

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації
Тимощука Дмитра Івановича здобувача ступеня доктора філософії з галузі знань
12 – Інформаційні технології за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки
«Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки
сплавів з пам'яттю форми»**

Науковий керівник: д.т.н., професор, професор кафедри систем штучного інтелекту та аналізу даних Ясній Олег Петрович.

Ким і коли затверджена тема дисертації.

Тема дисертації на здобуття ступеня доктора філософії «Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми» затверджена «20» червня 2023 р. на засіданні вченої ради Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, протокол № 6, уточнена «21» квітня 2026 р. на засіданні вченої ради Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, протокол № 4.

1. Актуальність теми дисертації та її зв'язок з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри.

Дисертація містить нові науково обґрунтовані результати проведених здобувачем досліджень у напрямі побудови, оцінювання та інтерпретації моделей машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми за умов циклічного навантаження.

Актуальність теми дисертаційної роботи зумовлена зростанням потреби у створенні ефективних моделей прогнозування складних нелінійних процесів у матеріалах, що характеризуються залежністю від історії навантаження, фазовими перетвореннями та накопиченням функціональної втоми. Сплави з пам'яттю форми, зокрема NiTi-сплави, широко застосовують в інженерії, медицині, робототехніці, авіакосмічній техніці та інших галузях, де важливими є надійність, довговічність і здатність матеріалу відновлювати форму після деформації. Однією з ключових характеристик таких матеріалів є гістерезисна поведінка на діаграмі «напруження–деформація», яка відображає складну взаємодію між прикладеним навантаженням, фазовими перетвореннями та накопиченням функціональної втоми під час багаторазового циклічного навантаження. Попри значні досягнення у сфері чисельного моделювання сплавів з пам'яттю форми, традиційні підходи не забезпечують достатню точність під час екстраполяційного прогнозування гістерезисної поведінки за різних режимів навантаження. Такі моделі часто потребують складної параметричної ідентифікації, значного обсягу експериментальних даних і високих обчислювальних витрат. У цьому контексті методи машинного навчання відкривають нові можливості для побудови моделей, здатних виявляти приховані закономірності в експериментальних даних, відтворювати нелінійну залежність між напруженням, номером циклу, фазою навантаження та деформацією, а також здійснювати прогнозування гістерезисної поведінки поза межами навчального діапазону.

Водночас застосування моделей машинного навчання у задачах матеріалознавства потребує не лише високої точності прогнозування, а й забезпечення фізичної обґрунтованості отриманих результатів. Тому особливої актуальності набуває застосування методів пояснюваного штучного інтелекту, які дають змогу інтерпретувати внесок вхідних ознак у прогноз моделі, оцінити узгодженість результатів із фізичними закономірностями гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми та підвищити довіру до побудованих моделей.

Таким чином, створення моделей машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми, а також інтерпретація їх результатів засобами пояснюваного штучного інтелекту є актуальним науково-практичним завданням. Його розв'язання сприяє підвищенню точності прогнозування гістерезисної поведінки

матеріалів, зменшенню обсягу необхідних експериментальних досліджень, оцінюванню функціональної втоми та підвищенню надійності елементів і конструкцій зі сплавів з пам'яттю форми.

Дисертаційна робота пов'язана з науковими дослідженнями у рамках науково-дослідної теми ВК 76-24 «Розв'язування задач науки методами штучного інтелекту», № держреєстрації 0125U000584, що виконується в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя. Тематика дисертації відповідає науковим напрямам університету та кафедри систем штучного інтелекту та аналізу даних, зокрема напряму побудови, адаптації, оцінювання та інтерпретації моделей машинного навчання і пояснюваного штучного інтелекту для розв'язання прикладних задач науки й техніки.

2. Формулювання наукового завдання, нове розв'язання якого отримано в дисертації. Наукове завдання дисертаційного дослідження полягає у побудові, оцінюванні та інтерпретації моделей машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми за умов циклічного навантаження з урахуванням напруження, номера циклу та фази навантаження-розвантаження, здатних забезпечити високу точність, екстраполяційне прогнозування та фізично обгрунтовану інтерпретацію отриманих результатів.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом та їх новизна, особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів.

Основні наукові результати та висновки дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Зокрема, автором вперше запропоновано та обгрунтовано математичну модель прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми, у якій номер циклу навантаження-розвантаження визначено як незалежну вхідну змінну поряд із напруженням і фазою навантаження. Це дало змогу врахувати вплив циклічного навантаження та накопичення функціональної втоми матеріалу на прогнозовану деформацію, а також здійснювати екстраполяційне прогнозування. Автором вперше обгрунтовано критерії перевірки фізичної узгодженості моделей машинного навчання шляхом зіставлення результатів SHAP та Integrated Gradients із відомими фізичними закономірностями деформування матеріалу. Дисертантом удосконалено метод валідації та тестування моделей шляхом застосування групового розбиття даних за номером циклу, що унеможливило витік інформації між вибірками. Також удосконалено метод побудови Voting-моделі через визначення ваг базових моделей на основі величини, обернено пропорційної до середнього значення середньоквадратичної похибки, отриманої під час групової крос-валідації. Здобувачем особисто побудовано, налаштовано й оцінено ансамблеві та нейромережеві моделі, реалізовано методи пояснюваного штучного інтелекту, проведено порівняльний аналіз їх точності та розроблено програмну систему для побудови, оцінювання й інтерпретації моделей.

Подана дисертація виконана автором особисто. Усі наведені в тексті теоретичні положення, практичні результати, а також висновки й рекомендації є наслідком власного аналізу та узагальнення зібраних наукових і емпіричних даних.

4. Обгрунтованість та достовірність наукових положень, отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Обгрунтованість та достовірність наукових положень, отриманих результатів і запропонованих рішень забезпечуються комплексом взаємопов'язаних чинників. Теоретична обгрунтованість дисертаційної роботи забезпечується застосуванням сучасного науково-методичного апарату машинного навчання, методів математичної статистики, порівняльного аналізу моделей та засобів пояснюваного штучного інтелекту. Запропонована математична модель узгоджується з відомими фізичними уявленнями про гістерезисну поведінку сплавів з пам'яттю форми, фазовими перетвореннями, впливом історії навантаження та накопиченням

функціональної втоми за умов циклічного деформування. Достовірність експериментальних результатів підтверджується використанням реальних експериментальних даних циклічного навантаження NiTi-сплаву. Вибірка охоплює дані для різних частот навантаження, фаз навантаження-розвантаження та діапазону циклів, що дало змогу дослідити екстраполяційну здатність побудованих моделей. Додатковим підтвердженням достовірності результатів є використання методів SHAP та Integrated Gradients для перевірки фізичної узгодженості отриманих прогнозів. Апробація результатів здійснена шляхом їх оприлюднення у 8 наукових публікаціях, а також виступів на міжнародних наукових конференціях. Практичну значущість підтверджено актами впровадження у ТНТУ імені Івана Пулюя, ТОВ «СЕЙСМО АНАЛІТИКС» та ТОВ «НОВО-КОМ». Наукова обґрунтованість результатів дисертаційної роботи сумнівів не викликає.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру. Вперше запропоновано та обґрунтовано математичну модель прогнозування, у якій номер циклу навантаження визначено як незалежну вхідну змінну поряд із напруженням і фазою навантаження-розвантаження. Це дало змогу врахувати вплив циклічного навантаження та накопичення функціональної втоми матеріалу на прогнозовану деформацію. Порівняно з наявними підходами, у дисертації удосконалено стратегію валідації та тестування моделей шляхом застосування групового розбиття даних за номером циклу, що унеможливило витік інформації між навчальною, валідаційною та тестовою вибірками. Це забезпечує коректніше оцінювання узагальнювальної та екстраполяційної здатності моделей порівняно з випадковим поділом окремих вимірювань. Новизна роботи також полягає в удосконаленні підходів до побудови ансамблевих моделей Voting і Stacking та моделей глибокого навчання SimpleRNN, LSTM, GRU і TCN для задачі екстраполяційного прогнозування гістерезисної поведінки SMA. Зокрема, для Voting-моделі запропоновано визначення ваг базових моделей на основі середньоквадратичної похибки, отриманої під час групової крос-валідації. На відміну від більшості відомих досліджень, у роботі не обмежились лише оцінюванням точності прогнозування, а вперше обґрунтовано критерії перевірки фізичної узгодженості моделей із використанням методів SHAP та Integrated Gradients. Це дало змогу зіставити виявлені моделями залежності з фізичними закономірностями фазових перетворень, гістерезису та накопичення функціональної втоми. Таким чином, результати дисертації мають істотний ступінь наукової новизни порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру.

6. Використання результатів роботи. Результати дисертаційної роботи впроваджено у трьох організаціях, що підтверджено відповідними актами впровадження.

1) у науково-дослідній діяльності – в рамках виконання науково-дослідної теми ВК 76-24 «Розв'язування задач науки методами штучного інтелекту», № держреєстрації 0125U000584, що виконується в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя.

2) у виробничій діяльності – у ТОВ «СЕЙСМО АНАЛІТИКС» при розробленні та вдосконаленні підходів до аналізу експериментальних даних, пов'язаних із виявленням нелінійних залежностей, прогнозуванням поведінки досліджуваних об'єктів та підвищенням ефективності оброблення даних у прикладних аналітичних задачах.

3) у виробничій діяльності – у ТОВ «НОВО-КОМ» при вирішенні задач аналізу багатofакторних залежностей та прогнозування поведінки об'єктів у змінних умовах із застосуванням методів пояснюваного штучного інтелекту.

4) у навчальному процесі – на кафедрі систем штучного інтелекту та аналізу даних Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя при викладанні дисципліни «Машинне навчання», а також на кафедрі комп'ютерно-інтегрованих технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя при викладанні дисципліни «Методи та системи штучного інтелекту».

7. Повнота викладення матеріалів дисертації та особистий внесок здобувача до всіх наукових публікацій, опублікованих із співавторами та зарахованих за темою дисертації. Наукові результати дисертації висвітлено у наукових публікаціях:

- 1) Tymoshchuk, D., & Yasniy, O. (2025). Modelling of hysteresis behaviour of nickel-titanium shape memory alloy using artificial neural network. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (2), 285–289. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-40>.
- 2) Tymoshchuk, D., & Yasniy, O. (2025). Information technology for predicting the hysteresis behavior of shape memory alloys based on a stacking ensemble machine learning model. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 119(3), 134–146. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2025.03.134.
- 3) Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Didych, I., Maruschak, P., & Lutsyk, N. (2025). Recurrent neural networks with integrated gradients explanation for predicting the hysteresis behavior of shape memory alloys. *Sensors*, 26(1), 110. <https://doi.org/10.3390/s26010110>.
- 4) Yasniy, O., Tymoshchuk, D., Didych, I., Iasnii, V., & Pasternak, I. (2025). Modelling the properties of shape memory alloys using machine learning methods. *Procedia Structural Integrity*, 68, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.033>.
- 5) Yasniy, O., Tymoshchuk, D., Didych, I., Zoloty, R., & Tymoshchuk, V. (2025). Modeling of shape memory alloys hysteresis behavior considering the loading cycle frequency. *Procedia Structural Integrity*, 72, 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.091>.
- 6) Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Didych, I., Stanko, A., & Medvid, V. (2026). Prediction of SMA hysteresis behavior by ensemble stacking machine learning model with SHAP-based explanation. *Progress in Engineering Science*, 100237. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2026.100237>.
- 7) Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Didych, I., Maruschak, P., Lapusta, Y. (2026). Prediction of SMA Hysteresis Behavior: A Deep Learning Approach with Explainable AI. *Computers, Materials & Continua*, 87(3), 24. <https://doi.org/10.32604/cmc.2026.077062>.
- 8) Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Lapusta, Y., Didych, I., Pasternak, I., & Iasnii, V. (2026). Modeling the hysteresis behavior of SMA by an ensemble voting machine learning model. *Procedia Structural Integrity*, 81, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.03.007>.

8. Відомості про апробацію результатів дисертації. Результати роботи апробовано на:

- 1) Yasniy, O., Tymoshchuk, D., Didych, I., Iasnii, V., & Pasternak, I. (2024, August 26–30). Modeling of hysteresis in shape memory alloys using artificial neural network. *European Conference on Fracture 2024 Structural Integrity and Durability (ECF24)*, Zagreb, Croatia.
- 2) Yasniy, O., Tymoshchuk, D., Didych, I., Iasnii, V., & Tymoshchuk, V. (2024, November 17–19). Modelling of shape memory alloys hysteretic behaviour considering the loading cycle frequency. *12th Annual Conference of Society of Structural Integrity and Life (DIVK12)*, Belgrade, Serbia.
- 3) Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Didych, I., Medvid, V., & Stanko, A. (2025, November 25–28). Prediction of SMA hysteresis behaviour by ensemble stacking machine learning. *1st Biennial ESIS-CSIC Conference on Structural Integrity (BECCSI 2025)*, Belgrade, Serbia.
- 4) Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Didych, I., Pasternak, I., & Nykytyuk, V. (2025, October 15–17). Modeling the hysteresis behavior of SMA by an ensemble voting machine learning model. *VIII International Conference “In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction” (DMDP 2025)*, Ternopil, Ukraine.

9. Відповідність дисертації вимогам, що передбачені пунктом 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти». Дисертація відповідає вимогам, передбаченим пунктом 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

10. Список публікацій за темою дисертації.

1. Tymoshchuk, D., & Yasniy, O. (2025). Modelling of hysteresis behaviour of nickel-titanium shape memory alloy using artificial neural network. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (2), 285–289. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2025-82-40>.
2. Tymoshchuk, D., & Yasniy, O. (2025). Information technology for predicting the hysteresis behavior of shape memory alloys based on a stacking ensemble machine learning model. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University*, 119(3), 134–146. https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2025.03.134.
3. Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Didych, I., Maruschak, P., & Lutsyk, N. (2025). Recurrent neural networks with integrated gradients explanation for predicting the hysteresis behavior of shape memory alloys. *Sensors*, 26(1), 110. <https://doi.org/10.3390/s26010110>.
4. Yasniy, O., Tymoshchuk, D., Didych, I., Iasnii, V., & Pasternak, I. (2025). Modelling the properties of shape memory alloys using machine learning methods. *Procedia Structural Integrity*, 68, 132–138. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.06.033>.
5. Yasniy, O., Tymoshchuk, D., Didych, I., Zoloty, R., & Tymoshchuk, V. (2025). Modeling of shape memory alloys hysteresis behavior considering the loading cycle frequency. *Procedia Structural Integrity*, 72, 188–194. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2025.08.091>.
6. Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Didych, I., Stanko, A., & Medvid, V. (2026). Prediction of SMA hysteresis behavior by ensemble stacking machine learning model with SHAP-based explanation. *Progress in Engineering Science*, 100237. <https://doi.org/10.1016/j.pes.2026.100237>.
7. Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Didych, I., Maruschak, P., Lapusta, Y. (2026). Prediction of SMA Hysteresis Behavior: A Deep Learning Approach with Explainable AI. *Computers, Materials & Continua*, 87(3), 24. <https://doi.org/10.32604/cmc.2026.077062>.
8. Tymoshchuk, D., Yasniy, O., Lapusta, Y., Didych, I., Pasternak, I., & Iasnii, V. (2026). Modeling the hysteresis behavior of SMA by an ensemble voting machine learning model. *Procedia Structural Integrity*, 81, 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.03.007>.

Заслухавши та обговоривши доповідь Тимошука Дмитра Івановича, а також за результатами попередньої експертизи представленої дисертації на засіданні кафедри комп'ютерних наук, прийнято висновок щодо дисертації «Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми»:

1. Дисертація Тимошука Дмитра Івановича «Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретне наукове завдання побудови, оцінювання та інтерпретації моделей машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми за умов циклічного навантаження, здатних забезпечити високу точність, екстраполяційне прогнозування та фізично обґрунтовану інтерпретацію отриманих результатів., що має важливе значення для інформаційних технологій.


2. У 2 наукових публікаціях, опублікованих у наукових фахових виданнях України, та 6 наукових публікаціях у журналах, що індексуються в наукометричних базах Scopus та Web of Science повністю відображені основні результати дисертації.

3. Дисертація Тимошука Дмитра Івановича на тему: «Методи та моделі машинного навчання для прогнозування гістерезисної поведінки сплавів з пам'яттю форми» має наукову новизну, теоретичне та практичне значення і повністю відповідає вимогам п. 6 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої

ради закладу вищої освіти», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Голова засідання:

завідувач кафедри комп'ютерних наук,
к.т.н., доцент


Ігор БОДНАРЧУК

Рецензент

завідувач кафедри систем штучного
інтелекту та аналізу даних, к.т.н., доцент


Василь ЯЦИШИН

Рецензент

доцент кафедри автоматизації технологічних
процесів і виробництва, к.т.н., доцент


Ігор КОНОВАЛЕНКО

Підписи рецензентів

к.т.н., доцента Василя Яцишина та к.т.н.,
доцента Ігоря Коноваленка засвідчую:

Проректор з наукової роботи
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя,
д.т.н., професор




Павло МАРУЩАК