

## ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертацію ГЕМБАРИ Назара Тарасовича

«Математичне моделювання двоїстого впливу водню на залишкову довговічність елементів конструкцій», подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика

**Актуальність теми дисертації.** Важливою основою для адекватних випробувань металів і розрахунків конструкцій на міцність і довговічність під час взаємодії з воднем за дії силових та температурних навантажень, або інших критичних виробничих чи експлуатаційних чинників, є математичне моделювання процесів водневої деградації металів на основі фізичних і механічних теорій їх деформування і руйнування. Як показують експериментальні дослідження руйнування металів на основі заліза, водень може по-різному впливати на деформативні властивості. З одного боку водень, розчинений в металі, може його окрихчувати (за великих водневих концентрацій), а з іншого – пластифікувати (за малих концентрацій). У зв'язку з цим для практичних застосувань та розвитку теоретичних напрацювань у галузі математичного моделювання є важливим дослідження впливу такої своєрідної «двоїстості» впливу водню, визначення критеріїв «перемикання» механізмів водневого впливу залежно від властивостей металу та дії зовнішніх чинників тощо.

Відомі на сьогодні моделі описують, як правило, окрихчувальну дію водню і не враховують зумовлене ним пластифікування металу. З огляду на це, науковим завданням дисертаційної роботи Гембари Н.Т. є дослідження саме цих проблем шляхом розробки математичного апарату для опису процесів деформування і локального руйнування (ріст тріщин) матеріалів і елементів конструкцій за дії водню. Така постановка проблеми обумовлює актуальність дисертації та важливе науково-практичне значення її результатів.

**Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у відділі акустичних методів та засобів технічної діагностики Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України. Результати отримано у рамках виконання робіт по держбюджетній темі «Розроблення методів акустико-емісійного діагностування воднево-корозійного руйнування матеріалів і прогнозування ресурсу елементів конструкцій» (2020–2022 рр., номер д. р. 0120U101792), а також 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» (2020–2021 рр., номер д. р. 0120U104904), за якими автор працював як виконавець.

**Наукова новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень.** Ґрунтуючись на системному аналізі літературних даних та коректності постановки задач

здобувачем побудовано математичні моделі впливу водню на деформування і ріст тріщин в елементах конструкцій для розрахунку їх залишкової довговічності з урахуванням різних механізмів водневої деградації за тривалого статичного навантаження.

До нових наукових результатів, отриманих у роботі, слід віднести:

- розроблену розрахункову модель зумовленого воднем росту тріщин у металах за дії тривалого статичного навантаження, у якій враховується вплив напружено-деформованого стану у зоні передруйнування та перерозподіл водню на підготовку стрибка тріщини за різних механізмів HELP (посилена воднем локалізована пластичність), HEDE (воднева декогезія). На основі моделі побудовано метод оцінювання залишкової довговічності елементів конструкції з тріщинами у водневмісному середовищі. При цьому встановлено, що пластифікування матеріалу воднем позитивно впливає на довговічність елементів конструкцій в умовах водневмісних середовищ;
- сформульовану математичну модель дифузії водню в кусково-неоднорідному тілі в тривимірній постановці та отриманий аналітичний розв'язок диференціального рівняння в частинних похідних другого порядку, який дає змогу визначати характеристичне значення концентрації водню, за якого змінюється механізм впливу водню на деформування;
- сформульовану математичну модель кількісної оцінки впливу водню на пластичну деформацію. На її основі показано, що за малих концентрацій водень посилює рух дислокацій, що сприяє збільшенню швидкості пластичної деформації.

**Наукова обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.** Наукові положення дисертації є достатньо обґрунтованими та відображеними у висновках. Найсуттєвіші результати, що були отримані здобувачем, відповідають меті та завданням роботи і повною мірою висвітлені в опублікованих працях у рейтингових журналах. Ступінь вірогідності отриманих результатів забезпечується достатньою апробаційною базою здобувача – результати досліджень представлено на українських та міжнародних наукових конференціях.

Достовірність отриманих результатів забезпечується фізичною обґрунтованістю вихідних положень сформульованих математичних моделей, коректністю та строгістю математичних постановок задач, коректним застосуванням математичного апарату для їх розв'язання, порівнянням отриманих результатів із результатами числових розрахунків та відомими експериментальними даними.

**Рівень оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності.** Дисертаційна робота є добре та логічно структурованою. Зокрема, викликає схвалення спосіб подання огляду літературних джерел, який є чудово структурований як для такої багатогранної та складної тематики досліджень. Це зокрема свідчить про високий рівень оволодіння здобувачем методології проведення наукових досліджень.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі досліджень, висвітлено наукову новизну та значення науки і практики.

У першому розділі дисертант на основі зробленого широкого аналізу і синтезу експериментальних та теоретичних досліджень показав багатогранний вплив водню на механічну поведінку та міцність конструкційних матеріалів з реалізацією його декількох механізмів одночасно або незалежно.

У другому розділі сформульовано модель дифузії водню в полікристалічному тілі з урахуванням неоднорідності параметрів дифузії і розчинності водню в тілі зерна і по границях, а також алгоритми та числові програми для її реалізації для конкретних крайових задач.

Третій розділ присвячено розробленню основ теорії для оцінки впливу водню на пластичну деформацію в металах.

У четвертому розділі викладено розрахункову модель росту тріщин у металах за дії водню та статичного навантаження з урахуванням механізмів впливу водню на деформування, а також на її основі результати оцінки залишкової довговічності елементів конструкцій.

Кожен розділ відповідає окресленому завданню, наводить вичерпний виклад матеріалу, який підсумовано та підкріплено висновками в кінці розділів. У дисертаційній роботі наведено результати відомих та нових теоретичних і числових досліджень за проблемою двоїстого впливу водню на деформування і руйнування металевих матеріалів, які підтверджують ефективність розроблених моделей, новизну результатів та їх достовірність. Загальні висновки містять основні наукові результати, отримані здобувачем у дисертаційній роботі.

**Рівень виконання поставленого наукового завдання.** Роботу виконано на належному науковому рівні. Її положення та результати є достатньо обґрунтованими та не суперечать загальним положенням механіки руйнування. Основні результати, отримані в дисертації, достатньо повно висвітлені в наукових виданнях та апробовані на міжнародних конференціях. Здобувачем опубліковано 14 друкованих праць, з них 6 статей у фахових виданнях, 7 матеріалів і тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій, 1 авторське свідоцтво. Чотири статті прореферовані наукометричною базою SCOPUS.

Обсяг і кількість опублікованих наукових робіт, а також їх якість відповідають вимогам МОН України щодо публікацій основного змісту дисертації на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – Прикладна математика.

**Зауваження щодо оформлення та змісту дисертації.** До дисертації можна зробити наступні зауваження.

1. У постановках задач дифузії водню розглянуто лише умови першого роду: задані концентрації водню на границях металічної конструкції, або у вершині тріщини. Така постановка є досить обмеженою, адже передача концентрації водню до металу не може бути миттєвою.

2. В роботі бажано було б сформулювати рекомендації для класу процесів і матеріалів, для яких можна використовувати розроблені моделі.
3. На ст. 76 визначено існування деякого характеристичного значення концентрації водню для низьколегованих сталей, за якого відбувається зміна механізму впливу водню на деформування. Втім не зовсім чітко обумовлено, чи це значення є певною «фіксованою» характеристикою матеріалу, чи на нього мають вплив фактори навантаження, експлуатації та інші чинники.
4. На ст. 108 розділу 4 дисертант посилається на рівняння (4.19), яке насправді відповідає рівнянню за номером (4.14). Загалом у цьому розділі втрачено послідовність нумерації формул з (4.16) по (4.19) включно, після (4.15) йде (4.20).
5. У тексті дисертаційної роботи наявні окремі граматичні та стилістичні помилки й некоректність ілюстративного матеріалу. Наприклад, написи і позначення зокрема на рис. 1.3, 1.4, 1.6, 1.7 наведено мовою, відмінною від мови викладу основного тексту; друге та третє речення анотації практично дублюють зміст одне одного, а відтак можна було б обійтися одним, відповідним чином розширеним; на ст. 39 аббревіатуру «hede» наведено малими літерами; практично цілий вступний абзац третього розділу на ст. 79 майже дослівно повторює абзац, наведений на ст. 17 вступу, тощо.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Гембари Н.Т.

**Загальний висновок про відповідність дисертації встановленим вимогам.** Дисертація Гембари Назара Тарасовича «Математичне моделювання двоїстого впливу водню на залишкову довговічність елементів конструкцій» і його наукові публікації відзначаються достатнім науковим рівнем, а саме новизною теоретичних та практичних результатів проведених здобувачем досліджень, їхньою науковою обґрунтованістю, високим рівнем виконання поставленого наукового завдання та оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності. Дисертаційна робота відповідає спеціальності 113 – Прикладна математика та вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 44.

#### ОФІЦІЙНИЙ ОПОНЕНТ

заступник директора Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, завідувач відділу механіки деформівного твердого тіла, д. ф.-м. н. ст.н.с.

Юрій ТОКОВИЙ

Підпис Юрія Токового засвідчую  
Вчений секретар ІППИМ НАН України

Оксана КРАВЧИШИН

