

ОСОБЛИВОСТІ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ ЗВАРНИХ ПОГЛИНАЮЧИХ СТРИЖНІВ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ЗАХИСТУ ВВЕР-1000 В ПРОЦЕСІ МОНТАЖУ ТА ПОДАЛЬШОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, О.О. Махненко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: asmilenin@ukr.net

Система управління та захисту (СУЗ) з поглинаючими елементами (ПЕЛ СУЗ) відіграють ключову роль у стабільній та безпечній роботі ядерного реактора ВВЕР-1000, забезпечуючи контроль потужності та аварійну зупинку. Надійність ПЕЛ СУЗ безпосередньо залежить від цілісності оболонкових елементів поглинаючих стрижнів (ПС), які піддаються впливу монтажного зварювання та експлуатаційних навантажень. Важливою характеристикою надійності такого типу конструкцій є напружений стан на різних етапах монтажу та експлуатації. Дослідження зосереджено на аналізі напружено-деформованого стану оболонкових елементів ПС, що зумовлений технологічним етапом монтажного зварювання та експлуатаційного навантаження. Шляхом чисельного моделювання термодформацийних процесів показано, що геометричні особливості конструкції зумовлюють принципову різницю в розподілі напружень, а саме формування двовісного напруженого стану в області зварювання конуса з оболонкою ПС і тривісного напруженого стану в зоні з'єднання наконечника з оболонкою ПС. Показано, що під час аварійної зупинки реактора та його охолодження до кімнатної температури відбувається суттєве зниження зовнішнього тиску теплоносія та різке зростання максимальних напружень у стінці оболонки ПС, що є показником підвищеної схильності до втрати цілісності. Бібліогр. 15, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: ядерний реактор, ВВЕР-1000, ПЕЛ СУЗ, поглинаючі стрижні, зварні оболонки, напружений стан, математичне моделювання

Вступ. Експлуатація атомних електростанцій пов'язана з необхідністю гарантування високого рівня безпеки як окремих компонентів, так і всього циклу енергетичної генерації. Це стосується забезпечення цілісності конструкцій та компонентів ядерних реакторів і супутнього технологічного обладнання, планового протікання процесів ядерних і супутніх реакцій, уникнення попадання радіоактивних речовин у навколишнє середовище, безпеки праці обслуговуючого інженерного персоналу тощо. Складність і взаємопов'язаність фізичних і технологічних процесів, а також значний вплив людського фактору зумовлює необхідність детального та всебічного вивчення закономірностей їхнього впливу на безпеку експлуатації ядерних реакторів.

Важливою частиною реактора є система управління та захисту (СУЗ), до складу якої належать поглинаючі елементи (ПЕЛ СУЗ) (рис. 1, а), які відіграють критичну роль у забезпеченні стабільної та безпечної роботи реактора, виконуючи низку важливих функцій [1, 2]. По-перше, СУЗ дозволяє точно контролювати та регулювати потужність реактора, забезпечуючи його ефективну й безпечну експлуатацію. Вона відповідає за запуск реактора та його поступовий вихід на заданий рівень потужності, а також за зміну режимів роботи шля-

хом переходу з одного рівня потужності на інший. По-друге, СУЗ забезпечує можливість оперативно припинення ланцюгової реакції ядерного поділу в разі виникнення нештатних ситуацій або необхідності швидкого зниження потужності. Це досягається шляхом скидання в активну зону ПЕЛ, які ефективно поглинають нейтрони, запобігаючи подальшому розвитку реакції. Нарешті, СУЗ є важливим елементом загальної безпеки реактора, оскільки її функціонування дозволяє виключити ймовірність неконтрольованого розвитку ядерної реакції, тим самим запобігаючи можливим аварійним ситуаціям.

Таким чином, забезпечення надійності експлуатації ядерного реактора безпосередньо пов'язане з гарантуванням цілісності елементів СУЗ. Важливість цього фактора зумовила формулювання низки регламентних вимог щодо аналізу технічного стану та працездатності окремих елементів СУЗ, зокрема, міцності та герметичності поглинаючих стрижнів (ПС) [3–5].

Особливістю цих ПС є їхній складний профіль і наявність монтажних зварних з'єднань оболонки з конусом і наконечником. Це, у свою чергу, визначає складний розподіл механічних напружень в умовах експлуатації, що зумовлено нелінійною взаємодією

Міленін О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-9465-7710>, Великоіваненко О.А. – <https://orcid.org/0009-0007-3704-2000>,

Розинка Г.П. – <https://orcid.org/0009-0009-1750-7266>, Махненко О.О. – <https://orcid.org/0000-0003-2319-2976>

© О.С. Міленін, О.А. Великоіваненко, Г.П. Розинка, О.О. Махненко, 2025

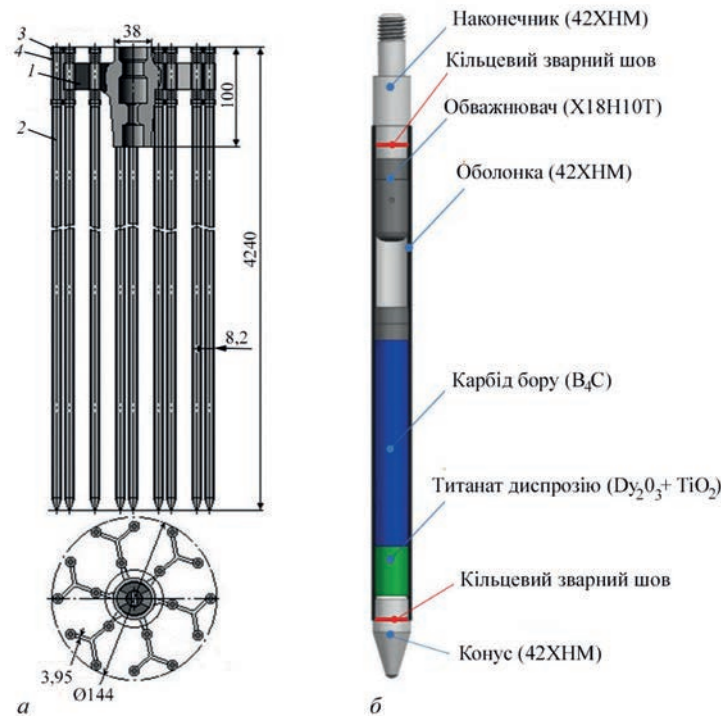


Рис. 1. Ескізи поглинаючих елементів ПЕЛ СУЗ (а) і поглинаючого стрижня ПС (б): 1 – головка; 2 – ПС; 3 – гайка; 4 – пружина

залишкових післязварювальних напружень з експлуатаційними. Відомо, що величина напружень характеризує схильність до крихкого, крихко-в'язкого та втомного руйнувань конструкційних матеріалів [6–8]. Тому розуміння закономірностей розподілу напружень у перерізі оболонкових ПС СУЗ на різних етапах експлуатації є важливим для коректного прогнозування надійності при проектуванні, технічній діагностиці фактичного стану та продовженні ресурсу на позапроектний період.

Метою даного дослідження є визначення впливу процесу монтажного зварювання та термосилового експлуатаційного впливу на напружено-деформований стан (НДС) оболонкових елементів ПЕЛ СУЗ.

Виклад основного матеріалу. ПС (рис. 1, б) являє собою стрижень з циліндричною оболонкою із хромонікелевого сплаву 42ХНМ [9] із зовнішнім діаметром 8,2 мм і товщиною стінки 0,50...0,55 мм, герметично закритий кінцевими деталями (наконечником, який забезпечує з'єднання з несучою системою ПЕЛ СУЗ, та обтяжуючим конусом) і заповнений поглинаючим матеріалом [10].

Температурні залежності фізичних і механічних властивостей корозійностійкого сплаву 42ХНМ наведені в таблиці. Границя текучості сплаву 42ХНМ при виготовленні безшовних тонкостінних холоднодеформованих труб регламентується на рівні $\sigma_T = 520$ МПа при $T = 20$ °С, $\sigma_T = 245$ МПа при $T = 375$ °С.

Герметизація оболонки здійснюється шляхом електродугового зварювання верхньої та нижньої кінцевих деталей у середовищі інертних газів. Усередині оболонки розташовано поглинаючий стрижень із дисперсійного матеріалу, такого як карбід бору (B_4C) і титанат диспрозію ($Dy_2O_3 + TiO_2$) в алюмінієвій матриці або гафній [11]. Вигорання цих елементів та їх розпухання призводить до появи надлишкового внутрішнього тиску $P_{внутр}$ всередині циліндричної оболонки (близько 3,0 МПа) та за певних умов має вплив на несучу здатність і кількісні показники технічного стану. У проектних умовах експлуатації ПЕЛ діє зовнішній тиск теплоносія $P_{зовн} = 16$ МПа за температури $T_0 = 350$ °С. Окрім проектного режиму необхідно також враховувати ситуацію аварійної зупинки експлуатації реактора, коли $P_{зовн}$ знижується до нуля, а температура – до кімнатної $T_0 = 20$ °С. Підсумовуючи сказане, можна виділити три характерних стани ПС СУЗ, а саме: після монтажного зварювання, в умовах проектного експлуатації на стаціонарному режимі та за зупинки й охолодження реактора.

Як зазначалося вище, типовою характеристикою надійності відповідальних елементів енергетичного обладнання, яка визначається під час експертизи стану, є рівень механічних напружень, що формується на різних етапах експлуатації. Для випадку оболонкових ПЕЛ СУЗ розподіл напружень у перерізі конструкції визначається

Температурні залежності фізичних і механічних властивостей сплаву 42ХНМ [9]

$T, ^\circ\text{C}$	$E, \text{ГПа}$	$\alpha \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт}/(\text{см} \cdot ^\circ\text{C})$	$c_p, \text{Дж}/(\text{см}^3 \cdot ^\circ\text{C})$
20	234	14,5	0,050	3,550
100	223	15,0	0,100	3,686
200	218	15,6	0,130	3,800
300	210	16,0	0,150	3,854
400	204	16,6	0,180	3,955
500	196	17,0	0,205	3,991
600	188	17,5	0,230	4,040
700	143	18,0	0,230	4,043
800	135	18,5	0,230	4,113
900	118	19,0	0,230	4,115
1000	96	19,5	0,230	4,115
1100	46	19,5	0,230	4,115
1200	8	19,5	0,230	4,115

взаємодією післязварювальних напружень із зовнішніми навантаженнями та температурним впливом. Тому для прогнозування полів напружень необхідно врахувати як технологічний аспект монтажного зварювання, тобто кінетику термодетформованого стану матеріалу конструкції під дією локального джерела нагрівання аж до повного охолодження та настання залишкового стану, так і подальшого експлуатаційного нагрівання та навантаження.

Просторова неоднорідність і нелінійна кінетика фізико-механічних процесів, що визначають поточний та залишковий НДС конструкції при монтажному зварюванні та подальшій експлуатації, ускладнює використання спрощених аналітичних методів аналізу. Крім того, невеликі масштаби елементів ПЕЛ СУЗ та їхня геометрична форма ускладнюють використання інструментальних засобів контролю НДС. Тому раціональним є залучення методів математичного моделювання та комп'ютерної симуляції відповідних технологічних процесів на основі мультифізичних математичних моделей та скінченно-елементних засобів їх чисельної реалізації.

У рамках цієї роботи розглядалась задача чисельного прогнозування кінетики температурного поля та розвитку пружно-пластичних деформацій у рамках постановки крайової задачі нестационарної термопластичності. Так, кінетика температурного поля описувалась шляхом чисельного розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності, а саме [12]:

$$c_p(r, \beta, z, T) \cdot \frac{\partial T(r, \beta, z)}{\partial \tau} = \nabla \left[\lambda(r, \beta, z, T) \cdot \nabla T(r, \beta, z) \right], \quad (1)$$

де λ, c_p – теплопровідність і об'ємна теплоємність матеріалу конструкції відповідно в даній точці як функції від просторових координат і температури.

Джерелом тепла є нормально розподілений поверхневий потік від зварювальної дуги в області монтажного з'єднання наконечника з оболонкою та конуса з оболонкою. Дисипація тепла через поверхню при зварюванні відбувається відповідно до закону Ньютона-Ріхмана (конвективна тепловіддача) і Стефана-Больцмана (інфрачервоне випромінювання) та описується відповідними потоками тепла. Таким чином, граничні умови щодо сформульованої задачі (1) наступні [12]:

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = -q_w + \alpha_T \cdot (T - T_C) + \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot (T^4 - T_C^4), \quad (2)$$

де n – нормаль до поверхні; α_T – коефіцієнт тепловіддачі; T_C – температура навколишнього середовища; ε – ступінь чорноти матеріалу; σ_{SB} – константа Стефана-Больцмана; q_w – потік енергії зварювального нагрівання.

Математичний розгляд об'єднаної задачі кінетики температурного поля та розвитку НДС базується на скінченно-елементному описі з використанням восьмивузлових скінченних елементів (СЕ). У межах об'єму СЕ розподіли температур, напружень і деформацій приймаються однорідними, а приріст тензора деформацій може бути представлено у відповідності до наступного виразу [13]:

$$d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p + \delta_{ij} \cdot d\varepsilon_T, \quad (3)$$

де $d\varepsilon_{ij}^e, d\varepsilon_{ij}^p, \delta_{ij} \cdot d\varepsilon_T$ – компоненти приросту тензора деформацій, обумовлених пружним механізмом деформування, деформаціями миттєвої пластичності та кінетикою неоднорідного температурного поля відповідно.

Тензори механічних напружень σ_{ij} і пружних деформацій $d\varepsilon_{ij}^e$ пов'язані між собою узагальненим законом Гука, тобто [14]:

$$\varepsilon_{ij}^e = \frac{\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma}{2 \cdot G} + \delta_{ij} \cdot (K \cdot \sigma + \varphi), \quad (4)$$

де σ – середнє значення нормальних компонентів тензора напружень σ_{ij} , тобто $\sigma = \frac{(\sigma_{\beta\beta} + \sigma_{zz} + \sigma_{rr})}{3}$,

$$K = \frac{1 - 2 \cdot \nu}{E} - \text{модуль об'ємного стиску.}$$

Приріст деформацій миттєвої пластичності $d\varepsilon_{ij}^p$ від напруженого стану в конкретному СЕ може бути обчислене за допомогою лінійної залежності скалярної функції Λ і девіаторної складової тензора напружень, а саме [14]:

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\Lambda \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma). \quad (5)$$

Конкретне значення функції Λ залежить від напруженого стану в розглянутій області конструкції, а також від форми поверхні плинності матеріалу, яка характеризується напруженням σ_s :

$$\begin{aligned} d\Lambda &= 0, \text{ якщо } \sigma_i < \sigma_s, \\ d\Lambda &> 0, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_s \text{ неприпустимий.} \end{aligned} \quad (6)$$

Виходячи зі вищенаведеного, прирости тензора деформацій можуть бути представлені у вигляді суперпозиції прирости відповідних складових:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_{ij} &= \Psi \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma) + \delta_{ij} \cdot (K \cdot \sigma + \Delta\varepsilon_T) - \\ &- \frac{1}{2 \cdot G} \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma)^* - (K \cdot \sigma)^*, \end{aligned} \quad (7)$$

де символ «*» відносить відповідну змінну до попереднього кроку простежування, Ψ – функція стану матеріалу, що визначає умову пластичного плину відповідно до критерію Мізеса [15]:

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2 \cdot G}, \\ \text{якщо } \sigma_i &< \sigma_s = \sigma_T, \\ \Psi &> \frac{1}{2 \cdot G}, \text{ якщо } \sigma_i = \sigma_s, \\ \text{стан } \sigma_i &> \sigma_s \text{ неприпустимий.} \end{aligned} \quad (8)$$

Визначення функції Ψ проводиться ітеруванням на кожному кроці чисельного простежування в рамках крайової задачі нестационарної термопластичності, що дозволяє розв'язати нелінійність за пластичним плином матеріалу.

Комп'ютерна реалізація наведених алгоритмів дозволила провести аналіз закономірності формування НДС ПС СУЗ на етапі монтажного зварювання та подальшої експлуатації. Зварювання наконечника з оболонкою (рис. 2) у середовищі аргону відбувається на наступному режимі згідно з [10]: $U = 120$ В; $I = 20$ А; $v_{зв} = 13$ м/год. Зварюван-

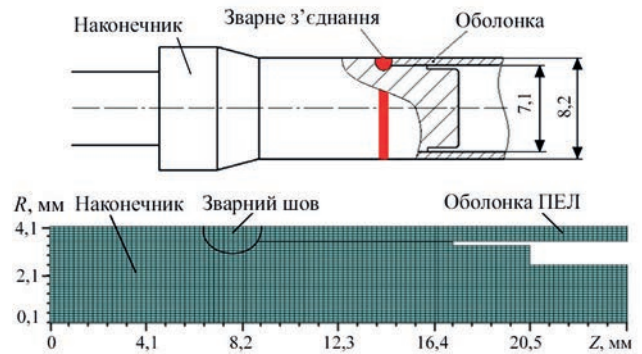


Рис. 2. Ескіз і скінченно-елементна модель зварного з'єднання оболонки ПС СУЗ з наконечником [10]

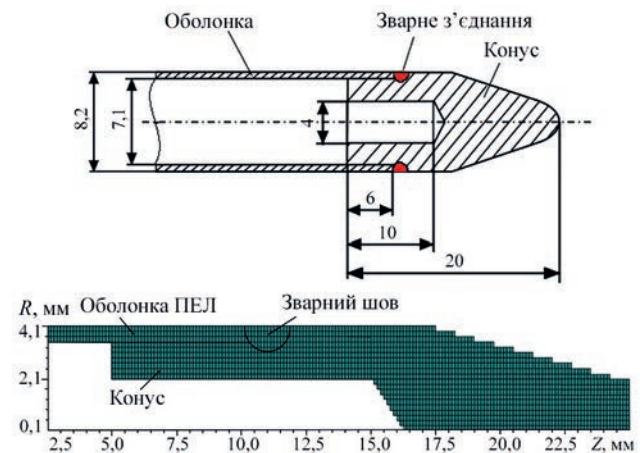


Рис. 3. Ескіз і скінченно-елементна модель зварного з'єднання оболонки ПС СУЗ з конусом [10]

ня зібраного конуса з оболонкою (рис. 3) у середовищі аргону відбувається на наступному режимі: $U = 10$ В; $I = 30$ А; $v_{зв} = 12$ м/год.

Як показали результати розрахунків (рис. 4, а), форма проплавлення в області з'єднання конуса з оболонкою ПС забезпечує належне нероз'ємне з'єднання цих компонентів. Залишкові післязварювальні напруження характеризуються підвищенням нормальних напружень в окружному ($\sigma_{\beta\beta} \approx 590$ МПа) та осьовому ($\sigma_{zz} \approx 540$ МПа) напрямках в області, близької до середини по товщині стінки конуса (рис. 5). Крім того, область розтягувальних напружень розповсюджується аж до внутрішньої поверхні оболонки області з'єднання з конусом. На противагу цьому, зовнішня поверхня характеризується стискаючими нормальними напруженнями. Максимальні значення окружних напружень близькі до значень границі текучості матеріалу у відповідності до критерію пластичності Мізеса. На противагу цьому, радіальна компонента напружень майже в п'ять разів нижча ($\sigma_{rr} \approx 105$ МПа). Така двовісність поля напружень, загалом, є характерною для циліндричних оболонкових елементів, з'єднаних кільцевим зварним швом, а особливості розподілу напружень

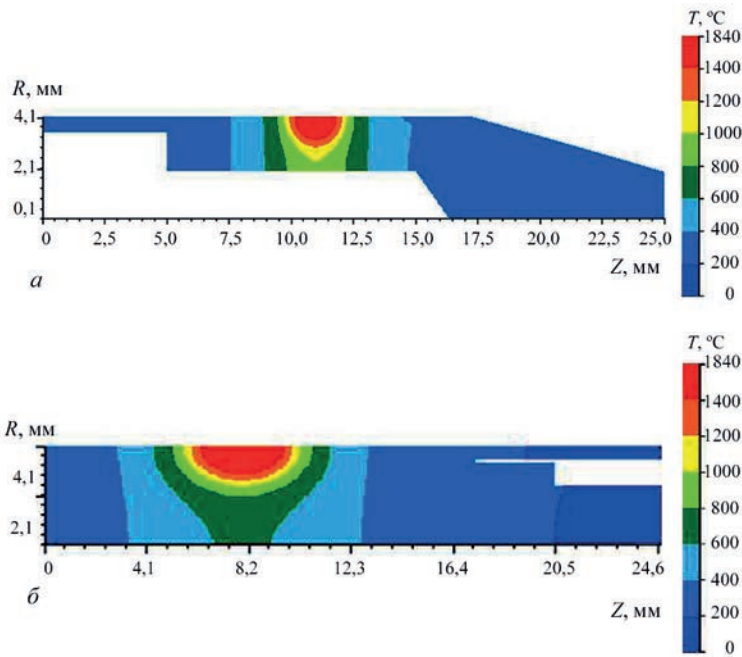


Рис. 4. Розрахунковий розподіл максимальних температур у зоні зварного з'єднання оболонки ПС СУЗ: з конусом (а) і з наконечником (б)

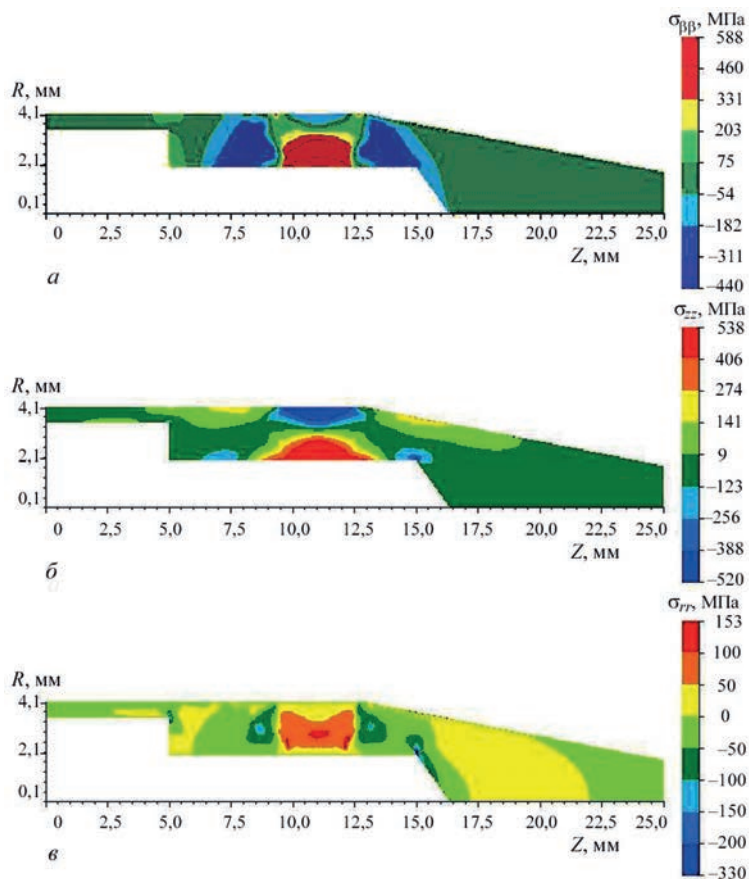


Рис. 5. Розрахункові розподіли залишкових післязварювальних напружень у зоні зварного з'єднання конуса з оболонкою ПС СУЗ: а – окружна компонента, б – осьова компонента, в – радіальна компонента

зумовлені співвідношенням товщини стінки до радіуса циліндра.

В умовах експлуатаційного навантаження за проектним стаціонарним режимом ($T_0 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_{\text{зовн}} = 16 \text{ МПа}$, $P_{\text{внутр}} = 3 \text{ МПа}$) розподіл напружень

принципово не змінюється (рис. 6), проте спостерігається певне зменшення максимальних напружень ($\sigma_{\beta\beta} \approx 500 \text{ МПа}$, $\sigma_{zz} \approx 470 \text{ МПа}$, $\sigma_{rr} \approx 85 \text{ МПа}$), викликане природнім зниженням границі текучості за температури $350 \text{ }^\circ\text{C}$ у порівнянні з кім-

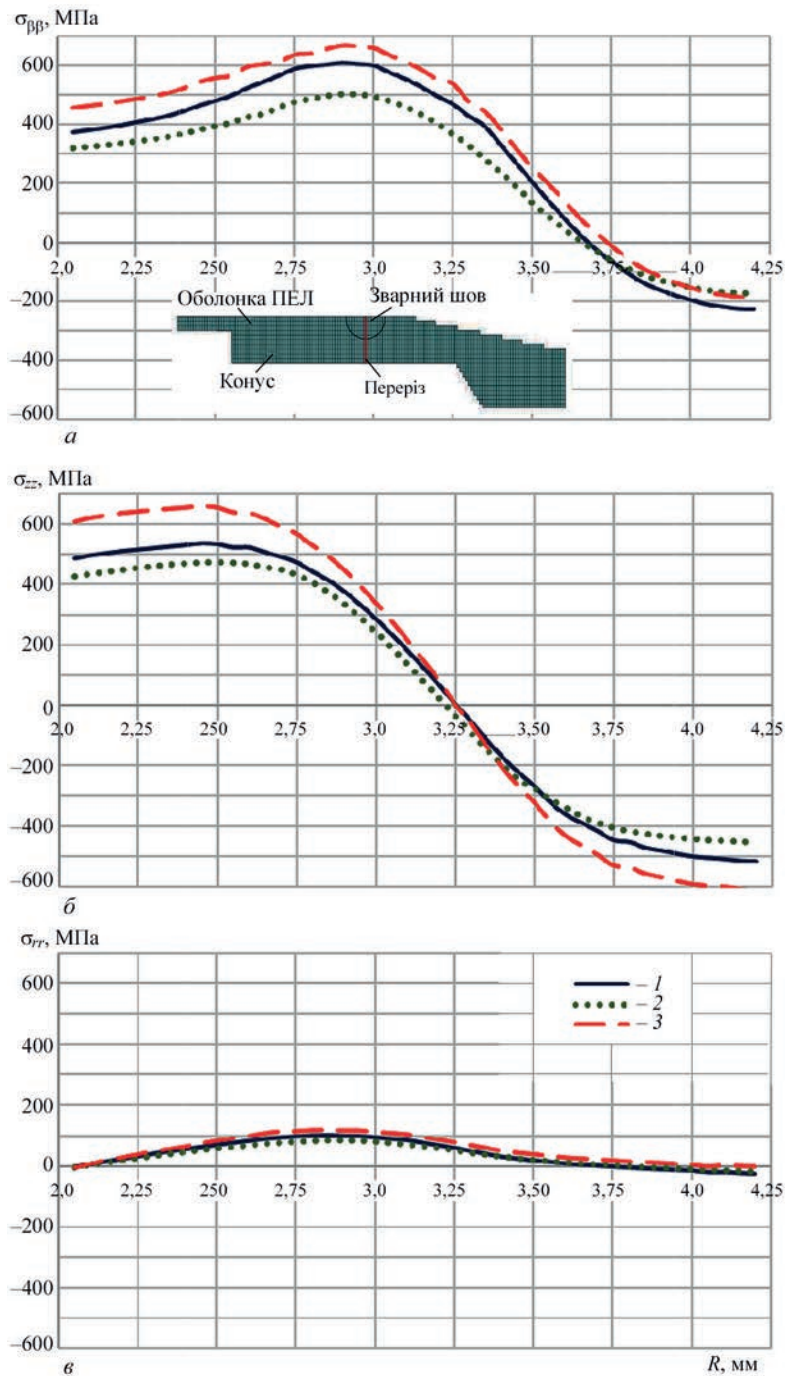


Рис. 6. Розрахункові розподіли залишкових і експлуатаційних напружень у перерізі по товщині зварного з'єднання конуса з оболонкою ПС: окружних (а), осьових (б), радіальних (в): 1 – залишкові напруження; 2 – $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$, $P_{\text{зовн}} = 16\text{ МПа}$; 3 – $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$

натною, за якою проводився процес монтаж-ного зварювання. Експлуатаційна ситуація зупинки роботи реактора, охолодження ПЕЛ СУЗ до кімнатних температур і зниження зовнішнього тиску ($P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$, $P_{\text{зовн}} = 0\text{ МПа}$, $T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), призводить до значного зростання максимальних напружень ($\sigma_{\phi\phi} \approx 670\text{ МПа}$, $\sigma_{zz} \approx 660\text{ МПа}$, $\sigma_{rr} \approx 120\text{ МПа}$) у стінці оболонки (рис. 6) з тієї причини, що внутрішній тиск від наповнювача не компенсується зовнішнім тиском охолоджувача, тому може розглядатись як найбільш несприятлива з точки

зору міцності зварного з'єднання оболонки ПС з конусом.

Розподіл максимальних температур в області з'єднання наконечника з оболонкою показує значне проплавлення, що забезпечує належне нероз'ємне з'єднання окремих частин (рис. 4, б). Принциповою відмінністю розподілу залишкових напружень (рис. 7) є те, що зварне з'єднання знаходиться в суцільній частині ПС СУЗ, тому область високих післязварювальних окружних і осьових напружень формується в підповерхневій зоні, де

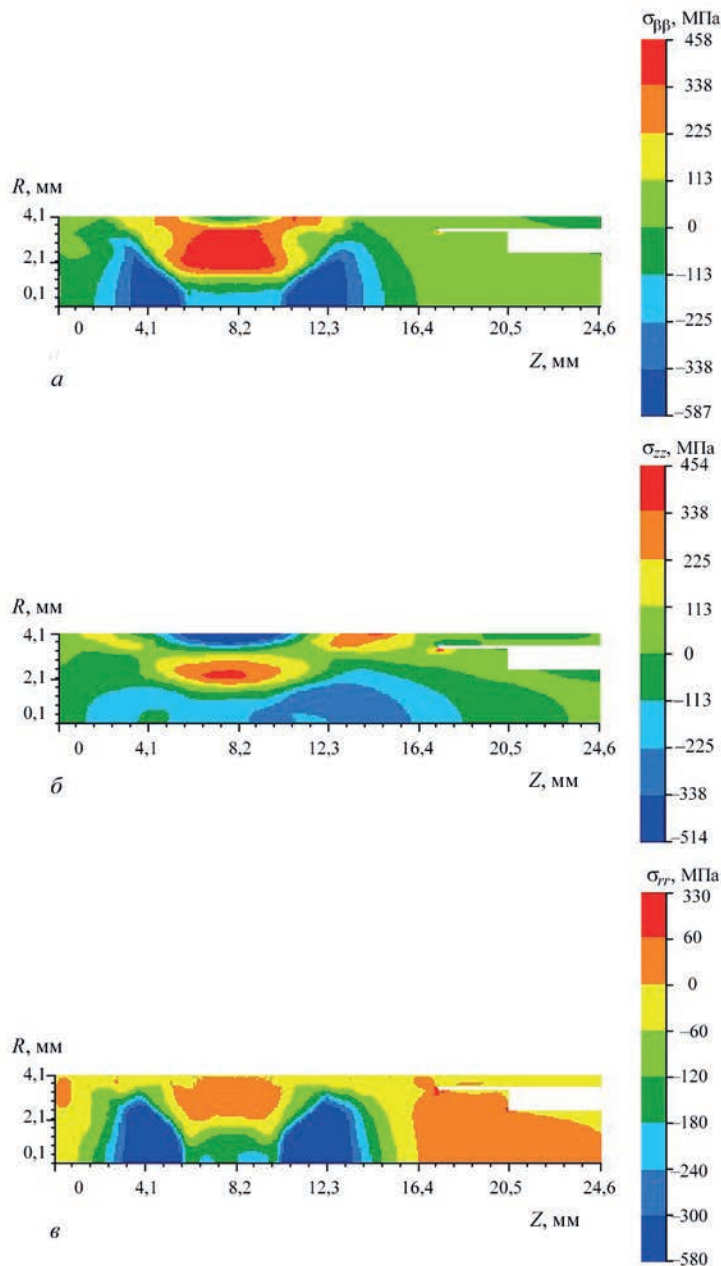


Рис. 7. Розрахункові розподіли залишкових післязварювальних напружень у зоні зварного з'єднання наконечника з оболонкою ПС СУЗ: окружних (а), осьових (б), радіальних (в)

слід очікувати максимального зниження міцності з'єднання. Крім того, у порівнянні зі зварним з'єднанням оболонки з конусом спостерігається нижчий рівень максимальних залишкових напружень ($\sigma_{\phi\phi} \approx 460$ МПа, $\sigma_{zz} \approx 350$ МПа, $\sigma_{rr} \approx 35$ МПа).

Як і для випадку області з'єднання конуса з оболонкою, за умов проєктної експлуатації в області з'єднання наконечника з оболонкою спостерігається певне зниження напружень ($\sigma_{\phi\phi} \approx 420$ МПа, $\sigma_{zz} \approx 300$ МПа, $\sigma_{rr} \approx 10$ МПа) (рис. 8), тоді як найнебезпечніший напружений стан формуються під час зупинки роботи реактора (рис. 8), коли немає компенсуючих стискаючих зусиль від зовнішнього тиску, а перерозподіл напружень при зростанні границі текучості в результаті зниження темпера-

тури з 350 °С до кімнатної викликає збільшення нормальних напружень більше ніж на 100 МПа ($\sigma_{\phi\phi} \approx 530$ МПа, $\sigma_{zz} \approx 410$ МПа, $\sigma_{rr} \approx 30$ МПа).

Висновки

1. Розроблено модель кінетики температурного поля та напружено-деформованого стану ПС СУЗ ВВЕР-1000 при монтажному зварюванні конуса з оболонкою ПС і наконечника з оболонкою ПС. Для цього використано чисельне розв'язання нестационарного рівняння теплопровідності поряд із послідовним простежуванням розвитку пружно-пластичних деформацій суцільного середовища шляхом скінченно-елементного розв'язання крайової задачі нестационарної термопластичності.

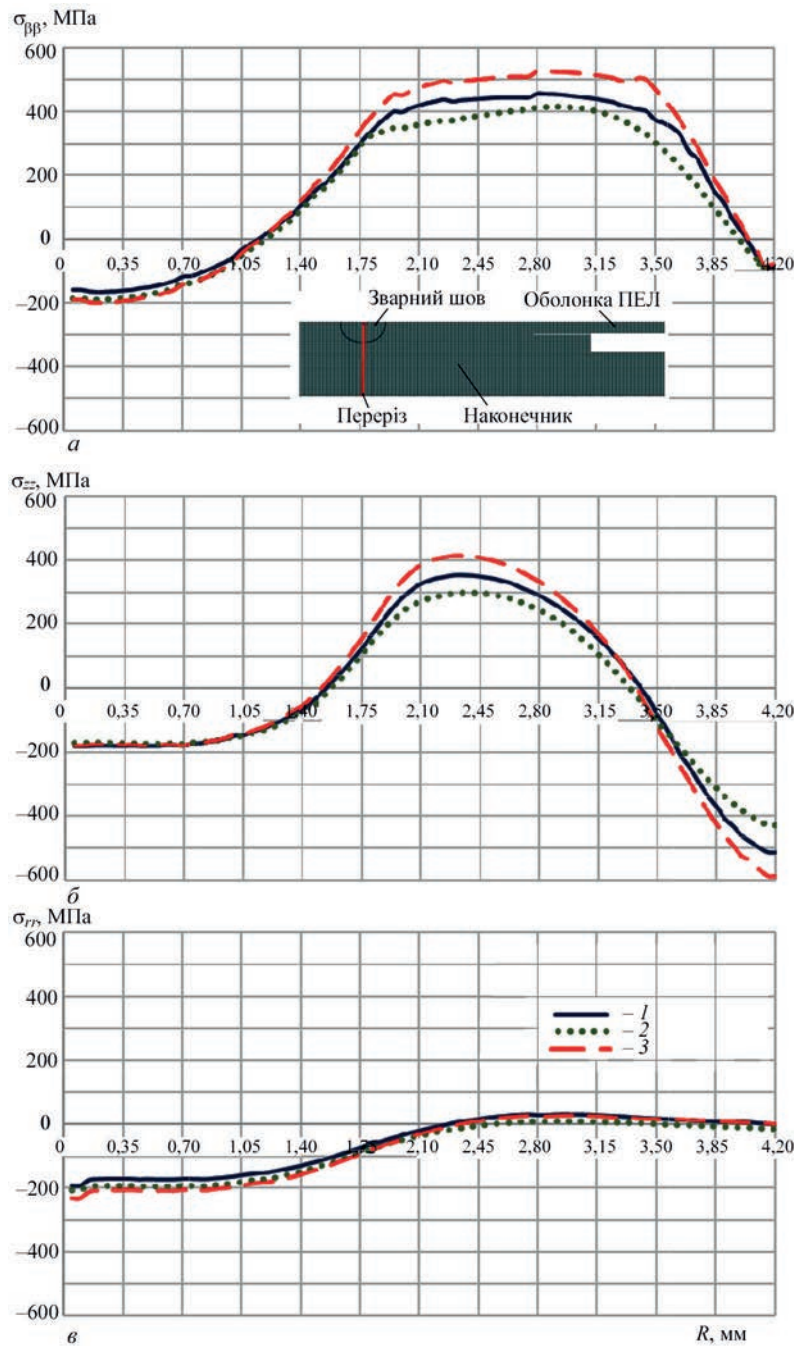


Рис. 8. Розрахункові розподіли залишкових і експлуатаційних напружень у перерізі по товщині зварного з’єднання наконечника з оболонкою ПС: окружних (а), осьових (б), радіальних (в): 1 – залишкові напруження; 2 – $T = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$, $P_{\text{зовн}} = 16\text{ МПа}$; 3 – $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{внутр}} = 3\text{ МПа}$

2. Показано, що розвиток термодетформованого стану конструкції ПС СУЗ у процесі зварювання конуса з оболонкою призводить до формування двовісного НДС, характерного для зварювання товстостінних труб, зі значним превалюванням окружних і повздовжніх напружень. У зоні з’єднання наконечника з оболонкою ПС СУЗ зварний шов розташований у суцільній частині конструкції, що зумовлює формування підповерхневої області інтенсивних післязварювальних окружних і осьових напружень. При цьому максимальні радіальні напруження зростають до рівня інших компонентів

тензора напружень. У результаті ця ділянка конструкції перебуває в стані тривісного напруження.

3. Під час експлуатації загальна картина розподілу напружень зберігається, але відбувається зниження їхніх максимальних значень. Це явище пов’язане з тим, що при робочій температурі $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ границя текучості матеріалу зменшується порівняно з її значенням за кімнатної температури, за якої здійснювалося монтажне зварювання. Внаслідок цього матеріал стає більш податливим до пластичних деформацій, що сприяє частковому перерозподілу напружень.

4. Під час зупинки реактора та його охолодження до кімнатної температури відбувається суттєве зниження зовнішнього тиску. Оскільки внутрішній тиск наповнювача більше не врівноважується тиском охолоджувача, це спричиняє різке зростання максимальних напружень у стінці оболонки ПС СУЗ. Така ситуація створює найнесприятливіші умови для міцності зварних з'єднань оболонки, підвищуючи ризик розвитку дефектів і зниження експлуатаційної надійності конструкції.

Список літератури/References

- Misak, J. (2024) History, specific design features, and evolution of WWER reactors. *Nuclear Power Reactor Designs: From History to Advances*, **2024**, 57–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99880-2.00004-7>
- Pyrohov, T., Korolev, A., Inyushev, V., Kurov, V. (2020) Analysis of accidents of the WWER-1000 reactor in which emergency cooling heat exchangers operate. *Technology Audit and Production Reserves*, **5(55)**, 43–47. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.213227>
- (2013) *Guidelines for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER nuclear power plants (VERLIFE)*. Vienna, Int. At. Energy Agency.
- ПНАЭ Г-7-002-86. *Норми розрахунку на міцність обладнання та трубопроводів атомних енергетичних установок*. PNAE G-7-002-86. *Standards for strength calculation of equipment and pipelines of nuclear power installations* [in Ukrainian].
- API 579-1/ASME FFS-1. Fitness-For-Service (2016) Washington: American Petroleum Institute, American Society of Mechanical Engineers.
- Lemaitre, J., Desmorat, R. (2005) *Engineering damage mechanics. Ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Berlin, Springer-Verlag.
- Amsterdam, E., Grooteman, F. (2016) The influence of stress state on the exponent in the power law equation of fatigue crack growth. *Int. J. Fatigue*, **82(3)**, 572–578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2015.09.013>
- Dormieux, L., Kondo, D. (2016) *Micromechanics of fracture and damage*. Vol. 1. London: ISTE Ltd.
- (1967) *Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике. Справочник*. Под ред. Неймарк Б.Е. Москва, Энергия.
(1967) *Physical properties of steels and alloys used in power engineering: Refer. book*. Ed. by B.E. Neimark. Moscow, Energiya [in Russian].
- Куштим А.В., Зігунов В.В. Грицина В.М. та ін. (2023) Характеристики зварних з'єднань поглинаючих елементів зі сплаву 42ХНМ для стрижнів системи управління та захисту ВВЕР-1000. *Ядерна та радіаційна безпека*, **4(100)**, 38–48. DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4\(100\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4(100).04)
Kushtym, A.V., Zihunov, V.V., Hrytsyna, V.M., et al. (2023) Characteristics of welded joints of absorbing elements from 42KhNM alloy for control and protection system rods of WWER-1000. *Yaderna ta radiatsiina bezpeka*, **4(100)**, 38–48 DOI: [https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4\(100\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2023.4(100).04) [in Ukrainian].
- Risovani, V.D., Zakharov, A.Z., Muraleva, E.M., Kosenkov, V.M., Latypov, R.N. (2019) Dysprosium hafnate as absorbing material for control rods. *J. of Nuclear Materials*, **355(1–3)**, 163–170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2006.05.029>
- Karkhin, V.A. (2019) *Thermal processes in welding*. Singapore, Springer Singapore.
- Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Rozyuka, G.F. et al. (2019) Prediction of susceptibility of welded joints of titan γ -aluminide based alloy to cold cracking in electron-beam welding. *Tekhnologicheskie Sistemy*, **3**, 73-80. DOI: <https://dx.doi.org/10.29010/88.9>
- Velikoivanenko, E.A., Milenin, A.S., Popov, A.V., Sidoruk, V.A., Khimich, A.N. (2019) Methods of numerical forecasting of the working performance of welded structures on computers of hybrid architecture. *Cybernetics and Systems Analysis*, **55(1)**, 117–127. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10559-019-00117-8>
- Махненко В.І. (2006) *Ресурс безопасной эксплуатации сварных соединений и узлов современных конструкций*. Киев, Наукова думка.
Makhnenko, V.I. (2006) *Safe operation resource of welded joints and assemblies of modern structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

FEATURES OF THE STRESS STATE OF WELDED ABSORBER RODS IN THE CONTROL AND PROTECTION SYSTEM OF WWER-1000 DURING ASSEMBLY AND SUBSEQUENT OPERATION

O.S. Milenin, O.A. Velykoivanenko, G.P. Rozyuka, O.O. Makhnenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.
E-mail: asmilenin@ukr.net

The rod control cluster assemblies with absorber rods (AR) plays a key role in the stable and safe operation of WWER-1000 reactor, ensuring power regulation and emergency shutdown. The reliability of AR directly depends on the integrity of the AR shell components, which are subjected to both welding stresses during assembly and to operational loads. A critical reliability factor for such structures is the stress-strain state at various stages of assembly and operation. This study focuses on the analysis of the stress-strain state in the AR shell components caused by the technological phase of installation welding and operational loading. Numerical modelling of thermo-mechanical processes shows that the geometric characteristics of the structure fundamentally affect the stress distribution: a biaxial stressed state forms in the area where the cone is welded to the AR shell, and a triaxial stressed state develops in the zone where the tip is joined to the shell. It is shown that during reactor emergency shutdown and cooling to room temperature, there is a significant drop in the external coolant pressure and a sharp increase in the maximum stresses within the AR shell wall, indicating an increased risk of integrity loss. 15 Ref., 1 Tabl., 8 Fig.

Keywords: nuclear reactor; WWER-1000, rod control cluster assemblies, absorber rods, welded shells, stressed state, modelling

Отримано 10.06.25

Отримано у переглянутому вигляді 24.07.25

Прийнято 29.08.25