

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Гембари Назара Тарасовича** “**Математичне моделювання двоїстого впливу водню на залишкову довговічність елементів конструкцій**”, поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань **11 “Математика та статистика”** за спеціальністю **113 “Прикладна математика”**

Актуальність дисертаційної роботи. На сьогоднішній день спостерігається інтенсивне збільшення використання водню в хімічній та нафтохімічній галузях промисловості, в охолоджувальних елементах роторів турбогенераторів, в металоводневих системах ядерних і термоядерних енергетичних установок, як палива для ракетних та авіаційних двигунів тощо. Зауважено, що процес експлуатації конструкцій, які працюють у водневмісних середовищах, супроводжується пониженням їх довговічності, одним з головних факторів цього явища є деструктивний вплив водню, який прискорює появу і поширення в ньому тріщин. Тому проблема міцності наводнених елементів конструкцій під час дії силових навантажень є злободенною. Зазвичай конструкційні матеріали підвищеної міцності більш схильні до шкідливого впливу водню, особливо водневої крихкості. Разом з тим дослідження останніх десятиріч виявили новий феномен механізму утворення локальних пластичних деформацій за певної концентрації водню. Необхідність розрахунку міцності та прогнозування довговічності металоконструкцій, які працюють у водневмісних середовищах, призводить до розуміння розробки ефективного математичного апарату, який уможливило фізично коректний опис комплексної дії водневого середовища на елементи металоконструкцій з урахуванням двоїстих механізмів його впливу на матеріал, дифузію та нерівномірну концентрацію водню, наявність тріщин, температурне і силове навантаження тощо. Незважаючи на значний обсяг наявних у літературі експериментальних даних, теоретичні доробки цієї проблематики вивчені недостатньо і далекі від свого логічного завершення. Математичному моделюванню та розробці теоретико-розрахункових моделей для опису характеру руйнування елементів металоконструкцій у водневмісних середовищах за тривалих статичних навантажень, двоїстому впливу водню на їх залишкову довговічність і присвячена дисертаційна робота.

Враховуючи вищесказане, дана дисертаційна робота є, поза сумнівом, актуальною в науковому та прикладному аспектах.

Загальна характеристика роботи та отриманих у ній результатів. Дисертація складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі на підставі аналізу літературних джерел окреслено сучасний стан розглянутих у дисертації проблем, проведено огляд досліджень, присвячених аналізу складного характеру взаємодії механізмів водневої деградації на конструкційні матеріали. Визначено мету роботи

та сформульовані необхідні для її досягнення задачі. У другому розділі дисертаційної роботи сформульовано математичну модель дифузії водню в полікристалічному тілі, яка враховує параметри неоднорідності дифузії і розчинності водню в об'ємі та на границях зерна; для розв'язання отриманих диференціальних співвідношень розроблено стійкий алгоритм скінченно-елементного аналізу визначення концентрації водню з урахуванням теплових та силових навантажень; для сталі марки 20 визначено характерну величину концентрації водню, за якої спостерігається трансформація механізму впливу водню на її деформування. **Третій розділ** дисертації присвячено побудові математичної моделі для опису впливу водню на пластичну деформацію, зумовленої рухом та швидкістю дислокацій, з урахуванням впливу температурних і силових чинників. З використанням отриманої моделі на прикладі α -заліза показано комплексний вплив зазначених чинників на кількісні і якісні параметри пластичного деформування. **Четвертий розділ** роботи присвячено розробці ефективного алгоритму-протоколу розрахунку залишкової довговічності елементів конструкцій у водневмісному середовищі. Розрахунковий алгоритм ґрунтується на запропонованій моделі росту тріщини з урахуванням механізмів HEDE водневого окрихчення та HELP підвищеної локальної пластичності під дією водню; деформаційному критерію старту тріщини; розв'язанні диференціального рівняння дифузії водню в полі напружень для визначення його концентрації в зоні передруйнування.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень і висновків дисертаційного дослідження. Достовірність отриманих автором у дисертаційній роботі результатів та висновків забезпечена обґрунтованим застосуванням класичних положень та методів математичної фізики, механіки деформівного твердого тіла; строгістю застосування ефективних математичних та числових методів для розв'язування отриманих диференціальних рівнянь; верифікацією в часткових випадках отриманих результатів з аналітичними та експериментальними результатами, отриманими іншими дослідниками; відповідністю виявлених висновків суті фізичних явищ у досліджуваних об'єктах.

Новизна одержаних теоретичних та/або експериментальних результатів досліджень полягає в тому, що дисертантом:

- вперше сформульовано математичну модель опису фізичного процесу дифузії водню в кусково-однорідному тілі, яка враховує параметри неоднорідності дифузії і розчинності водню по об'єму та на границях зерна;
- запропонований ефективний алгоритм та розроблено програму скінченно-елементного аналізу концентрації водню у тривимірному тілі під дією температурного та силового навантажень;
- на основі проведених досліджень для випадку маловуглецевої сталі встановлено верифіковане з відомими у літературі експериментальними результатами характеристичне значення концентрації водню, за якого спостерігається феномен зміни механізму впливу водню на деформування сталі;

- проведено математичне моделювання з отриманням основних фізичних співвідношень для дослідження сумісного впливу концентрації водню, температури та силового навантаження на пластичне деформування металу;
- розроблено методику оцінювання залишкової довговічності елементів конструкцій з тріщинами у середовищі за різних режимів наводнювання з реалізацією механізмів HELP, HEDE та показано його ефективність на прикладі розрахунку залишкової довговічності пластини з тріщиною.

Рівень виконання поставленого наукового завдання, оволодіння здобувачем методологією наукової діяльності. У дисертаційній роботі з використанням методів математичної фізики, механіки деформівного твердого тіла та числових методів проведено математичне моделювання низки фізичних процесів в однорідних та кусково-неоднорідних тілах зі зведенням їх до розв'язування певного класу неоднорідних рівнянь. Дисертантом розроблено відповідні програми для числового розрахунку розподілу концентрації водню в об'ємних елементах конструкцій під дією силового та температурного навантажень. Зокрема, на програму скінченно-елементного аналізу отримано авторське свідоцтво.

Поставлені наукові завдання виконані на високому методологічному рівні, а дисертант оволодів необхідними для рівня наукового ступеня доктора філософії компетенціями, навичками та досвідом.

Повнота викладу сформульованих у дослідженні наукових положень, висновків і результатів в опублікованих працях. Отримані в дисертаційній роботі результати висвітлені в наукових фахових виданнях, пройшли апробацію на вітчизняних та міжнародних конференціях. За результатами дисертаційних досліджень автором опубліковано 14 наукових праць, серед яких 6 статей у фахових наукових виданнях, 4 з яких прореферовано міжнародними наукометричними базами даних Web of Science та/або Scopus; 7 публікацій в матеріалах тез наукових конференцій та 1 авторське свідоцтво на комп'ютерну програму.

Обсяг опублікованих робіт, їх кількість та якісні показники відповідають вимогам стосовно публікацій для дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. У роботі для оцінювання процесу дифузії водню по границях зерен використано класичну модель Фішера. При цьому не зовсім чітко зрозуміло, наскільки коректним є застосування згаданої моделі, яка по суті описує макрооб'єкт, до моделювання процесів у мікрооб'єкті, яким є зерно металу.
2. У роботі не виписані формули (4.16) – (4.19), внаслідок чого частково обривається логічна послідовність математичних викладок.
3. Остаточний вигляд деяких математичних співвідношень виписано без наведення безперечно громіздких проміжних викладок (наприклад, отримання виразу (4.32) для функції концентрації водню, рівняння (4.36) для визначення швидкості росту тріщини). Разом з тим дисертаційна робота кваліфікується за спеціальністю

“Прикладна математика” і було б цікаво ознайомитися зі згаданими викладками (їх можна було б винести у Додатки роботи).

4. У роботі трапляються окремі описки (підписи до деяких рисунків виконані різними мовами); використано різні (хоча і вірні) назви одних і тих самих величин, наприклад, “*межа текучості* , *межа плинності*, *границя пластичності* “ ; одним параметром позначені різні величини (наприклад, параметр p одночасно є локальною координатою в скінченно-елементному аналізі, характеристикою силового навантаження та параметром інтегрального перетворення Лапласа).

Викладені зауваження не заперечують позитивного враження від поданої до захисту роботи, а також не впливають на достовірність основних результатів та висновків.

Відсутність порушень академічної доброчесності. Порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі Гембари Н.Т. та його наукових публікаціях не виявлено.

Заключна оцінка дисертаційної роботи. Подана до захисту дисертаційна робота Н.Т. Гембари є цілісною та завершеною науковою працею, в якій детально і математично вирішено актуальну і складну проблему дослідження двоїстого впливу водню на залишкову довговічність конструктивних елементів. Сформульовані завдання та мета успішно досягнуті. Виклад змісту роботи дуже добре структуровано, послідовно логічно подано та викладено на належно високому науковому рівні. Робота містить нові науково обґрунтовані та цікаві результати, які у сукупності є важливими для розвитку прикладної математики та механіки деформівного твердого тіла. За актуальністю теми, науковою новизною, обсягом, теоретичною та практичною значущістю отриманих результатів дисертаційна робота “Математичне моделювання двоїстого впливу водню на залишкову довговічність елементів конструкцій” повністю відповідає 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 № 44 від 12 січня 2022 року, а її автор, Гембара Назар Тарасович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 113 – прикладна математика.

Офіційний опонент
професор кафедри механіки
Львівського національного університету
імені Івана Франка,
д-р фіз.-мат. наук, доцент

Володимир СТАНКЕВИЧ

Підпис доцента Володимира Станкевича засвідчую
Вчений секретар
ЛНУ імені Івана Франка

Ольга ГРАБОВЕЦЬКА

