

**Висновки.** Проаналізовано вплив низки факторів на тріщиностійкість внутрішньореакторних компонентів. Побудовано рівняння поширення тріщини в металах за впливу високої температури та нейтронного опромінення за плоско напруженого стану. Рівняння розвинуто на випадок плоскої тріщини в об'ємному тілі. За допомогою нього пораховано динаміку поширення тріщини в шахті реактора ВВЕР-1000. Вказано на важливість врахування можливих дефектів при продовженні проектного ресурсу реактора.

**Conclusions.** The influence of various factors on crack resistance of in-pile components was analyzed. The equation of crack propagation in metals influenced by high temperature and neutron irradiation under plane strain were obtained. Equation was modified for plain crack in spatial body case. It was used to calculate crack propagation dynamic WWER-1000 reactor core barrel. It was indicated that taking into account possible defects during reactor service life extension is very important.

#### Список використаної літератури

1. Махненко, О.В. Перераспределение остаточных сварочных напряжений во внутрикорпусной шахте реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации [Текст] / О.В. Махненко, Е.А. Великоиваненко, И.В. Мирзов // Автоматическая сварка. – 2014. – № 11. – С. 1 – 7.
2. Моделирование разрушений материалов при длительном статическом нагружении в условиях ползучести и нейтронного облучения [Текст] / Б.З. Марголин, А.Г. Гуленко, А.А. Бучатский, С.М. Балакин // Проблеми Міцності. – 2006. – 384, № 6. – С. 5 – 16.
3. Иванова, В.С. Разрушение металлов. Серия «Достижения отечественного металловедения» [Текст] / В.С. Иванова. – М.: «Металлургия», 1979. – 168 с.
4. Черепанов, Г.П. Механика разрушения [Текст] / Г.П. Черепанов. – М.-Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 872 с.
5. Экспериментальные исследования радиационной ползучести нержавеющей сталей [Текст] / В.А. Красносельов, А.Н. Колесников, В.И. Прохоров, З.Е. Островский, А.В. Голубенко, В.С. Неустроев – Димитровград: НИИАР, 1981. – 14 с.
6. McMeeking, R.M. Finite deformation analysis of crack-tip opening in elastic-plastic materials and implications for fracture / McMeeking R.M. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1977. – № 25 (5). – P. 357 – 381.
7. Andreikiv, O.Ye. High temperature creep crack growth in metals under neutron irradiation (overview) / Andreikiv O.Ye., Kukhar B.Z., Dolinska I.Ya. // Materials Science. – 2015. – № 3. – P. 7 – 16.
8. Chopra, O.K. Crack growth rates and fracture toughness of irradiated austenitic stainless steels in BWR environments / Chopra O.K., Shack W.J. – Argonne: Argonne National Laboratory, 2008. – 142 p.

Отримано 01.10.2015

УДК 620.171.2; 620.187.22

**Леся Свірська; Галина Кречковська, канд. техн. наук;  
Олександра Студент, докт. техн. наук**

*Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України*

## **ЦИКЛІЧНА ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ 12Х1МФ РІЗНИХ ЗОН ГИНУ ПАРОГОНУ ТЕС ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

**Резюме.** Гини головних парогонів ТЕС характеризуються неоднаковою деформацією металу різних зон (розтягнутої, нейтральної, стисненої) на етапі їх виготовлення. Як результат, механічні характеристики металу цих зон після експлуатаційної деградації відрізняються. Досліджено втомний ріст тріщини сталі 12Х1МФ різних зон гину після  $1,3 \cdot 10^5$  год її експлуатації на парогоні ТЕС. Показано,

що найменш деградованим є метал прямої ділянки гину. Метал зі стисненої зони виявив найнижчий опір поширенню втомної тріщини, що є ознакою найсильнішої деградації, яку зв'язали з виникненням дефектів термічної втоми. Закриття втомної тріщини в найбільшій мірі проявилася у стисненій зоні гину, що зв'язали з виникненням розсіяної пошкодженості металу внаслідок термічної втоми.

**Ключові слова:** гин парогону ТЕС, теплотривка сталь, деградація, циклічна тріщиностійкість, фрактографічні особливості руйнування.

**Lesya Svirska, Halyna Krechkovska, Oleksandra Student**

## **FATIGUE CRACK GROWTH RESISTANCE OF THE 12Kh1MF STEEL FROM DIFFERENT ZONES OF STEAM PIPELINE BENDS OF TPP AFTER LONG TERM OPERATION**

**Summary.** *Hard temperature-power operating condition of the steam pipeline (vapor pressure up to 14 MPa, temperature – up to 565 °C and a large number of shutdowns of the technological process), and long-term influence of an aggressive hydrogenating environment on stressed metal promote degradation of its structure and worsening of the mechanical properties, which ensured their workability at the beginning of operation. Therefore, the diagnostics of the technical state of steam pipeline bends directed on providing the reliability of their operation does not lose relevance to the power system of Ukraine with critically wear of equipment.*

*The 12Kh1MF steel from different zones of pipe bend from main steam pipelines after  $\sim 13 \times 10^4$  h operation was investigated. During bend manufacturing the deformation of metal from its different zones (stretched, neutral and compressed) is not the same. As a result the properties of degraded metal from these zones are different too. The nominal and effective fatigue crack growth diagrams of the metal of stretched, neutral and compressed zones and straight pipe were received. Thresholds fatigue crack growth resistances were defined too. It is shown that the effective threshold fatigue crack growth resistance of metal with compressed zone is lower compared with other zones. High sensitivity of local fracture mechanics parameters to the metal degradation and their ambiguous changes in various zones at the same service duration and conditions were proved. It was shown that metal from compressed zone was the most degraded because its fatigue threshold levels were the least. It was explained by an appearance of dissipated intergranular damages in metal under the influence of thermal fatigue. Such intergranular elements on the fracture surface facilitate the fatigue crack growth and cause the strongest crack closure effect under fatigue test of degraded metal from compressed zone of bend.*

**Key words:** *steam pipeline bend of thermal power plants, heat resistant steel, degradation, fractographical features, cycle crack growth.*

**Постановка проблеми.** Гини парогонів ТЕС відносять до небезпечних елементів у системі трубопроводів [1 – 5]. Останнім часом відчутно зросла кількість їх пошкоджень після тривалої експлуатації. Ці елементи експлуатуються за жорстких температурно-силових умов, а через відмінність геометрії перерізу гину від властивого прямій ділянці труби та пов'язаними з цим особливостями напружено-деформованого стану експлуатаційні умови для гинів стають ще жорсткішими. Зокрема, це циклічна зміна напружень у діаметральних перерізах труб під час їх експлуатації, яка спричиняє малоциклову втому металу, і тому гнуті ділянки пошкоджуються найчастіше [6]. Імовірність виникнення руйнування в тій чи іншій зоні гину в основному пов'язують з напруженим станом. Досвід експлуатації парогонів свідчить, що осьові тріщини повзучості найчастіше виникають у розтягнених зонах (РЗ) гинів [2, 7]. Часто спостерігають також глибокі тріщини від внутрішньої поверхні у нейтральній їх зоні (НЗ), виникнення яких пов'язують із впливом технологічного середовища. В околі нейтральної лінії гину після значної кількості пусків-зупинок технологічного процесу фіксують зародження та поширення тріщин термічної втоми [4, 8 – 10]. Важливим аспектом оцінювання реального технічного стану гинів парогонів ТЕС є дослідження циклічної тріщиностійкості (ЦТ) експлуатованого металу. Отже, кінетичні особливості росту втомних тріщин в експлуатованому металі за низьких швидкостей їх росту

(близьких до порогових значень) є особливо чутливими до зміни стану металу внаслідок деградації.

Сумісний вплив робочої температури, напружень та активного робочого середовища, яким є водяна пара, під час тривалої експлуатації конструкційних сталей на реальних об'єктах теплоенергетики, зокрема на парогонках ТЕС, зумовлює структурно-фазові перетворення в металі [11]. Параметри тріщиностійкості, які характеризують опір руйнуванню в області, сумірній з елементами структури, зазвичай відображають ці структурні перетворення [12]. Висока локальність показників ЦТ забезпечує їх високу чутливість до зміни стану деградованого в процесі експлуатації металу, особливо на низьких близьких до порогових значень  $\Delta K$ . Таким чином, дослідження сукупного впливу на ріст втомної тріщини тривалої високотемпературної експлуатації у наводнювальному середовищі (пара) за різного напружено-деформованого стану у різних зонах гину труби (РЗ, НЗ, СЗ) та на його ПД, який зумовлений відмінністю їх робочих перерізів і відповідно різним впливом робочого тиску пари в трубі, термічних напружень, різного роду згинальних і крутних моментів тощо, що могли виникати під час експлуатації парогонів ТЕС, має важливе значення для розуміння специфіки їх деградації та пошкоджень.

**Мета роботи** – дослідити ЦТ та особливості механізму руйнування сталі 12Х1МФ різних зон гину та його прямої ділянки (ПД) після  $1,3 \cdot 10^5$  год її експлуатації на головному парогоні ТЕС.

**Об'єкт та методика дослідження.** Досліджували сталь 12Х1МФ демонтованого гину головного парогону після  $\sim 1,3 \cdot 10^5$  год експлуатації і 817 зупинок блоку ТЕС. Гин зняли з експлуатації, оскільки на зовнішній його поверхні в межах стисненої зони (СЗ) виявили поверхневі тріщини. Параметри експлуатації гину: тиск пари 14 МПа, температура 540°C. Зовнішній діаметр труби на прямій ділянці головного парогону становив 273 мм за товщини стінки 36 мм, кут загинання гину 90°, радіус кривизни 1,0 м. Після експлуатації гин у радіальному перерізі мав форму деформованого еліпса з товщиною стінки труби 39,5 мм у СЗ та 33 мм у розтягненій його зоні (РЗ).

Характеристики ЦТ металу різних зон гинів визначали за кімнатної температури на осьових балкових зразках, згідно з методичними рекомендаціями [13]. Балкові зразки (10×18×160 мм) вирізували таким чином, щоб ріст тріщин у них відбувався в радіальному напрямі (поперек стінки труби від її зовнішньої до внутрішньої поверхні). Адже експлуатаційні дефекти виявили саме на зовнішній поверхні труби в СЗ гину. Зразки навантажували за схемою консольного згину частотою 10 Гц за асиметрії  $R = 0,05$ . Номінальні  $da/dN - \Delta K$  та ефективні  $da/dN - \Delta K_{eff}$  кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) будували як залежності швидкості росту втомних тріщин  $da/dN$  від номінального  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  та ефективного  $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl}$  розмахів коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН). Рівень КІН  $K_{cl}$ , що спричинений закриттям тріщини і відповідає переходу від закритої до відкритої тріщини в циклі навантаження, визначали методом податливості. Порогові значення розмаху КІН (номінального  $\Delta K_{th}$  та ефективного  $\Delta K_{th, eff}$ ), що відповідають  $da/dN \approx 10^{-10}$  м/цикл, визначали з відповідних КДВР.

Для фрактографічних досліджень використали злами зразків, попередньо випробуваних на ЦТ за припорогової швидкості росту тріщини. Фрактографічні особливості досліджували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

**Основні результати дослідження.** Для оцінювання міри деградації металу різних зон гину головного парогону ТЕС порівняли їх номінальні та ефективні КДВР (рис. 1). Ефект деградації найочевидніший за припорогової швидкості росту втомної тріщини. Тому для оцінювання ефекту деградації важливо порівняти номінальні  $\Delta K_{th}$  та

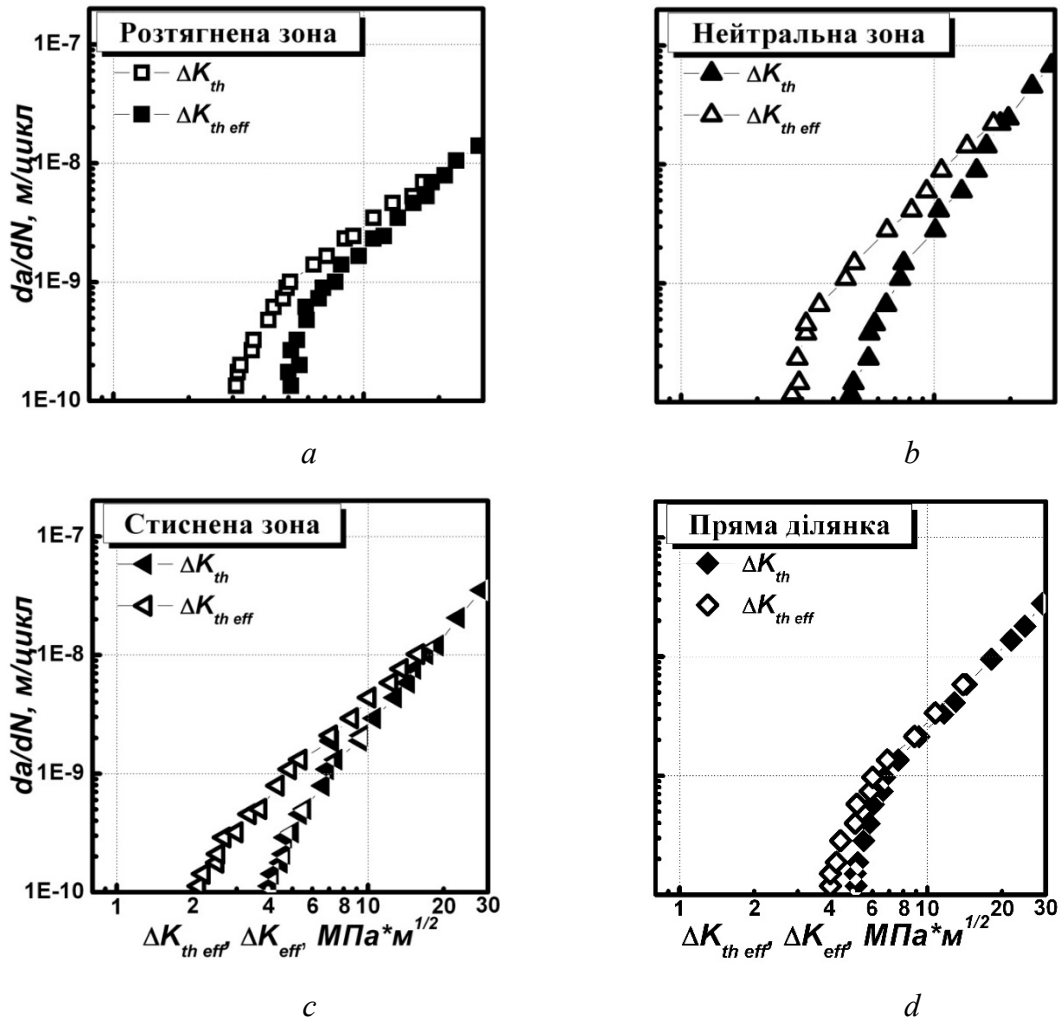
ефективні  $\Delta K_{th\,eff}$  пороги ЦТ металу різних зон гину. Виявилося, що тривалий вплив експлуатаційних чинників по-різному впливає на опір втомному росту тріщин металу різних зон гину та його ПД. Найвищими є порогові значення ЦТ  $\Delta K_{th} = 5,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  та  $\Delta K_{th\,eff} = 4,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  металу ПД. Крім того, саме для металу ПД різниця між номінальним  $\Delta K_{th}$  та ефективним  $\Delta K_{th\,eff}$  пороговими значеннями виявилася найменшою. Це є ознакою того, що ефект закриття втомної тріщини для ПД гину є найслабшим. Отже, інтенсивність впливу експлуатаційних чинників на метал цієї ділянки є найслабшим і тому на цій ділянці метал найменш деградований. Найнижчі порогові значення КІН отримали для металу СЗ гину парогону ТЕС ( $\Delta K_{th} = 4,0 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ , а  $\Delta K_{th\,eff} = 2,1 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ ). Це свідчить про те, що метал цієї зони деградував найсильніше. За пороговими рівнями ЦТ метал РЗ та НЗ гину посідають проміжні положення. Отже, попри ідентичні умови експлуатації металу всіх зон гину і його ПД порогові значення ЦТ (номінальні й ефективні) металу всіх зон гину виявилися нижчими, ніж ПД.

Загалом парогони ТЕС експлуатуються за впливу височастотних низькоамплітудних циклічних навантажень, спричинених перепадами тиску пари, та за значної асиметрії циклу від статичних навантажень, створюваних і тиском пари, і термічними напруженнями через градієнт температури. За таких умов мікроструктурні дефекти в металі (складнолеговані карбіди вздовж меж зерен, неметалеві включення, які втратили когезивний зв'язок з матрицею тощо) можуть ініціювати зародження мікротріщин під час експлуатаційних зупинок технологічного процесу, що полегшує пошкодження металу на субструктурному і структурному рівнях.

Вважали, що отримані зміни характеристик ЦТ металу різних зон гину парогону спричинені, з одного боку, змінами вихідної структури шляхом виділення та коагуляції карбідів уздовж меж зерен, а з іншого, – з одночасним формуванням мікропошкоджень [14]. Загалом, за меншої, ніж розрахункова тривалості експлуатації головних парогонів, визначальним чинником впливу на деградацію вважають термічну втому, а за більшої – повзучість. Адаже за повзучості виникнення пор та руйнування перетинок між ними з утворенням міжзеренних тріщин в осьовому перерізі труб відбувається впродовж тривалого часу, на який і орієнтуються під час розрахунку планового ресурсу. Тоді як за термічної втоми через зупинки технологічного процесу мікродефекти втомного походження в діаметральному перерізі труби можуть виникати значно швидше, а наводнювання металу парогону полегшуватиме їх злиття між собою. Тенденції, виявлені за випроб на ЦТ, підтвердили результати, отримані за випроб на статичну тріщиностійкість та ударну в'язкість зразків з різних зон гину [15]. Зокрема, деградація металу всіх зон гину відбувається інтенсивніше, ніж його ПД. Чутливість до деградації металу за ефективним пороговим рівнем ЦТ вища, ніж за номінальним. Метал СЗ гину виявив найнижчий опір поширенню втомної тріщини, що є ознакою найсильнішої його деградації, яку зв'язали з виникненням дефектів термічної втоми, які й спричинили найбільше закриття втомної тріщини у цій зоні гину.

Для з'ясування причин деградації металу різних зон гину, експлуатованих у реальному технологічному процесі, використано фрактографічний аналіз зламів зразків після випроб на ЦТ, який дає можливість виявити та проаналізувати відмінності розсіяної пошкодженості металу різних зон гину в часі експлуатації та впливу на цей процес водню як робочого середовища та деформування на етапі виготовлення гину. Відомо [16 – 17], що фрактографія дає змогу вирішувати ряд завдань: по-перше, ідентифікувати механізми руйнування з урахуванням виду навантаження, а по-друге, виявити характер впливу різних чинників, зокрема умов навантаження і властивостей матеріалу на процес руйнування. Тому нижче проаналізовано фрактографічні особливості росту втомної тріщини для металу різних зон гину (нейтральної,

розтягнутої й стисненої) та його прямої ділянки. Виявлено, що в металі прямої ділянки на припороговій ділянці КДВР переважало типове для такого класу сталей кризьзеренне руйнування з формуванням фестонів, перетинки між якими руйнувалися з ознаками значної пластичної деформації (рис. 2 а), а за вищої швидкості росту тріщини і вищої роздільної здатності поперек фестонів виявляли чіткі в'язкі втомні борізки, перпендикулярні до магістрального напрямку росту тріщини. Отже, в цьому випадку незначний ефект закриття тріщини можна зв'язати з високою залишковою пластичністю та шорсткістю поверхні зламу, зв'язану зі сходинками на переходах між фестонами.

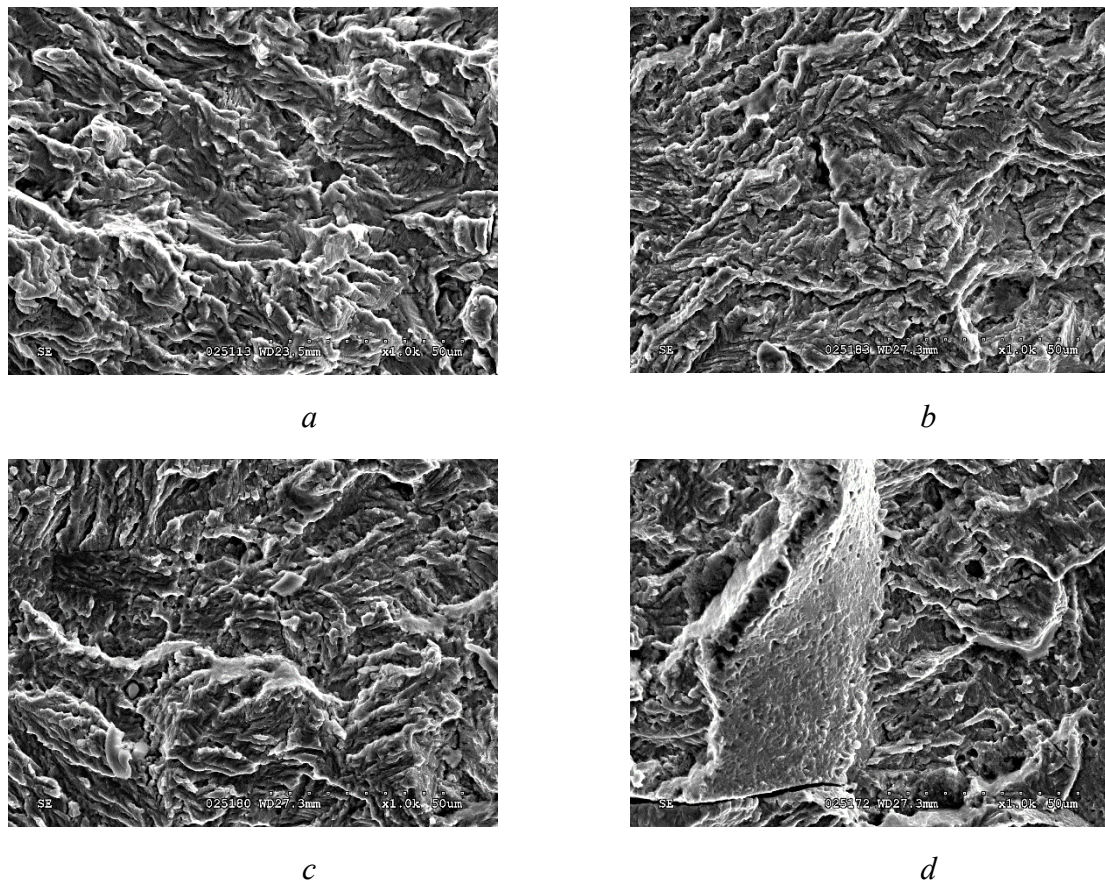


**Рисунок 1.** Номінальні (темні) та ефективні (світлі символи) кінетичні діаграми втомного росту тріщини в сталі 12Х1МФ з розтягнутої (а), нейтральної (б), стисненої (в) зон гину та його прямої ділянки (д) після  $1,3 \times 10^5$  год експлуатації на головному парогоні ТЕС

**Figure 1.** Nominal (black) and effective (white marks) kinetics diagrams of the fatigue crack growth for the 12Kh1MF steel from stretching (a), neutral (b) and compression (c) zones of bend and straight pipe (d) after  $1,3 \cdot 10^5$  hours of operation in the steam pipeline system of TPP

На зламах металу НЗ, РЗ та СЗ спостерігали менш інтенсивні сліди пластичного деформування під час руйнування перетинок між суміжними фестонами (рис. 2). Через появу крихкіших елементів на зламах (рис. 2b-d) порівняно з ПД зробили висновок, що за фактографічними ознаками опір руйнуванню металу цих зон значно

нижчий. А на припороговій ділянці зламу СЗ спостерігали навіть невеликі за площею фасетки міжзеренного відколу (рис. 2 *d*), значно крихкіші втомні борідки, декоровані мікротріщинами, та карбіди вздовж меж зерен, які ослабили їх і спричинили значне вторинне мікророзтріскування, завдяки якому відбулася фрагментація металу на мікроструктурному рівні. Зрозуміло, що міжзеренні фасетки, які виступають над загалом плитким утомним зломом (особливо багато їх у металі СЗ гину), забезпечили вищу (порівняно з іншими зона гину) шорсткість поверхні і тому їх вважали відповідальними за найбільший ефект ЗТ металу СЗ гину.



**Рисунок 2.** Фрактографічні особливості руйнування на ділянці припорогового росту втомних тріщин (швидкість  $\sim 10^{-9}$  м/цикл) у металі ПД (*a*), НЗ (*b*), РЗ (*c*), СЗ (*d*) гину парогону

**Figure 2.** Fractography features at near threshold fatigue crack grows (rate  $\sim 10^{-9}$  m/cycle) in metal from straight pipe (*a*), neutral (*b*) stretching (*c*), and compression (*d*) zones of steam pipeline bend

Чітко окреслені сліди від карбідів на міжзеренних фасетках зламу експлуатованої сталі СЗ гину (рис. 2*d*) свідчать про те, що впродовж експлуатації відбулася їх декогезія від матриці, що, безумовно, ослабило ці межі. Як наслідок, на зламі отримали на фоні міжзеренних фасеток рельєф з дрібних ямок, причому розміри цих ямок відповідали розмірам карбідів. Виступи і впадини від міжзеренних фасеток на спряжених поверхнях зламу СЗ гину хоч невисокі й неглибокі (до 50 мкм), але їх кількість є достатньою, щоб внаслідок мікророзсувів у вершині тріщини в циклі навантаження і їх неспівпадіння істотно посилювався ефект ЗТ. Отже, ЗТ в експлуатованій сталі СЗ гину спричинене шорсткістю поверхні внаслідок міжзеренних пошкоджень, які виникли як результат попередньої трансформації структури сталі з виділенням і коагуляцією карбідів уздовж меж зерен ще на етапі її експлуатації з відповідним ослабленням меж зерен і можливістю міжзеренного руйнування внаслідок

термовтоми під час частих зупинок технологічного процесу. Зустрічаючись на шляху росту втомної тріщини, вони знижують опір її поширення і водночас створюють рельєф, який спричиняє ЗТ.

**Висновки.** З використанням порогових характеристик циклічної тріщиностійкості однозначно показано не лише інтенсивнішу деградацію металу всіх зон гину порівняно з його прямою ділянкою, але й можливість нетипової інтенсивнішої деградації металу стисненої зони гину порівняно з розтягнутою, що зв'язали з впливом термічних напружень у цій зоні гину під час зупинок технологічного процесу. Фрактографічно це проявилось появою фрагментів міжзеренного руйнування на фоні доволі плиткого утомного рельєфу зламів за припорогових швидкостей росту втомної тріщини, які спричиняють високе закриття тріщини, пов'язане зі зростанням шорсткості поверхонь зламів зразків металу стисненої зони гину.

**Conclusion.** Using the characteristics of the near threshold fatigue crack growth resistance not only intensive degradation of metal from different zones of bend pipe compared with direct pipe, was shown but also the possibility of more intensive degradation of metal from the compressed zone of bend compared to stretched one. It was explained by the influence of thermal stresses in this zone during the shut-down of process. Fractography resulted in the appearance of the intergranular facets on the relatively flat background of fatigue relief of surface under the near-threshold fatigue crack growth rate which cause the cracks closure effect associated with increasing of surface roughness of the fractures surface of the metal from the compressed zone of bend.

#### Список використаної літератури

1. Соломаха, М.А. О надежности гибов паропроводов из стали 12X1МФ [Текст] / М.А. Соломаха, С.И. Макобоцкий // Электрические станции. – 1988. – № 4. – С. 15 – 19.
2. Кругасова, Е.И. Надежность металла энергетического оборудования [Текст] / Е.И. Кругасова. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
3. Бугай, Н.В. Повышение надежности котлов электростанций. [Текст] / Н.В. Бугай, Г.В. Мухопад, А.Я. Красовский. – К.: Техника, 1986. – 176 с.
4. Нахалов, В.А. Надежность гибов труб теплоэнергетических установок [Текст] / В.А. Нахалов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
5. Кравченко, В.П. Эрозионно-коррозионный износ гибов трубопроводов на блоках АЭС с ВВЭР-1000 [Текст] / В.П. Кравченко // Восточно-Европейский журнал передовых. – 2006. – № 4/3. – С. 65 – 68.
6. Туляков, Г.А. Конструкционные материалы для энергомашиностроения [Текст] / Г.А. Туляков, Н.В. Скоробогатых, В.В. Гриневский. – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
7. Станюкович, А.В. Пути повышения ресурса и надежности гибов паропроводов ТЭЦ [Текст] / А.В. Станюкович // Тр. ЦКТИ. – 1988. – 246 с.
8. Антикайн, П.А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов [Текст] / П.А. Антикайн. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
9. Мелехов, Р.К. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання [Текст] / Р.К. Мелехов, В.І. Похмурський. – К.: Наук. думка, 2003. – 382 с.
10. Слободчикова, Н.И. Анализ и обобщение случаев разрушения гибов необогреваемых труб котлов и паропроводов [Текст] / Н.И. Слободчикова // Тр. ВТИ. – 1981. – 29. – С. 18 – 23.
11. Effect of high-temperature degradation of heat-resistant steel on mechanical and fractographic peculiarities of fatigue crack growth / O.Z. Student, W. Dudzinski, H.M. Nykyforchyn, A. Kaminska // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1999. – 34, № 4. – С. 49 – 58. (Effect of high-temperature degradation of heat-resistant steel on the mechanical and fractographic characteristics of fatigue crack growth / O.Z. Student, W. Dudziński, H.M. Nykyforchyn, A. Kamińska // Materials Science. – 1999. – 35, 4. – P. 499 – 508.)
12. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: 4 т. [Текст]; под общ. ред. Панасюка В.В. – Киев: Наук. думка, 1988 – 1990. – Т. 4.: Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив, С.Я. Ярема, Г.Н. Никифорчин, Н.А. Махутов, М.М. Стадник. – 1990. – 680 с.
13. РД 50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении [Текст] – М.: Издательство стандартов. – 1983. – 96 с.

14. Оцінювання впливу технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС [Текст] / Г. Никифорчин, О. Студент, Г. Кречковська, А. Марков // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – 46, № 2. – С. 42 – 54. (Evaluation of the influence of shutdowns of a technological process on changes in the in-service state of the metal of main steam pipelines of thermal power plants / H.M. Nykyforchyn, O.Z. Student, H.V. Krechkov's'ka, A.D. Markov // Materials Science. – 2010. – 46, 2. – P. 177 – 189).

15. Свірська, Л.М. Вплив попередньої пластичної деформації металу в різних зонах гину на його властивості після експлуатації на головному парогоні ТЕС [Текст] / Л. Свірська, О. Студент, П. Сидор // Вісник Тернопільського націон. техн. університету. – 2011. – Ч. 2, спецвип. – С. 97 – 105.

16. Студент, О.З. Вплив тривалої експлуатації сталі 12Х1МФ з різних зон гину парогону ТЕС на її механічні характеристики [Текст] / О.З. Студент, Л.М. Свірська, І.Р. Дзіоба // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2012, – 48, № 2. – С. 111 – 118. (Influence of the long-term operation of 12Kh1M1F steel from different zones of a bend of steam pipeline of a thermal power plant on its mechanical characteristics / O.Z. Student, L.M. Svirs'ka, I.R. Dzioba // Materials Science – 2012. – 48, 2. – P. 239 – 246.)

17. Кречковська, Г.В. Фрактографічні ознаки механізмів транспортування впливу водню в конструкційних сталях [Текст] / Г.В. Кречковська // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2015. – № 4. – С. 67 – 70.

18. Brittle-Fracture Resistance of the Metal of Hyperboloid Gridshell Shukhov Tower / Krechkov's'ka H.V., Student O.Z., Kutnyi A.I., Nykyforchyn H.M., Sydor P.Ya. // Materials Science – 2015. – 50, 4. – P. 578 – 584.

Отримано 21.09.2015

УДК 622.4.076:620.197.6

**Мирослава Полутренко, докт. техн. наук;  
Любомир Побережний, докт. техн. наук; Андрій Станецький**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу*

## **ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ БІОКОРОЗІЙНИХ РУЙНУВАНЬ ПІДЗЕМНИХ ГАЗОПРОВОДІВ**

**Резюме.** У процесі тривалої експлуатації підземних газопроводів у певних регіонах України формується екологічна небезпека, зумовлена руйнуванням трубопроводів з причин ґрунтової та мікробіологічної корозії. Корозію металів у підземному середовищі найчастіше пов'язують з життєдіяльністю бактерій циклу сірки: сульфатвідновлювальних бактерій, здатних окиснювати сірку та її сполуки до сульфатної кислоти, різко знижуючи рН середовища. Проведено комплекс досліджень із визначення корозійної активності ґрунтів на досліджуваних ділянках траси прокладання магістральних газопроводів Південного та Західного регіонів. Встановлено, що ґрунти відносяться до ґрунтів із середнім та високим ступенем корозійної активності, що призводить до інтенсифікації корозійних процесів підземних газопроводів. Наявність сульфат-йонів у водних витяжках ґрунту на ділянці траси «відвід до ГРС м. Саки», на відмітках ПК 6+25, проба 4 і ПК 16+57, проба 5 та досліджуваній ділянці довжиною 150 м МГ «Пасічна-Долина» спричиняє розвиток мікробіологічної корозії з участю сульфатвідновлювальних бактерій (СВБ). Для оцінювання ризику розвитку біокорозійних руйнувань підземних металоконструкцій, найважливішими з яких є нафтогазопроводи, необхідним є проведення комплексу досліджень, який включає аналіз гранулометричного складу ґрунту, кислотності, вологості, питомого опору ґрунту, наявності сульфат-йонів, титру анаеробних та аеробних мікроорганізмів.

**Ключові слова:** корозія газопроводів, сульфатвідновлювальні бактерії, корозійна активність ґрунтів.

**Miroslava Polutrenko, Lubomyr Poberezhny, Andriy Stanetsky**

## **RISK ASSESSMENT OF BIOCORROSION FRACTURE OF UNDERGROUND PIPELINES**

**Summary.** During long-term operation of underground pipelines in certain regions of Ukraine formed environmental hazards are formed, caused by the destruction of pipelines because of soil and microbiological