

УДК 539.3

С. Банько

Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ВУЗЛА З'ЄДНАННЯ КОЛЕКТОРА З КОРПУСОМ ПАРОГЕНЕРАТОРА ПГВ-1000М З КАВЕРНОЮ

Резюме. Представлено розрахунковий аналіз пружно-пластичного напруженого стану вузла з'єднання «гарячого» колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М з дефектом у вигляді плоскої напівеліптичної каверни, розташованої на внутрішній поверхні патрубку вузла з'єднання в області галтельного переходу. Проведено оцінювання впливу геометричних параметрів каверни на напружений стан в околиці її вершини при моделюванні повторно статичних експлуатаційних навантажень парогенератора.

Ключові слова: пружно-пластичний напружений стан, парогенератор, каверна, повторно статичне навантаження, метод скінчених елементів.

S. Ban'ko

STRESS STATE OF THE HEADER-TO-PGV-1000M STEAM GENERATOR CONNECTOR WELDMENT WITH A CAVITY

Summary. The paper presents a numerical stress-state analysis of the weldment joining the "hot" header to the PGV-1000M steam generator. This weld joint has a defect in the form of a plane semielliptical cavity located on the inner wall of the nozzle, near the fillet. The numerical elastic-plastic analysis is performed using a three-dimensional model and SPACE-RELAX software. The stress state around the cavity is determined using a specially developed procedure to generate a regular finite-element mesh that is locally refined toward the cavity tip. The finite-element model of the steam generator was fragmented using a two-stage procedure involving the solution of the elastic-plastic problem for (i) the main model and (ii) a fragment of the weld joint with the cavity. The plane cavity with ellipsoidal tip located on the weld joint fillet, in the zone of peak tensile axial stresses determined at the first stage, is modeled. The solution is obtained for the following sequence of service loads on the weld joint: hydraulic testing – unloading – normal operation. The effect of the loading history on the stress state near the cavity is assessed by comparing the normal-operation calculations made with and without regard to the loading history. The effect of the geometrical parameters of the cavity on the stress state near its tip is evaluated during the simulation of repeated static service loads on the steam generator. The distribution of the axial and hoop stresses over the cross-section of the cavity that passes through its front and is perpendicular to the header axis is determined. Plots of the distribution of the axial and hoop stresses ahead of the cavity tip are presented.

Key words: elastoplastic stress state, steam generator, cavity, repeated static loading, finite element method.

Постановка проблеми На парогенераторах ПГВ-1000М атомних станцій України в процесі експлуатації виявлено дефекти у вигляді каверн і тріщин корозійного походження, які розташовувались на внутрішній поверхні патрубку вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора в зоні галтельного переходу [1]. У зв'язку з виявленням такого типу дефектів існує необхідність проведення детального аналізу напруженого стану (НС) вузла з'єднання з дефектом в умовах експлуатації з урахуванням пружно-пластичної поведінки матеріалу в околиці каверни. Вирішення зазначеної проблеми передбачає розв'язання задачі в тривимірній постановці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Уперше розрахунки тривимірного НС вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора при дії експлуатаційних

навантажень представлені в роботах [2, 3], в яких показано суттєво неоднорідний характер розподілу напружень на внутрішній поверхні галтельного переходу вздовж колової координати. В публікаціях фахівців ВАТ «Гідропрес» (Росія) [1, 4–5] розрахунки НС вузла з'єднання при дії експлуатаційних навантажень представлені в тривимірній пружній постановці без урахування дефектності в області галтельного переходу. Аналіз тривимірного пружно-пластичного НС вузла з'єднання з дефектом у відомих публікаціях з даної проблеми не представлено.

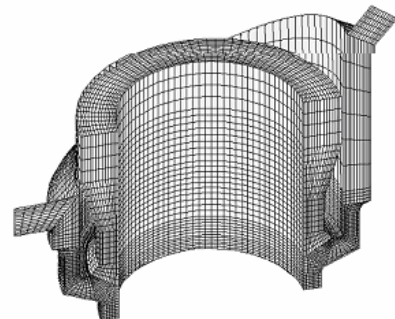
Мета роботи. Провести чисельний аналіз пружно-пластичного НС вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М з дефектом у вигляді плоскої напівеліптичної каверни, розташованої в області галтельного переходу в зоні максимальної концентрації напружень. Дослідити вплив геометричних параметрів каверни та повторно статичних експлуатаційних навантажень на НС вузла з'єднання.

Постановка завдання. Розрахунки НС проводили в пружно-пластичній постановці з використанням тривимірної моделі парогенератора за допомогою програмного комплексу SPACE-RELAX [6]. При розв'язанні задачі використовували рівняння теорії пластичної течії з ізотропним зміцненням [7]. Приймалась модель ідеально пружно-пластичного матеріалу.

Для визначення НС в околиці каверни розроблена спеціальна процедура побудови регулярної сітки скінченних елементів з локальним згущенням її вузлів до вершини каверни. Для всього тіла використовували спеціальні змішані скінченні елементи у формі шестигранних призм, а уздовж фронту каверни – тетраедри [8].

Оцінювання точності результатів розрахунків НС у вершині каверни проводили на основі розв'язання модельної задачі про розтяг пологого циліндра з кільцевою поверхневою каверною малого радіуса, що розташована на внутрішній поверхні циліндра й орієнтована вздовж його радіуса. Оцінювали якісний характер розподілу осьових напружень перед вершиною каверни і відстань від вершини до точки з максимальним рівнем напружень. Проведене порівняння отриманих результатів розрахунків з аналітичним розв'язком [9] показало їх узгодження.

Розрахункова скінченно-елементна модель 1-го контуру АЕС (рис.1), включала корпус парогенератора, «гарячий» колектор, головний циркуляційний трубопровід (ГЦТ) і корпус реактора [10].



б

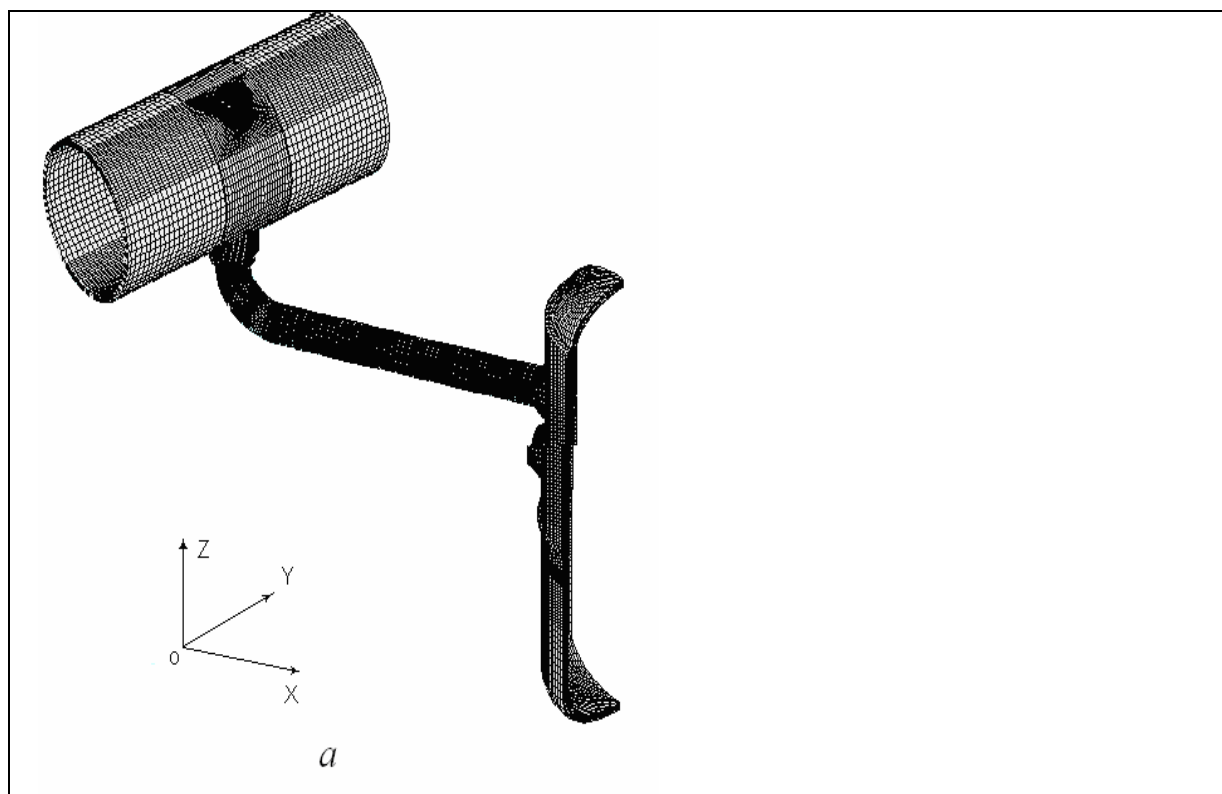


Рисунок 1. Скінченно-елементна модель: *a* – 1-го контуру АЕС; *б* – вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора

Figure 1. Finite-element model of (a) primary circuit and (b) weld joint of hot header to steam generator

При проведенні розрахунків використовували процедуру фрагментації дискретної моделі парогенератора, яка включала два послідовні етапи. На першому етапі розв'язували пружно-пластичну задачу для основної розрахункової моделі (рис. 1), на другому – задачу для фрагмента вузла з'єднання з каверною (рис. 2). Моделивали плоску каверну з еліпсоїдальною вершиною, яка розташована в галтелі вузла в зоні максимальних розтягуючих осьових напружень, визначених на першому етапі розв'язання задачі.

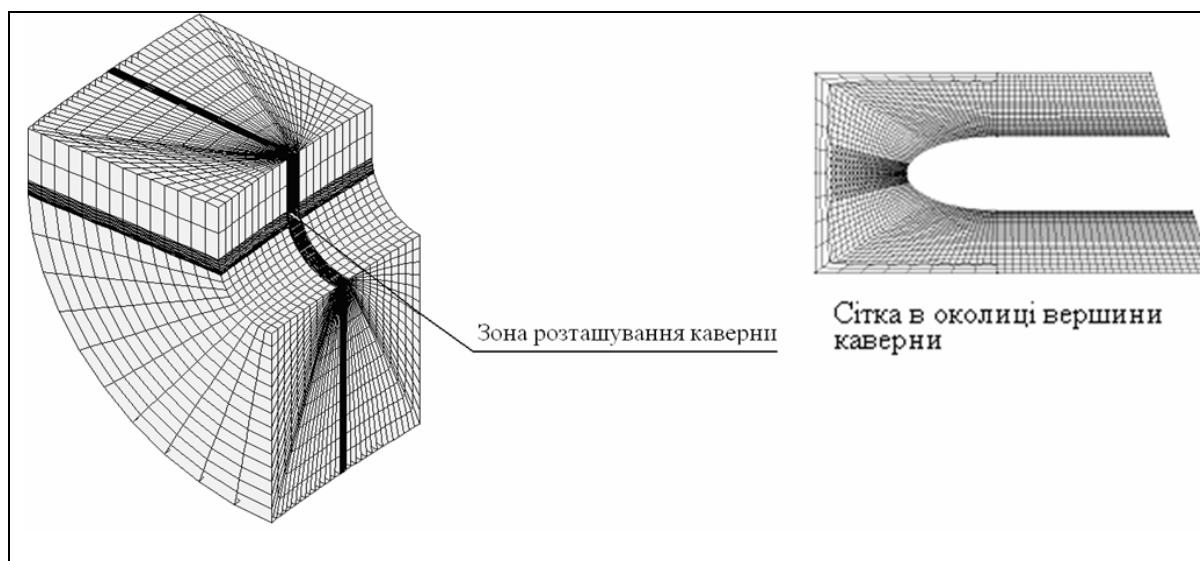


Рисунок 2. Скінченно-елементна модель фрагмента вузла з'єднання з каверною
 Figure 2. Finite-element model of the fragment of weldment with cavity

Геометричні параметри каверни наведено на рис. 3. При проведенні розрахунків приймали: $r=0,25$ мм, $R=0,5$ мм, $a=1,5, 2,0$ і $2,5$ мм, a/b -1/1.

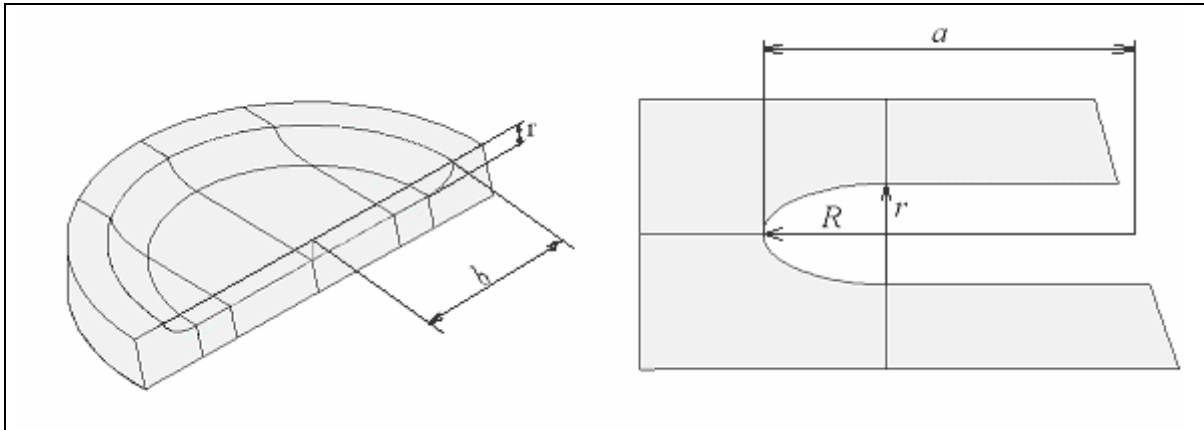


Рисунок 3. Геометрична модель каверни (1/2 частина)
 Figure 3. Geometrical model of half the cavity

Розв'язок отримали для наступної послідовності експлуатаційних навантажень вузла з'єднання: гідравлічні випробовування (ГВ) – розвантаження – нормальні умови експлуатації (НУЕ). При гідравлічних випробовуваннях тиск у першому контурі приймали 24,5 МПа, тиск у другому – 10,78 МПа, при нормальних умовах експлуатації відповідно приймали 16,0 і 6,0 МПа. Для оцінювання впливу історії навантаження на напружений стан в околиці каверни результати розрахунків НС для режиму НУЕ порівнювали з розрахунками без урахування історії навантаження.

Результати досліджень. На рис. 4 для режиму ГВ зображено характер розподілу осьових напружень σ_z у площині, що проходить через вісь колектора і вершину каверни глибиною 2,5 мм. Із представлених даних випливає, що в околиці вершини каверни має місце концентрація напружень. При цьому максимальні розтягуючі осьові напруження 653 МПа досягаються перед каверною на відстані 0,2 мм від її вершини.

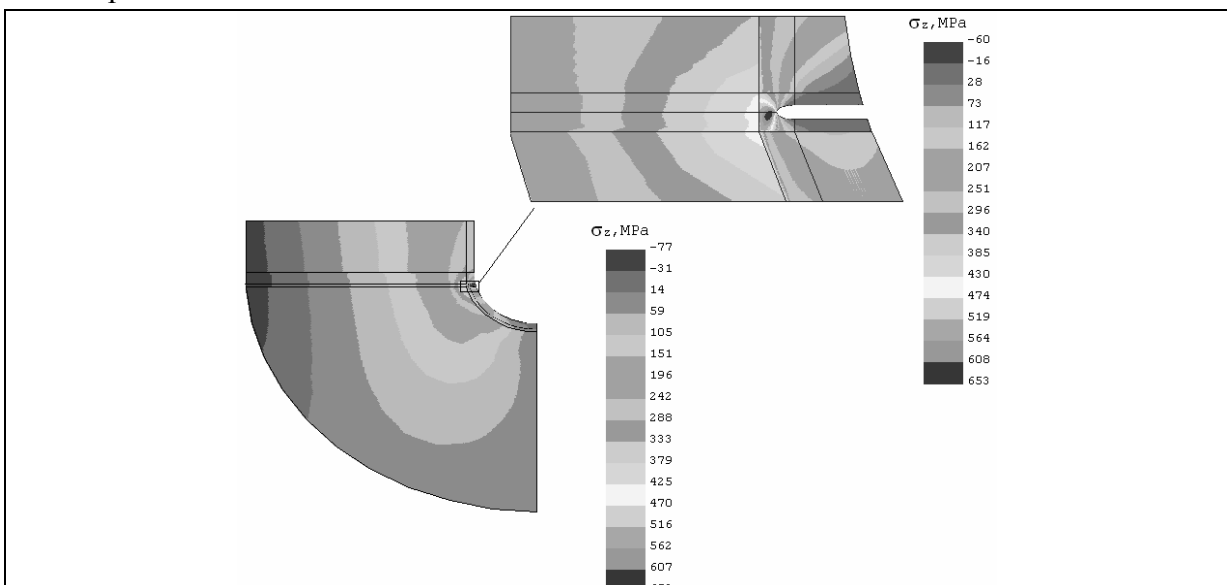


Рисунок 4. Розподіл осьових напружень для каверни глибиною 2,5 мм при ГВ
 Figure 4. Distribution of axial stresses for a 2.5-mm deep cavity during hydraulic testing (HT)

На рис. 5 зображено характер розподілу осьових σ_z і колових σ_φ напружень у перерізі каверни, що проходить через її фронт перпендикулярно до осі колектора. Максимальні розтягуючі осьові напруження перед вершиною каверни досягають 641 МПа, колові – 373 МПа.

Для глибин каверни 1,5 і 2,0 мм максимальні осьові напруження перед вершиною каверни досягають відповідно 626 і 642 МПа, максимальні колові – відповідно 374 і 391 МПа.

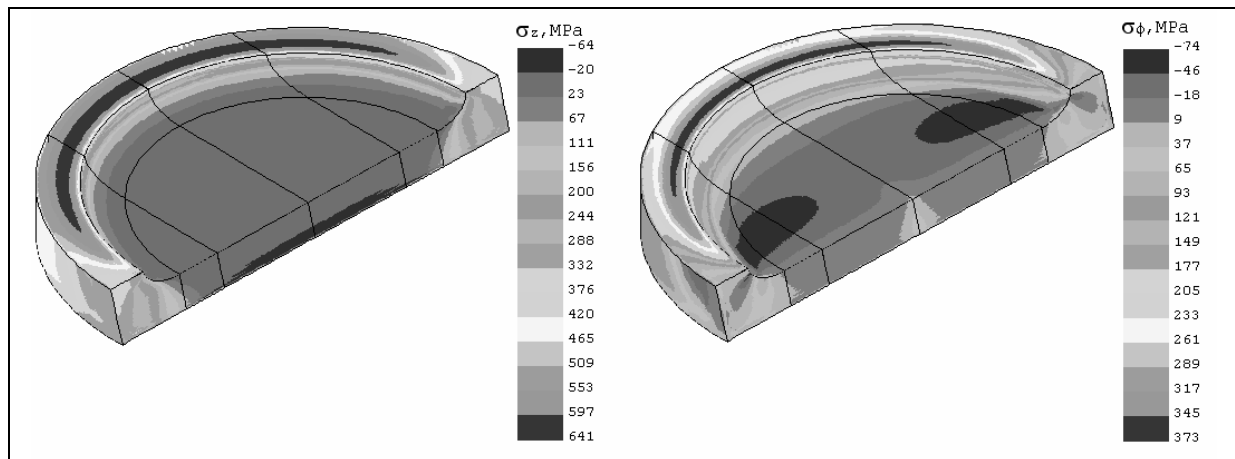


Рисунок 5. Розподіл осьових та колових напружень у перерізі вершини каверни глибиною 2,5 мм при ГВ
 Figure 5. Distribution of axial and hoop stresses over the cross-section of the tip of a 2.5-mm deep cavity during HT

На рис. 6, 7 наведено графіки розподілу осьових та колових напружень для каверни глибиною 2,5 мм на відріжку 0,5 мм (початок відліку у вершині каверни) з урахуванням та без урахування історії навантаження. Із наведених результатів розрахунків випливає, що неврахування при моделюванні експлуатаційних режимів навантаження залишкової напруженості вузла з'єднання призводить до завищених значень осьових і колових напружень перед вершиною каверни, які відповідно складають 546 і 282 МПа. З урахуванням історії навантаження максимальні значення осьових і колових напружень суттєво знижуються і досягають відповідно 409 і 233 МПа.

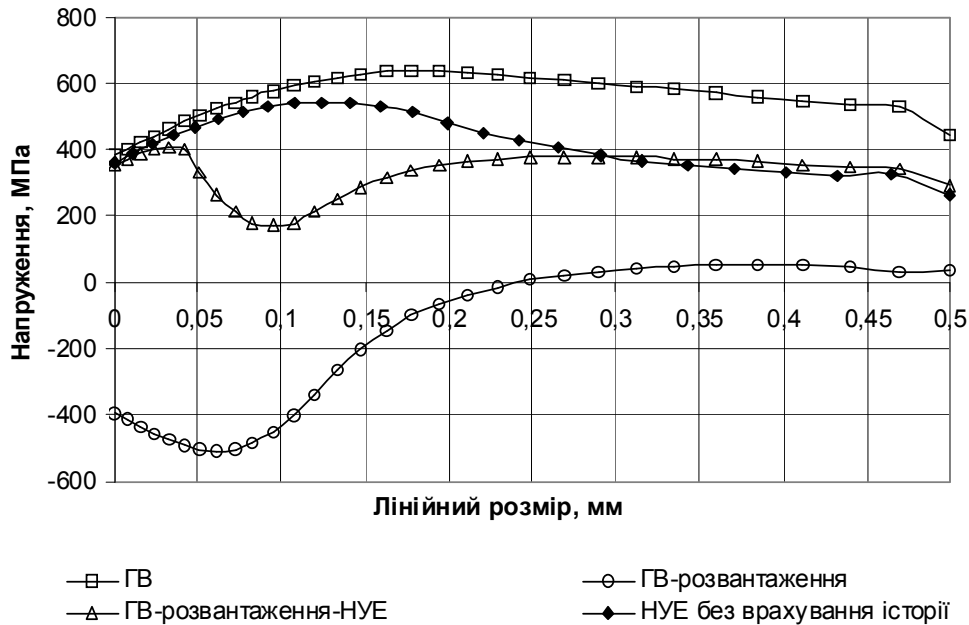


Рисунок 6. Розподіл осевих напружень для каверни глибиною 2,5 мм на відрізьку 0,5 мм для різних варіантів навантаження
 Figure 6. Distribution of axial stresses over a 0.5 mm segment for a 2.5-mm deep cavity and different types of loading

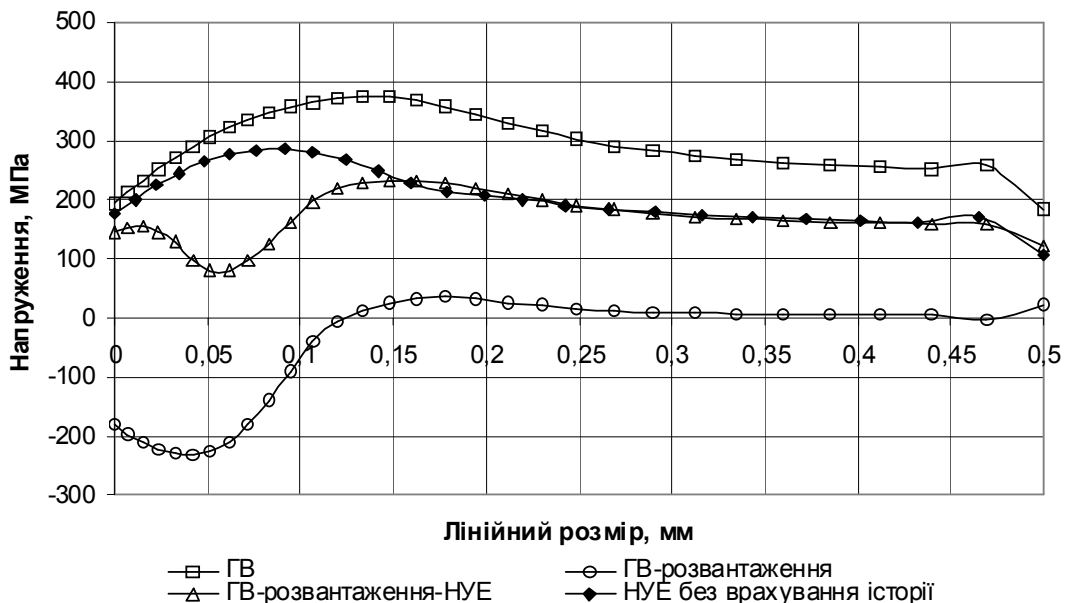


Рисунок 7. Розподіл колових напружень перед вершиною каверни для різних варіантів навантаження глибиною 2,5 мм

Figure 7. Distribution of hoop stresses ahead of the tip of a 2.5-mm deep cavity for different types of loading

Висновки. Проведено розрахунковий аналіз пружно-пластичного напруженого стану вузла з'єднання «гарячого» колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М з дефектом у вигляді плоскої напівеліптичної каверни, розташованої в області галтелі. Розрахунки виконували з урахуванням та без урахування історії навантаження. Виконано оцінювання впливу історії навантаження на напружений стан вузла з'єднання. Показано, що перед вершиною каверни глибиною 2,5 мм максимальних значень досягають осеві напруження, які для режиму гідравлічних випробувань

складають 641 МПа. У режимі нормальних умов експлуатації з урахуванням історії навантаження максимальні осьові напруження перед вершиною каверни знижуються до 409 МПа. Без урахування історії навантаження осьові напруження складають 546 МПа.

Таким чином, неврахування при моделюванні експлуатаційних режимів навантаження залишкової напруженості вузла з'єднання з дефектом у вигляді каверни призводить до завищеної (до 25%) оцінки рівня напружень.

Conclusions. A numerical elastic-plastic stress analysis of the weldment joining the “hot” header to the PGV-1000M steam generator and having a defect in the form of a plane semielliptical cavity near the fillet has been performed. The effect of the loading history on the stress state of the weld joint has been assessed by comparing the calculations made with and without regard to the loading history. It has been shown that the axial stresses ahead of a 2.5-mm deep cavity peak during hydraulic testing, reaching 641 MPa. During normal operation, these stresses are lower: 409 and 546 MPa as calculated with and without regard to the loading history, respectively.

Thus, neglecting the residual stress in the weld joint with a cavity during the simulation of service loading leads to an overestimation (by 25%) of the stresses.

Список використаної літератури

1. Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000, -1000М [Текст] / Ю.Г. Драгунов, О.Ю. Петрова, С.Л. Лякишев и др. // Атомная энергия. – 2008. – Том 104. – №1. – С. 9–13.
2. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения “горячего” коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС [Текст] / Г.В. Степанов, В.В. Харченко, А.И. Бабуцкий и др. // Пробл. прочности. – 2003. – №5. – С. 142–153.
3. Влияние компоновки реакторов ВВЭР «малой» и «большой» серий атомных электростанций на напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку парогенератора [Текст] / Г.В. Степанов, В.В. Харченко, А.И. Бабуцкий и др. // Пробл. прочности. – 2007. – №5. – С. 114–120.
4. Оптимизация конструкции узла приварки коллектора к корпусу парогенератора [Текст] / С.Л. Лякишев, С.А. Харченко, А.В. Кучерявиченков, Н.Ф. Коротаяев // Сб. трудов 7-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам. – 2006. – ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.
5. Разработка и обоснование мероприятий по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации сварных соединений № 111 парогенератора ПГВ-1000М [Текст] / С.Л. Лякишев, Н.Б. Трунов, С.А. Харченко и др. // Труды 6-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – 2009. – ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.
6. Програмне забезпечення «Тривимірне скінченно-елементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій» (SPACE) [Текст] / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. – 2004.
7. Качанов, Л.М. Основы теории пластичности [Текст] / Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
8. Чирков, А.Ю. Построение смешанной аппроксимации МКЭ для решения пространственных задач теории упругости [Текст] / А.Ю. Чирков, С.В. Кобельский, А.А. Звягинцева // Надёжность и долговечность машин и сооружений. – 2008. – Вып. 31. – С. 118–123.
9. Tracey, D. M., Freese, C. E., Plasticity Near a Blunt Flaw Under Remote Tension, Nonlinear Fracture Mechanics: Volume II – Elastic-Plastic Fracture, ASTM STP 995, J. D. Landes, A. Saxena and J. G. Markle, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 93–106.
10. Исследование напряженности корпусов реакторов и парогенераторов АЭС с учетом дефектности и истории термомеханического нагружения [Текст] / В.В. Харченко, Г.В. Степанов, А.Ю. Чирков и др. // Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин. Цільова комплексна програма НАН України “Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та

машин”: Збірник наукових статей за результатами, отриманими в 2007–2009 рр.; наук. керівник академік Б.Є. Патон. – Київ: Ін-т електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, 2009. – С. 251–254.

Отримано 12.07.2012