

**ОЦІНЮВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ПОДАЛЬШОГО ВИКОРИСТАННЯ
КОЛЕКТОРІВ ПЕРВИННОГО ПАРОПЕРЕГРІВАЧА КОТЛА
З ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ПОШКОДЖЕННЯМИ**

На основі рівнянь неізотермічної термпружно-пластичності досліджено напружено-деформований стан (НДС) колекторів первинного пароперегрівача котла ТП-100, 100 А з тріщиноподібними пошкодженнями під час експлуатації. Встановлено, що зародження і поширення поперечних тріщин між отворами слід пов'язувати зі значними температурними градієнтами по товщині колектора в нестационарних режимах різкого охолодження. За наскрізної поперечної тріщини між отворами НДС колектора під час експлуатації є такий, що за відсутності тріщин за межами крайніх отворів подальше непрогнозоване руйнування колектора неможливе. Отримані результати використано для оцінювання можливості продовження термінів експлуатації колекторів на конкретних ТЕС.

За тривалої експлуатації міцнісні характеристики та несуча здатність елементів енергетичного обладнання змінюються. Внаслідок дії механічних навантажень, підвищеної температури та корозивно-активного середовища в них утворюються різного роду дефекти і пошкодження, серед яких найнебезпечніші – тріщини. Тому необхідно з'ясувати причини виникнення таких дефектів, щоб впливати на них, оцінити придатність обладнання з пошкодженнями до подальшої експлуатації та виробити рекомендації щодо відповідних ремонтних заходів. Актуальними є дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів енергообладнання з експлуатаційними навантаженнями за уточненими математичними моделями, які дають можливість урахувати реальну геометричну форму конструкційних елементів та наявних у них дефектів.

Надійне програмне забезпечення, розроблене на основі адекватних сучасних математичних моделей і методів, дає можливість у стислі терміни проаналізувати механічну поведінку того чи іншого діючого конструкційного елемента під час експлуатації та отримати експертну оцінку запасу його міцності. Ці дані можна використати для прийняття обґрунтованих рішень про можливість тимчасового продовження тривалості експлуатації чи заміни вузлів та елементів енергетичного обладнання з дефектами і пошкодженнями.

У цій праці подано результати дослідження НДС колекторів первинного пароперегрівача котла ТП-100, 100 А ТЕС з експлуатаційними ушкодженнями на внутрішній поверхні між отворами за робочих параметрів експлуатації (внутрішній тиск $p = 14$ МПа при 540°C) у межах тривимірної теорії термпружнопластичності з використанням розроблених раніше [1] засобів математичного, числового та комп'ютерного моделювання процесів деформування у твердих тілах за дії комплексного навантаження.

Формулювання задачі та методика її розв'язування. Під час експлуатації в колекторах між отворами для зміювиків утворюються поперечні тріщиноподібні дефекти (рис. 1). Щоб виявити причину їх появи, виконали низку обчислювальних експериментів з визначення напруженого стану колектора без пошкоджень під час експлуатації. За розрахункову модель колектора взяли тривимірний порожнистий циліндр Ω з отворами (рис. 2). Вважали, що циліндр із внутрішнім R_1 і зовнішнім R_2 радіусами навантажений внутрішнім тиском p за температури T і закритий днищами з обох

боків. Ряди отворів для штуцерів радіусом r розташовані на віддальх $2L_y$ один від одного у напрямі поздовжньої осі циліндра. Аналогічні віддалі між центрами отворів у коловому напрямі (виміряні на зовнішній поверхні циліндра) рівні L_ϕ . На поверхнях отворів теж задано тиск p .

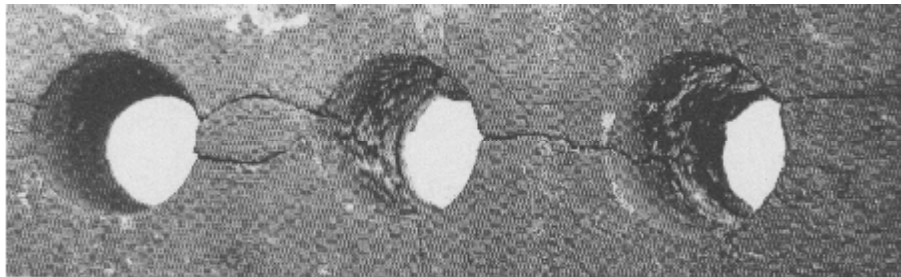


Рис. 1.

Циліндр віднесено до декартової системи координат так, що вісь OY збігається з віссю циліндра, а OZ утворює вісь обертання центрального отвору.

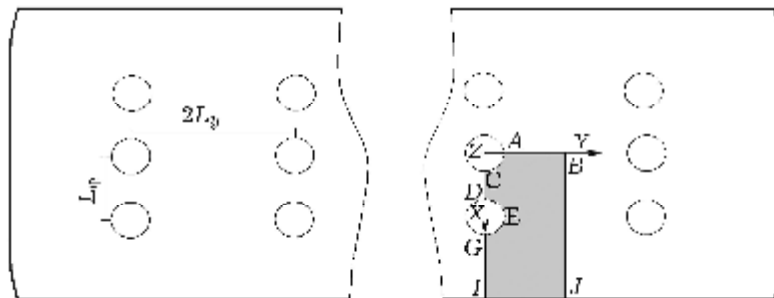


Рис. 2.

З умов симетрії розглянуто фрагмент області Ω (рис. 3). При цьому за відсутності тріщини (якщо $h=0$) на поверхнях $GIKK'IG$ і $C'CDD'$ (при $y=0$), а також $AA'B'B$ та $KLL'LK'$ (при $x=0$) задано крайові умови симетрії

$$u_y = 0 \quad (\forall(x, y, z) : (x, y, z) \in GIKK'IG \cup C'CDD'), \quad (1)$$

$$u_x = 0 \quad (\forall(x, y, z) : (x, y, z) \in AA'B'B \cup KLL'LK') \quad (2)$$

для переміщень; на внутрішній поверхні і отворах – тиск p , а на поверхні $BFJLL'J'F'B'$ – напруження $\sigma_{yy} = pR_1^2 / (R_2^2 - R_1^2)$, що відповідає впливу тиску на днища; зовнішня поверхня вільна від навантаження. За наявності тріщини сталої глибини h на поверхні $QQ'D'C'$ задано тиск p , а для точок поверхні $CQQ'D$ – умову симетрії $u_y = 0$.

Комп'ютерне моделювання процесів деформування колектора під час експлуатації виконали на основі методу скінченних елементів, застосовуючи біквадратичні ізопараметричні елементи з двадцятьма вузлами, які дають можливість точно апроксимувати криволінійні поверхні області і адекватно описують геометрію колектора з отворами [1].

Досліджували колектор зі сталі 12Х1МФ, характеристики якої прийняли відповідно до температур експлуатації [5, 6] з урахуванням деградації матеріалу (згідно з наданими замовником кривими деформування зразків металу, що відпрацювали до 300 000 год).

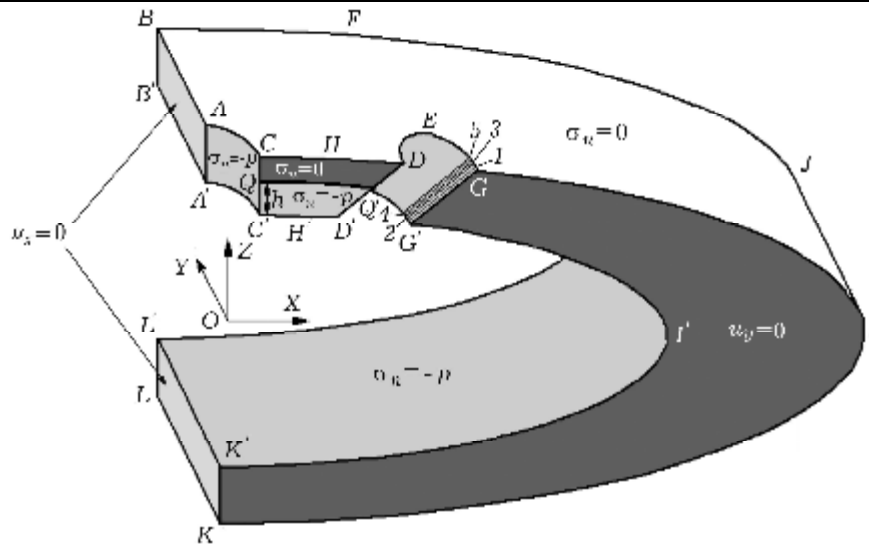


Рис. 3.

Числові результати. Можливі причини виникнення тріщин. За дії внутрішнього експлуатаційного тиску 14 МПа та температури 540°C максимальні напруження в колекторі без ушкоджень ($h=0$) виникають на внутрішній поверхні в околі точок A' та E' на отворах (рис. 3). При цьому на складний напружений стан суттєво впливають лише колові напруження (рис. 4; $t = (z - R_1) / (R_2 - R_1)$ – безрозмірна товщина), а максимальне значення інтенсивності напружень σ_I (~125 МПа) значно менше за мінімальну границю пластичності для сталі при $T = 540^\circ\text{C}$ (180 МПа) [5].

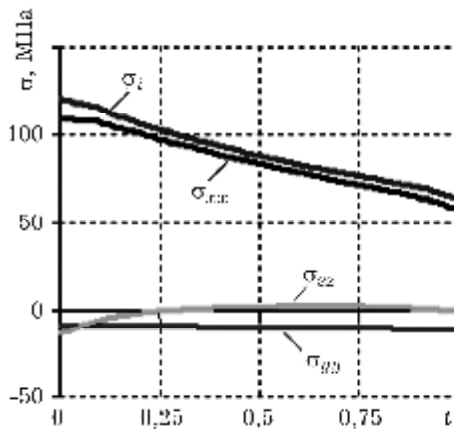


Рис. 4.

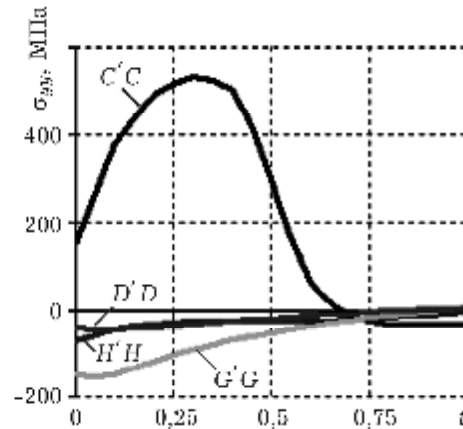


Рис. 5.

Зазначимо, що максимальні осьові напруження σ_{yy} у площині $CC'DC$ можливого виникнення тріщини за цих умов несуттєві (~45 МПа) і не можуть спричиняти появу поперечної тріщини між отворами.

Дослідження впливу перепаду температур за товщиною колектора під час стаціонарної експлуатації (коли температура на внутрішній поверхні більша, ніж на зовнішній) засвідчили, що осьові напруження σ_{yy} у площині виникнення пошкоджень стискальні (компенсують напруження розтягу від внутрішнього тиску). Тому сумарні напруження (від перепаду температури за товщиною і дії внутрішнього тиску) завжди менші, ніж зумовлені лише

внутрішнім тиском, і не можуть викликати появу поперечних тріщин між отворами (за наявності такої тріщини температурне навантаження діє в напрямі стискання її берегів).

Щоб з'ясувати причину зародження поперечних тріщин, моделювали процеси деформування в колекторі без тріщини під час зупинки енергетичного обладнання за різних режимів охолодження (інтенсивність якого під час обчислювальних експериментів залежала від коефіцієнта теплообміну). Виявили, що поперечні тріщини між отворами можуть зароджуватись через значні осьові напруження σ_{yy} , спричинені різким охолодженням ще гарячого колектора внаслідок потрапляння в окремі отвори води чи холоднішої пари під час зупинки обладнання в аварійному режимі. На рис. 5 відображено розподіли максимальних осьових напружень у площині можливого зародження поперечної тріщини, які виникають під час різкого охолодження центрального отвору.

Наскрізна тріщина. Досліджували також гіпотетично найгірші (щодо міцності) умови, коли між отворами виникає наскрізна поперечна тріщина. При цьому додатково на поверхні $CC'D'D$ задали внутрішній тиск (за моделювання колектора без пошкоджень на цій поверхні задавали умови симетрії).

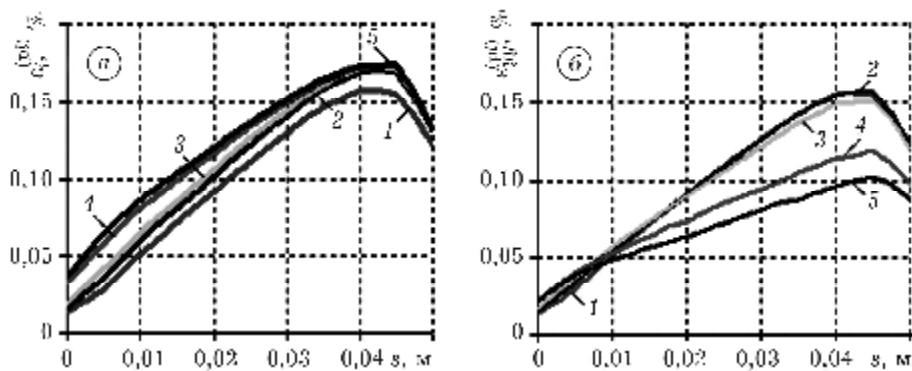


Рис. 6.

На рис. 6 наведено залишкові деформації у найнавантаженішій ділянці колектора (уздовж ліній 1–5; див. рис. 3), отримані за припущення пружно-пластичного деформування з мінімально допустимою для даного матеріалу границею пластичності 180 МПа [5] за дії внутрішнього тиску 14 МПа при 540°C. Максимальні пластичні деформації при цьому практично майже удвічі перевищують ті, за яких починається пластичне деформування. Через здатність сталі 12Х1МФ зміцнюватись (на кривих її деформування, одержаних на зразках, що відпрацювали до 300 000 год, за температур експлуатації є досить широкі зони пластичного деформування [3, 4]), НДС в околі крайніх отворів у колекторі з наскрізною тріщиною між отворами такий, що не повинен призводити до катастрофічного руйнування обладнання за відсутності тріщин за отворами.

Отже, за наявності наскрізної тріщини між отворами НДС колектора за відсутності тріщин у площині наскрізного дефекту за межами крайніх отворів практично не повинен зумовити непрогнозоване руйнування колектора.

Колектор з тріщинами сталої глибини. За дії експлуатаційного навантаження досліджували напружений стан у колекторі, на внутрішній поверхні якого між отворами є тріщина сталої глибини h . Під час обчислювального експерименту встановили концентрацію напружень в околі берега тріщини (лінія QQ' на рис. 3). Максимальні напруження та розкриття трі-

щини виникають в околі її вершини на центральному отворі (уздовж лінії CC).

Відображено розподіли інтенсивності напружень (рис. 7а) та осьових напружень (рис. 7б) у площині тріщини глибиною 25 мм (за границі пластичності сталі 290 МПа). Зауважимо, що границя пластичності практично не впливає на розподіли напружень поза відносно малим околom вершини тріщини.

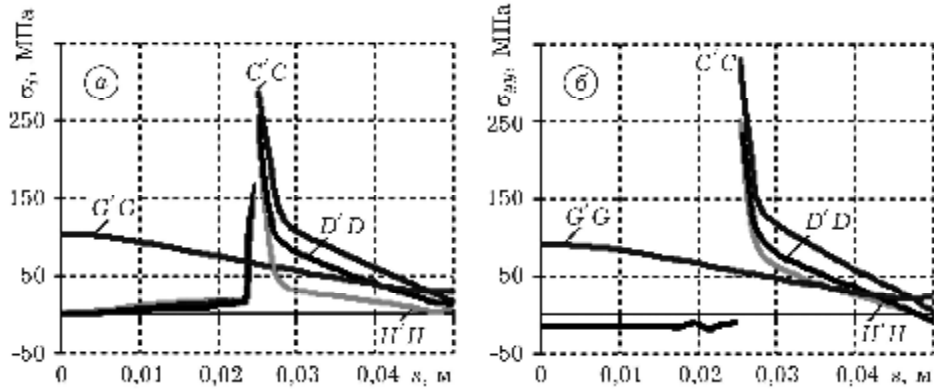


Рис. 7.

Побудовано (рис. 8) графіки розподілу напружень у найнавантаженішій ділянці колектора з поперечною тріщиною між отворами різної глибини ($h = 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45$ мм).

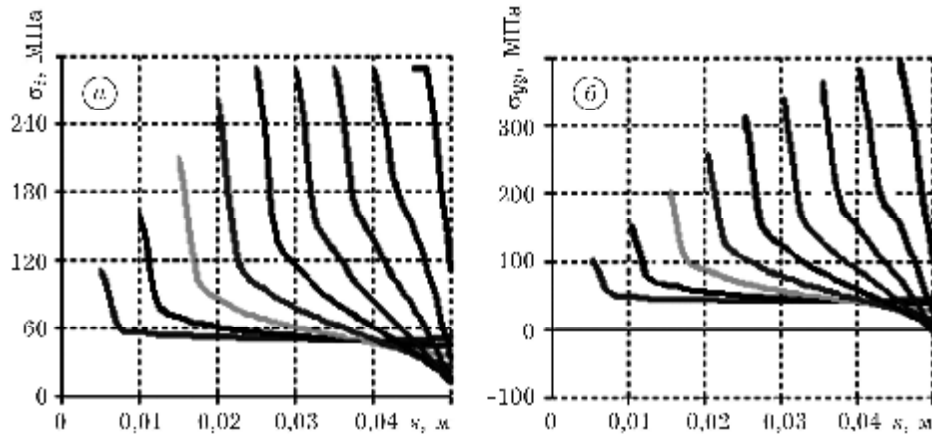


Рис. 8.

Зауважимо, що за глибини тріщини 45 мм зона пластичного деформування в околі її берега незначна, а максимальні еквівалентні пластичні деформації (біля вершини тріщини на центральному отворі) при $\sigma_T = 220$ МПа становлять 0,00373, тобто практично утричі більші, ніж на початку пластичного деформування ($\sigma_T/E = 0,00122\dots$), що загалом не вичерпує здатності матеріалу далі пластично деформуватись і зміцнюватись. Однак це зовсім не означає, що тріщина не може катастрофічно поширюватись, оскільки критерії її розповсюдження формулюють у термінах коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН), граничного значення енергії, яка притікає до вершини тріщини, чи розкриття тріщини тощо, порівнюючи їх з відповідними специфічними характеристиками матеріалу.

Наприклад, у лінійній механіці руйнування використовують КІН K як міру сингулярності напружень поблизу вершини тріщини (вважають, що

$\sigma \approx K / \sqrt{r}$, де r – віддаль від вершини) і умову початку поширення тріщини записують у вигляді [2]

$$K \geq K_1, \tag{3}$$

де K_1 – критичний КІН (характеристика матеріалу), у нашому випадку це може бути гранична інтенсивність напружень для тріщиноутворення від корозії під напруженням.

За поведінкою осьових напружень з наближенням до вершини тріщини (використовуючи співвідношення $\sigma \approx K / \sqrt{r}$) визначили КІН (для кожної з глибин тріщини) і на основі умови (3) зробили висновки про можливість катастрофічного поширення тріщин у конкретних діючих колекторах ТЕС (критичний коефіцієнт K_1 визначали за результатами експериментів на зразках, які відпрацювали майже 300000 год).

З аналізу результатів обчислень напруженого стану колектора без пошкоджень і з поперечними тріщинами між отворами за його стаціонарної експлуатації чи зупинки і охолодження стає зрозуміло, чому тріщини внаслідок тривалої експлуатації швидше поширюються біля отворів (там завжди осьові напруження, які можуть викликати поперечні тріщини, максимальні) (рис. 9).

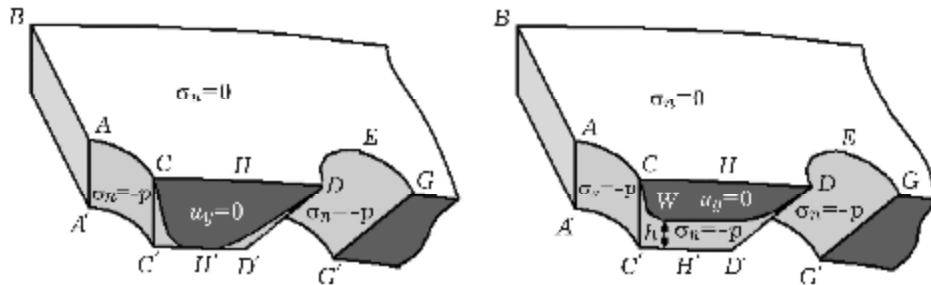


Рис. 9.

Для порівняння напружень, які виникають у колекторі з поперечною тріщиною між отворами, форма якої наближена до реальної, з відповідними в колекторі з тріщиною постійної глибини, виконали обчислювальний експеримент. За стаціонарної експлуатації проаналізували напружений стан колектора з тріщиною, глибина якої на отворах 45 мм, а в центральній частині між отворами 25 мм.

Рис. 10 ілюструє розкриття такої тріщини глибиною 25 (на лінії $H'H$) та 45 мм (на лініях $C'C$ та $D'D$). Зауважимо, що її розкриття практично не збільшилось проти розкриття відповідної тріщини сталої глибини 25 мм. Якщо тріщина між отворами сталої глибини, інтенсивність напружень на 25% менша, а осьові напруження – на 30%. Однак варто зазначити, що за експлуатаційних умов максимальні напруження виникають не в околі точок C і D (де мінімальна товщина), а в околі точки W (див. рис. 9б), де берег тріщини виходить на нульову кривину, а КІН біля її вершини уздовж лінії $H'H$ зростає лише на 15% (проти коефіцієнта для тріщини сталої глибини 25 мм).

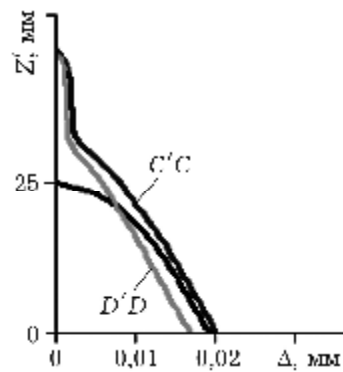


Рис. 10.

Висновки. На основі комп'ютерного моделювання досліджено придатність до подальшої експлуатації колекторів первинного пароперегрівача

котла Бурштинської ТЕС з урахуванням деградації матеріалу та експлуатаційних пошкоджень. Зроблено висновок, що під час експлуатації у стаціонарному режимі ($p = 14$ МПа; $T = 540^\circ\text{C}$) максимальні напруження удвічі менші за границю пластичності матеріалу, тому не можуть спричинити тріщини у колекторі. Зародження і поширення поперечних тріщин у тілі колектора між отворами слід пов'язувати зі значними температурними градієнтами за товщиною колектора у нестационарних режимах різкого охолодження (наприклад, за аварійної зупинки котла, відхилень у режимах охолодження).

За наявності наскрізної поперечної тріщини між отворами (що є найгіршим варіантом) і відсутності тріщин за межами крайніх отворів подальше непрогнозоване руйнування колектора неможливе (згідно з наданими замовником кривими деформування зразків металу, що відпрацювали до 300 000 год, здатність металу до подальшого пластичного деформування і зміцнення у найнавантаженишій зоні у цьому випадку далеко не вичерпано).

Використана методика математичного моделювання дає можливість визначити коефіцієнт інтенсивності напружень для кожної з глибин тріщин. За критичним значенням коефіцієнта K_I , обчисленого за результатами випробувань зразків, які відпрацювали відповідну кількість годин, можна зробити висновки про глибину тріщини, за якої можливий її швидкий ріст, а отже, подальша експлуатація колектора небажана.

Порівняльний аналіз результатів виявив, що границя пластичності матеріалу практично не впливає на розподіли напружень поза відносно малим околom вершини тріщини. Розкриття тріщини теж дуже слабо залежить від неї.

Встановлено, що максимальні напруження у колекторі за наявності тріщин між отворами з нульовою глибиною в середній частині за стаціонарного режиму роботи незначно (приблизно на 15 %) вищі, ніж у колекторі без пошкоджень.

1. *Моделювання та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я. Й. Бурака, Р. М. Кушніра. Т.4: Термомеханіка намагнечуваних електропровідних термочутливих тіл / О. Р. Гачкевич, Б. Д. Дробенко. – Львів: СПОЛОМ, 2010. – 256 с.*
2. *Панасюк В. В. Механіка квазіхрупкого руйнування матеріалів. – К.: Наук. думка. 1991. – 416 с.*
3. *Протокол № 586. Випробування на статичний розтяг за підвищеної температури металу вирізки з пароперепускної труби в парозбірну камеру блока № 11 Бурштинської ТЕС. ВАТ "Західенерго". Відділ організації технічного діагностування устаткування (дозвіл № 1106.04.30-74.30.0). Грудень 2007 р.*
4. *Протокол № 605. Про механічні властивості та мікроструктуру металу вирізки з пароперепускної труби турбіни ст. № 5 Добротвірської ТЕС. ВАТ "Західенерго". Відділ організації технічного діагностування устаткування (дозвіл № 1106.04.30-74.30.0). Січень 2008 р.*
5. *Свойства сталей и сплавов, применяемых в котлотурбостроении. Руководящие указания / Л. Я. Либерман, М. И. Пейсихис. – Ленинград: группа полиграф. работ. ОНТИ ЦКТИ им. И.И. Ползунова. – 1966. – Выпуск 16, часть 1. – С. 220.*
6. *ТУ 14-3-460: 2009/ ТУ У 27.2-05757883-207: 2009. Труби сталеві безшовні для парових котлів та трубопроводів.*

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОЛЛЕКТОРОВ ПЕРВИЧНОГО ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯ КОТЛА С ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

На основе уравнений неадиабатической термоупругопластичности исследовано напряженно-деформированное состояние коллекторов первичного пароперегревателя котла ТП-100, 100 А с трещиноподобными повреждениями в условиях эксплуатации. Установлено, что зарождение и распространение поперечных трещин между отверстиями вызвано значительными температурными градиентами по толщине коллектора в нестационарных режимах резкого охлаждения.

При наличии сквозной поперечной трещины между отверстиями напряженно-деформированное состояние коллектора в условиях эксплуатации является таким, что при отсутствии трещин за пределами крайних отверстий практически исключено его дальнейшее непрогнозируемое разрушение. Полученные результаты использованы при оценке возможности продления сроков эксплуатации коллекторов на конкретных ТЭС.

EVALUATION OF THE POSSIBILITY OF FURTHER USE OF COLLECTORS OF THE PRIMARY STEAM SUPERHEATERS WITH OPERATING DAMAGES

On the basis of the nonisothermal thermoelastic-plasticity equations, a study of the stress-strain state of the collectors of the primary superheater of the boiler TP-100, 100A, with crack-like damage subjected to operational conditions, was performed. It is shown that the origin and spreading of transverse cracks between the holes should be associated with significant temperature gradients along the thickness of the collector in nonstationary modes of abrupt cooling. In the presence of a transverse cross-sectional crack between the holes, the stress-strain state of the collector under operating conditions is such that in the absence of cracks beyond the extreme holes, virtually eliminates further unpredictable destruction of the collector. The obtained results are used in assessing the possibility of extending the life of collectors at specific power plant is studied.

Ін-т прикл. проблем механіки і математики
ім. Я. С. Підстригача НАН України, Львів

Одержано
07.10.18