

УДК 539.4

В.В. Харченко¹, чл.-кор. НАН УкраїниС.М. Банько¹,С.В. Кобельский¹,В.І. Кравченко¹

¹Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка НАН України
Тимирязєвська вул., 2, м. Київ, Україна. 01014

ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗВ'ЯЗОК ЗАДАЧІ ПРО ОПІР РУЙНУВАННЮ ПОЛОГО ЦИЛІНДРА З ДЕФЕКТОМ У ВИГЛЯДІ КАВЕРНИ З ТРІЩИНОЮ В ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНІЙ ПОСТАНОВЦІ

Представлено результати розрахунків в пружно-пластичній постановці опору руйнуванню полого циліндра з дефектом у вигляді тріщини, яка знаходиться в вершині каверни. Одержані дані порівнювали з результатами розв'язку в пружній постановці задачі про розтяг полого циліндра з дефектом у вигляді тріщини, яка знаходиться в вершині каверни, а також з результатами розв'язку для циліндра з тріщиною.

Ключові слова: каверна, тріщина, напружений стан, коефіцієнт інтенсивності напружень, метод скінченних елементів.

Вступ. Проблема дослідження напруженого стану вузла з'єднання колектора з корпусом парогенераторів ПГВ-1000М енергоблоків АЕС з реактором ВВЕР-1000 в умовах експлуатації є актуальною, оскільки в межах проектного строку служби виявляються пошкодження вузлів з'єднання [1-5].

В роботах [6-8] проведено результати розрахунків щодо впливу геометричних параметрів дефекту у вигляді каверни в зоні галтельного переходу вузла з'єднання колектора до корпусу парогенераторів ПГВ-1000М на його напружено-деформований стан. Дані щодо оцінки напруженого стану і опору руйнуванню вузла з'єднання з тріщиною в зоні галтельного переходу при дії експлуатаційних навантажень представлений у [9].

В даній роботі в пружно-пластичній постановці розглядається модельна задача про опір руйнуванню полого циліндра з дефектом у вигляді каверни з тріщиною, що бере початок в її вершині. Результати розрахунків порівнювали з розв'язком даної задачі в пружній постановці [10], а також з даними розв'язку про розтяг циліндра з тріщиною [11].

Мета роботи. Дослідити вплив геометричних параметрів каверни і тріщини на розрахункові значення коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН).

Постановка задачі. Розглядали задачу про розтяг полого циліндра (рис. 1) із зовнішнім діаметром $D_1=2,2$ м, внутрішнім діаметром $D_2=2$ м,

висотою $2H=2\text{ м}$ з внутрішньою і зовнішньою крайовою кільцевою каверною з тріщиною, що знаходиться в її вершині [10].

На торцях циліндра задавали рівномірно розподілене навантаження інтенсивністю $q=100\text{ МПа}$. Зважаючи на симетрію задачі, розглядали сектор з кутом $\pi/40$. Коефіцієнт Пуассона задавали $\nu=0,3$. Матеріал ідеально пружно-пластичний, границя текучості $\sigma_T=500\text{ МПа}$.

Розрахунки проводили на основі методу скінченних елементів з застосуванням програмного комплексу SPACE-RELAX [12] Використовували просторові змішані скінченні елементи (спеціальні кубічні елементи) ЗСЕ-1, побудовані

на основі шестигранної восьмивузлової призми з полілінійним заповненням переміщень і апроксимацією напружень і деформацій за допомогою інтерполяційних функцій, визначених щодо вершин і центру призми [13]. Крім того, використовували спеціальні тетраедричні елементи (ЗТЕ-1) з апроксимацією напружень і деформацій, побудованих за допомогою інтерполяційних функцій, визначених відносно вершин і центру тетраедра [14]. При спільному використанні елементів ЗСЕ-1 та ЗТЕ-1 досягається збіжність результатів по напруженням, розкриттям і КІН при зменшенні кроку сітки. На тетраедри розбиваються лише елементи, що примикають до фронту тріщини. Розмір елемента у вершині тріщини – $700\text{ мкм}\times 25\text{ мкм}\times 25\text{ мкм}$. Величина параметру c сітки скінченних елементів, що розповсюджується вздовж фронту тріщини, для всіх варіантів становила $1/20$ товщини t стінки циліндра, величину параметра δ сітки приймали $2/3 c$. Розрахунки проводили для чотирьох варіантів взаємного розташування каверни і тріщини.

В перших двох варіантах розглядали неглибоку зовнішню (внутрішню) кільцеву тріщину, глибина якої c (відлік від вершини каверни) (рис. 2). Розв'язували ряд модельних задач з наступними відношеннями глибини дефекту $a=k_1\delta+c$ до товщини стінки t : $a/t=0,1, 0,3, 0,5, 0,7$. Висоту h каверни приймали: $1,1\delta, 1,5\delta, 2\delta, 4\delta, 6\delta, 8\delta, 10\delta$.

В наступних двох розглядали глибоку зовнішню (внутрішню) кільцеву тріщину, відстань між вершиною тріщини і вершиною каверни варію-

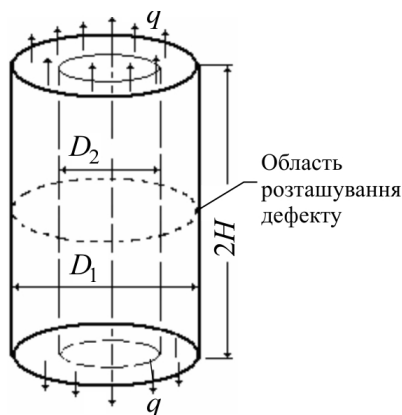


Рис. 1. Задача про розтяг полого циліндра з внутрішньою і зовнішньою крайовою кільцевою тріщиною, що бере початок з каверни

вали величиною параметра k_1 (рис. 3). Розв'язували ряд задач з наступними значеннями глибини каверни: $b=1\delta, 5\delta, 7\delta, 9\delta$ та значеннями висоти каверни: $h=1.1\delta, 1.5\delta, 2\delta, 4\delta, 6\delta, 10\delta$. Відношення глибини дефекту $k_3\delta+k_1\delta+c$ до товщини стінки t : $a/t=0.3, 0.5, 0.7$.

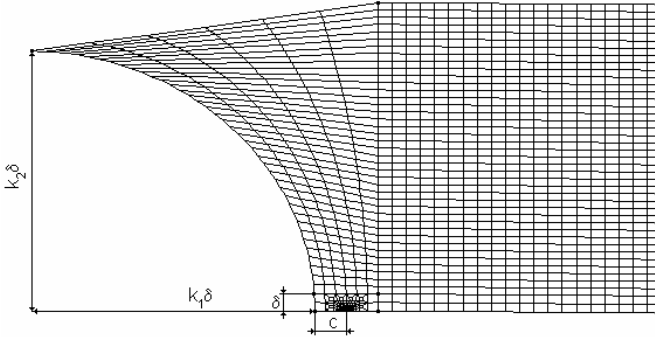


Рис. 2. Скінченно-елементна модель для задач першого та другого варіанту

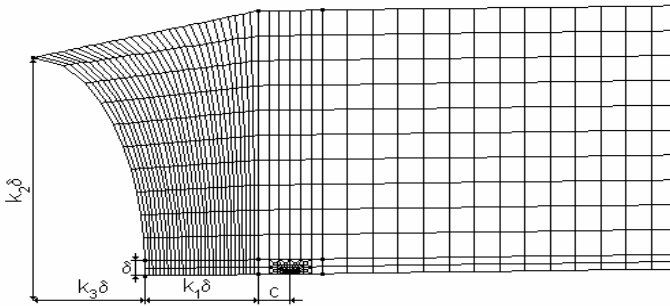


Рис. 3. Скінченно-елементна модель для задач третього та четвертого варіанту

Результати розрахунку КІН порівнювали з результатами розв'язку даної задачі в пружній постановці, а також з результатами розв'язку задачі про розтяг циліндра з тріщиною [11].

Перевірка збіжності результатів розрахунку. На результати розрахунків КІН впливають розміри скінченних елементів в вершині тріщини. Зокрема, в [15] йдеться про чутливість розв'язку до розмірів скінченно-елементної сітки. Показано, як від розмірів елементів у вершині тріщини залежить величина зони пластичності. Крім того, представлено результати залежності величини навантаження руйнування від розміру елемента у вершині тріщини. Найменше значення навантаження руйнування отримано для найдрібнішої сітки. В [16] проаналізовано вплив розміру елемента

сітки на результати визначення параметрів розкриття і закриття тріщини. Показано, що найкращі результати можна отримати при мінімізації розмірів елементів навколо тріщини, проте це не завжди можливо в зв'язку з обчислювальними витратами. З огляду на це, було встановлено залежність між розмірами сітки скінчених елементів та одержаними результатами і отримано значення, при яких досягається збіжність.

Для одержання коректних результатів важливо перевірити умову виконання поправки Ірвіна на пластичність. При розв'язанні поставлених задач виявилось, що для моделі першого та другого варіантів при відношенні $a/t=0.1$ з кроком сітки в околиці вершини тріщини $700 \text{ мкм} \times 25 \text{ мкм} \times 25 \text{ мкм}$ поправка Ірвіна на пластичність не виконується. Тому для цих задач була побудована більш густа сітка (крок сітки – $294 \text{ мкм} \times 8.3 \text{ мкм} \times 8.3 \text{ мкм}$). При розв'язанні задач на даній сітці було досягнуто виконання поправки Ірвіна.

Отже, результат розв'язку є чутливим до величини кроку сітки і при розв'язанні задач з дефектами такого типу (мілка каверна і тріщина) потрібно бути обережним з підбором сітки.

Результати. На рис. 4 представлені порівняльні результати розрахунку КІН в пружній і пружно-пластичній постановці для різних відношень глибини дефекту до товщини стінки циліндра (a/t) в залежності від висоти каверни для задач першого варіанту.

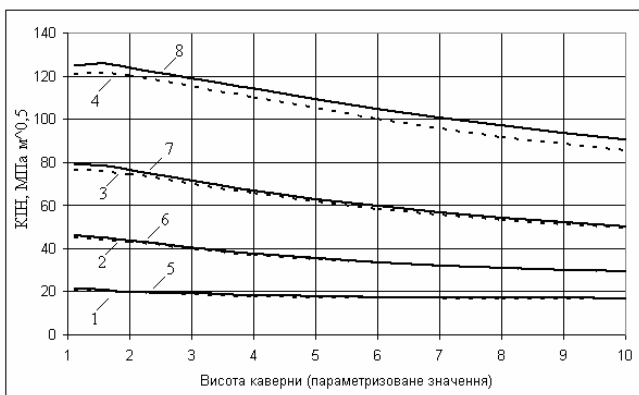


Рис. 4. Графіки порівняння розподілу КІН для задач в пружній і пружно-пластичній постановці; зовнішня тріщина; задача першого варіанту: 1 – $a/t=0.1$ (пружність), 2 – $a/t=0.3$ (пружність), 3 – $a/t=0.5$ (пружність), 4 – $a/t=0.7$ (пружність), 5 – $a/t=0.1$ (пружно-пластичність), 6 – $a/t=0.3$ (пружно-пластичність), 7 – $a/t=0.5$ (пружно-пластичність), 8 – $a/t=0.7$ (пружно-пластичність)

Як видно з рис. 4, значення КІН при розв'язанні задач в пружно-пластичній постановці вищі, ніж при розв'язанні задач в пружній поста-

новці. При цьому різниця між величинами КІН для пружного і пружно-пластичного розв'язків зростає зі збільшенням глибини дефекту.

На рис. 5 для задач третього варіанту представлено графіки розподілу КІН для різних глибин каверни в залежності від висоти. Відношення глибини дефекту до товщини стінки циліндра a/t стали і становить 0.5. Показано порівняльні результати для розв'язку задачі в пружній та пружно-пластичній постановках.

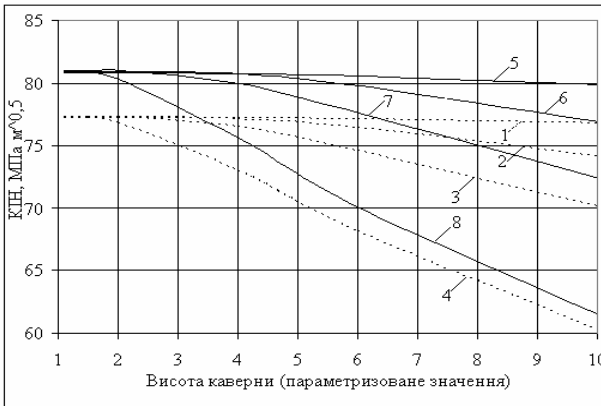


Рис. 5. Графіки порівняння розподілу КІН для задач в пружній і пружно-пластичній постановці; зовнішня тріщина; задача третього варіанту : 1 – $b=1\delta$ (пружність), 2 – $b=5\delta$ (пружність), 3 – $b=7\delta$ (пружність), 4 – $b=9\delta$ (пружність), 5 – $b=1\delta$ (пружно-пластичність), 6 – $b=5\delta$ (пружно-пластичність), 7 – $b=7\delta$ (пружно-пластичність), 8 – $b=9\delta$ (пружно-пластичність)

З рис. 5 слідує, що, значення КІН при розв'язанні задачі в пружно-пластичній постановці вищі, ніж при розв'язанні задачі в пружній постановці для всіх співвідношень глибини і висоти каверни.

Результати розрахунку КІН порівнювали з чисельними розв'язками задачі в пружно-пластичній постановці про розтяг полого циліндра з зовнішньою і внутрішньою тріщиною [11]. На рис. 6 представлено графіки розподілів КІН для зовнішніх дефектів при відношенні $a/t=0.3$ в залежності від висоти каверни, на рис. 7 – для внутрішніх дефектів при відношенні $a/t=0.7$.

Як видно з представлених графіків, для задач з мілкою тріщиною (перший та другий варіанти) значення КІН нижчі в порівнянні з розв'язком [11] для всіх співвідношень глибини і висоти каверни. Для задач з глибокою тріщиною (третій та четвертий варіанти) при збільшенні висоти і глибини каверни значення КІН перевищують отримані в роботі [11]. Зокрема, для внутрішнього дефекту з відношенням $a/t=0.7$ такий ефект спостерігається при глибині каверни $b=5\delta$ для $h>2.5\delta$, при глибині $b=7\delta$ для $h>1.5\delta$, при глибині $b=9\delta$ для всіх значень висоти каверни. Максимальне перевищення значень КІН для тріщини спосте-

рігається для дефекту з відношенням $a/t=0.7$ при $b=5\delta$, $h>10\delta$ і складає 4.37%, при $b=7\delta$, $h>10\delta$ складає 5.46%. З отриманих результатів можна зробити висновок, що більш небезпечними є дефекти з глибокою тріщиною (задачі третього і четвертого варіантів). У випадку збільшення глибини і висоти каверни в даних дефектах розв'язки даних задач є більш консервативними, ніж розв'язки задач про розтяг циліндра з тріщиною.

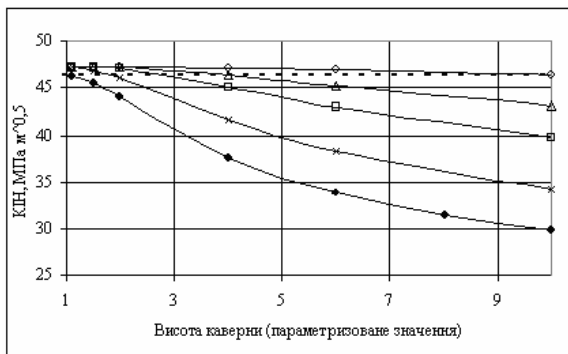


Рис. 6. Графіки порівняння розподілу КІН зовнішній дефект; $a/t=0.3$:
 --- - розв'язок [11], ● – мілка тріщина, ○ – глибока тріщина $b=1\delta$, Δ – глибока тріщина $b=5\delta$,
 □ – глибока тріщина $b=7\delta$, × – глибока тріщина $b=9\delta$

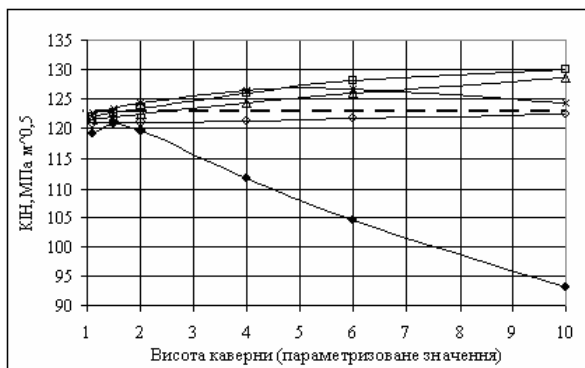


Рис. 7. Графіки порівняння розподілу КІН внутрішній дефект; $a/t=0.7$:
 --- - розв'язок [11], ● – мілка тріщина, ○ – глибока тріщина $b=1\delta$, Δ – глибока тріщина $b=5\delta$,
 □ – глибока тріщина $b=7\delta$, × – глибока тріщина $b=9\delta$

Повний масив отриманих результатів рішення даних задач представлено в таблицях 1-8. Приведено порівняння значень КІН при розв'язанні задач в пружній та пружно-пластичній постановках, а також при розв'язанні пружно-пластичної задачі про розтяг циліндра з тріщиною.

Таблиця 1

Порівняння значень КІН для задач першого варіанту

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м ^{0.5} (пружна постановка/ пружно-пластична постановка)			
	<i>a/t</i>			
	0.1	0.3	0.5	0.7
1.1δ	21.03/ 21.44	45.21/ 46.24	76.70/ 78.92	120.78/ 124.97
1.5δ	20.58/ 20.94	44.52/ 45.46	76.26/ 78.58	121.27/ 126.12
2δ	19.97/ 20.27	43.15/ 44.05	74.77/ 76.78	120.38/ 123.98
4δ	18.36/ 18.56	37.26/ 37.71	65.82/ 67.07	110.42/ 114.07
6δ	17.64/ 17.80	33.59/ 33.83	58.56/ 59.69	99.99/ 104.84
8δ	17.26/ 17.40	31.31/ 31.44	53.48/ 54.47	91.85/ 97.13
10δ	17.01/ 17.14	29.70/ 29.76	49.66/ 50.50	85.42/ 90.54
Розв'язок [11]	21.175	46.437	79.894	129.67

Таблиця 2

Порівняння значень КІН для задач другого варіанту

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м ^{0.5} (пружна постановка/ пружно-пластична постановка)			
	<i>a/t</i>			
	0.1	0.3	0.5	0.7
1.1δ	20.80/ 21.20	44.01/ 45.02	73.48/ 75.91	114.08/ 119.20
1.5δ	20.39/ 20.74	43.44/ 44.37	73.28/ 75.82	114.89/ 120.89
2δ	19.80/ 20.10	42.21/ 43.12	72.10/ 74.43	114.45/ 119.57
4δ	18.25/ 18.44	36.79/ 37.25	64.29/ 65.97	106.40/ 111.83
6δ	17.56/ 17.72	33.42/ 33.69	57.87/ 59.32	97.53/ 104.46
10δ	16.99/ 17.12	29.95/ 30.04	50.07/ 51.23	85.24/ 93.19
Розв'язок [11]	20.928	45.329	77.033	122.94

Таблиця 3

Значення КІН для задач третього варіанту, $a/t=0.3$

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м ^{0.5} (пружна постановка/ пружно-пластична постановка)			
	Глибина каверни			
	1δ	5δ	7δ	9δ
1.1δ	45.59/ 47.21	45.56/ 47.21	45.56/ 47.24	45.50/ 47.18
1.5δ	45.58/ 47.21	45.56/ 47.22	45.53/ 47.21	45.23/ 46.84
2δ	45.58/ 47.21	45.53/ 47.19	45.39/ 47.03	44.58/ 46.05
4δ	45.53/ 47.13	44.88/ 46.41	43.73/ 45.10	40.68/ 41.66
6δ	45.39/ 46.92	43.83/ 45.19	41.82/ 42.96	37.56/ 38.32
10δ	45.02/ 46.39	42.03/ 43.12	39.05/ 39.89	33.73/ 34.19
Розв'язок [11]	46.437			

Таблиця 4

Значення КІН для задач третього варіанту, $a/t=0.5$

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м ^{0.5} (пружна постановка/ пружно-пластична постановка)			
	Глибина каверни			
	1δ	5δ	7δ	9δ
1.1δ	77.20/ 80.83	77.22/ 80.87	77.25/ 80.96	77.28/ 81.03
1.5δ	77.20/ 80.83	77.23/ 80.91	77.27/ 81.01	77.20/ 80.88
2δ	77.20/ 80.83	77.25/ 80.95	77.28/ 81.03	76.86/ 80.34
4δ	77.18/ 80.73	77.13/ 80.73	76.51/ 79.96	73.03/ 75.60
6δ	77.11/ 80.57	76.44/ 79.83	74.61/ 77.58	68.15/ 70.11
10δ	76.76/ 79.88	74.18/ 76.97	70.16/ 72.42	60.29/ 61.52
Розв'язок [11]	79.894			

Таблиця 5

Значення КІН для задач третього варіанту, $a/t=0.7$

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м ^{0.5} (пружна постановка/ пружно-пластична постановка)			
	Глибина каверни			
	1δ	5δ	7δ	9δ
1.1δ	120.84/ 128.76	121.12/ 129.13	121.35/ 129.48	121.72/ 129.96
1.5δ	120.86/ 128.84	121.25/ 129.36	121.59/ 129.85	122.06/ 130.39
2δ	120.88/ 128.92	121.42/ 129.65	121.91/ 130.33	122.36/ 130.72
4δ	120.93/ 129.37	122.20/ 131.09	122.96/ 132.18	121.21/ 129.66
6δ	120.98/ 129.60	122.81/ 132.18	123.10/ 132.83	117.19/ 125.76
10δ	120.97/ 129.42	122.95/ 132.61	121.01/ 130.93	107.60/ 115.25
Розв'язок [11]	129.67			

Таблиця 6

Порівняння значень КІН для задач четвертого варіанту, $a/t=0.3$

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м ^{0.5} (пружна постановка/ пружно-пластична постановка)			
	Глибина каверни			
	1δ	5δ	7δ	9δ
1.1δ	44.15/ 45.74	44.21/ 45.82	44.25/ 45.89	44.30/ 45.96
1.5δ	44.16/ 45.75	44.25/ 45.87	44.30/ 45.95	44.33/ 45.99
2δ	44.16/ 45.76	44.28/ 45.92	44.32/ 45.97	44.24/ 45.87
4δ	44.17/ 45.77	44.08/ 45.67	43.70/ 45.23	42.76/ 44.15
6δ	44.11/ 45.70	43.52/ 45.03	42.67/ 44.07	41.04/ 42.26
10δ	43.95/ 45.51	42.48/ 43.89	41.02/ 42.28	38.69/ 39.56
Розв'язок [11]	45.329			

Таблиця 7

Порівняння значень КІН для задач четвертого варіанту, $a/t=0.5$

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м ^{0.5} (пружна постановка/ пружно-пластична постановка)			
	Глибина каверни			
	1δ	5δ	7δ	9δ
1.1δ	73.49/ 77.17	73.70/ 77.44	73.83/ 77.63	73.97/ 77.84
1.5δ	73.51/ 77.19	73.81/ 77.56	73.98/ 77.82	74.15/ 78.05
2δ	73.53/ 77.22	73.93/ 77.72	74.16/ 78.04	74.29/ 78.18
4δ	73.62/ 77.34	74.31/ 78.19	74.37/ 78.22	73.36/ 76.89
6δ	73.67/ 77.40	74.22/ 78.05	73.66/ 77.36	71.059/ 74.14
10δ	73.62/ 77.32	73.17/ 76.85	71.26/ 74.65	66.37/ 69.00
Розв'язок [11]	77.033			

Таблиця 8

Порівняння значень КІН для задач четвертого варіанту, $a/t=0.7$

Висота каверни	Коефіцієнт інтенсивності напружень, МПа·м ^{0.5} (пружна постановка/ пружно-пластична постановка)			
	Глибина каверни			
	1δ	5δ	7δ	9δ
1.1δ	113.47/ 120.89	114.04/ 121.62	114.38/ 122.09	114.83/ 122.73
1.5δ	113.52/ 120.95	114.30/ 121.96	114.80/ 122.63	115.42/ 123.48
2δ	113.58/ 121.02	114.64/ 122.39	115.33/ 123.32	116.12/ 124.36
4δ	113.80/ 121.33	116.04/ 124.24	117.35/ 126.00	117.75/ 126.52
6δ	114.02/ 121.68	117.29/ 125.99	118.70/ 128.07	117.29/ 126.66
10δ	114.40/ 122.51	118.80/ 128.56	119.35/ 130.04	113.69/ 124.37
Розв'язок [11]	122.94			

Висновки. Розв'язано ряд модельних задач в пружно-пластичній постановці про розтяг полого циліндра з дефектом у вигляді тріщини, що бере початок з вершини каверни. Отримані значення КІН порівнювали з результатами розв'язку даної задачі в пружній постановці, а також чисельними розв'язками про розтяг циліндра з тріщиною.

З одержаних результатів слідує, що значення КІН при розв'язанні пружно-пластичної задачі вищі, ніж для розв'язку в пружній постановці. Отже, поправка Ірвіна на пластичність виконується, але розв'язок є чутливим до величини кроку сітки.

При порівнянні одержаних результатів із розв'язком задачі про розтяг циліндра з тріщиною встановлено, що для дефекту першого та другого варіантів (дефект з неглибокою тріщиною) величини КІН нижчі для всіх співвідношень глибини і висоти каверни, для задач третього та четвертого

варіантів (дефект з глибокою тріщиною) значення КІН перевищують значення КІН для задачі з тріщиною при збільшенні висоти і глибини каверни. Максимальне перевищення значень КІН для тріщини спостерігається для дефекту з відношенням $a/t=0.7$ при $b=5\delta$, $h>10\delta$ і складає 4.37%, при $b=7\delta$, $h>10\delta$ складає 5.46%. Тобто, більш небезпечним є дефект з глибокою тріщиною, для якого при збільшенні глибини і висоти каверни розв'язок стає більш консервативним, ніж при розв'язанні задачі з тріщиною. З одержаних результатів слідує, що при оцінці НДС вузла з'єднання «гарячого» колектора з патрубком парогенератора доцільним є розв'язання задачі з дефектом у вигляді глибокої тріщини, що проростає з каверни.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. Оценка напряженно-деформированного состояния узла сварного соединения "горячего" коллектора с патрубком парогенератора ПГВ-1000 АЭС // Пробл. прочности. - 2003, №5. - С. 142-153.
2. Драгунов Ю.Г., Петрова О.Ю., Лякишев С.Л. и др. Повышение надежности эксплуатации коллекторов парогенераторов ПГВ-1000, -1000М – Атомная энергия. – 2008. – Том 104. – №1. – С. 9–13.
3. Степанов Г.В., Харченко В.В., Бабуцкий А.И. и др. Влияние компоновки реакторов ВВЭР «малой» и «большой» серий атомных электростанций на напряженно-деформированное состояние узла приварки коллектора к патрубку парогенератора – Пробл. прочности. – 2007. – №5. – С. 114–120.
4. Лякишев С.Л., Харченко С.А., Кучерявченков А.В., Коротаев Н.Ф. Оптимизация конструкции узла приварки коллектора к корпусу парогенератора – Сб. трудов 7-го Международного семинара по горизонтальным парогенераторам. – 2006. – ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.
5. 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 – Труды 6-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – 2009. – ФГУП ОКБ «Гидропресс», Подольск, Россия.
6. Банько С.Н., Кобельский С.В., Кравченко В.И. Численный анализ напряженно-деформированного состояния в вершине каверны, расположенной в галтели узла приварки коллектора к корпусу парогенератора ПГВ-1000М – Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2012. – Вып. 35. – С. 214 – 220.
7. Банько С.М. Напружений стан вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М з каверною – Вісник Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя. – 2012. – №3 (67). – С. 56 – 63.
8. Банько С.М. Аналіз впливу геометричних параметрів каверни в галтелі вузла з'єднання колектора з корпусом парогенератора ПГВ-1000М на його напружений стан // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2013.– Вип.91. – С.181–187.
9. Ban'ko S.M., Kobel'skii S.V., Samardžić I. The stress-strain state of the cracked welded joint between the header and the shell of PGV-1000M steam generator // Metalurgija. – 2014. – Vol. 53 № 4. – P. 634-636.
10. Банько С.М., Кобельский С.В., Харченко В.В. Чисельне моделювання напруженого стану полого циліндра з дефектом у вигляді каверни з тріщиною // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2014.– Вип.92. – С. 157-169.

11. *Кобельский С.В.* Численный анализ пространственных задач теории трещин на основе змішаної схеми метода скінченних елементів // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2011.– Вип. 88. – С.147–156.
12. Програмне забезпечення «Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термопруженого стану елементів машинобудівних конструкцій» (SPACE) / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0054634-04. – 2004.
13. *Чирков А.Ю., Кобельский С.В., Звягинцева А.А.* Построение смешанной аппроксимации МКЭ для решения пространственных задач теории упругости // Надежность и долговечность машин и сооружений. – 2008. – Вып. 31. – С. 195 – 207.
14. *Кобельский С.В.* Аналіз змішаних скінченних елементів стосовно задач пружно-пластичного деформування та механіки руйнування // Опір матеріалів і теорія споруд: Наук.-техн. збірник. – К.: КНУБА, 2012.– Вип. 89. – С.131–141.
15. A. Munjiza, N.W.M. John Mesh size sensitivity of the combined FEM/DEM fracture and fragmentation algorithms // Engineering Fracture Mechanics 69 (2002) 281-295.
16. A. Gonzalez-Herrera, J. Zapatero Influence of minimum element size to determine crack closure stress by the finite element method // Engineering Fracture Mechanics 72 (2005) 337-355.

REFERENCES

1. *Stepanov H.V., Kharchenko V.V., Babutskyy A.Y. y dr.* Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzla svarnogo soedyneniya "goryacheho" kolektora s patrubkom paroheneratora PGV-1000 AES - Stress-strain state evaluation of a welded joint of hot collector to nozzle of NPP steam generator PGV-1000 // Probl. prochnosti.- 2003, No. 5. P. 142-153.
2. *Drahunov Yu.H., Petrova O.Yu., Lyakyshev S.L. y dr.* Povishenye nadezhnosti ekspluatatsyy kolektorov paroheneratov PGV-1000, -1000M – Increasing the operational reliability of the collectors of PGV-1000,-1000M steam generators – Atomnaya enerhiya. – 2008. – Tom 104. – No. 1. – P. 9–13.
3. *Stepanov H.V., Kharchenko V.V., Babutskyy A.Y. y dr.* Vlyaniye komponovki reaktorov VVER «maloy» y «bol'shoy» seriy atomnikh elektrostantsiy na napryazhenno-deformirovannoe sostoyaniye uzla pryvarky kolektora k trubku paroheneratora – Effect of the layout of small-and large-series WWER-1000 reactors of nuclear power plants on the stress-strain state of the header-steam generator connector weldment – Probl. prochnosti. – 2007. – No. 5. – P. 114–120.
4. *Lyakyshev S.L., Kharchenko S.A., Kucheryavchenkov A.V., Korotaev N.F.* Optymyzatsiya konstruktivnykh uzlov pryvarky kolektora k korpusu paroheneratora – Optimizing the design of the welded joint between the header and steam generator shell – Sb.trudov 7-ho Mezhdunarodnogo semynara po horizontal'nim paroheneratam. – 2006. – FGUP OKB «Hydropress», Podol'sk, Rossiya.
5. *Lyakyshev S.L., Trunov N.B., Kharchenko S.A., y dr.* Razrabotka y obosnovaniye meropriyatiy po obespecheniyu nadezhnoy y bezopasnoy ekspluatatsyy svarnikh soedyneniy № 111 paroheneratora PGV-1000M – Development and justification of measures for ensuring reliable and safe operation of welded joints No. 111 in PGV-1000M steam generators – Trudi 6-y Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnycheskoy konferentsiy «Obespecheniye bezopasnosti AES s VVER». – 2009. – FGUP OKB «Hydropress», Podol'sk, Rossiya.
6. *Ban'ko S.N., Kobel'skiy S.V., Kravchenko V.Y.* Chyislennyy analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v vershine kaverny, raspolozhennoy v haltely uzla pryvarky kolektora k korpusu paroheneratora PGV-1000M – Numerical analysis of the stress-strain state at the tip of a cavity near the fillet of the welded joint between the header and the shell of PGV-1000M steam generator – Nadezhnost' y dolgovechnost' mashyn y sooruzheniy. – 2012. – Vip. 35. – P. 214 – 220.
7. *Ban'ko S.M.* Napruzheniy stan vuzla z'yednannya kolektora z korpusom paroheneratora PGV-1000M z kavernoyu – Stress state of the welded joint with a cavity between the header and the shell of PGV-1000M steam generator – Visnyk Ternopil'skoho natsional'nogo tekhnichnoho universytetu im. I. Pulyuya. – 2012. – No. 3 (67). – S. 56 – 63.
8. *Ban'ko S.M.* Analiz vplyvu heometrychnykh parametriv kaverny v halteli vuzla z'yednannya kolektora z korpusom paroheneratora PGV-1000M na yoho napruzheniy stan – Analysis of the influence

- of geometrical parameters of the cavity near the fillet of the welded joint between the header and the shell of PGV-1000M steam generator on its stress state // Опір матеріалів і теорія споруд: Nauk.-tekh. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2013.– Vyp.91. – S.181–187.
9. *Ban'ko S.M., Kobel'skii S.V., Samardžić I.* The stress–strain state of the cracked welded joint between the header and the shell of PGV-1000M steam generator // *Metalurgija.* – 2014. – Vol. 53 № 4. – P. 634-636.
 10. *Ban'ko S.N., Kobel'skyy S.V., Kharchenko V.V.* Chiselne modelyuvannya napruzhenogo stanu pologo tsilindra z defektom u viglyadi kaverni z trischinoyu // Опір матеріалів і теорія споруд: Nauk.-tekh. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2014.– Vyp.92. – P. 157-169.
 11. *Kobel'skii S.V.* Chiselniy analiz prostorovih zadach teorii trischin na osnovi zmishanoyi shemi metoda skinchennih elementiv // Опір матеріалів і теорія споруд: Опір матеріалів і теорія споруд: Nauk.-tekh. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2011.– Vyp.88. – S.147–156.
 12. Programne zabezpechennya «Trivimirne skinchennoelementne modelyuvannya teplovogo i termopruzhenogo stanu elementiv mashinobudivnih konstruktiv» (SPACE) / Sistema sertifikatsiyi UkrSEPRO. Sertifikat vidpovidnosti № UA1.017.0054634-04. – 2004.
 13. *Chirkov A.Yu., Kobel'skii S.V., Zvyagintseva A.A.* Postroenie smeshannoyi approksimatsii MKE dlya resheniya prostranstvennykh zadach teorii uprugosti // *Nadezhnost i dolgovechnost mashin i sooruzheniy.* – 2008. – Vyp. 31. – S. 195 – 207.
 14. *Kobel'skii S.V.* Analiz zmishanih skinchennih elementiv stosovno zadach pruzhno-plastichnogo deformuvannya ta mehaniki ruynuvannya // Опір матеріалів і теорія споруд: Nauk.-tekh. zbirnyk. – K.: KNUBA, 2012.– Vyp.89. – S.131–141.
 15. *A. Munjiza, N.W.M. John* Mesh size sensitivity of the combined FEM/DEM fracture and fragmentation algorithms // *Engineering Fracture Mechanics* 69 (2002) 281-295.
 16. *A. Gonzalez-Herrera, J. Zapatero.* Influence of minimum element size to determine crack closure stress by the finite element method // *Engineering Fracture Mechanics* 72 (2005) 337-355.

Стаття надійшла до редакції 29.09.2014 р.

Харченко В.В., Банько С.Н., Кобельский С.В., Кравченко В.И.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О РАСТЯЖЕНИЕ ПОЛОГО ЦИЛИНДРА С ДЕФЕКТОМ В ВИДЕ КАВЕРНЫ С ТРЕЩИНОЙ В УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ ПОСТАНОВКЕ

Представлены результаты расчетов напряженного состояния полого цилиндра с дефектом в виде трещины, которая находится в вершине каверны в упруго-пластической постановке. Результаты расчетов сравнивали с результатами решения данной задачи в упругой постановке, а также с результатами решения задачи о растяжении цилиндра с трещиной.

Ключевые слова: каверна, трещина, напряженное состояние, коэффициент интенсивности напряжений, метод конечных элементов.

Kharchenko V.V., Ban'ko S.N., Kobelsky S.V., Kravchenko V.I.

SOLVE THE PROBLEM OF THE STRETCHING OF A HOLLOW CYLINDER WITH A DEFECT IN THE FORM OF A CAVITY WITH A CRACK IN THE ELASTIC-PLASTIC FORMULATION

The results of calculating the stress state of a hollow cylinder with a defect in the form of cracks, which is at the top of the cavity in the elastic-plastic formulation is presented. The calculation results are compared with the results of solving this problem in the elastic formulation and with the results of solving the problem of the stretching cylinder with a crack.

Key words: cavity, crack, stress state, stress intensity factor, finite element method.