

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертацію  
Михайла Васильовича ГРИНЕНКА

„Моделювання напружено-деформованого стану та експериментально-розрахунковий метод оцінки опірності руйнуванню теплоенергетичної сталі”,

поданої на здобуття наукового ступеня *доктора філософії*

з галузі знань 11 – Математика та статистика  
за спеціальністю 113 – Прикладна математика

### **Актуальність теми**

Реальні елементи конструкцій під час експлуатації піддані комплексній дії силового навантаження та впливу робочого середовища. Наприклад, основні конструкційні елементи (колектори, патрубки, теплообмінні трубки тощо) ТЕС та АЕС працюють за умов термосилового навантаження та дії воденьвмісного середовища. Внаслідок цього в матеріалі за їх дії змінюється напружено-деформований стан, що впливає на його ресурс. Дослідження взаємовпливу цих чинників на зміну напружено-деформованого стану в металі та ресурсу роботи елементів конструкцій є актуальними, як в науковому так практичному плані. Коли внаслідок експлуатації проявляються одночасно декілька механізмів пошкодження матеріалів, то ресурс елементів трубопроводів ТЕС та АЕС традиційно визначають як найменший з них з урахуванням кожного з цих механізмів пошкодження; при цьому, природно, нехтують взаємовпливом різних механізмів пошкодження. Такий традиційний підхід може призводити як до занижених, так і завищених оцінок ресурсу елементів обладнання, що призводить до економічних витрат при експлуатації ТЕС та АЕС, наприклад, при непередбачуваних порушеннях експлуатації або заміни елементів обладнання, які фактично можуть експлуатуватися ще досить тривалий час.

Об’єктивну інформацію про властивості матеріалу можна отримати на підставі залежностей напружень від деформацій, тобто діаграм деформування. Точність встановлених залежностей визначає достовірність інженерних розрахунків на міцність та надійність елементів конструкцій. Встановити напружено-деформований стан в околі концентраторів напружень за значних пластичних деформацій доволі складно. У межах механіки руйнування розроблено теоретичні та експериментальні підходи, які дають змогу прямо чи опосередковано вирішити цю задачу.

З огляду на це, є актуальною і важливою проблема розробки математичних моделей та методів для визначення напружено-деформованого стану та прогнозування нагромадження пошкоджень у конструкційних елементах трубопроводів ТЕС та АЕС за умов експлуатації з урахуванням водневої деградації металу, локальних пошкоджень та оцінка на цій основі їх

експлуатаційного ресурсу, можливості тимчасового продовження термінів експлуатації чи заміни вузлів та елементів енергетичного обладнання з пошкодженнями, а також, створення рекомендацій щодо відповідних ремонтних заходів для їх подальшого використання.

Про актуальність теми дисертації також свідчить її тісний зв'язок із тематикою відділу міцності матеріалів і конструкцій у водневовмісних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, який здійснював підготовку здобувача, зокрема:

- науково-дослідної роботи III-144-18 „Розроблення методології оцінювання технічного стану та прогнозування ресурсу роботи елементів конструкції 2-го контуру енергоблоку АЕС за наявності водню”, № держреєстрації 0118U000464 (2018 – 2020 рр.);
- конкурсного проекту НФДУ за номером 2020.02/0049 „Фізико-механічні макро, мікро та нано механізми взаємодії водню із низьколегованими сталями як фундаментальний чинник міцності та працездатності систем зберігання і транспортування водню”, № держреєстрації 0120U104904 (2020 – 2021 рр.);
- науково-дослідної роботи III-14-21 „Розвиток енергетичного підходу для оцінювання міцності та довговічності елементів конструкцій за складного навантаження у воднево-му середовищі”, № держреєстрації 0121U108957 (2021 – 2023 рр.).

#### **Новизна представлених результатів проведених здобувачем досліджень**

- Розроблено алгоритм моделювання методом скінченних елементів напружено-деформованого стану та нагромадження пошкоджень у модифікованому зразку Бріджмана за умов, що відтворюють експериментальні випробування.
- Удосконалено методику і побудовано істинні діаграми деформування модифікованих зразків Бріджмана зі сталі 22К за різних рівнів попереднього деформування та часу наводнювання з використанням методу оптико-цифрової кореляції зображень.
- Встановлено вплив концентрації водню у попередньо деформованій маловуглецевій сталі на її опірність руйнуванню.

#### **Практичне значення отриманих результатів**

полягає у розробці експериментально-розрахункового методу побудови істинних діаграм деформування та руйнування конструкційних сталей за умов складного навантаження та впливу робочого воденьовмісного середовища. Метод ґрунтується на визначенні параметрів напружено-деформованого стану в околі концентраторів напружень високоточним і простим у застосуванні безконтактним методом оптико-цифрової кореляції зображень, який можна використовувати як у лабораторних умовах, так і для елементів конструкцій за реальних умов експлуатації. Використання цих діаграм в інженерних розрахунках та комп'ютерному моделюванні зі застосуванням методу скінчених елементів значно підвищить їх точність.

Отримані результати можуть бути використані для розв'язання прикладних задач у Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, Державному підприємстві „Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки”, Державному підприємстві „НАЕК „Енергоатом”, Національному університеті „Львівська політехніка” (Інститут енергетики та систем керування), підприємствах теплоенергетики; в науково-дослідних та конструкторських організаціях, які проектують трубопровідні системи та обґрунтовують їх безпечну експлуатацію.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих** у дисертації забезпечується фізично коректним застосуванням концепцій та експериментальних методів механіки руйнування; точністю вимірювання та статистичною обробкою результатів експерименту; узгодженням отриманих даних з відомими в літературі результатами; фізичною несуперечливістю результатів та задовільною узгодженістю експериментальних і розрахункових даних; практичним підтвердженням одержаних висновків та рекомендацій.

**Рівень виконання поставленого наукового завдання, оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності**

Подана Михайлом ГРИНЕНКОМ дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії має відповідний рівень виконання поставленого наукового завдання та засвідчує оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності. Сформульована тема дисертації відповідає її фактичному змісту. Предмет дослідження, його мета і завдання, повністю узгоджуються між собою, а сама дисертаційна робота має чітку логічну структуру. Вибір об'єкту та методів дослідження, а також обсяг проведених досліджень є достатніми та адекватними. Всі висновки достатньо обґрунтовані та випливають з представленої дослідження. Тому *вважаю, що здобувач* набув теоретичні знання, уміння, навички та компетентності, визначені відповідно до восьмого рівня Національної рамки кваліфікацій, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 23 листопада 2011 р. № 1341 (Офіційний вісник України, 2011 р., № 101, ст. 3700; 2020 р., № 54, ст. 1670), *провів власне наукове дослідження, оформлене у вигляді дисертації, та опублікував основні його наукові результати.*

**Оцінка наукового рівня дисертації і наукових публікацій здобувача**

Основні наукові положення та результати, які становлять суть дисертації, отримані автором самостійно. Вибір теми, формування завдань та аналіз результатів проведених досліджень виконано спільно з науковими керівниками. У наукових публікаціях, підготовлених у співавторстві, безпосередньо здобувач розробив алгоритм та програми; провів обчислювальні експерименти, що включали моделювання зразка, деталей конструкцій та розбиття на скінченні елементи; визначення напружено-деформованого стану, концентрації водню та енергії деформування; провів обробку й аналіз отриманих результатів, їх графічну та таблич-

ну ілюстрацію; провів порівняльний аналіз отриманих результатів із відповідними експериментальними даними та результатами інших авторів; провів експериментальні випробування, побудував істинні діаграми деформування для сталі 22К, здійснив обробку та аналіз отриманих результатів, їх графічну і табличну ілюстрацію. Загалом за результатами досліджень опубліковано 10 наукових праць, у тому числі 4 статті у наукових фахових виданнях (з них 2 статті у періодичних наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних WoS або Scopus), 5 тез та доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 1 авторське свідоцтво на комп'ютерну програму, зокрема:

- статті у періодичних наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних WoS або Scopus<sup>1</sup>

1 Dutkiewicz M., Hembara O., Ivanytskyi Y., Hvozdiuk M., Chepil O., **Hrynenko M.**, & Hembara N. Influence of hydrogen on the fracture resistance of pre-strained steam generator steel 22K. *Materials*. 2022. Vol. 15, Is. 19. Article number 6596. doi:10.3390/ma15196596 (Q2: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=76627&tip=sid&clean=0>)

2 Jin C., Hembara O.V., **Hrynenko M.V.** Computer Modeling of the Deformation of Structural Elements Under the Conditions of Creep in the Course of Hydrogenation of the Metal Under Complex Loading. *Materials Science*. 2021. Vol. 57, Is. 3. P. 397–403. <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00561-6> (Q3: <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=17804&tip=sid&clean=0>).

- статті, опубліковані у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України<sup>2</sup>

3 Іваницький Я.Л., Гвоздюк М.М., Клименко М.М., **Гриненко М.В.**, Максименко О.П. Моделювання впливу наводнювання за підвищених температур на міцність парогенераторної сталі АЕС. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2022. Т. 58, № 4. С. 32–36 (дата включення: 15.03.2019, категорії А).

4 Гембара О., Чепіль О., Сапужак Я., Гембара Н., **Гриненко М.** Вплив корозивного середовища на повзучість металу. *Проблеми корозії та протикорозійного захисту матеріалів (Корозія–2020)* / Спецвипуск журналу „Фізико-хімічна механіка матеріалів”. № 13. Львів: Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, 2020. С. 103–106 ([https://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020/Chapter\\_01/XX\\_103\\_HEMBARAChepil.pdf](https://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020/Chapter_01/XX_103_HEMBARAChepil.pdf))

---

<sup>1</sup> Належність наукового видання до першого – третього квартилів (Q1–Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports визначається згідно з рейтингом у році, в якому опублікована відповідна публікація члена разової ради або у разі, коли рейтинг за відповідний рік не опублікований на дату утворення разової ради, згідно з останнім опублікованим рейтингом.

<sup>2</sup> <https://mon.gov.ua/storage/app/media/atestatsiya-kadriv-vyshchoi-kvalifikatsii/2023/01/13/Per.fakh.vid.dlya.publ.rez.dosl.na.zdob.stup.DN-KN-DF-13.01.2023.pdf>

- наукові публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5 Ivanytskyi Ya., Hembara O., Hvozdiuk M., Chepil O. and **Hrynenko M.** Disbonding of Austenitic Stainless Steel Cladding Following High-Temperature Hydrogen Service in Hydro Processing Applications. EasyChair Preprint, № 6422, August 27, 2021. P. 1–10 ([https://easychair.org/publications/preprint\\_open/JmGm](https://easychair.org/publications/preprint_open/JmGm))

6 **Hrynenko M.** Effect of Hydrogen on the Fracture Energy of Mild Steel. *Materials Science and Surface Engineering (MSSE2021)*: Proc. of Int. Young Scientists Conf., September 22–24, 2021, Lviv (Ukraine): National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2021. P. 116–120. ([https://lozovan.com.ua/msse2021/files/Proceedings\\_MSSE2021.pdf](https://lozovan.com.ua/msse2021/files/Proceedings_MSSE2021.pdf)).

7 Гембара О.В., Чепіль О., Гембара Н., **Гриненко М.** Математичне моделювання впливу експлуатаційних чинників на довговічність теплообмінних труб парогенератора. *Симпозіум українських інженерів-механіків у Львові*: зб. матеріалів 15-го міжнар. симп., 20–21 трав. 2021, Львів: Національний університет „Львівська політехніка”, 2021. С. 27–29. (<https://lpnu.ua/sites/default/files/2021/4/26/events/12263/programa-msuiml-15.pdf>).

8 Hembara O., Chepil O., Sapuzhak Ya., Hembara N., **Grynenko M.** Effect of corrosion environment on metal creep. *Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials (Corrosion–2020)*: Book of Abstract, October 15–16, 2020, Lviv, Ukraine: National Academy of Sciences of Ukraine, Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2020. P. 41 ([https://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020/en/Book\\_abstract\\_Corrosion2020.pdf](https://www.ipm.lviv.ua/corrosion2020/en/Book_abstract_Corrosion2020.pdf))

9 Сапужак Я., Гембара Н., **Гриненко М.** Моделювання нагромадження пошкодження в металі за енергетичним підходом. *Підстригачівські читання – 2020*: зб. тез конференції молодих учених, 26–28 травня 2020, Львів: Інститут прикладних проблем механіки і математики імені Я.С. Підстригача НАН України, 2020. 2 с. (<http://iapmm.lviv.ua/chyt2020/abstracts/Hrynenko.pdf>)

- публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації

10 Чепіль О.Я., Гембара О.В., Гембара Н.Т., **Гриненко М.В.** А.с. № 107646 Комп’ютерна програма „Програма розрахунку концентрації водню в об’ємних елементах конструкцій за дії силових навантажень” („DIFEUS 3D”). Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 107646 видане Державною службою інтелектуальної власності України 30.08.2021 р. [https://www.ipm.lviv.ua/files/certufikat/Certufikat\\_teacher\\_t hree.pdf](https://www.ipm.lviv.ua/files/certufikat/Certufikat_teacher_t hree.pdf)

У повному обсязі дисертація доповідалась, обговорювалась та була рекомендована до захисту на розширеному науковому семінарі відділу міцності матеріалів і конструкцій у водневовмісних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Отже, кількість та якість опублікованих праць де опубліковано основні наукові результати дисертаційної роботи відповідає вимогам Наказу МОН „Про опублікування результатів дисертацій на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук” від 23.09.2019 р. № 1220.

### **Оцінка мови та стилю дисертації. Дані про відсутність текстових запозичень та порушень академічної доброчесності**

Дисертація, у вигляді спеціально підготовленого рукопису, написана українською мовою, послідовно за формально-логічною структурою з дотриманням наукового стилю. Виклад матеріалу супроводжується необхідною та достатньою кількістю рисунків, графіків та таблиць. За результатами перевірки та аналізу матеріалів дисертації не було виявлено ознак академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації, фальсифікації (Протокол перевірки роботи на плагіат системою UNICHECK від 19.12.2022 р., ID перевірки 1013331730). Оригінальність тексту дисертації становить 92,47%. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно, і не мають ознак плагіату. Кваліфікаційна наукова робота, яка виконана здобувачем ступеня доктора філософії особисто, містить наукові результати проведених ним досліджень та подана з метою присудження йому ступеня доктора філософії.

### **Недоліки дисертації щодо її змісту та оформлення**

1. Наскільки доцільним та необхідним є наголошення про випробування зразка з конкретної марки сталі у новизні роботи, змісті та у висновках роботи за спеціальністю 113 – Прикладна математика?
2. Автором розроблено алгоритм моделювання методом скінченних елементів напружено-деформованого стану та нагромадження пошкоджень у модифікованому зразку Бріджмана за умов, що відтворюють експериментальні випробування. Чи запропонований алгоритм враховує розмір та динаміку розвитку тріщиноподібного дефекту в середині шийки зразка?
3. Наскільки коректним є використання термінів „водневі деформації” та „температурні деформації” (див. рис. 2.3, с. 55)?
4. Аналізуючи алгоритм обчислення поля напружень незрозуміло, що необхідно робити у п. 5 (див. с. 58). До якого пункту переходимо?
5. Чим обґрунтовано вибір характеристики пластичності матеріалу (див. с. 58), в якій введено експериментально отриману залежність (рис. 2.5a) під час моделювання напружено-деформованого стану модифікованого зразка Бріджмана методом скінченних елементів?
6. Чи доцільно акцентувати уваги на різних умовах наводнювання зразків? Можливо доцільніше було б говорити про залишкову концентрацію водню у матеріалі?
7. Незначна кількість мовних помилок (правописні, стилістичні тощо, напр. див. ст. 27, 36).

8. Незначна кількість технічних помилок (що виникли при комп'ютерному наборі тексту, верстці, напр. див. ст. 61–71, 88, 89).

Зроблені вище зауваження не мають визначального впливу на загальну позитивну оцінку роботи.

**Висновок про відповідність дисертаційного дослідження вимогам, представленим на здобуття наукового ступеня доктора філософії**

Дисертація Михайла ГРИНЕНКА „Моделювання напружено-деформованого стану та експериментально-розрахунковий метод оцінки опірності руйнуванню теплоенергетичної сталі”, виконана у відділі міцності матеріалів і конструкцій у водневовмісних середовищах Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України, є завершеним науковим дослідженням, оформленим у вигляді дисертації. Представлена робота за актуальністю, новизною отриманих результатів дослідження та їх практичним та теоретичним значенням, рівнем методичного вирішення поставлених завдань 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 2022р. № 44, а її автор Михайло Васильович ГРИНЕНКО заслуговує присвоєння ступеня доктора філософії з галузі знань 11 – Математика та статистика за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

**Рецензент:**

д-р техн. наук, ст. наук. співроб.,  
пров. наук. співроб. відділу  
міцності матеріалів і конструкцій  
у водневовмісних середовищах  
Фізико-механічного інституту  
ім. Г.В. Карпенка НАН України

Андрій СИРОТЮК

