

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

Л. М. Свірська, Г. В. Кречковська, О. З. Студент

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

Steam pipeline bends of TPP are characterized by unequal deformation during fabrication of metal from different zones (stretched, neutral, compressed) compare with the straight part of pipe. As a result, the mechanical properties of metal from these zones may be too different. The fatigue crack growth resistance of the 12Kh1MF steel from different zones of pipeline bend after operational degradation during the $1,3 \cdot 10^5$ hours were investigated. It was shown the metal from compressed zone is most degraded and from the straight part of bend is least degraded. It was explained by an appearance of dissipated damages of the metal under the influence of thermal fatigue.

Гини парогонів ТЕС відносять до небезпечних елементів у системі трубопроводів [1-5]. Останнім часом відчутно зросла кількість пошкоджень, які виявляють на гинах парогонів після їх тривалої експлуатації. Ці елементи експлуатуються за жорстких температурно-силових умов, а через відмінність геометрії перерізу гину від прямої ділянки 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]. Залежно від умов використання і характеру руйнування в окрему групу виділяють гини головних парогонів та пароперепускних труб з теплотривкої оццднолегованої сталі 12Х1МФ, що експлуатуються за температури 540°C і тиску робочого середовища 10...14 МПа [3, 6]. Причини пошкоджень гинів пов'язують з дефектами металургійного походження або бракованою структурою через порушення технології виготовлення труб, з дефектами, що виникли на етапі виготовлення гинів в заводських умовах, які спричиняють небезпечну локалізацію напружень від дії внутрішнього тиску пари та термічних напружень під час їх експлуатації; порушення регламенту експлуатації і пов'язані з цим перевантаження [2, 3].

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 з 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. Особливо важливо дослідити кінетичні особливості росту втомних тріщин в експлуатованому металі, в тому числі і за низьких швидкостей їх росту (близьких до порогових значень). Адже інформація про характеристики металу гинів, які ще не відпрацювали і вже відпрацювали свій парковий ресурс, дала б можливість наблизитися до оцінювання ресурсу (у тому числі і залишкового) цих елементів за показниками ЦТ.

Мета роботи – оцінити міру деградації сталі 12Х1МФ різних зон гину головного парогону ТЕС та його прямої ділянки (ПД) після $1,3 \cdot 10^5$ год експлуатації за їх характеристиками ЦТ.

Досліджені матеріали та методичні аспекти випроб. Досліджували сталь 12Х1МФ гину головного парогону ТЕС. Для досліджень взяли демонтований гин парогону після $\sim 1,3 \times 10^5$ год експлуатації і 817 зупинок блоку ТЕС, на зовнішній поверхні якого в межах стисненої зони (СЗ) виявили поверхневі тріщини. Його

параметри експлуатації: тиск пари 14 МПа за температури 540°C. Зовнішній діаметр труби на прямій ділянці головного парогону становив 273 мм за товщини стінки 36 мм, кут загинання гину 90°, радіус кривизни 10³ мм. Після експлуатації гин у радіальному перерізі мав форму деформованого еліпса з товщиною стінки труби 39,5 мм у СЗ та 33 мм у розтягненій зоні (РЗ).

Характеристики циклічної тріщинотійкості металу різних зон гинів визначали за кімнатної температури на осьових балкових зразках, згідно методичних рекомендацій [11]. Балкові зразки (10×18×160 мм) вирізали з металу усіх зон гину та його ПД таким чином, щоб ріст тріщин в 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 ΔK_{th} та ефективного $\Delta K_{th\,eff}$), що відповідають $da/dN \approx 10^{-10}$ м/цикл, визначали з відповідних КДВР.

Сумісний вплив робочої температури, напружень та активного робочого середовища, яким є водяна пара високих параметрів, під час тривалої експлуатації конструкційних сталей на реальних об'єктах теплоенергетики, зокрема на парогоних ТЕС, зумовлює структурно-фазові перетворення в металі [12]. Параметри тріщинотійкості, які характеризують опір руйнуванню в області, сумірній з елементами структури, звикло відображають ці структурні перетворення [13]. За вищої порівняно зі статичною тріщинотійкістю локальності показників ЦТ логічно очікувати їх високої чутливості до зміни стану деградованого в процесі експлуатації металу, особливо на низьких близьких до порогових значень ΔK . Таким чином в роботі дослідили сукупний вплив на ріст втомної тріщини в сталі 12Х1МФ 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 парогону.

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 ΔK_{th} та ефективні $\Delta K_{th\,eff}$ пороги ЦТ металу різних зон гину. Виявилось, що тривалий вплив експлуатаційних чинників на ріст втомних тріщин в металі різних зон гину та його ПД є неоднаковим. 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 ΔK_{th} та ефективним $\Delta K_{th\,eff}$ пороговими значеннями виявилася найменшою. Це є ознакою того, що ефект закриття втомної тріщини для ПД гину є найменшим. Отже, інтенсивність впливу експлуатаційних чинників на метал цієї ділянки була найслабшою і тому на цій ділянці метал найменше 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 пороги ЦТ (і номінальні, і ефективні) металу всіх зон гину виявилися нижчими, ніж ПД.

Загалом парогони ТЕС експлуатуються за впливу високочастотних низькоамплітудних навантажень, спричинених перепадами тиску пари, та 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 структурному і субструктурному рівнях.

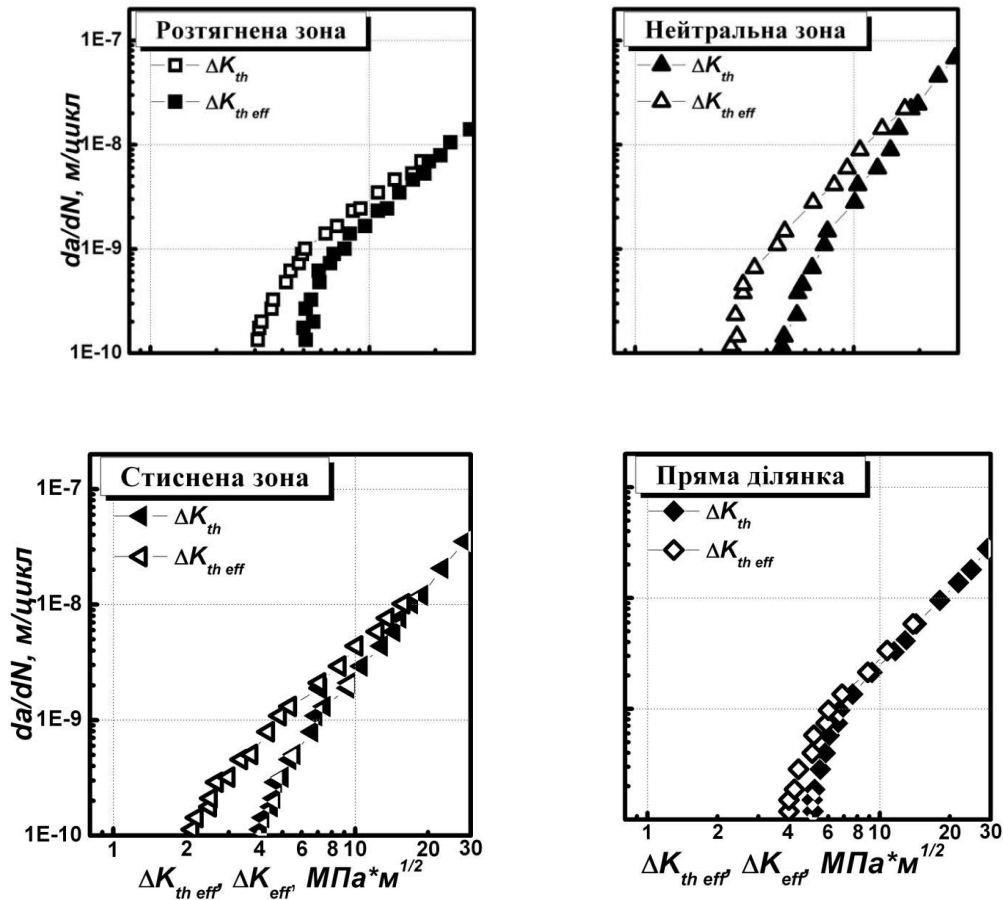


Рис. 1. Номінальні (темні символи) та ефективні (світлі символи) КДВР сталі 12Х1МФ з РЗ, НЗ, СЗ гину та ПД головного парогону після $1,3 \times 10^5$ год експлуатації.

Вважали, що отримані зміни характеристик ЦТ металу різних зон гину парогону спричинені, з одного боку, змінами вихідної структури шляхом виділення та коагуляції карбідів вздовж меж зерен, а з іншого, з одночасним формуванням мікропошкодженості [14]. Загалом, за меншої ніж розрахункова тривалості експлуатації головних парогонів визначальним чинником впливу на деградацію вважають термічну втому, а за більшої – повзучість. Адже за повзучості виникнення пор та руйнування перетинків між ними з утворенням міжзеренних тріщин в осьовому перерізі труб відбувається впродовж тривалого часу, на який і орієнтуються під час розрахунку ресурсу. Тоді як за термічної втоми через зупинки технологічного процесу мікродфекти 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, 16]. 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 деградації, яку зв'язали з виникненням дефектів термічної втоми. Закриття втомної тріщини в найбільшій мірі проявилася у СЗ зоні гину.

Висновок: з використанням порогових характеристик циклічної тріщиностійкості однозначно показано не лише інтенсивнішу деградацію металу всіх зон гину порівняно з його прямою ділянкою, але і можливість нетипової інтенсивнішої

деградації металу стисненої зони гину порівняно з розтягнутою, що зв'язали з впливом термічних напружень в цій зоні гину під час зупинок технологічного процесу.

1. Соломаха М. А., Макобоцкий С. И. О надежности гибов паропроводов из стали 12Х1МФ // Электрические станции. – 1988. – № 4. – С. 15–19.
2. Крутасова Е. И. Надежность металла энергетического оборудования. – М.: Энергоиздат, 1981. – 240 с.
3. Бугай Н. В., Мухопад Г. В., Красовский А. Я. Повышение надежности котлов электростанций. – К.: Техника, 1986. – 176 с.
4. Нахалов В. А. Надежность гибов труб теплоэнергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 184 с.
5. Кравченко В. П. Эрозионно-коррозионный износ гибов трубопроводов на блоках АЭС с ВВЭР-1000 // Восточно-Европейский журнал передовых. – 2006. – № 4/3. – С. 65–68.
6. Туляков Г. А., Скоробогатых Н. В., Гриневский В. В. Конструкционные материалы для энергомашиностроения – М.: Машиностроение, 1991. – 240 с.
7. Станюкович А. В. Пути повышения ресурса и надежности гибов паропроводов ТЭЦ // Тр. ЦКТИ. – 1988. – 246 с.
8. Антикайн П. А. Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
9. Мелехов Р. К., Похмурський В. І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. – К.: Наук. думка, 2003. – 382 с.
10. Слободчикова Н. И. Анализ и обобщение случаев разрушения гибов необогреваемых труб котлов и паропроводов // Тр. ВТИ. – 1981. – 29. – С. 18–23.
11. 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. – М.: Издательство стандартов. – 1983. – 96 с.
12. 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.)
13. Механика разрушения и прочность материалов: Справ. пособие: 4 т. / 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.
14. Оцінювання впливу технологічного процесу на зміну технічного стану металу головних парогонів ТЕС // 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 / 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 / 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.)