

ВІДГУК

офіційного опонента

про дисертаційну роботу **Сапужака Ярослава Ігоровича**
“Моделі та розрахункові методи оцінювання впливу наводнювання металу на довговічність елементів енергетичного обладнання”,
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
з галузі знань 11 – Математика та статистика
за спеціальністю 113 – Прикладна математика

Актуальність теми дисертації. Для елементів обладнання теплових і ядерних енергоустановок, що експлуатуються за високих механічних навантажень та температур і взаємодіють з хлоридовмісними середовищами, характерними рисами є повзучість і корозійне розтріскування. Коли внаслідок експлуатації проявляються одночасно декілька механізмів пошкодження конструкційних матеріалів, наприклад, повзучість, різні види корозії, воднева деградація, ресурс елементів обладнання теплових і ядерних енергоустановок традиційно визначають як найменший ресурс 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 теплових і ядерних енергоустановок, наприклад, при непередбачених порушеннях нормальної експлуатації або заміни елементів обладнання, які фактично можуть експлуатуватися ще досить тривалий час.

Обґрунтування працездатності таких елементів конструкцій з урахуванням повзучості значно ускладнюється залежністю швидкості повзучості конструкційних матеріалів від багатьох чинників – температури, механічних напружень та наявності робочих середовищ.

Отримання знань щодо закономірностей плинності процесів повзучості та накопичення прихованих пошкоджень надає можливість оцінювання поточного стану напружено-деформованого стану конструкції, та на його основі робити висновки щодо її довговічності. Проте, навряд чи можна в найближчому майбутньому, розраховувати на побудову універсальної теорії повзучості. Необхідно направляти зусилля на розроблення більш досконалих моделей з можливо меншим числом емпіричних параметрів при досить точному описі певних режимів деформування матеріалів.

З огляду на це, дисертаційна робота Сапужака Я. І. “Моделі та розрахункові методи оцінювання впливу наводнювання металу на довговічність елементів енергетичного обладнання”, у якій на основі енергетичного підходу побудована розрахункова модель для прогнозування довговічності елементів конструкцій за високотемпературної повзучості в металевих матеріалах за дії довготривалих навантажень і експлуатаційних середовищ є **актуальною і має важливе науково-практичне значення.**

Розроблені у дисертаційній роботі методи мають важливе значення для визначення міцності та довговічності, і дають можливість в короткі терміни

кількісно оцінити залишковий ресурс елементів конструкцій з урахуванням впливу водню та складного навантаження.

Представлені в роботі дослідження виконані в рамках науково-дослідних тем Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України згідно з планами Національної академії наук України, в яких дисертант був виконавцем, а саме в рамках таких наукових тем і проєктів: науково-дослідної роботи Ш-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 проєкту 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.).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації та їх достовірність. Детальний аналіз стану теоретичних розробок та результатів експериментальних досліджень по проблемі за літературними джерелами, чітке формулювання завдань теоретичних досліджень, комплексний підхід при їх розв'язанні, використання для досягнення мети визнаних та апробованих у механіці руйнування методів розрахунку та різнобічний аналіз і порівняння отриманих результатів з відомими даними, отриманими іншими авторами, порівняння результатів числових та теоретичних розрахунків з результатами власних або відомих з наукової літератури експериментальних досліджень, свідчать про високий ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації Я. І. Сапужака.

Достовірність сформульованих у роботі висновків забезпечується також фізично коректною постановкою задач механіки руйнування, використанням відомих методів їх розв'язування та несуперечливістю отриманих результатів з фізично очікуваними. Так, в роботі проведено порівняння отриманих результатів із аналітичними розв'язками задачі Ляме для деформівного лінійно-пружного порожнистого осесиметричного циліндра. Показано, що еквівалентні напруження на зовнішній стінці труби добре корелюють із аналітичними результатами. Порівняльний аналіз результатів розрахунку довготривалої міцності за класичними рівняннями Работнова - Качанова та за розробленим автором енергетичним підходом показав, що час довговічності матеріалу, отриманий за енергетичним підходом, краще корелює з експериментальними даними.

Результати дисертаційної роботи також добре узгоджуються з висновками інших дослідників та відомими закономірностями експлуатаційної деградації металів, що підтверджує їх правильне трактування.

Основні положення та висновки дисертаційної роботи висвітлені в численних рецензованих наукових публікаціях, у тому числі цитованих в наукометричних базах Scopus і WoS. Крім того, результати дисертаційної роботи пройшли апробацію під час представлення матеріалів доповідей та їх обговорення на авторитетних наукових конференціях.

Наукова новизна наукових положень та висновків дисертації. Щодо наукової новизни отриманих результатів, то вона, перш за все, полягає у

суттєвому розвитку теорії водневого руйнування. Ґрунтуючись на проведених теоретичних розрахунках і системному аналізі результатів, здобувачем розроблена та апробована оригінальна методологія оцінювання довговічності елементів енергетичного обладнання на основі врахування як механічного навантаження, так і фізико-хімічної взаємодії металу з експлуатаційним середовищем. До основних наукових здобутків Я. І. Сапужака, які відзначаються суттєвою науковою новизною, належать:

1. Розрахункові моделі та методи оцінювання міцності та довговічності елементів енергетичного обладнання, які враховують вплив наводнювання та корозивного середовища на деформування матеріалу.

2. Алгоритм і програми для визначення методом скінченних елементів концентрації водню, температурного поля, корозивного середовища та напружено-деформованого стану в елементах конструкцій із врахуванням реальної геометричної форми та визначення на їх основі енергії деформування локального об'єму металу.

3. Розрахунок напружено-деформованого стану теплообмінних труб парогенераторів з урахуванням наводнювання металу залежно від зміни внутрішнього тиску, товщини парогенераторів та вмісту хлориду магнію. Побудова діаграм довговічності для різних парогенераторів на повітрі та у корозивних середовищах для різних експлуатаційних тисків та концентрацій водню.

4. Методика оцінювання міцності та довговічності елементів конструкцій в умовах повзучості і наводнювання металу за тривалої експлуатації на основі дослідження зв'язану задачі дифузії водню та термовязкопружнопластичності з врахуванням пошкодження матеріалу за повзучості.

Практичне значення отриманих результатів. Методи, розроблені Я.І. Сапужаком на основі адекватних сучасних математичних моделей, дають можливість у стислі терміни проаналізувати поведінку того чи іншого конструктивного елемента з пошкодженнями за умови, що моделюють експлуатаційні, та отримати експертну оцінку запасу його міцності. Ці дані використовують, приймаючи рішення про можливість тимчасового продовження термінів експлуатації чи заміни вузлів та елементів енергетичного обладнання з пошкодженнями, а також для вироблення рекомендацій щодо відповідних ремонтних заходів.

За допомогою розроблених засобів комп'ютерного моделювання процесів деформування термомеханічних систем за дії комплексного навантаження дисертанту вдалось дослідити напружено-деформований стан теплообмінних труб за умов експлуатації з урахуванням фізично нелінійного деформування, наводнювання металу та впливу корозивного середовища.

Розроблені автором метод та програмне забезпечення дозволили оцінити накопичення дефектів і визначити момент появи тріщин.

Отримані здобувачем результати можуть бути використані для дослідження прикладних задач в Фізико-механічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України, в Державному підприємстві «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» (ДНТЦ ЯРБ), Державному підприємстві «НАЕК «Енергоатом», Національному університеті «Львівська

політехніка» (Інститут енергетики та систем керування), Інституті проблем машинобудування ім. А. Підгорного НАН України, в науково–дослідних та конструкторських організаціях, які займаються проектуванням трубопровідних систем, енергетичного обладнання та обґрунтуванням їх безпечної експлуатації.

Відповідність роботи вимогам, які ставляться до дисертації. За важливістю розв’язаної наукової задачі, повнотою її теоретичного та експериментального обґрунтування, обсягом проведених досліджень і новизною сформульованих висновків дисертаційна робота Сапужака Я. І. відповідає вимогам, що ставляться до робіт на здобуття наукового ступеня доктора філософії, зокрема п. 10 Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою КМУ від 06.03.2019 № 167 та Вимогам до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 № 40.

Повнота викладення наукових положень та висновків. Результати дисертаційної роботи сповна відображено у 15 наукових публікаціях, серед них 4 праці індексуються науковою базою SCOPUS. Дослідження, представлені у дисертації, пройшли достатньо широку апробацію на різного рівня наукових конференціях.

Публікації автора повністю розкривають основний зміст дисертації. Викладене вище свідчить про достатньо високий науковий рівень роботи та її відповідність вимогам, що пред’являються до кандидатських дисертацій.

Викладення матеріалу логічне і послідовне, висновки до розділів і в цілому по дисертації базуються на результатах глибоких теоретичних розробок і всебічного аналізу. В цілому робота виконана на високому науковому рівні, написана технічно грамотно, досить легко читається та сприймається спеціалістами відповідного профілю.

Зауваження до дисертаційної роботи.

1. Згідно з нормативними документами, розрахунок довготривалої міцності базується на визначенні коефіцієнту запасу довготривалої міцності за значеннями еквівалентних напружень та границі довготривалої міцності за заданої температури і терміну служби. У роботі не достатньо чітко пояснюється, чим саме запропонований у роботі енергетичний підхід є кращим.
2. В розділах 2 (стор. 74) та 3 (стор.107-108) подано таблиці з константами, які входять у рівняння та критичні значення енергії деформування. Проте не сказано, як було визначено ці величини. Варто було б вказати, чи це власні дані чи літературні.
3. В роботі показано, що визначення енергії деформування та руйнування на циліндричному зразку з використанням методу ЦКЗ дає можливість встановлювати інваріантні характеристики матеріалу. Чи можна використовувати цей підхід у випадку визначення довговічності трубчастих елементів?
4. У роботі робиться наголос про врахування впливу наводнювання. Проте практично не описано, як визначається концентрація водню у металі.
5. У формулюванні задачі про дифузію водню за товщиною стінки трубопроводів слід було б вказати, які крайові та початкові умови приймалися.

Висновок. Перелічені недоліки не впливають на високу оцінку роботи в цілому. Дисертаційна робота “Моделі та розрахункові методи оцінювання впливу наводнювання металу на довговічність елементів енергетичного обладнання” є завершеною науковою роботою, яка гідно продовжує наукові дослідження львівської школи математиків та механіків. В роботі розв’язана важлива як в науковому, так і в практичному відношенні задача оцінювання довговічності елементів конструкцій, підданих дії силових навантажень та водневмісних середовищ за урахування впливу водню на метал. За новизною отриманих результатів та ступенем їх обґрунтованості дисертація відповідає вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації», і вимогам, передбаченим пунктом 10 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» (Постанова Кабінету Міністрів України № 167 від 6 березня 2019 р.), а її автор заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії з галузі знань 11 «Математика та статистика» за спеціальністю 113 «Прикладна математика».

Провідний науковий співробітник
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України
д.т.н., професор

О.О. Стрельнікова

Підпис Стрельнікової О.О. засвідчую

Заступник директора
Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного Національної *
академії наук України з наукової роботи
член-кореспондент НАН України



А.О. Костіков