не є просто цікавістю та представлені в різних наукових звітах з державною реєстрацією. Вищевикладена значимість результатів, як в науковому, так и в практичному контексті показує, що представлена тема відповідає сучасним тенденціям і проблемам машинобудування.

Представлена концепція математичної моделі даних буде сприяти розвитку наукової думки, що до інформаційного-аналітичного опису конструктивних елементів і методів кластерного аналізу в прикладній механіці. Концепція представлення семантичних поять прикладної механіки математичним описом піднімає важливі питання створення елементів штучного інтелекту, що може впливати при розповсюдженні положень цієї роботи та подальших публікацій (Юшкевич & Ігнаткин, 2023; Юшкевич & Ігнаткин, 2024) на суспільне обговорення у відповідь на проблеми аналізу баз даних в галузі машинобудування.

Теоретичне підґрунтя

Проводились дослідження, спрямовані на визначення сукупності класифікаційних параметрів сталей. За допомогою безлічі фактичних даних, які отримали назву класифікаційних ознак, і спеціально розробленого для вирішення оптимізаційних завдань програмного забезпечення, можна виділити з наявних марок сталі оптимальні об'єкти, які найбільш повно відповідають конкретним умовам експлуатації. Однак ані у вітчизняній, ані в зарубіжній промисловості немає брендів сортментів і нормативно-технічної документації на металургійну продукцію. (Калиновский & Зайцева, 2021), які б дозволяли підбирати замітники складнолегованих сталей. При цьому критерії якості цільового продукту встановлюються існуючими стандартами, типовими технологіями та іншими нормативними документами в допустимих межах. Ймовірно, останнє продиктоване тим, що розробники нормативних документів прагнуть підтримувати технологічний процес, наскільки це можливо, в конкретній обраній зоні роботи. Деякі критерії, в силу своєї фізичної природи, можуть суперечити один одному. Наприклад, підвищення твердості матеріалу може суперечити змінам пластичності, крихкості і т. д. У зв'язку з цим постає завдання ранжирування за важливістю критеріїв якості... Задачу можна вирішити за допомогою фрактального формалізму (Volchuk, 2017). Проте, аналітичне математичне представлення дозволяє розв'язати не тільки задачу ранжування, а й визначити сукупність зв'язків між об'єктами інформаційного моделювання — марками сталей і конструктивними елементами. Марки сталі можуть бути об'єднані за рівнями близькості механічних властивостей в фіксовані набори, а саме, нетрадиційні класи, в межах яких може бути проведений порівняльний аналіз, в тому числі за допомогою ранжування. Таким чином, із вихідного набору даних створюється нова структурована інформація про марки сталей, яка дозволяє виконувати операції уніфікації металевих матеріалів відносно заданого конструктивного елемента.

Практичне значення результатів

Результатом структурування інформації можна вважати впорядкування марок сталей для: економії легуючих елементів; зниження енерговитрат на тону продукції за рахунок раціоналізації як попередньої, так і остаточної термічної обробки; підвищення надійності конструкції при збереженні рівня витрат на її виробництво; зниження собівартості конструктивних елементів при збереженні ступеня службових характеристик відповідно до вимог нормативно-технічної документації.

Наукова новизна результатів

«Багато складних процесів та явищ у природі складно описати із застосуванням традиційних методик. Реалізувати детермінований спосіб, який

застосовується для оцінювання механічних властивостей масивних металевих виробів, що заснований на аналізі причинно-наслідкових зв'язків, — складне сучасне завдання. Це пояснюється тим, що технологія виробництва складний багатопараметричний процес» (Volchuk et al., 2023). Концепція математичної моделі структури даних дає нову систему поглядів на створення аналітичного опису в багатовимірному просторі, в якому осі координат відповідають різним типам характеристик конструктивних елементів. Представлення марочного сортаменту сталей, як інформаційних об'єктів, в частому випадку, в тривимірному просторі головніших службових характеристик конструктивних елементів є наочним і відомим. Уперше багатовимірність допомагає дослідити відношення і взаємозв'язки між марками сталей і конструктивними елементами, як інформаційними об'єктами множин з урахуванням всіх можливих показників якості.

Концепція теоретико-аналітично представлення конструктивних елементів в багатовимірному просторі механічних властивостей вперше дозволяє перейти до розробки математичної моделі структури даних, яка застосовує алгоритми визначення сукупності зв'язків між об'єктами інформаційного моделювання — марками сталей і конструктивними елементами, і веде до створення системи методів та алгоритмів нетрадиційної кластеризації конструкційних матеріалів. Концепція пропонує нову оригінальну систематизацію вихідної інформації з урахуванням ймовірнісних параметрів, що підвищує достовірність порівняльного аналізу характеристик конструктивного елемента і показників якості сталі. Це, насамперед, дає можливість зі статистичним фактичним розмиттям границь інформаційних об'єктів (за рахунок дійсної інформації одержаної з лабораторій механічних випробувань різних підприємств) зробити експертний підбір групи марок сталей для виготовлення конструктивного елемента, також в ракетно-космічній галузі.

Мета та завдання

Створити концепцію моделі аналітично-математичного представлення конструктивних елементів в просторі показників якості марочного сортаменту сталей, призначених для їх виробництва.

Завдання дослідження можна звести до розробки концепцій моделі представленої описом:

- 1) вибору навчаючих представників з обраних класів (сукупностей) сталей з будь-яких конкретних показників,
- 2) або ж виділення навчаючих вибірок серед марок сталей після оцінки за критеріями з усіх порівнюваних характеристик.

Методологія

Метод дослідження базується на ясному і чіткому розгляді етапів об'єктивного процесу семантичного опису структури даних, який був проведений при обробці механічних властивостей одержаних з 9 підприємств. При цьому застосовано теоретико-аналітичний підхід до створення

концепції розв'язання задачі формування математичної моделі даних залежно від вимог до конструктивних елементів. Такий актуальний метод адекватно відповідає меті створення концепції моделі аналітично-математичного представлення конструктивних елементів у просторі показників якості. Одержання концепції моделі — це є досягнення наукового результату. Семантично-математичний опис моделі може бути адаптований для аналогічних дослідів технологічних процесів виготовлення деталей машин. Описаний нижче метод деталізовано дає розуміння процесу одержання концепції моделі даних конструктивних елементів.

Матеріали та методи

Відібрані характеристики сталей для металовиробів узагальнювали у вигляді таблиць, які мають наступну структуру колонок: марка сталі; завод-виробник; профіль перерізу металопродукату; типорозміри; характерний розмір; σ_B ; σ_T ; δ ; ψ ; КСУ; $Z_{\text{екв}}$; σ_B / σ_T ; δ / σ_B . Таким чином, було отримано генеральну сукупність показників сталей.

Дані з таблиць вводили в комп'ютер і зберігали в текстових файлах, які конвертували в середовище обробки інформації. Попередній аналіз даних виконували в інтегрованому середовищі розробки експертних систем Інтер-Експерт (GURU), що поєднує системи електронних таблиць, СУБД, внутрішню алгоритмічну мову програмування високого рівня, мову запитів SQL та середовище створення інтелектуальних правил, що дає явні переваги перед традиційними системами обробки інформації. Дослідження виконали для сталей (Юшкевич & Ігнаткин, 2023):

1) вуглецевих звичайної якості (СтЗкп, СтЗпс, СтЗсп, СтЗГпс, СтЗпс, СтЗсп та ін);

2) якісних вуглецевих (10, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50);

3) легованих (20X, 35X, 45X, 09Г2, 09Г2С, 10Г2С1, 14Г2, 19Г2, 50Г, 10ХСНД, 15ХСНД, 10ХНДП, 14Г2АФ, 15Г2А та ін.).

Після визначення початкових граничних вимог для механічних властивостей конструктивних елементів відповідно до нормативних документів формується масив даних. При цьому можуть використовуватися бази даних фактичних і нормативних характеристик марок сталей по кожному конструктивному елементу. Спільне використання стандартних із нормативної документації, експериментальних вибраних зі звітів за науково-дослідними роботами і фактичних, визначених у промислових лабораторіях при поточному виробництві механічних характеристик сталей, дозволяє виявити показники якості, які функціонально не залежать один від одного. Після цього необхідно систематизувати вихідну інформацію з урахуванням статистичних параметрів і створити основу моделі структури даних конструктивних елементів, в тому числі у вигляді математичних матриць і електронних таблиць. Це підвищує достовірність роботи моделі порівняльного аналізу показників якості і дає можливість розробити алгоритм підбору раціональної марки сталі для виготовлення конструктивного елемента.

Можливість реплікації дослідження

Методи і методологія аналітичного дослідження описані достатньо повно, на їх основі можна повторити аналіз даних в різних галузях знань. Текстові дані дають наочне представлення про створення основних положень концепції, що дає доступність іншим дослідникам до її застосування. Викладені процеси збирання й оброки інформації визначають прозорість формулювання концепції. Повний опис системи поглядів на створення математичної моделі даних включає всі ключові деталі, які дозволяють іншим авторам застосовувати представлені методи к аналогічним або новим випадкам.

Обговорення та результати

На структуру та властивості багатьох матеріалів впливають методики їх отримання, режими оброблення, фазовий і хімічний склад тощо (Hlushkova et al., 2023). Побудову математичної моделі структури даних конструктивних елементів необхідно починати з представлення їх в просторі показників якості конструкційних матеріалів, у тому числі, в вигляді інформаційних об'єктів. Марка сталі як інформаційний об'єкт (Юшкевич. & Ігнаткин, 2024) може бути представлена системою позначень.

$$T_v M_{mfcptn} \quad (1)$$

з цього випливає, що сталь заданого хімічного складу можна позначити аналогічно

$$T_v S_m(X_s)_{fcptn}, \quad (2)$$

ознаки марки сталі (Юшкевич & Ігнаткин, 2023) позначаються послідовністю індексів

$$\{vmfncptns\}, \quad (3)$$

сталь марки m має набір механічних властивостей (Юшкевич & Ігнаткин, 2024), які є координатами інформаційного об'єкту в просторі показників якості конструкційних матеріалів

$$\{\sigma_{vmfncptns}^1, \sigma_{vmfncptns}^2, \dots, \sigma_{vmfncptns}^i, \dots, \sigma_{vmfncptns}^\rho\}, \quad (4)$$

де $\sigma_{vmfncptns}^i$ – позначення механічних властивостей - σ сталі - m з номером-індексом - i , ρ - кількість показників або означеної сукупності індексів ($i = \overline{1; \rho}$).

Причому

$$\sigma^1 = \sigma_B, \sigma^2 = \sigma_T, \sigma^3 = \delta_s, \sigma^4 = \psi, \sigma^5 = \text{КСУ}, \dots \quad (5)$$

де T – префікс обробки, призначеної згідно з ДСТУ, ТУ або за іншими нормативними документами для сталі; ν – індекс виду обробки: термічної – 1, зміцнювальної – 2 або розміцнювальної – 3 і т. ін.; M – позначення марок сталей відповідних до ДСТУ, ТУ або інших нормативних документів; S – позначення сталей в необробленому стані; m – індекс (умовний порядковий номер) марки сталі; f – умовний індекс підприємства; c – індекс стану металу: литий, холоднодеформований, гаряче-деформований; p – індекс геометричного профілю елемента конструкції; t – індекс розміру профіля, якому також відповідає величина площі поперечного перерізу металевго виробу; n – індекс цільового призначення; X_s – вектор фактичного хімічного складу; s – індекс плавильного хімічного складу сталі, що ставиться у відповідність номеру в журналі лабораторних випробувань підприємства-виробника або в сертифікаті якості на металопродукцію. Таким чином, інформаційними об'єктами простору ознак конструктивних елементів виступають сталі, представлені в багатовимірній системі координат механічних властивостей. У нормативно-технічній документації зазвичай представлені масивні списки фізико-механічних властивостей, які не враховують фактичний статистичний розкид їх значень, що виникає при виробництві металопродукату з численних видів марок сталей. У формалізованому описі конструктивних елементів може використовуватися одна основна споживча властивість, сукупність характеристик, інтегральний показник якості або безрозмірні ознаки.

Найчастіше для характеристики конструктивних елементів використовується один з споживчих показників, який умовно вважається основним або головним серед усього набору. Такий підхід може робити представлення про металовиріб неповним. Однак можуть існувати певні важливі показники конструктивних елементів, в мінімальній кількості, за найбільш повною відповідальністю критеріям працездатність. Ці показники повинні бути обґрунтовано підібрані з різноманіття наявних характеристик металевго виробу, що містяться в нормативно-технічній документації.

Використання даних нормативних документів в завданнях ранжирування, упорядкування, структурування, групування, класифікації, заміни, уніфікації, моделювання, оптимізації і сертифікації марок сталей значно ускладнює обробку і представлення досліджуваних характеристик, практично не відображає взаємозв'язок між ними. При цьому виключається визначення функціонально залежних характеристик.

Застосування баз даних отриманих із підприємств вирішує поставлені завдання визначення переліку марок сталей, які мають фактичні значення рівнів фізико-механічних властивостей конструктивного елемента. При цьому, чим більша кількість підприємств, на яких зібрано технічні дані про марки сталі і конструктивні елементи, тим обґрунтованішим та достовірнішим буде результат їх математичної обробки.

Для порівняння однотипних механічних властивостей різних марок сталей використовується комбінаторний метод. Це призводить до великого обсягу порівнянь. Тому для набору сталей, пропонованих для виготовлення конструктивного елемента, можна визначити навчальні вибірки і правила введення в них. При цьому в навчальних вибірках має бути максимальна щільність розташування марок сталей.

Визначення 1

Навчальна вибірка при нетрадиційній класифікації конструктивних елементів — це сукупність марок, яка утворює клас в ознаковому просторі, та у який набори механічних властивостей спрямовуються к значенням координат центра тяжіння множини

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{v1fcptns}^1, \dots, \sigma_{v1fcptns}^i, \dots, \sigma_{v1fcptns}^p \\ \sigma_{v2fcptns}^1, \dots, \sigma_{v2fcptns}^i, \dots, \sigma_{v2fcptns}^p \\ \dots \\ \sigma_{vmfcptns}^1, \dots, \sigma_{vmfcptns}^i, \dots, \sigma_{vmfcptns}^p \\ \dots \\ \sigma_{2vmfcptns}^1, \dots, \sigma_{2vmfcptns}^i, \dots, \sigma_{2vmfcptns}^p \end{array} \right\} \rightarrow \{ \sigma_{vufcptns}^1, \dots, \sigma_{vufcptns}^p \} \quad (6)$$

де $\{ \sigma_{vmfcptns}^1, \sigma_{vmfcptns}^2, \dots, \sigma_{vmfcptns}^i, \dots, \sigma_{vmfcptns}^p \}$ — координати точки — марки сталі с індексом-номером m ; $\{ \sigma_{vufcptns}^1, \sigma_{vufcptns}^2, \dots, \sigma_{vufcptns}^i, \dots, \sigma_{vufcptns}^p \}$ — координати центра ваги класу в просторі ознак; M — номер останньої марки в списку; α — індекс центру ваги.

Визначення 2

Клас сталей конструктивного елемента в просторі механічних властивостей являє собою статистичну хмару точок, кожна з яких характеризує сталь, зосереджену навколо її центру статистичної ваги в межах заданих відхилень, таких як середньоквадратичний корінь, довірчий інтервал і ін. Найкращим значенням стандартного відхилення δ від центру класу при нормальному розподілі механічних властивостей розглянутих сталей слід вважати величину $\delta = 1,0 \pm 0,2$.

Використовуючи обмежену початкову відому множену марок сталей (хоча б з однієї), які застосовуються на різних підприємствах для виготовлення конструктивного елемента, можна виконати варіантний поділ всієї генеральної сукупності марок на класи сформовані навколо навчаючої вибірки з попередньо заданими рівнями механічних властивостей і максимальною щільністю розташування точок-сталей всередині них. Через те, що для кожного класу може бути вибрано кілька близько розташованих навчаючих інформаційних об'єктів, то для навчаючої вибірки необхідно виділити мінімальну кількість сталей. Таким чином, використовуючи сформульовані

визначення, задачу структуризації матеріалів конструктивних елементів можна привести до пошуку в вихідному масиві даних, навчаючих вибірок, формуючих навколо себе раціональні механічні властивості які відповідають кращим представникам серед марок з утворених класів сталей.

Механічні властивості є основними показниками якості металевих виробів, і мають стохастичний характер, що визначається діапазоном варіації внаслідок різних способів виробництва і коливань хімічного складу в різних плавках. Тому показники якості конструкційних матеріалів і конструктивних елементів виготовлених з них мають статистичний розкид. Таким чином, значенням механічних властивостей сталей притаманний імовірнісний характер, що згідно з усталеною традицією, не береться до уваги виробниками і споживачами конструктивних елементів. В результаті це призводить до того, що інтервали зміни фактичних механічних властивостей багатьох марок сталей перекриваються, це веде до того, що запаси міцності елементів конструкції використовуються не в повній мірі, їх вартість зростає за рахунок виробництва легованих сталей з близькими значеннями механічних властивостей, попит на металопродукат падає, а конкурентоспроможність металопродукції знижується. Застосування параметрів статистичного розкиду характеристик дозволить, математично описати вірогідність споживчих переваг конструктивних елементів, у тому числі утворені сукупностями різниць механічних властивостей двох різних сталей. Таким чином, одержано концепцію моделі даних конструктивних елементів, основні положення, якої представлені в висновках.

Висновки

1. Запропоновано аналітично-математичний підхід до створення структури даних конструктивних елементів.
2. Структура даних конструктивних елементів - це різновид аналітичного математичного опису, що характеризує розташування об'єктів у багатовимірному просторі ознак.
3. Інформаційними об'єктами простору ознак конструктивних елементів виступають сталі, представлені в багатовимірній системі координат механічних властивостей.
4. Модель даних конструктивних елементів повинна включати характеристики статистичного розкиду реальних механічних властивостей марок сталей, що дозволить вирішити проблеми порівняння конструкційних матеріалів, котрі виникають при відсутності обліку даних, які знаходяться за межами вимог нормативних документів.
5. Аналітична математична модель представлення марочного сортаменту сталей в просторі механічних властивостей конструктивних елементів може теоретично описати взаємозв'язки між марками сталей і конструктивними елементами з урахуванням всіх можливих характеристик.

Майбутні дослідження

Відкривається перспектива створення математичного апарату кількісного аналізу різних марок сталей за всіма можливими характеристиками, які можуть бути запропоновані для створення нових конструктивних елементів. Це дозволить побудувати аналітичну систему ранжування і впорядкування марок сталей, на основі якої можна вибирати замітники дорогим складнолегованим сталям, що надасть можливості:

- економії легуючих елементів;
- зниження енерговитрат на тону продукції;
- підбору матеріалів із підвищеною надійністю за збереження рівня витрат;
- зменшення собівартості конструктивних елементів за незмінності рівня експлуатаційних характеристик.

Посилання

- Hlushkova, D., Bagrov, V., & Volchuk, V. (2023). Application of modern fractal formalism methods for researching the influence of ion-plasma coatings on assessing the wear resistance of volume hydraulic drive components. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 1(103), 34. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2023.103.1.34>
- Volchuk, V. M. (2017). On the Application of Fractal Formalism for Ranging Criteria of Quality of Multiparametric Technologies. *Metallofizika i noveishie tekhnologii*, 39(7), 949–957. <https://doi.org/10.15407/mfint.39.07.0949>
- Volchuk, V. M., Kashyna, N. V., Kotov, M. A., Haidar, A. M., & Kashyn, D. O. (2023). Calculation of material quality criteria using fractal theory. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 2 (101), 20–28. <https://doi.org/10.30838/j.pmhtml.2413.040723.20.980>
- Калиновский, С. К., & Зайцева, Т. А. (2021). К вопросу о влиянии электромагнитных полей на формирование структуры и свойств материалов в процессе термической обработки. In *Молоді вчені 2021 – від теорії до практики* (pp. 57–60). НМетАУ. <https://crust.ust.edu.ua/handle/123456789/15983>
- Юшкевич, О., & Ігнаткін, В. (2023). Обґрунтування аналітичного представлення марок сталей для конструктивних елементів в прикладній механіці. *Challenges and Issues of Modern Science*, 1, 165-175. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/32>
- Юшкевич, О., & Ігнаткін, В. (2024). Інформаційно-математичне представлення марок сталей конструктивних елементів в прикладній механіці. *Challenges and Issues of Modern Science*, 2, 159-164. <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/173>