

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення
результатів дисертації
«Розроблення моделей росту коротких тріщин у металевих матеріалах
за тривалих навантажень та експлуатаційних середовищ»
здобувачки ступеня доктора філософії
з галузі знань 11 «Математика та статистика»
за спеціальністю 113 «Прикладна математика»
Яджак Наталії Степанівни**

1. Актуальність теми дисертації

В елементах конструкцій, які працюють під циклічним навантаженням, з'являються та накопичуються тріщини, змінюються та перерозподіляються напруження і деформації у зоні перед вершиною тріщини, що призводить до зміни гранично-рівноважного стану конструкції. Проаналізувавши зміну напружено-деформованого стану, можна прогнозувати процес розвитку тріщини. При цьому, особливу увагу слід приділяти коротким тріщинам. Такі тріщини, за рівності інших параметрів, можуть розвиватися за значно нижчих коефіцієнтів інтенсивності напружень, ніж довгі; а швидкість їх росту може бути значно більшою. Така поведінка коротких тріщин під дією статичного чи циклічного навантаження порушує закономірності лінійної механіки руйнування, на якій базується опис поширення довгих тріщин, і вимагає особливого підходу до дослідження поширення таких тріщин. Крім цього, дія корозивного середовища і циклічного навантаження значно посилює ріст тріщини.

Для визначення залишкового ресурсу металевих елементів конструкцій за циклічного навантаження та дії корозивних середовищ необхідно мати відповідні розрахункові моделі. Відомі моделі росту коротких тріщин, отримані на основі конкретних експериментальних результатів, визначають ресурс лише тих елементів конструкцій, на основі яких вони побудовані. Для втомного поширення довгих тріщин запропоновано значну кількість моделей руйнування, проте моделі втомної довговічності, які описують процес поширення коротких тріщин, вивчені недостатньо. У зв'язку з цим постає потреба в розробці моделей та встановлення критеріїв руйнування елементів конструкцій з короткими тріщинами.

Тему дисертації затверджено Вченою радою Львівського національного університету імені Івана Франка, протокол № 43/12 від 06.12.2017 року.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямками університету та кафедри

Дисертаційна робота виконана за програмою спільного керівництва дисертаційною роботою на кафедрі механіки Львівського національного університету імені Івана Франка та в Докторській школі інженерних наук Університету Клермон-Овернь, Франція. У процесі підготовки дисертаційної роботи проведено навчальні стажування у Школі обчислювальної математики Кільського університету, Великобританія та відділі інженерії у ТОВ Андрітц Гідро, Равенсбург, Німеччина в рамках програм міжнародної академічної мобільності.

У Львівському університеті дослідження проводилися за науковою тематикою кафедри механіки в рамках держбюджетних тем Львівського національного університету імені Івана Франка Міністерства освіти і науки України «Моделювання руйнування матеріалів за дії довготривалих навантажень, високих температур, водневмісних середовищ і радіаційного опромінення» (№ д/р 0116U001536, 2017–2018 рр.) та «Вплив деградації матеріалів на залишковий ресурс елементів конструкцій довготривалої експлуатації за дії силових і фізико-хімічних факторів» (№ д/р 0119U002202, 2019–2021 рр.).

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Дисертаційна робота є завершеним та самостійно виконаним науковим дослідженням, яке полягає у розроблених математичних моделях для опису поширення коротких тріщин у металевих матеріалах за дії тривалого навантаження та з врахуванням корозивного середовища. Постановка задач та обговорення результатів дослідження проводилися спільно з науковими керівниками проф. Андрейківим О. Є. та проф. Лапустою Ю. М. Результати досліджень, які наведені у дисертаційній роботі, належать авторці та є її науковим доробком.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором вирішень, висновків, рекомендацій

У дисертації достовірність та обґрунтованість отриманих результатів забезпечується фізичною та механічною коректністю вихідних положень і

математичних моделей; містяться повні і детальні доведення, пояснення та викладення усіх сформульованих наукових результатів, а також їхня інтерпретація на основі концепцій, понять та тверджень, відомих з літературних джерел. Достовірність отриманих моделей підтверджено внаслідок їх апробації на конкретних задачах та порівняно з розв'язками, отриманими за іншими підходами, іншими авторами або з експериментальними даними. Крім того, достовірність одержаних теоретичних результатів підтверджено шляхом доповідей на міжнародних конференціях та публікації статей у рецензованих фахових журналах.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

Внаслідок ознайомлення з дисертаційною роботою, можна стверджувати, що наукова новизна основних результатів дисертації збігається із зазначеною у тексті дисертаційної роботи та полягає у:

- побудові коректної (підтвердженої експериментами) математичної моделі поширення коротких тріщин в деформаційних параметрах розкриття у вершині тріщини на відміну від відомих розв'язків задач у параметрах КІН;
- наближеному визначенні параметрів розкриття у вершині тріщини із врахуванням середньої завантаженості зони передруйнування;
- адаптації побудованої моделі на випадок дії корозивного середовища;
- розв'язку пружних задач поперечного та повздовжнього зсувів шляхом зведення їх до відомої розв'язаної задачі нормального відриву через постановку в гармонічних функціях;
- побудові математичної моделі для визначення періоду зародження тріщин біля гладких концентраторів у пластинах;
- адаптації згаданих вище двовимірних математичних моделей на випадок тривимірних елементів конструкцій для дослідження поширення в них плоских малих втомних тріщин нормального відриву, повздовжнього і поперечного зсувів та визначення їх залишкового ресурсу за циклічного навантаження;
- розв'язанні за допомогою створеної теорії ряду задач, що мають важливе значення для інженерної практики.

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

Основні положення дисертації опубліковано в 13 наукових працях, серед яких 11 – статті у наукових виданнях, з них п'ять праць у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science, та чотири статті у наукових фахових виданнях України (три з яких – категорії «А», одна – категорії «Б»).

6.1. Публікації у закордонних фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus та/або Web of Science

1. O. Andreykiv, O. Hembara, I. Dolinska, Y. Sapuzhak, and N. Yadzhak, "Prediction of Residual Service Life of Oil Pipeline Under Non-stationary Oil Flow Taking into Account Steel Degradation," in *Degradation Assessment and Failure Prevention of Pipeline Systems. Lecture Notes in Civil Engineering*, G. Bolzon, G. Gabetta, and H. Nykyforchyn, Eds. Cham: Springer, 2020, pp. 203-216 (*Scopus*). Особистий внесок здобувача: розв'язання задачі з визначення залишкової довговічності труби.
2. Y. Lapusta, O. Andreikiv, and N. Yadzhak, "Short crack problem in delayed fracture mechanics," *Procedia Structural Integrity*, vol. 16, pp. 105-112, 2019. (*Scopus, Web of Science*). Особистий внесок здобувача: побудова та апробація математичної моделі зародження та поширення тріщин у вершинах концентраторів.
3. O. E. Andreikiv and N. S. Shtayura¹, "Computational models of fatigue cracks growth in metallic materials under the action of force and physicochemical factors," *Materials Science*, vol. 54, no. 4, pp. 465-476, 2019. (*Scopus, Web of Science*). Особистий внесок здобувача: розроблення математичної моделі поширення коротких втомних тріщин, знаходження довговічності елементів конструкцій з тріщинами та отримання формули для визначення розкриття у вершині тріщини.
4. O. E. Andreikiv, A. R. Lysyk, N. S. Shtayura¹, and A. V. Babii, "Evaluation of the residual service life of thin-walled structural elements with short corrosion-fatigue cracks," *Materials Science*, vol. 53, no. 4, pp. 514-521, 2018. (*Scopus, Web of Science*). Особистий внесок здобувача: розроблення математичної моделі поширення коротких втомних та корозивно-втомних тріщин,

¹ Штгаюра – дівоче прізвище здобувачки.

знаходження довговічності елементів конструкцій з тріщинами та отримання формули для визначення розкриття у вершині тріщини.

5. O. Andreykiv, N. Shtayura¹, and R. Yarema, "Energy-based approach to evaluation of short fatigue crack growth rate in plates," *Strength of Materials*, vol. 49, no. 6, pp. 778-787, 2017. (*Scopus, Web of Science*). Особистий внесок здобувача: розроблення математичної моделі поширення коротких втомних тріщин, знаходження довговічності елементів конструкцій з тріщинами та отримання формули для визначення розкриття у вершині тріщини.

6.2 Публікація у наукових фахових виданнях України

6. N. Yadzhak, "Generalization of the equivalent area method for the case of short fatigue cracks in a three-dimensional body," *Visnyk of the Lviv University*, no. 89, Series Mech. Math., pp. 106-122, 2020. (*Категорія Б*)
7. С. Штаюра та Н. Штаюра¹, "Аналіз впливу водню на механічні характеристики середньокарбоневих сталей," *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск "Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів"*, № 12, С. 58-63, 2018. (*Категорія А*). Особистий внесок здобувача: розрахунки властивостей матеріалів на основі експериментальних результатів.
8. С. Штаюра, Р. Костів, І. Вергун, та Н. Штаюра¹, "Вплив водню за непропорційного двовісного навантаження на деформування та міцність сталі 20," *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск "Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів"*, № 11, С. 76-81, 2016. (*Категорія А*). Особистий внесок здобувача: розрахунки властивостей матеріалів на основі експериментальних результатів.
9. С. Штаюра, Р. Костів, І. Вергун, та Н. Штаюра¹, "Побудова діаграм руйнування сталі 20 за двовісного навантаження циліндричних порожнинних зразків і дії водню," *Фізико-хімічна механіка матеріалів. Спеціальний випуск "Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів"*, № 10, С. 170-175, 2014. (*Категорія А*). Особистий внесок здобувача: розрахунки властивостей матеріалів на основі експериментальних результатів.

6.3. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

10. О. Є. Андрейків, Ю. М. Лапуста, та Н. С. Яджак, “Визначення залишкового ресурсу тонкостінних елементів конструкцій з короткими тріщинами,” на VI Міжнародній науково-технічній конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“, Тернопіль, 24-27 вересня 2019, С. 139-142.
11. Ю. Лапуста, О. Андрейків, та Н. Штаюра¹, “Оцінка залишкового ресурсу елементів конструкцій з механічно малими тріщинами за дії силових і фізико-хімічних факторів” Сучасні проблеми механіки і математики, Львів, 22-25 травня 2018, том 2, С. 223-224.
12. Н. С. Штаюра¹, “Визначення залишкової міцності тонкостінних елементів конструкцій з короткими тріщинами,” Наукові нотатки, том 57, С. 187-189, 2017.
13. I. Panko, S. Shtayura, O. Panko, and N. Shtayura¹, “Biaxial Tension of the Plate Softened by the Griffith Crack” Scientific Journal of the Ternopil National Technical University, no. 4, pp. 88-96, 2017. Особистий внесок здобувача: розроблення деформаційного критерію розкриття берегів тріщини.

7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

1. I-шій Міжнародній науково-технічній конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації: діагностування і прогнозування“ / 1-st Virtual International Conference “In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction” (Тернопіль, 2021);
2. Конкурсі представлення дисертаційних робіт УКРАІNET у рамках наукової конференції “Дні України в Берліні та Бранденбурзі: розвиток українсько-німецької академічної співпраці та побудови міцної Європи разом” / UKRAINET Thesis Presentation Contest within the “Days of Ukraine in Berlin and Brandenburg: Fostering German-Ukrainian Academic Cooperation and Building Stronger Europe Together” (Берлін, Німеччина, 2021);
3. I Зимовій школі “Тенденції адитивного виробництва для інженерних цілей”, січень 2021, Політехнічний університет Тімішоари, Румунія /

I Winter School “Trends on Additive Manufacturing for Engineering Applications”, Polytechnic University of Timișoara, Romania (2021).

4. НАТО воркшопі “Розроблення новітніх методів запобігання руйнуванню газопроводів задля безпеки” / NATO Workshop “Development of Novel Methods for the Prevention of Pipeline Failures with Security Implications” (Львів, 2020);
5. Засіданні наукової ради інженерної школи СІГМА Клермон / SIGMA Clermont (Клермон-Ферран, Франція, 2019);
6. VI Міжнародній науково-технічній конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“ / VI International Scientific and Technical Conference “In-Service Damage of Materials, its Diagnostics and Prediction”, (Тернопіль, 2019);
7. VI Міжнародній конференції “Механіка руйнування матеріалів та цілісність конструкцій” / VI International Conference. “Fracture Mechanics of Materials and Structural Integrity” (Львів, 2019);
8. Міжнародній науковій конференції “Сучасні проблеми механіки і математики”, присвяченій 90-річчю від дня народження академіка НАН України Ярослава Степановича Підстригача та 40-річчю створеного ним Інституту прикладних проблем механіки і математики НАН України / International Conference on Modern Problems of Mechanics and Mathematics dedicated to 90-th birth anniversary of Yaroslav Stepanovych Pidstryhach, Academician of NASU and 40-anniversary of the Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NASU, founded by him (Львів, 2018);
9. XIV Міжнародній конференції “Проблеми корозії та протикорозійного захисту конструкційних матеріалів” / XIV International Conference “Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Structural Materials” (Львів, 2018);

8. Наукове значення та практична цінність виконаного дослідження

Наукове значення виконаного дослідження полягає в отриманні нових математичних моделей та удосконалених методів, за допомогою яких можна описувати ріст коротких тріщин у металевих матеріалах за циклічного навантаження та наближено визначати довговічність елементів конструкцій

з такими тріщинами. З цим пов'язана і практична цінність отриманих результатів, адже запропоновані методи та моделі можуть бути використані в інженерній практиці для оцінки залишкової довговічності реальних елементів конструкцій, що перебувають в експлуатації.

Отримані внаслідок дисертаційного дослідження результати можуть бути використані у навчальному процесі для розроблення спеціалізованих курсів з механіки руйнування, методів визначення довговічності елементів конструкцій, механіки сповільненого руйнування.

9. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладення відповідає вимогам МОН України.

Дисертацію заслухано та обговорено на фаховому семінарі кафедри механіки механіко-математичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка (протокол № 3 від 18 жовтня 2021 року). У ході обговорення дисертації суттєвих зауважень, які стосуються суті роботи, висунуто не було.

На основі сказаного вище можна зробити наступні висновки щодо поданої дисертаційної роботи:

1. За актуальністю обраної теми, обсягом, достовірністю та рівнем апробації отриманих результатів, науковою новизною, обґрунтованістю висновків, практичною цінністю дисертаційна робота Яджак Н.С. «Розроблення моделей росту коротких тріщин у металевих матеріалах за тривалих навантажень та експлуатаційних середовищ» відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та п. 10 10 «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 р. № 167 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 979 від 21.10.2020 р.).
2. Дисертація відповідає спеціальності 113 «Прикладна математика» галузі знань 11 «Математика та статистика».
3. Наукові праці Яджак Н.С., опубліковані за темою дисертаційної роботи, за кількістю та якістю відповідають п. 11 «Тимчасового порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 06 березня 2019 р. № 167 із змінами, внесеними згідно з Постановою КМ № 979 від 21.10.2020 р.

4. Дисертацію «Розроблення моделей росту коротких тріщин у металевих матеріалах за тривалих навантажень та експлуатаційних середовищ» Яджак Наталії Степанівни рекомендовано для подання до розгляду та захисту в одноразовій Спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

Рецензенти:

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри вищої математики

Максимук О. В.

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри механіки

Слободян М. С.

20.10.2021

(дата)

Підписи проф. Максимаука О. В. та доц. Слободяна М. С. засвідчую:

Вчений секретар
Львівського національного
університету імені Івана Франка, доц.



Грабовацька О. С.