



Ідентифікатор подання: 11

Тип: Секційна доповідь

## Окрихчування високоопроміненого зварного шва корпусу реактора ВВЕР-1000 з високим вмістом нікелю і марганцю

*вівторок, 27 травня 2025 р. 11:55 (20 хвилин)*

Одним із критичних питань довгострокової експлуатації енергетичних реакторів з водою під тиском є окрихчування корпусу реактора (КР), спричинене переважно нейтронним опроміненням. Для покращення розуміння багатьох відкритих питань стосовно деградації металу КР під впливом нейтронного опромінення реалізуються різні міжнародні проекти, одним із яких є STRUMAT-LTO, що виконується у рамках програми Європейського Союзу HORIZON 2020. Однією із задач цього проекту є дослідження впливу несприятливої синергії між нікелем (Ni), марганцем (Mn) і кремнієм (Si) на мікроструктуру та механічні властивості КР при високих флюенсах швидких нейтронів, що відповідають терміну довгострокової експлуатації АЕС (60 років і більше).

Задачею ІЯД НАН України в рамках STRUMAT-LTO було випробування опромінених зразків модельного шва з умовним позначенням «Н» (realistic weld Н), що за хімічним складом і режимами термообробки нагадує зварний шов КР ВВЕР-1000, а також реконструювання випробуваних зразків та дослідження їх методами механіки руйнування.

Метою цієї роботи є визначення критичної температури крихкості металу зварного шва Н за результатами випробувань стандартних зразків Шарпі на ударний вигин, а також її зсуву внаслідок опромінення відповідно до різних нормативних підходів.

У номенклатуру досліджуваних в проекті STRUMAT-LTO матеріалів включено вісім зварних швів подібних до металу КР ВВЕР-1000 з вмістом нікелю у діапазоні  $CNi = 1,26 \div 1,94\%$ , марганцю  $CMn = 0,56 \div 1,08\%$  та кремнію  $CSi = 0,18 \div 0,32\%$ . Вміст інших хімічних елементів майже не відрізняється. Особливістю зварного шва Н є високий вміст всіх трьох елементів, які, як вважається, мають найбільший вплив на швидкість радіаційного окрихчування металу КР:  $CNi = 1,89\%$ ,  $CMn = 1,08\%$  та  $CSi = 0,32\%$ . Всі досліджувані матеріали було опромінено потоком швидких нейтронів з енергією понад 1 МеВ до флюенсу  $1,11 \cdot 10^{24}$  нейтр./м<sup>2</sup>. Номінальне значення густини потоку нейтронів на зразки складало  $\sim 2,75 \cdot 10^{16}$  нейтр./м<sup>2</sup>·с при температурі опромінення 286 °С. Зразки опромінювалися в рамках експерименту LYRA-10 у дослідницькому реакторі Petten High Flux Reactor.

Дослідження зразків металу зварного шва Н виконувалися в лабораторії «гарячих» камер ІЯД НАН України. Випробування на ударний вигин проводилося на дистанційно керованому маятниковому копрі КМД-30 з максимальною енергією удару 300 Дж.

За результатами випробувань було отримано температурні залежності енергії руйнування і долі в'язкої складової у зламі зразків. Температурні залежності апроксимовано функцією гіперболічного тангенсу згідно з міжнародними підходами. Поєднання таких факторів як висока ступінь опромінення та високий вміст Ni і Mn суттєво вплинуло на форму кривої апроксимації, яка є надзвичайно пологою та має низький рівень верхнього шельфу (USE – upper shelf energy).

Для визначення критичної температури крихкості матеріалу застосовано декілька підходів: діючий в Україні нормативний підхід за СОУ НАЕК 087:2023 [1], міжнародний підхід згідно з ASTM E185 [2], який регламентує визначення температури крихкості на рівні енергії руйнування 41 Дж, та застосування фіксованого критеріального рівня 28 Дж. Визначення критичної температури крихкості на рівні 28 Дж широко застосовується у наукових дослідженнях згідно із стандартом ASTM E1921 [3] для оцінки температури випробувань зразків механіки руйнування. Відповідно до СОУ НАЕК 087:2023 критеріальні рівні для визначення критичної температури крихкості змінюються ступінчасто залежно від границі текучості матеріалу. Для сталі із границею текучості понад 549 МПа значення критеріальних рівнів складають 47,2 і 71,2 Дж.

Значення верхнього шельфу досліджуваного матеріалу становить 47,8 Дж, що є надзвичайно низьким і не дозволяє оцінити температуру крихкості за підходом СОУ НАЕК 087:2023. Через значну пологість кривої Шарпі температури крихкості, визначені на рівнях 41 і 28 Дж, відрізняються на понад 90 °С, а їх зсуви на 70 °С. Однак, фактично, температуру крихкості на рівні 41 Дж не може бути визначено достовірно, оскільки у нормах ASME [4] вказані обов'язкові вимоги до величини USE, яка має бути не нижчою 68 Дж для опроміненого матеріалу.

Також у роботі виконано апроксимацію функцією гіперболічного тангенсу температурної залежності долі в'язкої складової у зламі. З отриманого графіка виявлено, що температура крихкості, визначена на рівні 41 Дж, відповідає значенню в'язкої складової 94%, тобто значенню, що лежить поблизу верхнього шельфу кривої Шарпі. Це свідчить про те, що для зварного шва Н в опроміненому стані критична температура крихкості може бути штучно завищена. Отже, встановлення лімітуючого значення USE 68 Дж у нормативних документах ASME є виправданим. У цьому випадку оцінку тріщиностійкості рекомендується визначати з використанням експериментальних методів механіки руйнування. Проект STRUMAT-LTO отримав фінансування від Програми досліджень та навчання EURATOM 2019–2020 згідно з грантовою угодою № 945272.

1. СОУ НАЕК 087:2023. Інженерна, наукова і технічна підтримка. Методика визначення радіаційного окрихчування металу корпусів реакторів за результатами випробувань зразків-свідків.
2. ASTM E185-16. Standard Practice for Design of Surveillance Programs for Light-Water Moderated Nuclear Power Reactor Vessels, Annual Book of ASTM Standards, Volume 12.02, 2016.
3. ASTM E1921-21. Standard test method for determination of reference temperature, T<sub>0</sub>, for ferritic steels in the transition range // Annual Book of ASTM Standards, 2021. –Vol. 03.01. –P. 1–39.
4. American Society of Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Subsection NB 2300, Fracture toughness requirements for material, New York, NY (2001).

**Author:** Пан ТРИГУБЕНКО, Олександр (Інститут ядерних досліджень НАН України)

**Співавтори:** Пан РЕВКА, Володимир (Інститут ядерних досліджень НАН України); Пан ЧАЙКОВСЬКИЙ, Юрій (Інститут ядерних досліджень НАН України)

**Доповідач:** Пан ТРИГУБЕНКО, Олександр (Інститут ядерних досліджень НАН України)

**Тип засідання:** Радіаційна фізика та реакторне матеріалознавство

**Класифікація за напрямком:** Радіаційна фізика та реакторне матеріалознавство