

УДК 620.1 + 539.3 + 539.4

О.П. Ясній, Ю.І. Пиндус, В.П. Ясній

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОЦІНКА КОЕФІЦІЄНТІВ ІНТЕНСИВНОСТІ НАПРУЖЕНЬ В ПІВЕЛІПТИЧНИХ ТРІЩИНАХ КОЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРІВАЧА ТЕС

З використанням методу скінченних елементів (МСЕ) змодельовано систему півеліптичних тріщин, локалізованих у містку між отворами колектора пароперегрівача теплової електростанції (ТЕС). Геометрія тріщин відповідає результатам аналізу пошкоджень реальних конструкцій. Повномасштабну тривимірну модель колектора з тріщиною навантажували термомеханічними навантаженнями, які охоплюють найбільш небезпечні режими експлуатації за дії внутрішнього тиску пари та різниці внутрішньої і зовнішньої температур стінок колектора. З використанням прямого методу визначення напружень отримано розподіли коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН) вздовж фронтів тріщин різних глибин. З урахуванням НДС внутрішньої поверхні містка між отворами пароперегрівача та визначених КІН у фронтах тріщин різних розмірів отримано поправкову функцію КІН. Функція враховує різницю зовнішньої та внутрішньої температур колектора і глибину тріщини.

Ключові слова. Колектор пароперегрівача, півеліптична тріщина, метод скінченних елементів, коефіцієнт інтенсивності напружень.

Рис. 15. Табл. 1. Форм. 9. Літ. 7.

О.П. Ясний, Ю.И. Пындус, В.П. Ясний.

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛУЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ТРЕЩИНАХ КОЛЛЕКТОРА ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ ТЭС

С использованием метода конечных элементов (МКЭ) смоделировано систему полуэллиптических трещин, локализованных в мостике между отверстиями колектора пароперегревателя тепловой электростанции (ТЭС). Геометрия трещин соответствует результатам анализа поврежденных реальных конструкций. Полномасштабную трехмерную модель колектора с трещиной нагружали термомеханическими нагрузками, которые охватывают наиболее опасные режимы эксплуатации при действии внутреннего давления пара и разности внутренней и внешней температур стенок колектора. При использовании прямого метода определения напряжений получено распределения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) вдоль фронтов трещин различных глубин. С учетом НДС внутренней поверхности мостика между отверстиями пароперегревателя и определенных КИН во фронтах трещин различных размеров получено поправочную функцию КИН. Функция учитывает разницу внешней и внутренней температур колектора и глубину трещины.

Ключевые слова. Колектор пароперегревателя, полуэллиптическая трещина, метод конечных элементов, коэффициент интенсивности напряжений.

O.P. Yasniy, Y.I. Pyndus, V.P. Iasnii

EVALUATION OF STRESS INTENSITY FACTORS IN SEMI-ELLIPTICAL CRACKS OF THERMAL POWER PLANT SUPERHEATER COLLECTOR

Using the finite element method (FEM) the system of semi-elliptical cracks that were localized in the ligament between the holes of thermal power plant (TPP) superheater collector is modeled. The geometry of the cracks corresponds to the results of the analysis of real structures damage. Full-scale three-dimensional model of the collector with a crack was loaded by thermomechanical loads that cover most dangerous modes of operation under the actions of internal steam pressure and temperature difference on the internal and external collector walls. Using the direct method of stress determination the distributions of stress intensity factors (SIF) along the crack front for different crack depth were obtained. Taking into account the stress strain state of the internal surface of the ligament between the holes of superheater and determined SIF at the crack fronts of different sizes the obtained correction function of SIF were evaluated. The function takes into account the difference of external and internal temperature of the collector and the depth of the crack.

Keywords. Superheater collector, semi-elliptical crack, finite element method, stress intensity factor.

Вступ. Одними з найбільш небезпечних, з точки зору ймовірності руйнування, елементів обладнання ТЕС вважаються колектори пароперегрівачів. Основними факторами, які призводять до виникнення в них пошкоджень і руйнування є неоднорідний розподіл температурного поля по товщині стінки та високий внутрішній тиск пари. Довговічність колекторів пароперегрівачів залежить від напружень, які виникають в найбільш навантажених ділянках. Як правило, пошкодження виникають на внутрішній поверхні в містках між отворами колектора. Тому для оцінювання міцності і довговічності колектора, поряд із характеристиками тріщиностійкості за статичного і циклічного навантаження, необхідно описати напружено-деформований стан колектора за експлуатаційного термомеханічного навантаження з урахуванням геометричних параметрів дефектів. Достовірна оцінка напружено-деформованого стану (НДС) товстостінного циліндра з отворами за комплексного температурного та механічного впливів та з урахуванням

впливу температури на теплофізичні та фізико-механічні властивості матеріалу є складною міждисциплінарною задачею, вирішення якої можливе тільки з використанням методу скінченних елементів (МСЕ).

Мета досліджень та постановка задачі. Відомі роботи, у яких визначали коефіцієнти інтенсивності напружень для небезпечних з точки зору зародження і поширення тріщин ділянок колекторів пароперегрівачів, зокрема [1, 2]. МСЕ обчислено напруження і відповідні коефіцієнти інтенсивності напружень колектора з дефектами на ділянці між отворами за сумісної дії внутрішнього тиску пари і градієнту температур, спричинених холодними, теплими чи гарячими пусками а також регулюванням потужності енергоблоків. Показано, що найбільші напруження та коефіцієнти інтенсивності напружень для заданого розміру і геометрії дефекту виникають, коли температура зовнішньої поверхні колектора перевищує температуру внутрішньої.

На основі аналізу відомих літературних даних щодо експлуатаційного пошкодження колекторів різних конструкцій і різних виробників виявив, що місце зародження дефектів і їх геометрія приблизно співпадають. Тріщини зароджуються на центральному отворі перфорованої ділянки перпендикулярно до осі колектора пароперегрівача [1, 2, 3]. На основі розгляду НДС колектора з прямою поперечною між отворами тріщиною сталої глибини побудовано розподіл розкриття тріщини вздовж її фронту і показано, що максимальні напруження при охолодженні колектора під час зупинки енергетичного блоку виникають в околі вершини тріщини на центральному отворі [2]. У праці [1] при аналізі НДС колектора під дією внутрішнього тиску і термічних напружень теж розглядали експлуатаційний дефект у вигляді прямої поперечної тріщини між отворами, хоча на основі неруйнівного контролю виявлено, що вона має параболічну форму.

Слід зауважити, що при моделюванні підростання тріщини і оцінюванні граничного стану елементів конструкцій точність прогностичних оцінок буде залежати від того наскільки точно форма розрахункового дефекту відповідає геометрії експлуатаційних дефектів.

В роботі авторів [4] МСЕ у пружній постановці змодельовано вплив внутрішнього тиску і перепаду температур на внутрішній і зовнішній поверхнях, які виникають під час пуску і зупинки блоку ТЕС на напружено-деформований стан колектора пароперегрівача ТЕС. Показано, що найбільш небезпечними для експлуатації є режими, коли температура внутрішньої поверхні колектора пароперегрівача нижча від зовнішньої. При збільшенні вказаної різниці від 0 до 100 °С нормальні напруження на внутрішній поверхні містка між отворами пароперегрівача зростають у 5 разів і сягають 230 МПа, що перевищує умовну межу текучості матеріалу колектора – сталі 12Х1МФ за температури 500 °С.

Метою даної роботи є дослідження НДС колектора пароперегрівача ТЕС з урахуванням експлуатаційних термомеханічних навантажень, температурних змін теплофізичних і фізико-механічних властивостей сталі 12Х1МФ та геометрії реальних експлуатаційних дефектів. З використанням скінченноелементного програмного забезпечення ANSYS Workbench створено тривимірну повномасштабну модель та оцінено НДС і розподіл КІН вздовж фронту півеліптичної поперечної тріщини між отворами колектора пароперегрівача. Побудовано поправкову функцію для визначення КІН, яка урахує глибину і форму тріщини за комплексної дії внутрішнього тиску і термомеханічного навантаження.

Моделювання колектора пароперегрівача ТЕС з тріщинами МСЕ. Повномасштабну модель колектора пароперегрівача котла ТП-100 у вигляді товстостінного циліндра з отворами побудовано у прямокутній декартовій системі координат (рис.1). Внутрішній діаметр колектора становить 235 мм, зовнішній 325 мм. Діаметр отворів 22 мм, кут між осями отворів в площині OXY дорівнює 20° . Відстань між рядами отворів вздовж осі OY становить 80 мм.

З урахуванням умов симетрії моделювали фрагмент колектора пароперегрівача [4]. Для достовірного відтворення поведінки матеріалу за комплексного термомеханічного впливу у скінченноелементну модель колектора пароперегрівача закладали теплофізичні та фізико-механічні властивості сплаву 12Х1МФ [5].

Систему локалізованих півеліптичних тріщин (рис. 1) створювали в площині OYZ на ділянці між отворами, де виникає найбільша концентрація напружень за експлуатаційних умов [1-4, 6]. Тріщини створювали з урахуванням їх геометрії в реальних конструкціях колекторів пароперегрівачів з пошкодженнями (рис. 2).

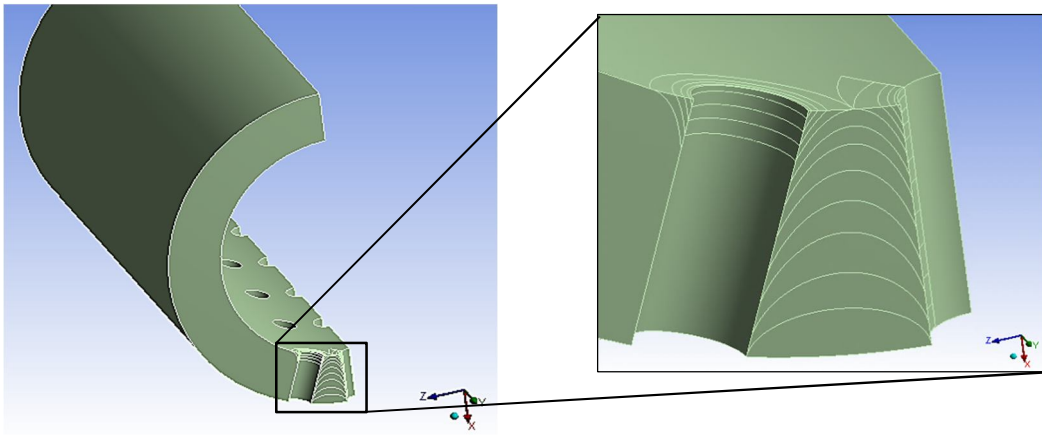


Рис. 1. Повномасштабна модель колектора пароперегрівача котла ТП-100 з площинами півеліптичних тріщин

Фронти тріщин (№1 - №8) описуються еліпсом з центром, який знаходиться посередині ділянки між отворами на зовнішній поверхні колектора пароперегрівача (рис. 2). Вісь еліпса a має сталий розмір. Розмір осі b , яка визначає глибину фронту тріщини приймали змінною. Розміром (глибиною) l тріщини вважали відстань між отворами вздовж осі симетрії ділянки: від центру еліпса, який незалежно від глибини тріщини співпадає із серединою проміжку між отворами на зовнішній поверхні, до середини фронту тріщини.

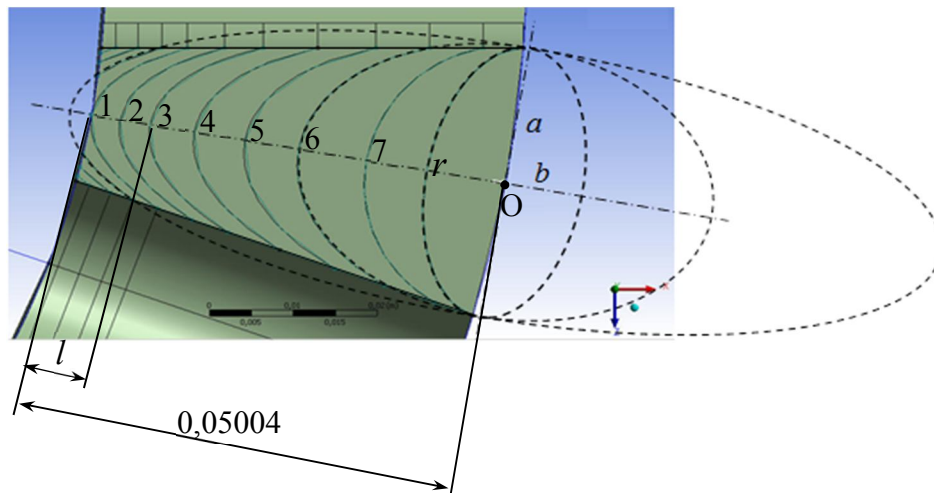


Рис. 2. Геометрія фронтів тріщин у проміжку між отворами колектора пароперегрівача

Створені між фронтами тріщин в площині Oxz поверхні можуть моделювати суцільний матеріал або поверхні тріщини (рис. 3). Наприклад (тріщина №2), для відтворення суцільного матеріалу на виділеній червоним кольором поверхні (рис. 3 а) наклали умови симетрії відносно площини Oxz , тобто обмежували їх в переміщеннях вздовж осі Oy . Області над контуром фронту тріщини в площині Oxz (позначені червоним кольором (рис.3 б) в переміщеннях не обмежували, що визначало поверхню тріщини.

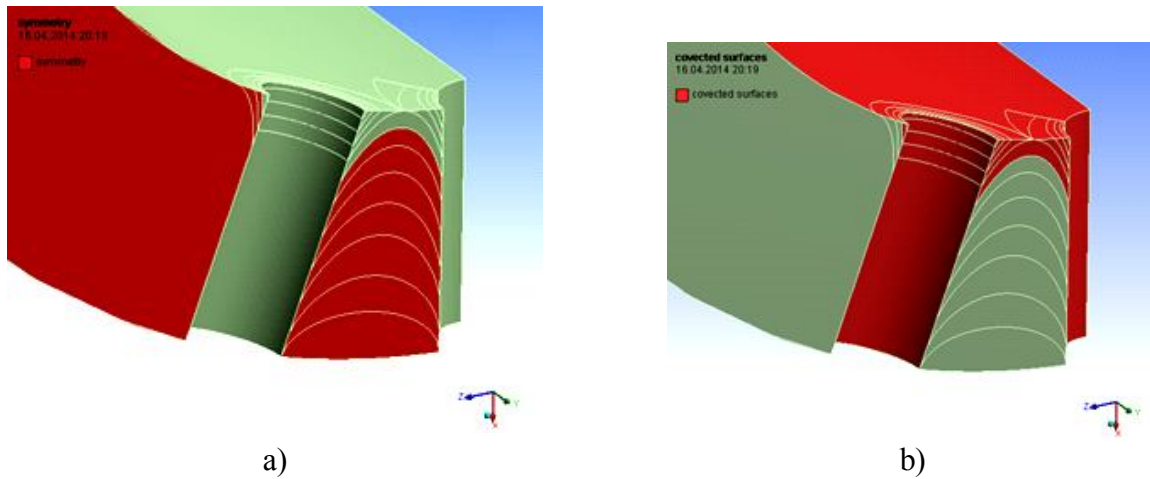


Рис. 3. Моделювання тріщини № 2

Внутрішні поверхні циліндра, отворів та поверхні утвореної тріщини (рис. 2 b) піддавали впливу внутрішнього тиску та температури пари. В околі фронту тріщини сітку скінченних елементів згущували. Мінімальний розмір між вузлами елементів становив 0,05 мм (рис.4).

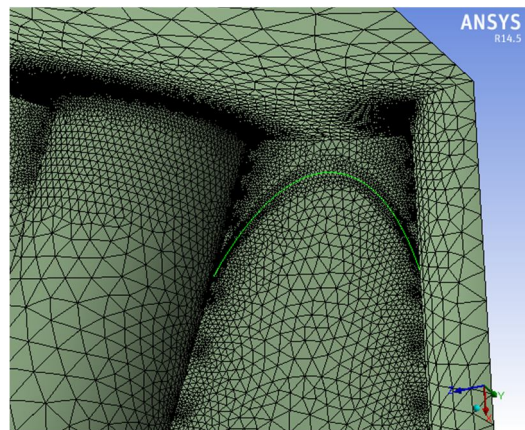


Рис. 4. Згущення скінченноелементної сітки біля фронту тріщини № 2

НДС колектора пароперегрівача з тріщиною оцінювали за методикою термомеханічного розрахунку з використанням платформи ANSYS Workbench, запропонованою у праці [4]. Термомеханічний розрахунок поєднує два етапи – нелінійний тепловий "Transient Thermal" та статичний структурний "Static Structural" і дозволяє пов'язувати програмні модулі шляхом передачі (експорт-імпорт) результатів розрахунку з одного модуля в інший. Результати теплових розрахунків, отримані в модулі "Transient Thermal" (розподіл температур в корпусі товстостінного циліндра), передавались у модуль "Static Structural" для подальших обчислень переміщень вузлів, деформацій та напружень, які виникають внаслідок нерівномірного температурного розширення матеріалу по товщині корпусу колектора. Окрім того, в модулі "Static Structural" моделювали вплив тиску пари на поверхню тріщини, а також внутрішні поверхні та отвори колектора пароперегрівача [4].

Оцінка розподілу КІН вздовж фронтів тріщин. В працях [1, 2, 4, 6] встановлено, що найбільш небезпечними для експлуатації колектора пароперегрівача є режими, коли температура його внутрішньої поверхні t_{int} нижча від зовнішньої t_{ext} . Значення напружень, які виникають у стінці пароперегрівача, залежать тільки від різниці температур $\Delta t = |t_{int} - t_{ext}|$ внутрішньої та зовнішньої поверхонь відповідно і не залежать від їх максимальних значень. З урахуванням експлуатаційних режимів навантаження колектора пароперегрівача [1, 2] в роботі МСЕ моделювали НДС за сталого внутрішнього тиску 14 МПа та за різних температур внутрішньої і зовнішньої поверхні колектора пароперегрівача $0^{\circ}\text{C} \leq \Delta t \leq 60^{\circ}\text{C}$ з кратністю 15°C , за умови $t_{int} \leq t_{ext}$.

КІН відриву (K_I) вздовж фронту півеліптичних тріщин обчислювали з урахуванням розподілу нормальних напружень σ_{yy} , які визначають напружений стан у поперечному перерізі колектора

пароперегрівача (в площині OXZ) [4]. K_I для 11 рівновіддалених точок фронтів кожної з 8 півеліптичних тріщин визначали використовуючи прямий метод напружень, який базується на МСЕ [7]. З використанням опції "path" створювали перпендикулярні дотичним до фронту тріщини лінії (рис. 5) з початком у кожній з 11 рівновіддалених точок. Вздовж цих ліній отримували криві розподілу нормальних напружень спереду вістря тріщини (рис. 6).

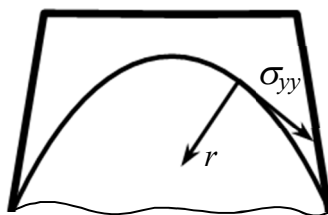


Рис. 5. Перпендикулярна дотичній до фронту тріщини лінія r

Отримані значення нормальних напружень σ_{yy} спереду вістря тріщини (рис. 6) описуються асимптотичною формулою [7]

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (1)$$

де r – відстань спереду фронту тріщини; θ – кут відносно площини OXZ .

З урахуванням (1), при $\theta = 0$ можна записати

$$K_I = \sigma_{yy} \sqrt{\pi r} \quad (2)$$

За формулою (2) будували криві залежності K_I від r (рис. 7). Шукане K_I приймали рівним екстрапольованому значенню при $r \rightarrow 0$. При наближенні до вістря тріщини точність визначення K_I , помітно знижується (рис. 7) через сингулярність напружень у вістрі тріщини при $r \rightarrow 0$. Тому точки, які знаходяться безпосередньо біля вістря тріщини при обчисленні КІН до уваги не брали.

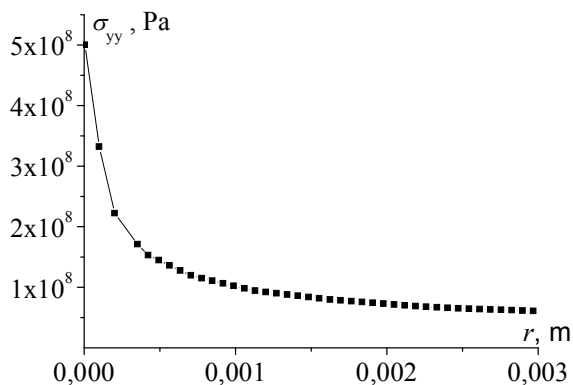


Рис. 6. Типовий розподіл нормальних напружень σ_{yy} вздовж перпендикулярної до фронту тріщини лінії

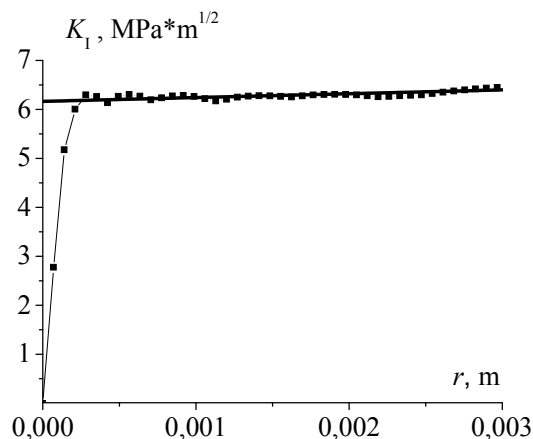
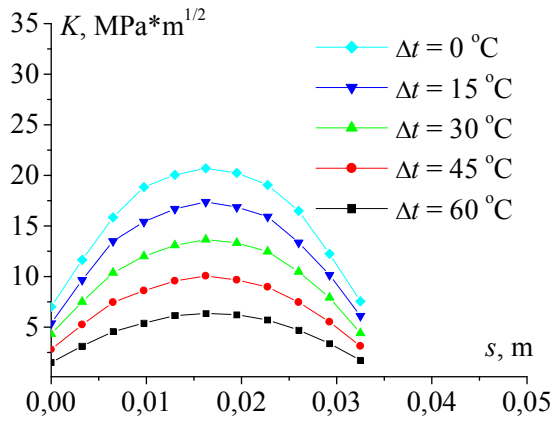
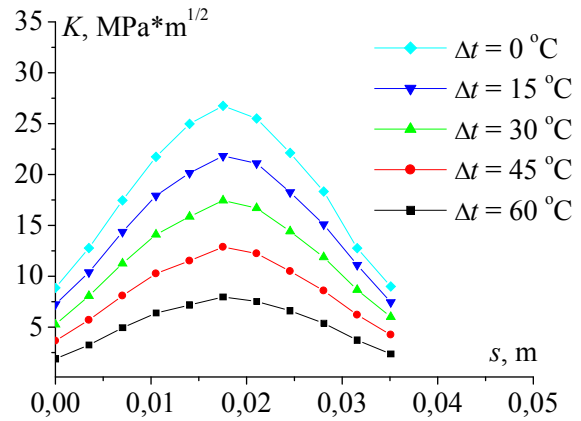


Рис. 7. Визначення КІН за відомими значеннями напружень σ_{yy} (рис. 5) з використанням ф-ли (2)

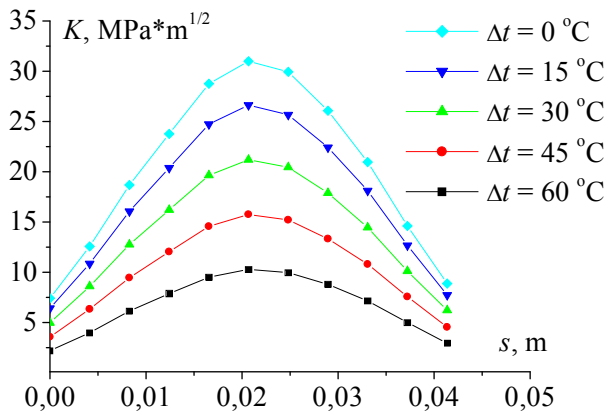
Результати розрахунків розподілу K_I вздовж фронтів s модельних півеліптичних тріщин № 2 – № 5 між отворами колектора пароперегрівача ТЕС зображено на рис. 8.



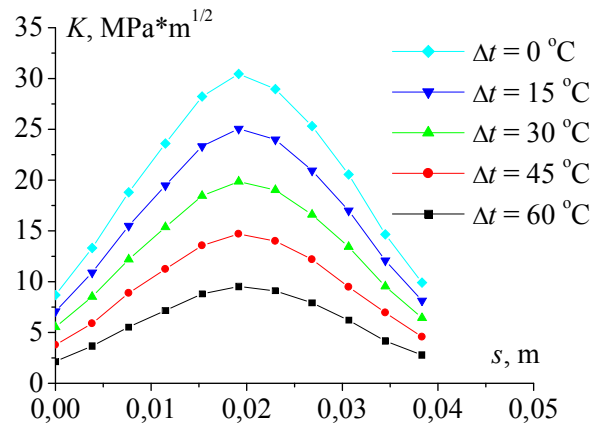
a)



b)



c)



d)

Рис. 8. Розподіл КІН з урахуванням Δt вздовж фронтів тріщин s :
 а) № 2, $l = 0,0034$ м; б) № 3, $l = 0,00706$ м; в) № 4, $l = 0,01244$ м; д) № 5, $l = 0,01855$ м.

Очевидно (рис. 8), що основний вклад в збільшення K_I вносить зростання різниці температур Δt внутрішньої та зовнішньої поверхонь, за умови $t_{\text{int}} \leq t_{\text{ext}}$.

Визначення поправкової функції КІН. Геометрію фронту тріщини на ділянці між отворами колектора пароперегрівача ТЕС формує еліпс з центром, який знаходиться посередині проміжку між отворами на зовнішній поверхні колектора пароперегрівача (рис. 2). Одна з осей еліпса (а) є сталою, а другу (б) визначає глибина тріщини l . З урахуванням цього припущення та симетрії розподілу K_I відносно середини фронтів тріщин (рис. 8), для оцінки росту втомної тріщини (РВТ) достатньо визначати K_I та відповідний приріст тріщини (цикл за циклом) Δl посередині фронту тріщини за кінетичною діаграмою РВТ.

Складність оцінки K_I у даному випадку полягає в тому, що НДС у вістрі тріщини визначає комплексний вплив внутрішнього тиску і термомеханічних напружень. Тобто, поправкова функція КІН повинна враховувати вплив різниці температур Δt внутрішньої та зовнішньої поверхонь циліндра та розмір тріщини l (глибину тріщини).

Для розв'язання цієї задачі було виконано серію чисельних програмних експериментів з метою оцінки впливу Δt на розподіл нормальних напружень $\sigma_{yy}(\Delta t)$ вздовж лінії "surface" (рис. 9) моделі колектора пароперегрівача без тріщин.

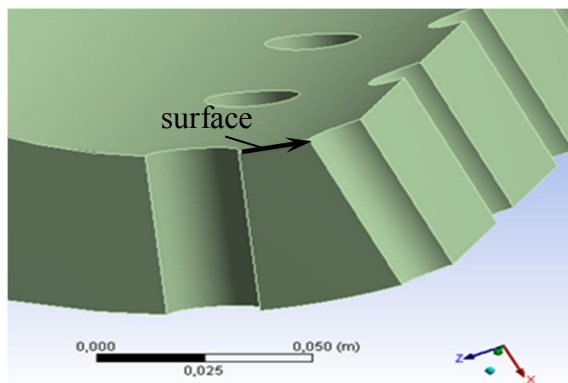


Рис. 9. Лінія в місцях найбільшої концентрації напружень на внутрішній поверхні колектора пароперегрівача

Результати програмного моделювання (рис. 10) свідчать про те, що при ступінчатому зменшенні температури внутрішньої поверхні відносно зовнішньої, напруження на внутрішній поверхні ділянки між отворами в площині Oxz зростають. При $\Delta t = 0$ в матеріалі виникають напруження, які спричинені тільки внутрішнім тиском у 14 МПа.

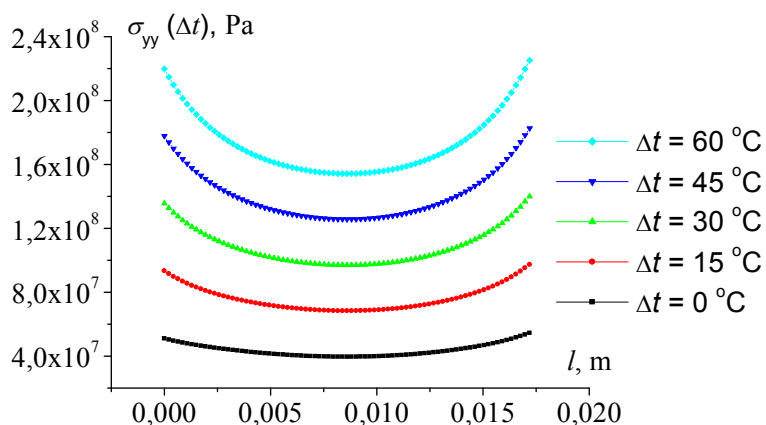


Рис. 10. Розподіл нормальних напружень вздовж відрізка "surface" (рис. 9) з урахуванням різниці зовнішньої та внутрішньої температур Δt стінок колектора пароперегрівача

Вплив Δt на значення відносних нормальних напружень $\frac{\sigma_{yy}(\Delta t)}{\sigma_{yy}(\Delta t = 0)}$ посередині містка (середина лінії "surface") за сталого внутрішнього тиску пари 14 МПа показано на рис. 11.

Залежність (рис. 11) апроксимували лінійною функцією:

$$\frac{\sigma_{yy}(\Delta t)}{\sigma_{yy}(\Delta t = 0)} = 1 + 0,048\Delta t, \quad (3)$$

де $\sigma_{yy}(\Delta t = 0) = 39,49$ МПа – значення нормального напруження по центру відрізка "surface" при однакових температурах ззовні та всередині колектора ($\Delta t = 0$) за дії лише внутрішнього тиску.

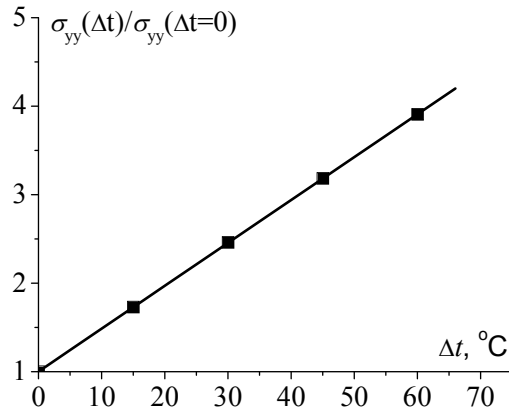


Рис. 11. Залежність відносних нормальних напружень посередині відрізка "surface" від різниці температур Δt

З урахуванням формули (3), отримали залежність нормального напруження посередині проміжку між отворами на внутрішній поверхні (посередині відрізка "surface") від різниці температур Δt :

$$\sigma_{yy}(\Delta t) = \sigma_{yy}(\Delta t = 0)(1 + 0,048\Delta t). \quad (4)$$

Залежності впливу різниці температур та глибини тріщини на K_I посередині фронту тріщини між отворами колектора пароперегрівача подано на рис. 12. Якщо температура всередині та зовні колектора рівні ($\Delta t = 0$) то K_I визначається лише внутрішнім тиском та розміром тріщини (крива чорного кольору (рис. 12). При збільшенні Δt від 0 до 60 $^\circ\text{C}$ значення K_I збільшуються майже у 4 рази за однакових глибин тріщин (зміщення кривих вгору).

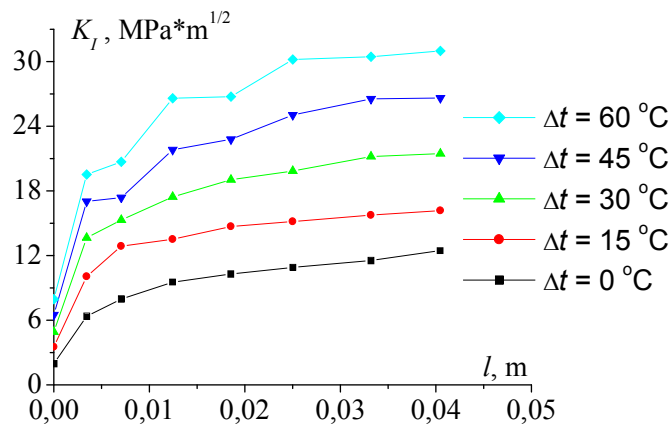


Рис. 12. Залежності K_I від різниці температур Δt та глибини тріщини l

За відомою різницею температур Δt , використовуючи залежність (4) можна визначити напруження $\sigma_{yy}(\Delta t)$ і, відповідно КІН в посередині фронту тріщини за формулою:

$$K_I = \sigma_{yy}(\Delta t) \sqrt{\pi l} \cdot Y\left(\frac{l}{w}; \Delta t\right), \quad (5)$$

де $Y\left(\frac{l}{w}; \Delta t\right)$ – поправкова функція, яка залежить від відношення глибини тріщини до товщини стінки колектора $\frac{l}{w}$ та різниці температур Δt .

З урахуванням формули (5) можна записати

$$Y\left(\frac{l}{w}; \Delta t\right) = \frac{K_1}{\sigma_{yy}(\Delta t) \sqrt{\pi l}}. \quad (6)$$

Обчислені за формулою (6) значення поправкової функції з урахуванням відношення $\frac{l}{w}$ для різних Δt подано на рис. 13.

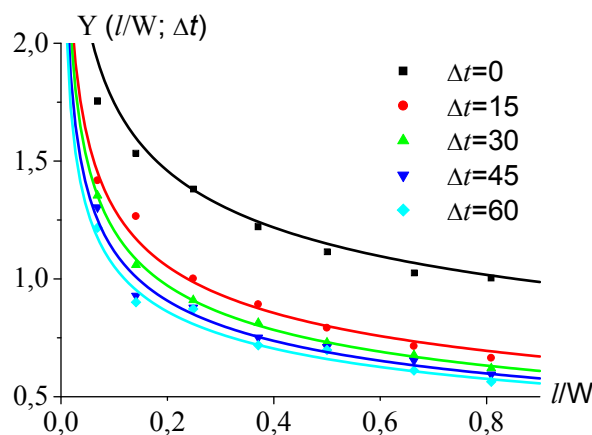


Рис. 13. Залежності поправкової функції Y від глибини тріщини l за різних Δt

Отримані значення поправкової функції (рис. 13) за різних Δt апроксимували степеневою функцією:

$$Y = A \left(\frac{l}{w}\right)^m, \quad (7)$$

де A і m – параметричні коефіцієнти (табл.1).

Оскільки зміна показника степеня m в залежності від Δt є незначною (максимальне відхилення становить 16 %), його значення усереднили і прийняли сталим та рівним $m = -0,295$. Значення коефіцієнтів A (рис. 14) скорегували шляхом повторної апроксимації даних функцією (7) з фіксованим m . Залежність зміни A від Δt (рис. 14) описали експоненціальною функцією

Таблиця 1. Значення коефіцієнтів A і m функції (7):

Δt	A	m
0	0.96	-0.26
15	0.65	-0.30
30	0.59	-0.31
45	0.56	-0.30
60	0.54	-0.29

$$A = A(\Delta t=60) + A_1 e^{(-\Delta t/p)}. \quad (8)$$

де $A(\Delta t=60) = 0,54$ – значення A при $\Delta t=60$; $A_1 = 0,32$ і $p = 15,62$ – параметричні коефіцієнти.

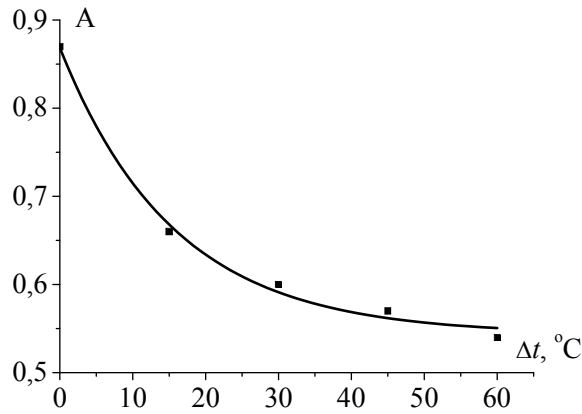


Рис. 14. Залежність коефіцієнту A у формулі (7) від різниці температур Δt

З урахуванням (7) та (8) можна записати:

$$Y\left(\frac{l}{w}; \Delta t\right) = (0,54 + 0,32e^{(-\Delta t/15,62)}) \cdot \left(\frac{l}{w}\right)^{-0,295} \quad (9)$$

Вказана формула є поправковою функцією для формули з визначення КІН (5). Суцільними лініями (рис. 15) показано побудовані з використанням (9) криві залежності поправкової функції від глибини тріщини та з урахуванням зміни різниці температур зовнішньої та внутрішньої поверхонь колектора пароперегрівача. Вказані криві добре узгоджуються із значеннями, отриманими МСЕ.

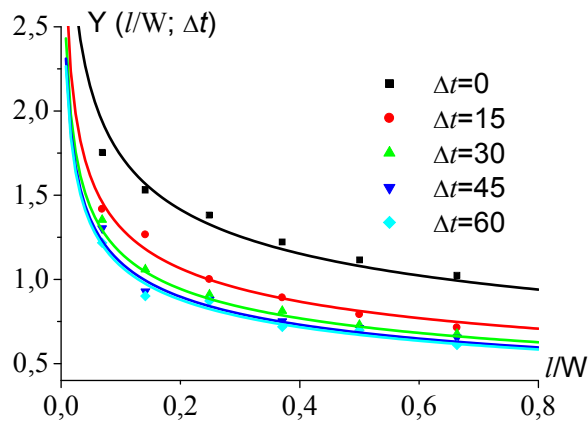


Рис. 15. Залежності поправкової функції Y від глибини тріщини l за різних Δt

Висновки. Методом скінченних елементів у пружній постановці змодельовано повномасштабну модель колектора пароперегрівача котла ТП-100 у вигляді товстостінного циліндра з системою локалізованих на ділянці між отворами півеліптичних тріщин.

З урахуванням експлуатаційних режимів навантаження колектора пароперегрівача – тиску пари та різниці температур $\Delta t = |t_{\text{ext}} - t_{\text{int}}|$ між зовнішньою та внутрішньою поверхнями колектора пароперегрівача, за умови $t_{\text{ext}} \leq t_{\text{int}}$ виконано серію міждисциплінарних термомеханічних розрахунків НДС колектора пароперегрівача з тріщинами. Визначені розподіли КІН відриву (K_I) вздовж фронтів півеліптичних тріщин прямим методом напружень, який базується на чисельних розрахунках НДС у вістрі тріщин. Встановлено, що при збільшенні Δt від 0 до 60 °C значення K_I збільшуються майже у 4 рази за однакових глибин тріщин та сталого внутрішнього тиску пари.

Отримано поправкову функцію для формули визначення КІН у середині фронту півеліптичної тріщини. Функція враховує глибину тріщини та різницю температур між зовнішньою та внутрішньою поверхнями колектора пароперегрівача за сталого внутрішнього тиску пари. Вказана функція задовільно узгоджується з отриманими МСЕ значеннями.

1. Kwon, O. The effect of the steam temperature fluctuations during steady state operation on the remnant life of the superheater header / O. Kwon, M. Myers, A.D. Karstensen, D. Knowles // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. – 2006. – Vol. 83, No. 5. – P. 349-358.
2. Дробенко, Б.Д. Комп'ютерне моделювання деформування елементів діючого енергетичного обладнання з пошкодженнями [Текст] / Б.Д. Дробенко // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2010. – № 6. – С.56–60.
3. Ясній, О. Пошкодження внутрішньої поверхні ділянки колектора пароперегрівача під час експлуатації [Текст] / О. Ясній, А. Собчак, В. Ясній, Н. Луцик // *Машинознавство*. – 2011. – № 1–2. – С.16–19.
4. О.П. Ясній. Моделювання НДС колектора пароперегрівача котла ТП-100 за комплексного термомеханічного навантаження методом скінченних елементів [Текст] // *Вісник ТНТУ*, № 2014. - С.7-15
5. Марочник сталей и сплавов. 2-е изд., доп. и испр. [Текст] / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение. – 2003. – 784 с.
6. Farragher, T.P. Development of life assessment procedures for power plant headers operated under flexible loading scenarios / T.P. Farragher, S. Scully, N.P. O'Down, S.B. Leen // *International Journal of Fatigue*. – 2013 – Vol. 49. – P. 50–61.
7. Сиратори, М. Вычислительная механика разрушения [Текст]: Пер. с японск. / М. Сиратори, Т. Миеси, Х. Мацусита. – М.: Мир. – 1986. – 334 с.