

УДК 621.134.5.004.63

Г.В. Кречковська¹, О.З. Студент¹, Ю.М. Гребенчак²¹Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України²Луцький національний технічний університет

ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ДЕГРАДАЦІЇ СТАЛІ 34ХН3М НА МЕХАНІЗМ ЇЇ ВТОМНОГО РУЙНУВАННЯ ЗА ПРИПОРОГОВОЇ ШВИДКОСТІ РОСТУ ТРІЩИНИ

На основі випроб на циклічну тріщиностійкість отримано номінальні та ефективні порогові розмахи коефіцієнтів інтенсивності напружень дискової сталі 34ХН3М у вихідному стані та після $3 \cdot 10^5$ год експлуатації на паровій турбіні. Внаслідок експлуатаційної деградації відбулося суттєве зниження порогових показників циклічної тріщиностійкості. Фрактографічно показано, що під час експлуатації вздовж меж зерен сформувалися пошкодження, яке виявили у вигляді міжзеренних фрагментів на фоні типового для втоми кризьзеренного руйнування. Такі міжзеренні фрагменти, виступаючи над загальним плитким рельєфом втомого зламу, відповідальні за значне закриття тріщини, спричинене шорсткістю поверхні зламу на припороговій ділянці її росту.

Ключові слова: експлуатаційна деградація, механізми руйнування, диск ротора парової турбіни, циклічна тріщиностійкість.

Г.В. Кречковская, А.З. Студент, Ю.Н. Гребенчак

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ДЕГРАДАЦИИ СТАЛИ 34ХН3М НА МЕХАНИЗМ ЕЕ УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ОКОЛОПороГОВОЙ СКОРОСТИ РОСТА ТРЕЩИНЫ

На основе испытаний на циклическую трещиностойкость определены номинальные и эффективные пороговые размахи коэффициентов интенсивности напряжений дисковой стали 34ХН3М в исходном состоянии и после $3 \cdot 10^5$ ч эксплуатации в паровой турбине. Вследствие эксплуатационной деградации произошло существенное снижение пороговых показателей циклической трещиностойкости. Фрактографически показано, что во время эксплуатации вдоль границ зерен сформировались повреждения, обнаруженные в виде межзеренных фрагментов на фоне типичного для усталости трансзеренного разрушения. Эти межзеренные фрагменты, выступая над в основном плоским рельефом усталостного излома, ответственны за значительное закрытие трещины, вызванное шерстностью поверхности излома на припороговом участке ее роста.

Ключевые слова: эксплуатационная деградация, механизмы разрушения, диск ротора паровой турбины, циклическая трещиностойкость.

H.V. Krechkovska, O.Z. Student, Yu.M. Hrebenchak

IN-SERVICE DEGRADATION EFFECT OF THE 34HN3M STEEL ON THE FATIGUE FRACTURE MECHANISM AT NEAR THRESHOLD CRACK GROWTH RATE

Based on the fatigue crack growth tests the nominal and effective fatigue threshold levels for the 34HN3M steel in virgin state and after $3 \cdot 10^5$ h of its operation in a steam turbine were defined. Due to operational degradation has been a significant reduction in thresholds levels of the fatigue crack growth resistance. By fractography method was shown that during operation along the grain boundaries formed damages detected in the form of intergranular fragments at the background of typical transgranular fatigue relief. These intergranular fragments, rising above the mainly flat relief of the fatigue fracture surface, are responsible for a substantial crack closure effect caused by high roughness of the fracture surface at near-threshold area of crack growth.

Keywords: in-service degradation, fracture mechanisms, steam turbine rotor disk, fatigue crack growth resistance.

Постановка проблеми. Значна частина устаткування теплоенергетики України вже виробила нормативний, а подекуди і продовжений ресурси. Визначальними чинниками впливу на ресурс високотемпературних вузлів парових турбін вважають повзучість, тривалу міцність та тріщиностійкість сталей лопаткового апарату роторів парових турбін. Конструктивні і технологічні чинники визначають багато- та малоциклову втомну міцність. Протягом усього часу експлуатації повзучість за регламентованих тиску, температури та дії силових факторів спричиняє накопичення незворотної пластичної деформації в елементах. Основними причинами пошкодження елементів парової турбіни називають зародження та поширення тріщин через вібрації, високі статичні та циклічні навантаження, наявність концентраторів напружень, фретинг- та корозійну втому, кавітаційно-ерозійне зношування тощо. В експлуатаційних умовах ці чинники вносять більший чи менший вплив у погіршення властивостей тривало експлуатованих сталей.

Диски є одними з високонавантажених елементів ротора парової турбіни, на які діють сили, спричинені обертанням ротора (відцентрові сили що діють на лопатки та обід диска), зусилля, спричинені внаслідок гарячого насаджування диска на вал, перепадом тиску пари по обидва боки диска, динамічними навантаженнями (у випадку вібрації), термічними напруженнями під час пусків-зупинок ротора. Диски парової турбіни найчастіше руйнуються внаслідок утворення тріщин та їх

поширення до критичної розміру в ступенях, розташованих в зоні фазового переходу турбін без проміжного перегріву пари, де температура досягає близько 130°C. З огляду на це інформація про вплив тривалої експлуатації сталей елементів парових турбін на структуру та механічні властивості необхідна для подальшого обґрунтування їх роботоздатності. Для оцінювання стану експлуатованих сталей важливо встановити закономірності зміни локальних параметрів механіки руйнування металу в міру зростання тривалості експлуатації. Тому мета досліджень цієї роботи є оцінювання впливу тривалої експлуатації на порогові характеристики циклічної тріщиностійкості (ЦТ) сталі диску парової турбіни та особливості механізму припорогового росту утомної тріщини у ній.

Об'єкт досліджень та використані методики. Дослідили сталь 34ХНЗМ з обома дисками ротора парової турбіни після $3 \cdot 10^5$ год її експлуатації. Для порівняння проаналізували властивості цієї сталі також у вихідному стані після термічного оброблення (витримка впродовж 2 год при 920°C, нормалізація, відпуск при 690°C з експозицією протягом 3 год та охолодженням на повітрі, витримка 1 год при 870°C, гартування в мастилі, відпуск при 650°C після 2 год витримки).

Для оцінювання стану металу використали локальні характеристики механіки руйнування, а саме, порогові показники ЦТ, які звичайно виявляють високу чутливість до зміни технічного стану деградованого металу [1-3]. Характеристики ЦТ визначали на повітрі за результатами циклічного навантаження консольним згином балкових зразків ($10 \times 20 \times 160$ мм) з крайовим надрізом. Частота циклів навантаження під час випроб на ЦТ становила $f = 10$ Гц, а коефіцієнт асиметрії циклу навантаження – $R = 0$. За результатами випроб отримали кінетичні діаграми втомного руйнування (КДВР) в координатах швидкість росту втомної тріщини da/dN від номінального (ΔK) і ефективного (ΔK_{eff}) розмаху коефіцієнтів інтенсивності напружень (КІН). Під час визначення ΔK_{eff} враховували ефект закриття тріщини (ЗТ). З КДВР визначали номінальний $\Delta K_{th} = K_{th\ max} - K_{th\ min}$ та ефективний $\Delta K_{th\ eff} = K_{th\ max} - K_{th\ cl}$ порогові розмахи КІН, де $K_{th\ cl}$ характеризує розмах КІН закритої частини циклу навантаження, коли за позитивного номінального навантаження метал в околі вершини тріщини циклічно не деформується. Фрактографічні особливості зламів зразків після випроб на ЦТ досліджували на сканівному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

Результати дослідження. Хімічний склад сталі у вихідному стані та після $3 \cdot 10^5$ год експлуатації на паровій турбіні наведено в табл. 1. Основні механічні характеристики металу диску парової турбіни у вихідному стані регламентовані нормативними документами [4], зокрема $\sigma_B = 813$ МПа, $\sigma_{0,2} = (686 \dots 882)$ МПа, $\psi \geq 35\%$, $\delta \geq 13\%$, $KCU \geq 0,5$ кДж/м², твердість – 340 НВ.

Таблиця 1.

Хімічний склад сталі 34ХНЗМ диска парової турбіни, мас. %.

Стан металу	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Mo	Fe
Вихідний стан	0,33	0,37	0,62	2,9	0,035	0,03	0,9	0,3	Решта
Після експлуатації	0,32	0,41	0,59	2,8	0,053	0,039	0,91	0,29	Решта

За результатами механічних випроб на ЦТ сталі у вихідному стані та після $3 \cdot 10^5$ год експлуатації проаналізували її номінальні та ефективні порогові значення КІН (рис.1).

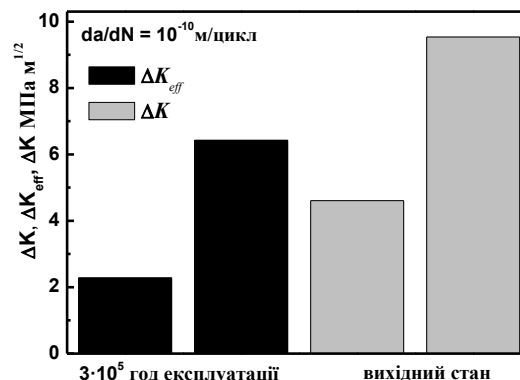


Рис. 1. Номінальні та ефективні порогові значення ЦТ сталі 34ХНЗМ у вихідному стані та після $3 \cdot 10^5$ год експлуатації на диску ротора парової турбіни

Істотний вплив деградації сталі впродовж експлуатації зафіксували і за номінальними, і за ефективними пороговими показниками ЦТ. Причому, яскравіше ефект деградації проявляється за ефективними значеннями. Зокрема, пороговий розмах номінальних значень КІН експлуатованої

сталі знижується після експлуатації на 35 % стосовно сталі у вихідному стані, а ефективних – на 50 %. Таке значне зниження порогових характеристик ЦТ експлуатованого металу дає підстави говорити про суттєве зниження опору поширенню втомних тріщин. Слід відзначити також сильніший прояв ефекту ЗТ в експлуатованій сталі. Якщо для сталі у вихідному стані ефективний поріг ЦТ металу на 48 % нижчий за номінальний, то в експлуатованій – на 63 %. Це підтверджує високу чутливість порогових характеристик ЦТ до зміни технічного стану металу диску ротора парової турбіни після експлуатаційної деградації і дає підстави сподіватися на відмінності механізмів росту тріщин та формування ЗТ в сталі у вихідному стані та після експлуатації.

Фрактографічні дослідження зламів зразків після випроб на ЦТ виявили, що ЗТ в експлуатованій сталі пов'язане з ділянками міжзеренного руйнування, які виступають над плитким рельєфом класично крізьзеренного втомного руйнування навіть за припорогової швидкості росту тріщини (рис. 2 а). Їх появу пов'язали з ослабленням меж зерен внаслідок тривалої експлуатації сталі в паровій турбіні. Значну роль у руйнуванні відіграють неметалеві включення, які відокремившись від матриці під час експлуатації, створюють додаткову концентрацію напружень і сприяють росту тріщини (рис. 2 б).

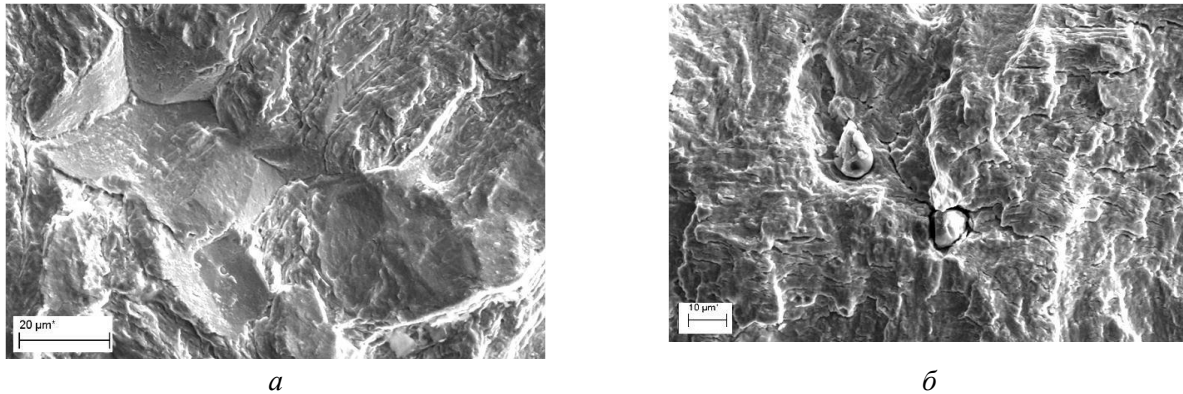


Рис. 2. Типові фрактографічні елементи втомного рельєфу експлуатованої сталі 34ХНЗМ, випробуваної на ЦТ за швидкості РВТ $8 \cdot 10^{-10}$ м/цикл

Отже, отримані результати свідчать про те, що за пороговими показниками ЦТ можна оцінити рівень деградації металу диску ротора парової турбіни. Суттєве зниження порогових рівнів ЦТ дискової сталі 34ХНЗМ після експлуатації є наслідком її деградації. Отримана висока чутливість ефективного порогового рівня ЦТ свідчить про те, що його можна використати для обґрунтування консервативного граничного рівня робоздатності сталі. За фрактографічними ознаками зламів деградованого металу підтвердили ослаблення меж зерен дискової сталі внаслідок її експлуатаційної деградації.

Висновок. Показано, що порогові показники ЦТ сталі 34ХНЗМ диску ротора парової турбіни залежать від міри її деградації. Чутливість до деградації ефективних порогових рівнів ЦТ вища, ніж номінальних. Висока чутливість ефективних порогових рівнів ЦТ до зміни технічного стану сталі внаслідок експлуатаційної деградації може стати основою для обґрунтування консервативного граничного рівня робоздатності дискової сталі. Фрактографічно показано, що високе ЗТ на ділянці припорогового росту втомної тріщини зумовлене рельєфними елементами міжзеренного руйнування на фоні загалом плиткого крізьзеренного втомного рельєфу. Причиною виникнення міжзеренних фрагментів вважали ослаблення меж зерен дискової сталі внаслідок її експлуатаційної деградації. Тому кількісний аналіз площі міжзеренних елементів може бути корисним для оцінки реального технічного стану експлуатованої сталі на основі фрактографічних досліджень розпоршених міжзеренних пошкоджень.

Список використаних джерел:

1. СОУ 40.3-0013044-20:2010. Настанова. Оцінювання технічного стану металу прямих ділянок головних парогонів ТЕС. Вплив зупинок технологічного процесу на зміну технічного стану експлуатованого металу. Типова інструкція. – Львів: ДП "ЛКБ" і ФМІ НАНУ, 2010. – 52 с.
2. Effect of damage in service of 12Kh1MF steam-pipe steel on its crack resistance characteristics / Romaniv O.M., Nykyforchyn H.M., Dzyuba I.R., Student O.Z., Lonyuk B.P. // Materials Science. – 1998. – 34, №1. – P. 110–114. 18.
3. Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафто- та паропроводів / В.В. Панасюк, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент, З.В. Слободян // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій; за заг. ред. О.Є. Андрейківа, Й.Й. Лучка, В.В. Божидарника. – Львів: Каменяр, 2002. – С. 537–546.
4. Методические указания по предотвращению коррозионных повреждений дисков и лопаточного аппарата паровых турбин в зоне фазового перехода: РД 34.30.507-92. – М.: ВТИ. – 1993. – 43 с.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2016.