

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
д.т.н., професору Пастуху Олегу Анатолійовичу

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора **Грицюка Юрія Івановича**

на дисертаційну роботу **Демчика Владислава Івановича**

*"Методи машинного навчання для моделювання функціональних
властивостей та довговічності сплавів",*

подану до захисту на здобуття ступеня доктора філософії

з галузі знань 12 *"Інформаційні технології"*

та спеціальності 122 *"Комп'ютерні науки"*

Актуальність теми дослідження

Відомо, що розвиток інформаційних технологій призвів до надзвичайно швидкого зростання кількості доступних даних, котрі потребують сучасних алгоритмів їхнього оброблення. Проведення експериментів, особливо у галузі механіки деформівного твердого тіла, фізики твердого тіла чи матеріалознавства є часто дороговартісним, довготривалим та науковомістким процесом. Тому, за достатнього обсягу експериментальних даних, доцільно у деяких випадках відмовитися від проведення безпосереднього експерименту та скористатися доступними методами машинного навчання моделей для вирішення певного комплексу завдань.

Особливо перспективними та обнадійливими у матеріалознавстві та механіці є так звані сплави з пам'яттю форми. Це матеріали, в яких зацікавлена як наука, так і промисловість. Сплави з пам'яттю форми користуються широкою увагою з огляду на їхні особливі властивості: унікальний ефект пам'яті форми та псевдопружність, спричинені прямим аустенітно-мартенситним перетворенням і зворотним мартенситно-аустенітним перетворенням. Такі матеріали володіють низкою конструкційних та функціональних властивостей. Власне, дослі-

дження та моделювання їхніх станів стосується дисертаційне дослідження здобувача. Такі властивості зручно вивчати та прогнозувати методами машинного навчання з учителем на основі наявних експериментальних даних.

Здобувачем встановлено, що існує низка методів і засобів для розв'язування задач механіки та матеріалознавства методами машинного навчання, однак прогнозування функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми та втомною довговічністю матеріалів елементів конструкцій у доступних літературних джерелах висвітлено недостатньо.

У зв'язку з цим зростає актуальність дослідження Владислава Демчика, пов'язаного з розробленням нових методів, котрі ґрунтуються на методах машинного навчання з учителем для прогнозування функціональних властивостей та довговічності сплавів з пам'яттю форми.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота пов'язана з науковими дослідженнями на кафедрі систем штучного інтелекту та інтелектуального аналізу даних Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя і виконана у межах науково-дослідної роботи "Моделювання функціональних і конструкційних властивостей сплавів з пам'яттю форми методами машинного навчання" (реєстраційний № 0122U001858) та науково-дослідної роботи "Розв'язування задач науки методами штучного інтелекту".

Ступінь обґрунтованості та достовірності основних наукових положень, висновків і рекомендацій

Проведені теоретично-експериментальні дослідження підтверджують актуальність наукового напрямку. Отримані здобувачем наукові положення дисертаційної роботи обґрунтовані та якісно продовжують розвиток етапів наукового дослідження, спрямованого на розробленням нових методів, котрі ґрунтуються на методах машинного навчання з учителем для прогнозування функціональних властивостей та довговічності сплавів з пам'яттю форми.

Результати дисертаційної роботи підтверджуються теоретичним обґрунтуванням базових положень, результатами апробації, відповідністю результатів, а

також моделюванням методами машинного навчання, їх зв'язком з наявними результатами, отриманими із застосуванням класичних методів; відповідністю результатам інших авторів, а також результатам, одержаним іншими методами.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження

Наукова новизна роботи полягає в такому:

1. Вперше розроблено методику прогнозування розмаху розсіяної енергії та залишкової деформації нікельтитанового сплаву з пам'яттю форми (СПФ) із застосуванням методів машинного навчання з учителем, що забезпечує підвищену точність оцінки функціональних властивостей матеріалу.

2. Вперше показано можливість підвищення точності прогнозування функціональних характеристик СПФ завдяки використанню алгоритмів машинного навчання з учителем, що відрізняє запропонований підхід від традиційних емпіричних та аналітичних методів.

3. Вперше запропоновано моделювати та спрогнозовано залежність довжини тріщини від кількості циклів навантаження титанового сплаву методом машинного навчання з учителем, зокрема нейронною мережею типу багатошарового перцептрона, що дозволяє отримати високоточні прогнози розвитку втомних пошкоджень.

4. Вперше побудовано аналітичну модель петель гістерезису нікельтитанового СПФ на основі мінімізації функціоналу методом найменших квадратів із застосуванням кусково-лінійних функцій, що забезпечує новий інструмент для опису нелінійної поведінки матеріалу.

Практичне значення одержаних результатів дослідження

Покращено відомі підходи до прогнозування функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми та втомної довговічності матеріалів, зокрема:

- розроблено методи прогнозування функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми та втомної довговічності матеріалів на основі методів машинного навчання з учителем, зокрема, нейронними мережами на основі багатошарового перцептрона;

- побудовано моделі, котрі ґрунтуються на класичних і ансамблевих методах машинного навчання, що дає змогу визначити оптимальне поєднання методу машинного навчання та набору даних для певної задачі регресії;

- запропоновані підходи, котрі ґрунтуються на методах машинного навчання з учителем, дають змогу підвищити точність прогнозування моделей.

Отримані результати дослідження впроваджено в навчальний процес кафедри будівельної механіки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя при підготовці магістрів за спеціальністю G19 Будівництво та цивільна інженерія.

ТОВ "Реворк-Спейс" підтверджено можливість застосування побудованих методами машинного навчання моделей в дослідницьких проєктах компанії.

Результати даної науково-дослідної роботи можуть використовуватися для розв'язування задач механіки руйнування засобами штучного інтелекту в атомній та нафтогазовій промисловості, а також у трубопровідному транспорті.

Особистий внесок здобувача

У межах дисертаційної роботи виконано планування етапів дослідження, реалізацію підходів для прогнозування функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми методами машинного навчання спільно з науковим керівником д. т. н., проф. О. П. Яснієм. Спільно з науковим керівником здобувачем було підготовлено матеріали для наукових публікацій, що відображають основні результати дослідження. Здобувач розробив систему прогнозування функціональних властивостей сплавів з пам'яттю форми методами машинного навчання з учителем з урахуванням частоти навантаження. Здійснено порівняльний аналіз застосованих методів машинного навчання для розв'язування задачі регресії та вибрано найточніші моделі.

Повнота викладу основних наукових положень і висновків в опублікованих працях та дотримання вимог академічної доброчесності

Наукові положення та отримані результати повною мірою висвітлені у опублікованих автором наукових працях та апробовані на науково-технічних конференціях.

Основні результати дисертації висвітлено у 7 наукових працях, серед яких 3 статей у фахових виданнях України, 2 статті у періодичному виданні, яке індексується міжнародною наукометричною базою Scopus, 2 публікації у матеріалах і тезах доповідей міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, з яких 1 індексується наукометричною базою Scopus.

Структура та обсяг роботи

Дисертація складається із анотації, вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Робота містить 142 сторінки, у тому числі: 137 сторінок основного тексту, 44 рисунки, 10 таблиць, список використаних джерел із 131 найменувань на 15 сторінках.

Загальна характеристика дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Демчика В. І. є завершеною науковою працею, що містить анотацію, вступ, три розділи, висновки, список використаних джерел з 131 найменувань та додатки. Загальний обсяг роботи становить 142 сторінки. Основна частина роботи представлена на 137 сторінках друкованого тексту, що містить 44 рисунки та 10 таблиць.

У *вступі* аргументовано актуальність досліджуваної теми. Описано основну мету і завдання дисертації, зазначено об'єкт і предмет дослідження, а також вказано наукову новизну роботи та її практичне значення. Детально розкрито методи, що використовувалися в дослідженні, а також зазначено особистий внесок автора.

У *першому розділі* дисертаційної роботи детально розглянуто сплави з пам'яттю форми та їх функціональні властивості: відновлення, псевдопружність та висока демпфуюча здатність, котрі успішно застосовують у різного роду промисловій діяльності: кріплення, з'єднання, реагуючі на температуру системи безпеки, домашні прилади, одяг, актуатори у роботах і більшість медичних та біомедичних приладів.

У *другому розділі* дисертаційної роботи описано методіку прогнозування функціональних властивостей СПФ методами машинного навчання, котра потрібна для побудови відповідних регресійних залежностей на основі відповід-

них алгоритмів. Основними аспектами дослідження були система аналізу даних Orange, попередня обробка даних та аугментація відповідного набору даних. Як основний інструмент аналізу даних використовували програмне середовище Orange, котре дало можливість здійснити повний цикл інтелектуального аналізу даних та побудувати відповідні регресійні залежності методами машинного навчання з учителем. Наведено методику попереднього оброблення даних на основі перетворення ознаки у діапазон $[0, 1]$, що дало можливість побудувати ефективні моделі машинного навчання, зокрема, нейронні мережі. Також представлено методики аугментації набору даних на основі кубічних сплайнів, методу інтерполяції Акіма та модифікованого методу makima. Подано загальну методику прогнозування функціональних властивостей СПФ у вигляді блок-схеми, яка відображає основні кроки побудови відповідних регресійних залежностей. Описані методики забезпечують високу точність прогнозування, що є фундаментом для науково обґрунтованих висновків та рекомендацій.

У *третьому розділі* дисертаційної роботи змодельовано та отримано регресійні залежності розмаху залишкових деформацій та розмаху розсіяної енергії для чотирьох досліджуваних зразків методом k -найближчих сусідів, а також методом опорних векторів, методом стохастичного градієнтного спуску, випадковими лісами, нейронними мережами, градієнтним бустінгом та AdaBoost. Серед усіх досліджених методів, метод k -найближчих сусідів, AdaBoost, градієнтний бустінг і випадковий ліс показали найкращі результати у термінах похибки прогнозування.

Змодельовано розсіяну енергію нікельтитанового сплаву СПФ методами машинного навчання з учителем, врахувавши частоту циклу навантаження. Набір даних складався з петель гістерезису для шести частот циклу навантаження 0,1; 0,5; 1; 5; 7 та 10 Гц. Вхідні дані склалися з наступних ознак: напруження σ (МПа), номер циклу навантаження N та частота циклу навантаження f (Гц). Ґрунтуючись на цих даних, для кожного циклу навантаження і для кожної частоти навантаження, обчислено розсіяну енергію. Щоб додатково збільшити набір даних, його інтерпольовано модифікованим методом інтерполяції makima.

Загалом, побудовано чотири моделі машинного навчання методами Random Forest, AdaBoost, Gradient Boosting та Neural Network. Для досліджуваного набору даних методи Gradient Boosting та Neural Network демонструють більші значення похибки прогнозування порівняно з ансамблевими методами. Тому згадані вище методи не підходять для розв'язування конкретної задачі.

Наведені у дисертації *висновки* надають повну інформацію про виконання поставлених завдань та відповідають вимогам до наукового дослідження, а також пропонують ефективні підходи та методи вирішення конкретних завдань. Ці результати мають значний науковий та практичний потенціал, який можна використати як основу для подальших етапів дослідження у сфері комп'ютерних наук.

Список використаних джерел свідчить про те, що під час роботи було проаналізовано сучасні результати наукових досліджень науковців з різних країн світу. Дисертація є завершеною науковою працею, а її оформлення відповідає встановленим вимогам МОН України.

Відсутність порушення академічної доброчесності.

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора порушення академічної доброчесності не виявлено. Елементи фальсифікації чи спотворення тексту в роботі відсутні.

Зауваження та рекомендації до дисертаційної роботи

Попри загальне позитивне враження від дисертаційної роботи, варто відзначити деякі недоліки та зауваги до викладеного здобувачем матеріалу:

1. Дисертант на стор. 2 наводить таке формулювання "Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії...". Однак, відповідно до "Порядку підготовки здобувачів вищої освіти ступеня доктора філософії та доктора наук у закладах вищої освіти (наукових установах), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19 травня 2023 р. № 502, потрібно писати "Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії...".

2. Здобувач у своєму дослідженні часто вживає такі терміни: низка підходів до застосування..., запропонований підхід дозволяє..., методів та підходів

для розв'язування..., ґрунтуються на підходах машинного... тощо. Чомусь мене та моїх старших наукових колег в таких випадках дратує ключове слово "підхід". Однак, з мережі Інтернет дізнаємося, що *підхід* – це сукупність принципів, методів та поглядів, що визначають спосіб аналізу, вивчення або вирішення певної проблеми, об'єкта чи завдання. Це система засобів, які спрямовані на досягнення мети. Тобто таке слово має право на його використання.

3. Дисертант на стор. 18 наводить аж 5 пунктів наукової новизни отриманих результатів дослідження, причому кожен з них починається з ключового слова "вперше". А як відомо з мережі Інтернет, наукову новизну потрібно записувати у певній послідовності (за вагомістю отриманих результатів) і починати з таких ключових слів: *вперше розроблено ...*, *розроблено ...*, *удосконалено ...*, *отримала подальший розвиток...* Питання: а чи не забагато здобувач вживає "все виконано вперше"?

4. Дисертант на стор. 18 наводить аж 5 пунктів наукової новизни отриманих результатів дослідження, причому кожен з них починається з ключового слова "вперше". Однак, з мережі Інтернет відомо, що під терміном "вперше" може бути розроблено модель (математична чи машинного навчання), метод, методика, методологія та теорія (теоретичні засади). Проте, здобувач під ключовим словом "вперше" розуміє як "показано можливість...", так і "запропоновано моделювати...".

5. Дисертант на стор. 19 під час формулювання практичного значення отриманих результатів дослідження наводить таке формулювання: "полягає у покращенні відомих підходів до прогнозування ... довговічності матеріалів, зокрема: ", а потім ще 3 пунктами конкретизує, що саме покращено. Як на мене, ці пункти підійшли б до наукової новизни отриманих результатів дослідження. Водночас, з мережі Інтернет відомо, що практичне значення отриманих результатів дослідження полягає не в покращенні відомих підходів до..., а в підтвердженні їх життєздатності, що визначає, як результати можуть бути застосовані у реальній діяльності, бізнесі, освіті чи виробництві. Це відповідь на питання, навіщо проводилося дослідження та яка користь від нього для суспільства чи

конкретної галузі. Заради святих наукових ідей потрібно відзначити, що здобувач в наступних трьох абзацах коротко про це й пише.

6. Дисертант на стор. 21 наводить таке формулювання розділу 1 "Літературний огляд". Адже з мережі Інтернет відомо, що *огляд* (провести огляд, оглянути, розглядати, розглянемо) – не зовсім науковий термін, його можна замінити іншими словами (наприклад, аналіз, проаналізувати, проаналізовано), позаяк у аналізі якраз і передбачено попередній огляд як ззовні, по діагоналі чи в середині. Зазвичай, оглядають картину, статую, архітектурну споруду чи розглядають на подіумі якусь модель... Тому цей розділ мав би мати таку назву: "Аналіз останніх досліджень та публікацій", або "Стан та перспективи вдосконалення функціональних властивостей та довговічності сплавів з пам'яттю форми".

7. Дисертант на стор. 47, описуючи основні метрики методів машинного навчання, наводить формули (2.2)-(2.6), в яких ідентифікатори як експериментального, так і прогнозованого значення i -го елемента тестової вибірки мають таке позначення: $y_{true}^{test}(i)$ і $y_{pred}^{test}(i)$. Викликає запитання, чому тут параметр циклу взято в дужки, адже в наукових колах відомо, що параметр циклу завжди ставлять нижнім індексом, параметр етапу чи стадії ставлять у дужках верхнім індексом, а після цього в дужках зазвичай ставлять або момент часу t , або якість інші вхідні дані. Тому тут доцільно було б ввести такі ідентифікатори зазначених змінних: y_i^{true} і y_i^{pred} , в т. ч. і їх середні значення \bar{y}_i^{true} і \bar{y}_i^{pred} .

8. Дисертант у своєму дослідженні наводить рис. 2.3, 2.8, 2.9, 2.14, 2.15, 2.16 тощо, у значно збільшеному вигляді, на яких текстова інформація має шрифт розміром 20-25 пт. Адже, відповідно до наказу МОН України № 759 від 31.05.2019 "Про затвердження Вимог до оформлення дисертації", зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 03 лютого 2017 р. за № 155/30023 текст записки потрібно писати шрифтом 14 пт, а на рисунках він може бути й меншим до 12 пт. Це означає, на рисунках текстова інформація має бути також не більше 14 пт.

9. Дисертант у своєму дослідженні до кожного розділу наводить висновки, які відповідають його змісту, загалом вони хоча й розлогі, проте їх записано у розповідній формі, здебільшого взяті абзацами з тексту записки, що з гіршого годиться, однак не те, що потрібно. А як відомо з мережі Інтернет висновки до розділів дисертації потрібно писати не у розповідній формі, а кожен з них варто починати з таких ключових слів, як: *систематизовано, проаналізовано, з'ясовано, встановлено, досліджено, застосовано, представлено, введено, розроблено, проведено* і т.д. І все це потрібно пронумерувати.

10. Дисертант на стор. 124-138 наводить список використаних джерел не за стандартом ДСТУ 8302:2015 "Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання", Київ, ДП "УкрНДНЦ", 2016, а за Рекомендованим переліком стилів оформлення списку наукових публікацій, затвердженим наказом МОН України № 40 від 12.01.2017 р. "Про затвердження вимог до оформлення дисертації". Однак, здобувач у своєму списку літератури використані джерела навів не в алфавітному порядку, а ініціали авторів переніс перед їхніми прізвищами. Тобто, за бажанням знайти якесь джерело вимагатиме перегляду аж 14 стор. комп'ютерного тексту. Звичайно, деякі запропоновані в "Рекомендованим переліком стилів..." стилі оформлення наукових публікацій передбачають таке оформлення, проте як у наукових публікаціях, так і дисертаційних дослідженнях надається перевага стилю АРА, де є алфавітний їх порядок, а ініціали через кому записують відразу за прізвищем автора.

Однак, висловлені мною зауваги не є визначальними і не применшують загальну наукову новизну та практичну значущість результатів дослідження здобувача, тобто не істотно впливають на мою позитивну оцінку дисертаційної роботи.

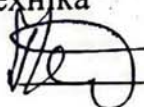
Загальні висновки

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Демчика Владислава Івановича за темою "Методи машинного навчання для моделювання функціональних властивостей та довговічності сплавів" виконана на належному практично науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого вирішує наукове завдання, що має немаловажне значення для комп'ютерних наук.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичним значенням і науковою новизною повністю відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. "Про затвердження вимог до оформлення дисертації", Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44). Автор дисертаційної роботи – Демчик Владислав Іванович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 "Комп'ютерні науки".

Офіційний опонент

професор кафедри програмного забезпечення
Національного університету "Львівська політехніка"
доктор технічних наук, професор

 Юрій ГРИЦЮК

Підпис д.т.н., проф. Грицюка Ю. І. засвідчується
Вчений секретар НУ "Львівська політехніка"

" " _____ 2026 р.



 Роман БРИЛИНСЬКИЙ