

## **Визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень у вузлі з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М із дефектом у вигляді каверни з тріщиною**

**С. В. Кобельський, С. М. Банько, В. В. Харченко**

Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, Київ, Україна

*Досліджено коефіцієнти інтенсивності напружень у вузлі з'єднання колектора з корпусом парогенератора з дефектом у вигляді каверни з тріщиною. Проаналізовано вплив історії термосилового навантаження на коефіцієнт інтенсивності напружень у вершині тріщини. Проведено порівняльний аналіз коефіцієнтів інтенсивності напружень для тріщини та каверни з тріщиною.*

**Ключові слова:** пружно-пластичний стан, коефіцієнт інтенсивності напружень, парогенератор, каверна, тріщина.

**Вступ.** На атомних електростанціях України з реакторами ВВЕР-1000 у процесі експлуатації на внутрішній поверхні вузла з'єднання гарячого колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М (далі – вузол з'єднання) виникають пошкодження у вигляді каверн та тріщин, які зумовлені сукупною дією напружень на рівні границі плинності та впливом корозійного середовища. Такі пошкодження локалізовані переважно в зоні галтельного переходу і зварного шва № 111. Багато аспектів питання зародження тріщин поблизу концентратора в корозійних середовищах та оцінки коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) в елементах енергетичного обладнання розглядаються в роботах [1, 2]. Але оскільки на сьогодні проблема усунення пошкоджень на внутрішній поверхні вузла з'єднання не вирішена, особливої уваги при оцінці його цілісності набувають методологічні аспекти розрахункового аналізу, пов'язані з побудовою адекватних розрахункових моделей, врахуванням історії пружно-пластичного деформування, залишкової спадковості та дефектності. Питанню дослідження напруженого стану вузла з'єднання присвячено роботи [3–5], в яких представлено результати розрахунків у пружній постановці без урахування залишкової технологічної спадковості, історії термосилового навантаження та дефектності в зоні зварного шва № 111.

Протягом останніх років в Інституті проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України проводяться роботи щодо удосконалення методики розрахунку напруженого стану елементів обладнання 1-го контуру АЕС, зокрема вузла з'єднання, на основі тривимірних моделей з урахуванням пружно-пластичної поведінки матеріалу, залишкових технологічних напружень та історії термосилового навантаження [6].

У даній роботі наведено нові результати розрахункової оцінки з використанням програмного забезпечення SPACE-RELAX [7] КІН вузла з'єднання з урахуванням дефекту в зоні галтельного переходу у вигляді каверни з тріщиною. Результати розрахунків КІН одержано за допомогою методу еквівалентного об'ємного інтегрування [8].

Результати тестування розрахункової методики при розв'язанні модельних задач про розтяг порожнього циліндра з дефектом у вигляді тріщини, що бере початок із вершини каверни, наведено в роботах [9, 10]. Там же представлено дані з визначення найбільш небезпечної, з точки зору максимальних значень КІН, геометрії дефектів даного типу.

**Методика розрахунку.** Розрахунки напруженого стану вузла з'єднання проводили в пружно-пластичній постановці з використанням тривимірної моделі петлі реакторної установки (РУ). Розрахункова модель РУ (рис. 1,а) складалась з обичайки корпусу парогенератора з патрубками Ду 1200 і Ду 800, “гарячого” і “холодного” колекторів теплоносія, головного циркуляційного трубопроводу, корпусу головного циркуляційного насоса і 1/4 частини обичайки корпусу реактора з патрубками Ду 850.

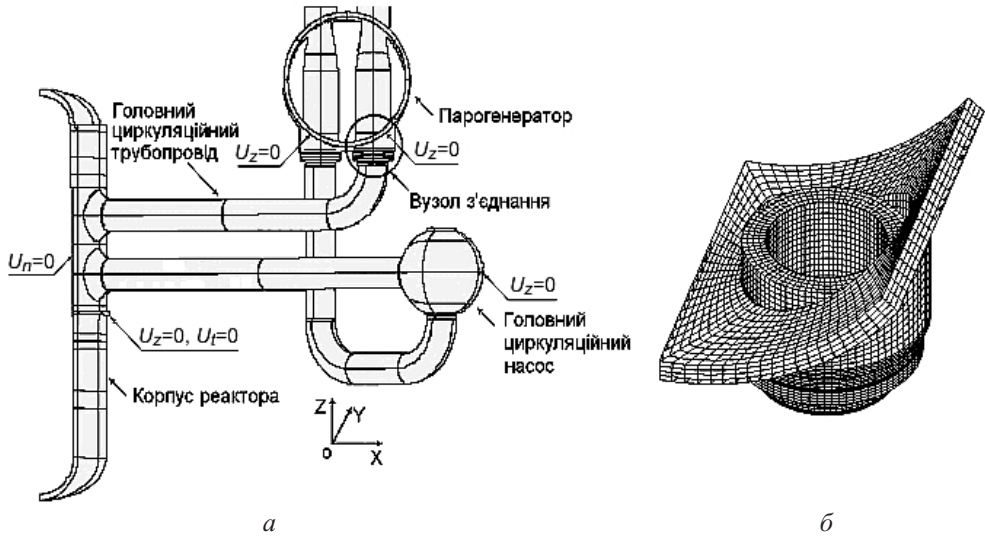


Рис. 1. Розрахункова модель петлі РУ (а) і вузла з'єднання (б):  $U_n$  – нормальні до поверхні переміщення;  $U_z$  – осьові переміщення;  $U_t$  – переміщення в коловому напрямку.

Методика розрахунку КІН вузла з'єднання (рис. 1,б) включала два етапи. На першому етапі визначали пружно-пластичний напружено-деформований стан для скінченноелементної моделі петлі РУ під дією експлуатаційних навантажень з урахуванням залишкових технологічних напружень у зоні зварного шва № 111. На другому етапі розраховували КІН для моделі фрагменту вузла з'єднання з прямим включенням постульованого дефекту в зону максимальних розтягуючих осьових напружень, визначених на першому етапі (рис. 2). Переміщення, отримані в результаті пружно-пластичного розрахунку моделі петлі РУ, приймали за граничні умови для фрагменту вузла з'єднання з вбудованим дефектом.

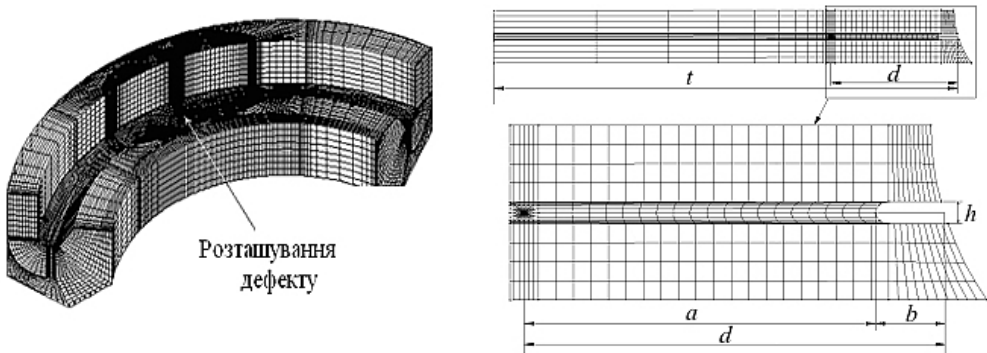


Рис. 2. Скінченноелементна модель фрагменту вузла з'єднання з дефектом у верхіні каверни.

При розрахунках напружено-деформованого стану враховувалась залежність фізико-механічних властивостей металу елементів петлі РУ від температури. Моделювали наступний цикл експлуатаційного навантаження: гідравлічні випробування (ГВ) – розвантаження – нормальні умови експлуатації (НУЕ). За початковий стан приймали поля залишкових напружень і деформацій, отриманих у результаті розрахункового моделювання технологічних операцій зварювання та термообробки (ТО). Для режиму ГВ тиск у першому контурі приймали рівним 24,5 МПа, у другому – 10,78 МПа, для режиму НУЕ – 16,0 і 6,0 МПа відповідно.

Одержаний розподіл залишкових та експлуатаційних напружень вздовж кутової координати по лінії переходу галтели у внутрішню поверхню циліндричної частини патрубку Ду-1200 на відстані 20 мм від дна “кишені”, а також на внутрішній стінці патрубку по висоті від дна “кишені” приведено раніше [6].

Моделювали дефект у вигляді каверни з напівеліптичною тріщиною у вершині, розташований в зоні галтельного переходу й орієнтований вздовж колової координати. Товщина  $t$  стінки патрубка в зоні розташування дефекту складала 73,14 мм. Приймали наступні параметри каверни і тріщини: висота каверни  $h = 1,25$  мм; глибина каверни  $b = 3,25$  мм; глибина каверни з тріщиною  $d = 18$  мм; глибина тріщини  $a = 14,75$  мм; відношення півосей тріщини  $a/c = 1/3$ . Довжина каверни вздовж колової координати значно перевищує велику піввісь тріщини.

**Результати розрахунків.** Розподіл КІН вздовж фронту тріщини для циклу експлуатаційного навантаження ілюструє рис. 3. Для оцінки впливу врахування залишкових напружень у зоні зварного шва № 111 та історії термосилового навантаження на розрахункові значення КІН проводили додаткові розрахунки при одноразовому навантаженні для режиму НУЕ.

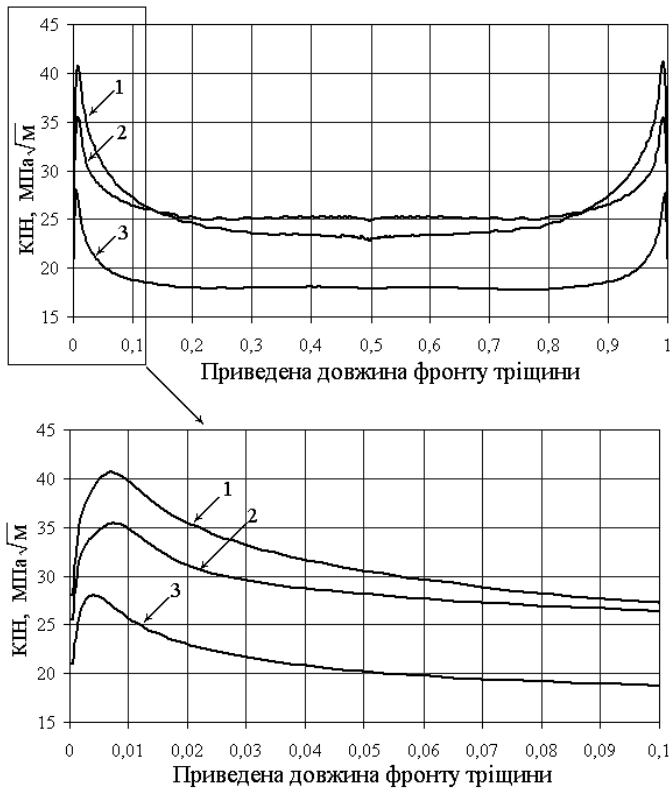


Рис. 3. Розподіл КІН вздовж фронту тріщини: 1 – НУЕ після ТО і ГВ; 2 – НУЕ після ГВ; 3 – НУЕ при одноразовому навантаженні.

Аналіз результатів розрахунків показує, що для циклу навантаження, в якому враховуються залишкові напруження, максимальні значення КІН сягають  $40,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . Неврахування залишкових напружень від ТО зумовлює зниження максимальних значень КІН до  $35,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ . При одноразовому навантаженні КІН дорівнюють  $28 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , що на 47% нижче КІН для циклу навантаження з врахуванням залишкових напружень після ТО.

Таким чином, неврахування залишкових напружень у циклі навантаження зумовлює суттєве зниження максимальних значень КІН і, як наслідок, неконсервативну оцінку опору руйнуванню вузла з'єднання.

Проведено порівняльний аналіз розрахункових значень КІН для каверни з тріщиною та тріщини. Приймали, що глибини дефектів однакові і складають 18 мм при співвідношенні півосей для тріщин  $a/c = 1/3$ . При цьому глибина тріщини у вершині каверни становить 14,75 мм. Розподіл КІН вздовж фронту тріщини для режиму НУЕ показано на рис. 4.

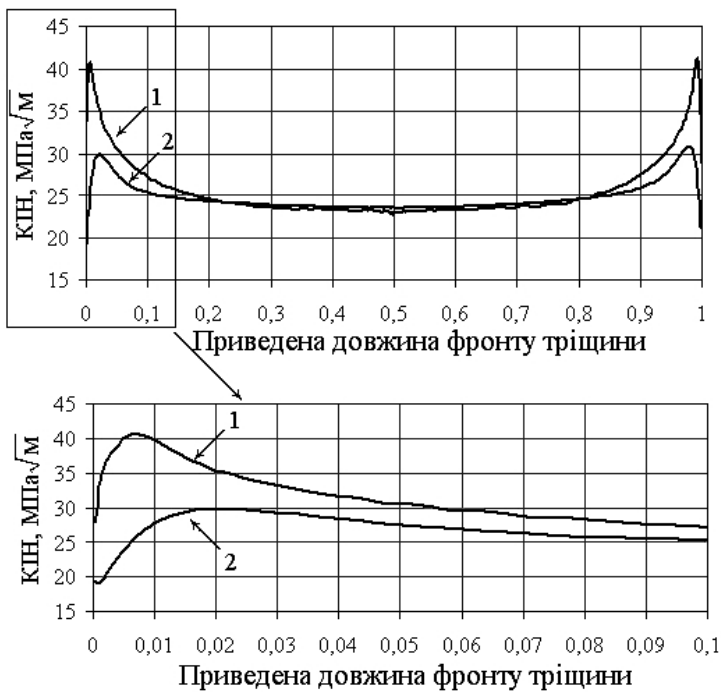


Рис. 4. Розподіл КІН вздовж фронту тріщини для каверни з тріщиною (1) та тріщини (2).

Видно, що для тріщини максимальні значення КІН становлять  $30 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , для каверни з тріщиною вони зростають на 30% і дорівнюють  $40,5 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , тобто за однакової глибини дефект у вигляді каверни з тріщиною є більш небезпечним.

Характер розподілу КІН вздовж фронту тріщини, за якого максимальні значення мають місце поблизу поверхні каверни, сприяє розповсюдженню тріщини в коловому напрямку.

## Висновки

1. При моделюванні експлуатаційного циклу навантаження визначено КІН вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора з дефектом у вигляді каверни з тріщиною у вершині.

2. Проаналізовано вплив залишкових напружень та історії термосилового навантаження на розрахункові значення КІН у вершині тріщини.

3. Показано, що неврахування залишкових напружень у циклі навантаження зумовлює зниження максимальних значень КІН на 47% і, як наслідок, неконсервативну оцінку опору руйнуванню вузла з'єднання.

4. На основі порівняльного аналізу розрахункових значень КІН для дефектів у зоні галтельного переходу вузла з'єднання у вигляді каверни з тріщиною і тріщини встановлено, що за однакової глибини дефектів максимальні КІН для каверни з тріщиною перевищують КІН для тріщини на 30%.

5. Характер розподілу КІН вздовж фронту тріщини сприяє розповсюдженню її у коловому напрямку.

## Резюме

Исследовано коефіцієнти інтенсивності напружень в узле соединения коллектора с корпусом парогенератора с дефектом в виде каверны с трещиной. Проанализировано влияние истории термосилового нагружения на коэффициент интенсивности напружений в вершине трещины. Проведен сравнительный анализ коэффициентов интенсивности напружений для трещины и каверны с трещиной.

1. *Дмитрах І. М., Вайнман А. Б., Стацук М. Г., Тот Л.* Механіка руйнування і міцність матеріалів / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування. – Київ: ВД “Академперіодика”, 2005. – 378 с.
2. *Гетман А. Ф.* Ресурс эксплуатации сосудов и трубопроводов АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 427 с.
3. *Драгунов Ю. Г., Петрова О. Ю., Лякишев С. Л. и др.* Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000, -1000М // Атом. энергия. – 2008. – **104**, № 1. – С. 9–13.
4. *Лякишев С. Л., Трунов Н. Б., Харченко С. А. и др.* Разработка и обоснование мероприятий по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации сварных соединений № 111 парогенератора ПГВ-1000М // VI Междунар. науч.-техн. конф. “Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР”. – Подольск: ФГУП ОКБ “Гидропресс”, 2009.
5. *Трунов Н. Б., Харченко С. А., Коротаев Н. Ф., Лякишев С. Л.* Результаты работ по исследованию причин повреждения металла в районе сварного шва приварки коллектора первого контура к корпусу парогенератора и разработка компенсирующих мероприятий // Материалы VIII Междунар. семинара по горизонтальным парогенераторам. – Подольск: ФГУП ОКБ “Гидропресс”, 2010.
6. *Чирков А. Ю., Харченко В. В., Кобельский С. В. и др.* Напряженное состояние узла приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора ПГВ-1000М при воздействии эксплуатационных нагрузок с учетом остаточных технологических напружений // Пробл. прочности. – 2013. – № 4. – С. 98–106.
7. *Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій” (SPACE) / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. – 2004.*
8. *Вычислительные методы в механике разрушения / Под ред. С. Атлури. – М.: Мир, 1990. – 392 с.*

9. Банько С. М., Кобельський С. В., Харченко В. В. Чисельне моделювання напруженого стану полого циліндра з дефектом у вигляді каверни з тріщиною // *Опір матеріалів і теорія споруд*. – 2014. – Вип. 92. – С. 157–169.
10. Харченко В. В., Банько С. М., Кобельський С. В. Чисельний розв'язок задачі про опір руйнуванню полого циліндра з дефектом у вигляді каверни з тріщиною в пружно-пластичній постановці // *Там же*. – 2014. – Вип. 93. – С. 137–150.

Поступила 23. 03. 2015