

Відгук
офіційного опонента на дисертаційну роботу
Кандала Степана Михайловича
на тему «Ресурс елементів внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 з урахуванням залишкових зварювальних напружень»,
представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 13 – Механічна інженерія,
за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Актуальність теми дисертації. Пролонгація роботи енергоблоків атомних електростанцій (АЕС) – загальносвітовий тренд, стратегія якого полягає в поетапному подовженні строків їхньої служби. Для забезпечення умов безпечної експлуатації енергоблоків АЕС у понадпроектний строк необхідна висококваліфікована науково-технічна підтримка, зокрема, актуальним завданням є розрахункове обґрунтування конструкційної міцності та прогнозування залишкового ресурсу елементів обладнання АЕС.

Одним із вирішальних чинників, що забезпечує умови довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС, є прогнозування незворотної формозміни такого елемента внутрішньокорпусних пристроїв, як вигородка активної зони реактора ВВЕР-1000. Під час експлуатації реактора вигородка зазнає найбільшого впливу нейтронного опромінення, оскільки вона розташована в безпосередній близькості від тепловиділяючих збірок (ТВЗ). Аналізувати прогресуючу формозміну вигородки необхідно для обґрунтування можливості перевантаження ТВЗ з активної зони реактора та контролю величини зазору між вигородкою і внутрішньокорпусною шахтою в процесі експлуатації. Змикання вигородки з шахтою через радіаційне розпухання і радіаційну повзучість металу вигородки може призвести до виникнення додаткових контактних напружень, перерозподілу витрат теплоносія першого контуру в реакторі та, як наслідок, до зміни температурного режиму роботи реактора. Отже, для розрахункового обґрунтування міцності та прогнозування формозміни вигородки найбільш актуальним є врахування радіаційних ефектів за умов тривалої експлуатації реактора.

Розрахункова оцінка прогресуючої формозміни вигородки активної зони реактора ґрунтується на застосуванні сучасних математичних моделей, які дають змогу описувати процеси радіаційного розпухання і радіаційної повзучості з урахуванням накопиченої пошкоджуючої дози, температури опромінення й впливу напружень та накопиченої незворотної деформації на розпухання і повзучість опроміненого металу.

Згідно з результатами розрахункової оцінки кінетики формозміни вигородки реактора ВВЕР-1000, які отримані іншими дослідниками, в тому числі в Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України, на основі розв'язання зв'язаної контактної задачі термо-пружно-пластичності з урахуванням деформацій радіаційного розпухання та радіаційної повзучості, можна очікувати, що вичерпання номінального зазору між вигородкою і внутрішньокорпусною шахтою не буде спостерігатися в межах проєктного строку експлуатації (30 років), хоча окремі значення зазору досить близько наближаються до нуля. Локальний контакт вигородки з шахтою відбувається після 30 років експлуатації в зоні розташування каналу з найбільшим отвором і паз-каналу. Мінімальний залишковий зазор, близький до нульового, між дистанційними решітками периферійних ТВЗ і гранями вигородки в режимі зупинення реактору може спостерігатися після 50 років експлуатації.

Отже, проблема забезпечення ресурсу реактора ВВЕР-1000 з точки зору можливого змикання зазорів між елементами внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП) дійсно існує. Також останнім часом було виконано декілька досліджень, які пов'язані з визначенням опору крихкому руйнуванню (ОКР) у вигородці ВКП реактора типу ВВЕР-1000. За отриманими результатами розглянуті умови ОКР виконуються з урахуванням необхідних коефіцієнтів запасу на 40 і 60 років експлуатації.

Попри існуючих розрахункових оцінок кінетики формозміни та опору крихкому руйнуванню вигородки реактора ВВЕР-1000 для умов проєктної та довгострокової експлуатації енергоблоків АЕС, вплив на вказані прогностичні оцінки залишкових технологічних напружень, що зумовлені зварюванням і післязварювальною термообробкою вигородки і шахти під час виготовлення, на цей час недостатньо вивчений. Тому тема дисертації здобувача Кандали С.М. є безумовно актуальною для глибшого дослідження проблеми забезпечення роботоспроможності та ресурсу елементів ВКП реакторів ВВЕР-1000 за умов довгострокової експлуатації енергоблоку АЕС.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни. Обґрунтованість наукових результатів, які висвітлені в дисертаційній роботі, ґрунтується на використанні чисельних методів скінченно-елементного моделювання напружено-деформованого стану (НДС) конструкційних елементів ВКП в поєднанні з сучасними фізичними моделями радіаційного окрихчення, розпухання і повзучості матеріалу (сталі 08X18H10T), а також методів лінійної механіки руйнування для аналізу крихкому руйнуванню тіл з тріщинами, використання яких регламентується існуючими в атомній енергетиці нормами для первинної оцінки крихкої міцності.

Згідно з результатами дисертаційного дослідження основні положення наукової новизни такі:

По-перше, методами математичного моделювання доведено, що післязварювальна термічна обробка вигородки ВКП ВВЕР-1000 за режимом аустенізації (максимальна температура нагріву $T=1100^{\circ}\text{C}$ і наступне швидке охолодження на повітрі) призводить до утворення високих залишкових напружень в об'ємі вигородки, як розтягуючих (до 320 МПа), так і стискаючих напружень на поверхні (до -290 МПа).

По-друге, методами лінійної механіки руйнування встановлено, що залишкові технологічні напруження суттєво впливають на опір крихкому руйнуванню вигородки ВКП ВВЕР-1000, а саме, врахування залишкових напружень дає змогу знизити консервативність оцінки ОКР вигородки для поверхневих напівеліптичних тріщин, оскільки на поверхні вигородки утворюються залишкові напруження стискання.

По-третє, визначено, що врахування залишкових технологічних напружень при розрахунковому прогнозуванні зазорів між вигородкою і внутрішньокорпусною шахтою може відстрочити їх контакт приблизно на 2 роки, а зазор між вигородкою і ТВЗ за 60 років експлуатації для різних можливих рівнях накопиченої дози не буде вичерпаний.

Таким чином, здобувач Кандали С.М в дисертаційній роботі досяг мети дослідження і виконав поставлені задачі. Він задовольнив кваліфікаційні вимоги до дисертаційних робіт і показав, що оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності. За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Кандали С.М. відповідає вимогам Стандарту вищої освіти зі спеціальності 132 – Матеріалознавство та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми Матеріалознавство. Дисертаційна робота оформлена у відповідності до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Згідно зі звітом подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння робота Кандали С.М є оригінальним самостійним дослідженням здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, плагіату та запозичень. Використані припущення, залежності, моделі, результати і тексти інших авторів мають посилання на відповідні джерела, які є в наукометричних базах або у відкритому доступі.

Взагалі, дисертаційна робота є результатом особистого внеску здобувача у вирішення прикладних проблем механіки суцільного середовища і матеріалознавства, містить сформульовані положення наукової новизни і може характеризуватись як завершена наукова кваліфікаційна праця.

Мова та стиль викладення результатів. Дисертаційна робота написана українською мовою, має логічну послідовність подання розглянутих матеріалів та одержаних результатів, використання загальноприйнятої термінології, в основному, є коректним.

Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку літератури та двох додатків. Загальний обсяг дисертації 129 сторінок.

Перший розділ містить результати аналізу проблеми, яка пов'язана з необхідністю розрахункового обґрунтування ресурсу внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000, прогнозування НДС за умов проєктної та тривалої експлуатації з урахуванням ефектів радіаційного окрихчення, розпухання і повзучості опроміненого матеріалу ВКП. Розглянуті сучасні методи чисельного визначення залишкових технологічних напружень після зварювання та термічної обробки товстостінних конструкційних елементів із аустенітних сталей. Наведені розрахункові підходи лінійної механіки руйнування, які можуть використовуватись для оцінки опору крихкому руйнуванню вигородки реактора ВВЕР-1000. Наприкінці першого розділу сформульовані мета і задачі дослідження.

Другий розділ містить запропоновану здобувачем методику оцінки ресурсу безпечної експлуатації елементів внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 на основі визначення їх напружено-деформованого стану під час виготовлення та тривалої експлуатації, а також проведення розрахункової оцінки опору крихкому руйнуванню елементів ВКП під час проєктного терміну і довгострокової експлуатації до 60 років.

Третій розділ містить результати чисельного дослідження НДС внутрішньокорпусних пристроїв ВВЕР-1000 в процесі виготовлення, проєктного строку та довгострокової експлуатації. Показано, що в результаті післязварювальної термообробки за режимом аустенізації у вигородці утворюються досить високий рівень залишкових напружень, які суттєво впливають на кінетику НДС під час експлуатації реактора ВВЕР-1000.

Четвертий розділ містить результати розрахункового аналізу впливу залишкових зварювальних (технологічних) напружень на оцінку ресурсу елементів внутрішньокорпусних пристроїв, а саме на кінетику змикання вигородки з тепловиділяючими збірками і шахтою внутрішньокорпусною під час експлуатації, а також на обґрунтування опору крихкому руйнуванню вигородки для режиму нормальних умов експлуатації та найбільш важкої аварійної ситуації.

Загальні висновки, сформульовані в кінці роботи, відповідають найбільш вагомим результатам досліджень здобувача, а також узгоджуються з положеннями наукової новизни і практичної цінності дисертаційної роботи.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи. Наукові результати дисертації висвітлені у 15 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 7 статей у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України; 8 робіт в збірниках доповідей міжнародних наукових конференцій; 3 з опублікованих робіт внесені до наукометричної бази SCOPUS.

Необхідно зазначити велику кількість публікацій здобувача Кандала С.М. за темою дисертації. Науковий рівень публікацій досить високий. Всі результати, отримані здобувачем стосовно впливу залишкових зварювальних напружень на визначення загального НДС та оцінку опору крихкому руйнуванню металу вигородки реактора ВВЕР-1000, є оригінальними. Всі представлені в його публікаціях результати або висновки інших дослідників мають посилання на літературне джерело.

Таким чином, наукові результати представлені в дисертаційній роботі Кандала С.М. повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи. Під час ознайомлення з дисертаційною роботою здобувача Кандала С.М. виникли наступні зауваження:

1. У роботі йдеться про вплив залишкових напружень на загальний НДС та опір крихкому руйнуванню конструкції внутрішньокорпусної вигородки реактора ВВЕР-1000. Проте вигородка кожного корпусу реактора має свої конструктивні особливості, тому у роботі доречно окреслити застосовність отриманих результатів, тобто для всіх вигоронок реакторів ВВЕР-1000, що експлуатуються, або для якогось одного конкретного енергоблока АЕС.

2. У роботі доцільно надати відомості про застосування програмне забезпечення для розрахунків НДС та ОКР, а також уточнити, як саме застосований програмний засіб для розрахунків вигородки дозволяє врахувати розраховані залишкові напруження у місцях зварювання.

3. У розділі про вхідні параметри зазначено, що з консервативного погляду для проведення математичного моделювання НДС вигородки реактора ВВЕР-1000 обрано параметри нормальних умов експлуатації (НУЕ) з нижчою швидкістю накопичення дози опромінення, однак твердження про консервативність потребує обґрунтування, оскільки більш консервативними параметрами є ті, що виникають у разі протікання перехідних процесів під час аварійної ситуації.

4. Крайові задачі з визначення температурних полів та НДС розв'язано в двовимірній постановці в поперечному перерізі, розташованому за висотою вигородки в зоні з максимальним рівнем температури та пошкоджуючої дози опромінення. Застосовано припущення щодо умов узагальненої плоскої деформації, тобто, деформації в перетині вигородки не повинні дорівнювати нулю. Ці умови перевірялись у роботі під час розрахунків ?

5. У розділі 4 зазначено, що допустимі значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) визначені за температурними залежностями, що представлені в документі «Типовая программа по оценке технического состояния и продления срока эксплуатации внутрикорпусных устройств. ПМ-Т.0.03.333-15 (із змінами, в редакції 2023)». Відповідно до цього документа критичне значення інтеграла J_c , за яким розраховуються допустимі значення КІН, залежить від температури експлуатації, температури опромінення та пошкоджуючої дози, що є індивідуальним для кожного енергоблоку. Доцільно вказати для якого саме енергоблоку та які параметри прийнято у розрахунку.

6. Є низка зауважень з точки зору коректності термінології: Наприклад, висловлення «корпусів енергоблоків» є некоректним і потребує уточнення як «корпусів реакторів». Використано термін «призначений ресурс», в той час як більш коректним і загальновживаним є термін «проектний строк експлуатації». У вступі зазначається, що на сьогоднішній день на АЕС України більшість енергоблоків типу ВВЕР-1000 працюють у надпроектному режимі. Термін «надпроектний режим» є некоректним і відповідно до вимог НП 306.2.210-2017 потребує уточнення, наприклад: «На сьогоднішній день на АЕС України більшість енергоблоків типу ВВЕР-1000 перейшли до довгострокової експлуатації...». Використано сполучення «продовження ресурсу безпечної експлуатації», водночас відповідно до вимог НП 306.2.210-2017 коректним є термін «довгострокова експлуатація», тобто відбувається перехід від проектного строку експлуатації до довгострокової експлуатації.

Вважаю, що висловлені зауваження не є принциповими і не зменшують наукову новизну і практичну значимість результатів, які отримані здобувачем, а також не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи.

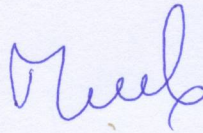
Висновок про дисертаційну роботу. Дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Кандали Степана Михайловича на тему «Ресурс елементів внутрішньокорпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 з урахуванням залишкових зварювальних напружень» виконана на сучасному науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань Механічна інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6–9 «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 січня 2022 р. № 44.

Таким чином, вважаю, що здобувач Кандаля Степан Михайлович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 13 Механічна інженерія за спеціальністю 132 – Матеріалознавство.

Офіційний опонент:

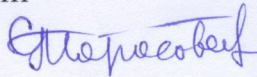
В.о. директора
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України
д.т.н., с.н.с.



Олександр ЧИРКОВ


Підпис офіційного опонента
д.т.н., с.н.с. Олександра Чиркова
Засвідчую

В.о. ученого секретаря
Інституту проблем міцності
імені Г.С. Писаренка НАН України
к.т.н., с.дослідник



Світлана ТАРАСОВСЬКА

М.П.

«  » лютого 2024 року