

УДК 620.171.2; 620.187.22

О. Студент, докт. техн. наук; Г. Кречковська, канд. техн. наук;  
Л. Бабій, канд. техн. наук

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

## ВПЛИВ ТЕПЛОЗМІН ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРОГОНІВ ТЕС НА СТАТИЧНУ ТРІЩИНОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ 15X1M1Ф

**Резюме.** Показано, що локальний параметр механіки руйнування – статична тріщиностійкість ( $J_{IC}$ ), чутлива до зміни стану металу внаслідок деградації в експлуатаційних умовах. Виявлено, що кількість зупинок технологічного процесу під час експлуатації сталі, орієнтація зразків (осьова й тангенціальна) та місце їх розташування в перерізі стінки труб (біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь труб) впливають на рівень статичної тріщиностійкості. За однакової тривалості експлуатації на головних парогоних ТЕС, але різної кількості зупинок блоків, які супроводжуються значними перепадами температури в стінці труб, найбільше зниження рівня  $J_{IC}$  сталі 15X1M1Ф зафіксували для металу, що переніс більшу кількість зупинок. Цим доказано, що показник  $J_{IC}$  високочутливий до зміни стану експлуатованого металу під впливом теплозмін. Проаналізовано механізми руйнування металу у вихідному стані та після експлуатації, виділено вплив кількості пусків-зупинок технологічного процесу на інформативні фрактографічні ознаки.

**Ключові слова:** головні парогони ТЕС, деградація, зупинки технологічного процесу, статична тріщиностійкість, інформативні фрактографічні ознаки.

О. Student, H. Krechkovska, L. Babiy

## SHUTDOWNS EFFECT DURING OPERATION OF STEAM PIPELINE OF TPP ON THE FRACTURE TOUGHNESS OF 15Kh1M1F STEEL

**Summary.** The main steam pipelines of TPP are subjected to a combined effect of number of technological factors causing the degradation of steel. Lot of operational factors affect the workability of energy equipment. Among these factors are hard temperature-force operating conditions (temperature of the steam pipelines is up to 570°C and the steam pressure – 24 MPa) and hydrogenated environment. One more reason of the loss workability of equipment was revealed recently. This is a frequent shutdown of the process caused by exploitation of the blocks in a maneuvering mode.

It is known that fracture toughness ( $J_{IC}$ ) is a local parameter of fracture mechanics sensitive to changes in the state of the metal as a result of its degradation in service conditions. It was shown that  $J_{IC}$ -curves significantly differ for the steel 15Kh1M1F in virgin state and used for a same time ( $\sim 2 \cdot 10^5$  h), but at different numbers of process shutdowns on the steam pipeline. It was revealed that number of shutdowns during longtime operation of steel and orientation of the specimens (axial and tangential) and its location in the cross section of tube wall (near the outer or inner surface of the tube) affect the value of fracture toughness. At the same operation time of steel on the main steam pipeline of TPP, but at different numbers of shutdowns the maximum reduction of the  $J_{IC}$  level was revealed for the 15Kh1M1F steel after more shutdowns. Consequently,  $J_{IC}$  level is the sensitive indicator of changes in the state of the metal under the influence of thermal cycles caused by shutdowns.

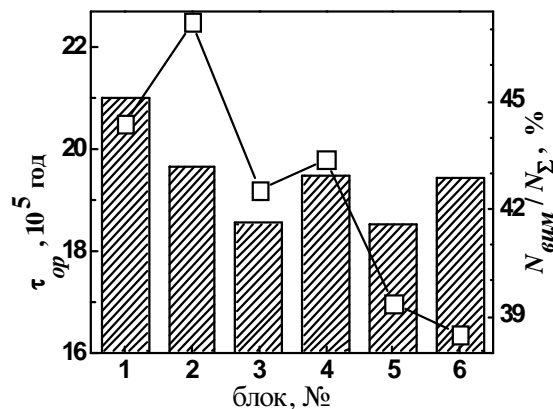
The fractographic features of the steel in virgin state and after operation during the same time on the main steam pipeline of TPP, but at different numbers of shutdowns were analyzed. The wide stretch zone with following ductile fracture by forming of dimple structure was revealed on the fracture surface of steel in virgin state. A few fractographic features were revealed on the fracture surfaces of long-time operated steel. That is, the stretch zone on the fracture surface of the metal operated at smaller number of shutdowns is significantly less than in the non-operated metal, but in the steel operated at larger number shutdowns - it disappears. Ductile increment of cracks during static active loading of specimens of operated steel are essentially decreased and the continuity of the crack fronts disappeared. At the stage of spontaneous fracture the steel operated at smaller number shutdowns was destroyed by the mixed inter- and transgranular fracture, but the steel after more shutdowns – practically only by intergranular fracture. Intergranular fracture was considered as an indicator of the weakening the boundaries between the neighbouring grains.

**Key words:** main steam pipeline of thermal power plant, shutdowns of technological process, degradation, fracture toughness, information fractographic features.

**Вступ.** Тривала високотемпературна експлуатація оцяднолегованих сталей спричиняє зміну їх мікроструктури та втрату механічних властивостей. У першу чергу це стосується показників статичної  $J_{Ic}$  [1] та циклічної  $\Delta K_{th\,eff}$  [2, 3] тріщиностійкостей, що зумовлено більшою чутливістю локальних (порівняно з інтегральними) характеристик опору руйнуванню таких сталей до специфічної деградації матеріалу на мікрорівні [4]. Крім того, виявлено важливу роль водню в інтенсифікації високотемпературної деградації сталей [5] та її особливість – підвищення схильності деградованих сталей до водневого розтріскування [6]. Ключовим чинником втрати роботоздатності теплоенергетичного обладнання є часті зупинки технологічного процесу через експлуатацію блоків у маневровому режимі. Нагрівання й охолодження внаслідок зупинок супроводжується виникненням додаткових термічних напружень у перерізі труб, які, сумуючись з напруженнями від внутрішнього тиску пари, можуть подекуди досягати критичних значень [7, 8]. Це полегшує зародження та поширення тріщин у трубах, інтенсифікованих шкідливим впливом абсорбованого металом водню, і приводить до очевидної деградації у вигляді пошкоджень у конструкції, які поширюються аж до її остаточного руйнування. Тому можна сподіватися, що зміна мікроструктури металу парогонів у процесі їх тривалої високотемпературної експлуатації пришвидшуватиметься внаслідок впливу і наводнювання, додаткових напружень розтягу, що виникають під час пусків-зупинок енергоблоків. При цьому, в першу чергу, скорочуватиметься етап деградації металу на структурному рівні з відповідною зміною механічних властивостей, а вже як наслідок цього – час до зародження тріщин і загальна довговічність конструкції.

**Мета роботи** – дослідити вплив зупинок технологічного процесу під час експлуатації сталі 15X1M1Ф на парогонях ТЕС на її статичну тріщиностійкість та механізм руйнування.

**Об’єкт дослідження.** Досліджували сталь 15X1M1Ф (0,14% С; 1,3 Cr; 1,0 Мо; 0,75 Mn; 0,1 Ni; 0,3 Si; 0,25 V; 0,012 S; 0,027% P) у вихідному стані (з труб запасу) та після  $\sim 2 \cdot 10^5$  год експлуатації за температури до 545°C і тиску до 24 МПа на головних парогонях ТЕС. За однакової тривалості експлуатації (рис. 1) метал з блоків № 6 і 2 (умовне позначення) відрізнявся за кількістю зупинок технологічного процесу (загальна кількість зупинок шостого блоку  $N_{\Sigma} = 501$ , а вимушених –  $N_{вим} = 219$ , а другого –  $N_{\Sigma} = 576$ ,  $N_{вим} = 283$ ). Зразки для досліджень вирізували біля зовнішньої та внутрішньої поверхонь труби. Анізотропію властивостей оцінювали на зразках осової й тангенціальної орієнтації стосовно осі труби.



**Рисунок 1.** Тривалість експлуатації  $\tau_{op}$  (стовпчики) та відсоток вимушених зупинок  $N_{вим}$  від їх загальної кількості  $N_{\Sigma}$  (крива) для сталі 15X1M1Ф з головних парогонів ТЕС на основі аналізу 6 блоків

**Figure 1.** Operation time  $\tau_{op}$  (bars) and a percentage ratio of forced shutdowns  $N_{for}$  vs. total amount of shutdowns  $N_{\Sigma}$  (curve) for 15Kh1M1F steam pipeline steel based on analysis of six blocks of power plant 200

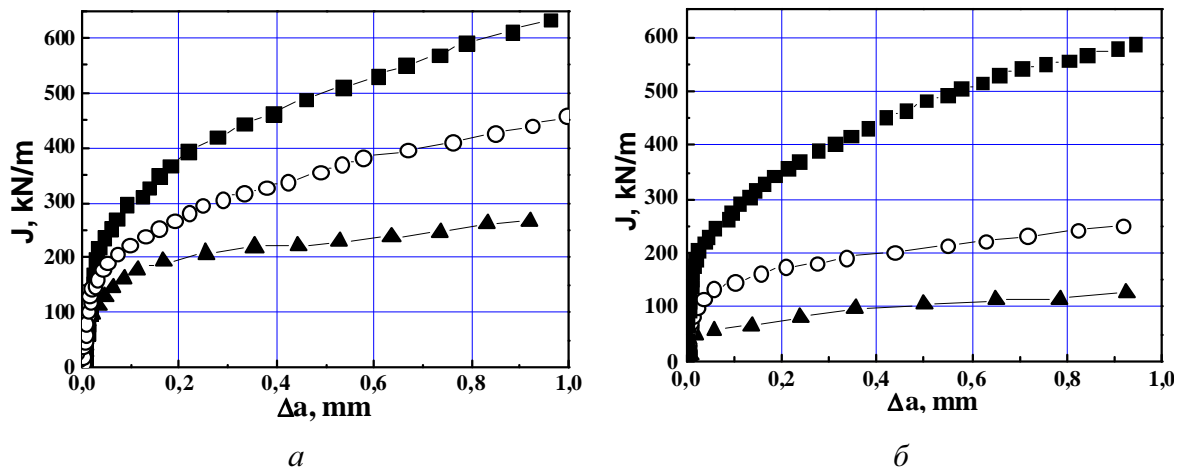
**Методи досліджень.** Статичну тріщиностійкість сталі визначали за кімнатної температури на повітрі з використанням методу  $J$ -інтеграла, оцінюючи його критичне значення  $J_{Ic}$ , яке чутливе до деградації теплотривких сталей [9]. Випробовували балкові зразки (10×15×90 mm) осьової та тангенціальної орієнтацій з наперед наведеними втомними тріщинами довжиною  $a_0 = 6...7$  mm. На завершальному етапі (останніх 0,5 mm) швидкість росту тріщини становила  $5 \cdot 10^{-9}$  m/cycle. Зразки навантажували за схемою триточкового згину. Під час активного статичного навантаження одночасно фіксували силу  $P$  та зміну податливості зразка і розкриття берегів тріщини внаслідок її підростання на величину  $\Delta a$ . Щоб визначити критичне значення  $J$ -інтеграла, що відповідає старту тріщини, будували  $J_R$ -криві (залежності поточного значення  $J$ -інтеграла  $J_I$  від підростання тріщини  $\Delta a$ ) [10]. Значення  $J_{Ic}$  визначали в точці перетину  $J_R$ -кривої з лінією  $J=M \cdot \Delta a$ , що враховує поправку на зону витягування у вершині тріщини при визначенні її довжини. При цьому приймали  $M = 2 \cdot \sigma_{0,2}$ , де  $\sigma_{0,2}$  – границя плинності металу.

Фрактографічні особливості руйнування зразків досліджували на сканувальному електронному мікроскопі EVO-40XVP.

**Результати роботи та їх обговорення.** Оцінювання стану металу після його деградації за рівнем тріщиностійкості з використанням  $J$ -інтеграла є перспективним методом, оскільки він дозволяє оцінити властивості високопластичних матеріалів на зразках невеликих розмірів, а рівень  $J_{Ic}$  не залежить від геометрії і розмірів зразків у доволі широкому діапазоні їх зміни [11].

Дослідження статичної тріщиностійкості сталі 15X1M1Ф у вихідному стані та після експлуатації на парогоні з використанням методу  $J$ -інтеграла виявили, що старт тріщини в металі, експлуатованому на блоці №6, відбувається за нижчих значень  $J$ -інтеграла порівняно з неексплуатованим металом. Це свідчить про меншу енергоємність процесу руйнування експлуатованого металу внаслідок його деградації. Руйнування зразків з металу блока № 2 відбувається за ще нижчих енергозатрат на ріст тріщини, що пов'язано із впливом більшої кількості зупинок технологічного процесу.

$J_R$ -криві для металу у вихідному стані та після  $\sim 2 \cdot 10^5$  год експлуатації на парогоні блоків № 6 та № 2, побудовані за результатами випроб зразків осьової орієнтації, істотно відрізняються (рис. 2). Визначені з  $J_R$ -кривих критичні значення  $J$ -інтеграла  $J_{Ic}$  для експлуатованого металу з обох блоків нижчі за значення  $J_{Ic}$  для металу у вихідному стані. Причому значення  $J_{Ic}$  для металу, що мав більшу кількість зупинок, є нижчі порівняно з металом з меншою їх кількістю. З їх аналізу дійшли висновку, що робота, яка затрачається на старт тріщини за активного навантаження зразків з експлуатованого металу значно нижча, ніж за руйнування металу у вихідному стані. Значно нижчими є й енергозатрати на старт втомної тріщини (значення  $J_{Ic}$ ) експлуатованого металу з більшою кількістю зупинок, що свідчить про інтенсивну деградацію металу, спричинену тепловмінами технологічного процесу. Відмінність рівнів  $J_{Ic}$  металу з обох блоків можна пов'язати з їх різною мікроструктурою – тріщиностійкість металу з блока № 6 з ферит-бейніт-карбідною структурою вища за тріщиностійкість металу з блока № 2 з ферит-карбідною структурою. Відмінність структури металу після однакової тривалості експлуатації можна пояснити лише впливом зупинок технологічного процесу на деградацію структури сталі [12].

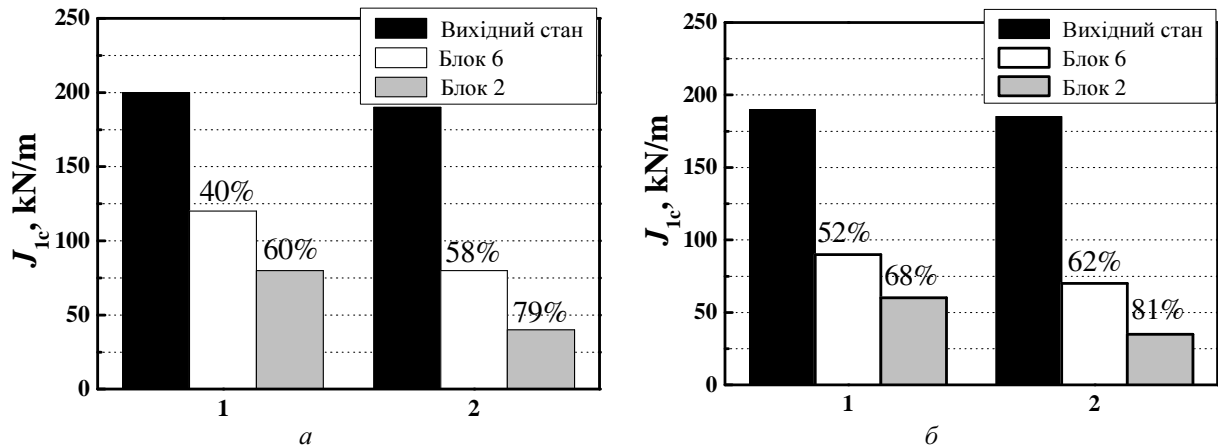


**Рисунок 2.**  $J_R$ -криві для металу у вихідному стані (■) та після  $\sim 2 \cdot 10^5$  h експлуатації на блоці № 6 (○) та № 2 (▲), отримані на зразках осьової орієнтації біля зовнішньої (а) та внутрішньої (б) поверхнь труб

**Figure 2.**  $J_R$ -curves for the metals in the initial state (■) and exploited one during  $\sim 2 \cdot 10^5$  h on the block N.6 (○) and N.2 (▲) determined on axial specimens cut near outer (a) and inner (b) surfaces of tubes

Важливо також оцінити тріщиностійкість сталі біля зовнішньої та внутрішньої поверхнь експлуатованих труб. Умови деградації металу в околі цих поверхнь були різними. Біля внутрішньої поверхні, яка контактує з наводнювальним середовищем (з парою високих параметрів), можливе активне наводнювання металу [13], яке, інтенсифікуючи дифузійний перерозподіл вуглецю та елементів легування [14], полегшує деградацію металу [15]. Зовнішня поверхня труб контактує з повітрям і, реагуючи з киснем, впливає на структурні перетворення в часі тривалої експлуатації сталі 15X1M1Ф на парогонах ТЕС, яке проявляється, у першу чергу, зневуглецюванням металу [16], що однозначно вплине на структуру та знизить механічні характеристики металу. З аналізу  $J_R$ -кривих бачимо, що біля внутрішньої поверхні значення  $J_{Ic}$  нижчі, ніж біля зовнішньої, причому і для металу після меншої, і після більшої кількості зупинок технологічного процесу.

Статична тріщиностійкість досліджених матеріалів, визначена на зразках осьової (рис. 3а) і тангенціальної (рис. 3б) орієнтацій, однозначно знижується, що свідчить про анізотропію деградації сталі внаслідок експлуатації. Важливу роль відіграють пуски-зупинки технологічного процесу, а також вплив робочого середовища. Максимальне зниження рівня  $J_{Ic}$  порівняно з вихідним станом (практично на 79% на осьових та на 81% на тангенціально орієнтованих зразках) зафіксували саме для металу після більшої кількості зупинок, вирізаного біля внутрішньої поверхні труби (рис. 3а, б). Біля зовнішньої поверхні труби внаслідок деградації металу блока № 2 значення  $J_{Ic}$  знижуються на 60% (на осьових) та 68% (на тангенціальних зразках) порівняно з характеристиками металу у вихідному стані, визначеними на зразках відповідної орієнтації. При цьому тріщиностійкість металу після меншої кількості зупинок, визначена на зразках, вирізаних біля внутрішньої поверхні труб, знизилася стосовно відповідних характеристик сталі у вихідному стані на 58% (на осьових) і на 62% (на тангенціальних зразках), а на зразках, вирізаних біля зовнішньої поверхні труб – на 40 та 52% відповідно.

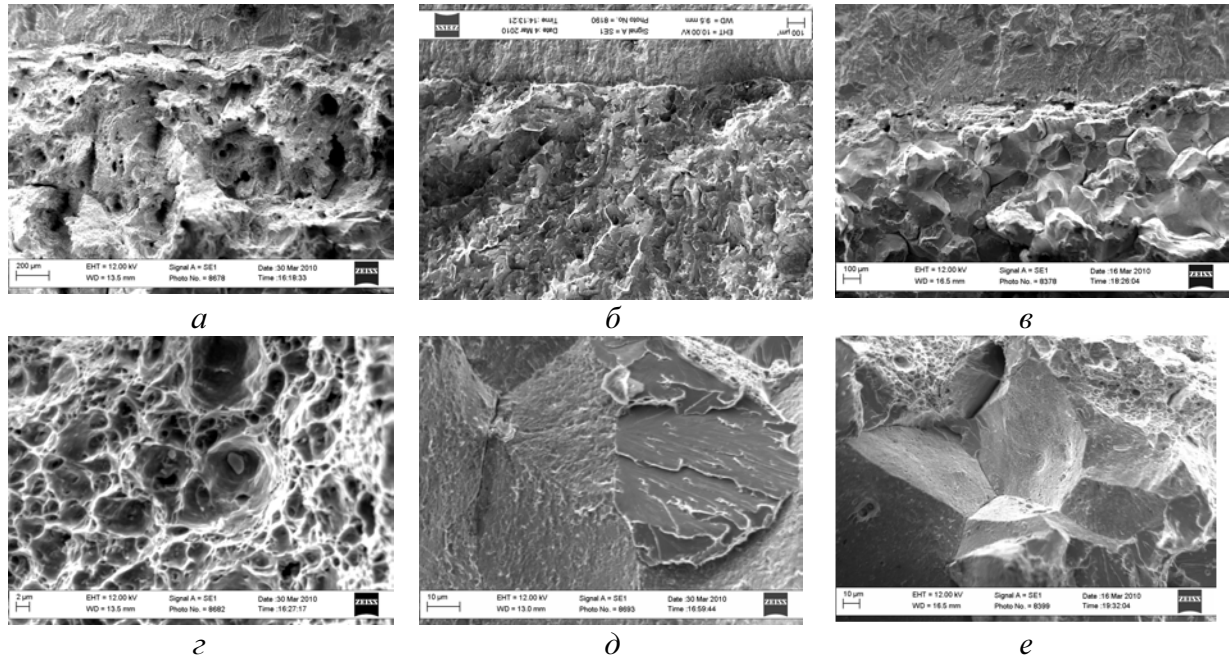


**Рисунок 3.** Статична тріщиностійкість  $J_{1c}$  сталі 15X1M1Ф у вихідному стані (чорні стовпчики) та після  $\sim 2 \cdot 10^5$  h експлуатації на блоці № 6 (білі стовпчики) та № 2 (сірі стовпчики), визначена на зразках осової (а) та тангенціальної (б) орієнтації біля зовнішньої (1) та внутрішньої (2) поверхонь труб

**Figure 3.** Fracture toughness  $J_{1c}$  of the 15Kh1M1F steel in the virgin state (black bars) and after exploitation during  $\sim 2 \cdot 10^5$  h on the block N.6 (white bars) and N.2 (gray bars) determined on the axial (a) and tangential (b) specimens outer (a) and inner (b) surfaces of tubes

Отже, на основі отриманих результатів щодо впливу теплових змін, спричинених зупинками технологічного процесу, на міру деградації сталі 15X1M1Ф можна стверджувати, що за однакової тривалості чим більша кількість зупинок відбулася під час її експлуатації, тим сильніше знижується рівень  $J_{1c}$ . Цими результатами доведено, що зупинки блоків інтенсифікують деградацію сталей парогонів ТЕС.

Виявили фрактографічні ознаки руйнування зразків експлуатаційно деградованої сталі за випроб на статичну тріщиностійкість, пов'язані з інтенсифікацією деградації під впливом пусків-зупинок технологічного процесу. Зокрема, на зламах зразків сталі у вихідному стані зона витягування з характерними слідами зсуву плавно переходить у зону в'язкого підростання тріщини шляхом зародження, росту та злиття мікропорожнин унаслідок витягування перетинок між ними (рис. 4а, з). В експлуатованій сталі зона витягування у вершині вихідної втомної тріщини істотно вужча, а в'язке статичне підростання тріщини траплялося лише у вигляді невеликих острівців уздовж її фронту (рис. 4б, в). Для сталі після більшої кількості зупинок спонтанне поширення тріщини відбувалося за міжзеренним (рис. 4д), а з меншою – за змішаним кризь- та міжзеренним механізмами руйнування (рис. 4е). Отже, у сталі після більшої кількості зупинок домінувало міжзеренне руйнування, що свідчить про послаблення зв'язків між суміжними зернами.



**Рисунок 4.** Фрактографічні особливості статичного підростання тріщини у сталі 15X1M1Ф у вихідному стані (а, г) та після експлуатації на блоках № 6 (б, д) та № 2 (в, е) парогонів ТЕС. Напрямок статичного росту тріщини зверху вниз на фрактограмах

**Figure 4.** Fractographic features of the static crack growth in the 15H1M1F steel in the virgin state (a, g) and after exploitation on the block N.6 (b, d) and N.2 (e, e) of the steam pipeline of thermal power plants. The subcritical static crack growth is directed from top to bottom of fractograms

Таким чином, фрактографічними ознаками впливу зупинок технологічного процесу на деградацію сталі 15X1M1Ф під час її експлуатації на парогонях ТЕС є порушення неперервності фронту та зменшення глибини статичного підростання тріщини за в'язким ямковим механізмом, а на етапі спонтанного руйнування – зниження адгезії вздовж меж зерен після більшої кількості зупинок технологічного процесу.

Крім того, відомо, що вплив водню, абсорбованого сталлю під час експлуатації, на статичну тріщиностійкість теж залежить від міри деградації сталі, пов'язаної з кількістю зупинок. За меншої їх кількості водень зменшує, а за більшої – практично усуває підростання тріщини за в'язким механізмом. А на етапі спонтанного росту тріщини саме водень змінює механізм руйнування з кризьзеренного, властивого металу після меншої кількості зупинок технологічного процесу, на міжзеренний за їх більшої кількості [17].

**Висновки.** Встановлено, що тепломіни, спричинені зупинками технологічного процесу, інтенсифікують деградацію сталі 15X1M1Ф, про що свідчить істотніше зниження статичної тріщиностійкості  $J_{Ic}$  сталі внаслідок зростання їх кількості. Металу після більшої кількості зупинок, вирізаному біля внутрішньої поверхні труби, властиве максимальне зниження рівня  $J_{Ic}$  (практично на 79% на осьових та на 81% на тангенціально орієнтованих зразках), а біля зовнішньої поверхні – на 60% (на осьових) та 68% (на тангенціальних зразках) порівняно з характеристиками металу у вихідному стані, визначеними на зразках відповідної орієнтації. Тріщиностійкість металу після меншої кількості зупинок, визначена на зразках, вирізаних біля внутрішньої поверхні труб, знизилася на 58% (на осьових) і на 62% (на тангенціальних зразках), а біля зовнішньої – на 40 та 52% стосовно відповідних характеристик сталі у вихідному стані.

Встановлено, що порушення неперервності фронту та зменшення глибини статичного підростання тріщини за в'язким ямковим механізмом, і зміна кризьзеренного руйнування на міжзеренне на етапі спонтанного росту тріщини є фрактографічними ознаками інтенсифікації деградації після більшої кількості зупинок технологічного процесу. Зміна механізму руйнування за більшої кількості зупинок на міжзеренний вважали за ознаку зниження когезивної міцності меж суміжних зерен.

**Conclusions.** It was found that thermocycles caused by shutdowns of the technological process intensify the 15H1M1F steel degradation, the evidence of which is significant reduction in of the fracture toughness level  $J_{Ic}$  due to an increase of their number. The maximum reduction  $J_{Ic}$  level (about 79% on the axial and 81% on the tangential oriented specimens cut near inner surface of tube and 60% on the axial and 68% on the tangential oriented specimens cut near outer surface of tube) is the characteristic of the metal after more number of the shutdown compared with the characteristics of the metal in the virgin state, determined on the specimens of the appropriate orientation. Fracture toughness of the steel after smaller number of shutdowns was reduced by 58% on the axial and 62% on the tangential oriented specimens cut near outer, and 40 and 52%, respectively – near inner surfaces of tube compared with the characteristics for the metal in the virgin state.

It is established that a violation of the continuity of the front and reducing of the increment of static crack growth by ductile dimples mechanism and changing transgranular to intergranular mechanism at the stage of spontaneous fracture are the fractographic features of the intensification of degradation after more number of shutdowns. The change in the failure mechanism with trans- to intergranular was considered to be indicator of the decrease of the cohesive strength of the neighboring grains boundaries.

### Список використаної літератури

1. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості [Текст] / О.М. Романів, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент та ін. – Фіз.-хім. механіка матеріалів.– 1998. – Т. 34, № 1. – С. 101 – 104.
2. Nykyforchyn, H.N. Thermocycling in hydrogen environment as simulation method of pipeline steam steel's damages / H.N. Nykyforchyn, O.Z. Student // Proc. 12<sup>th</sup> Biennial Conf. Fracture – ECF12: "Fracture from defects", Ed.: M.W.Brown, E.R.de los Rios, K.J.Miller, Sheffield, 1998. – London: EMAS. – 1998.– V. III. – P. 1139 – 1144.
3. Никифорчин, Г. Оцінка методами механіки руйнування високотемпературної водневої деградації сталей енергетичного та нафтохімічного обладнання [Текст] / Г. Никифорчин, О. Студент // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій; за заг. ред. В.В. Панасюка. – Львів: ФМІ НАНУ, 2004. – С. 633 – 640.
4. Застосування підходів механіки руйнування до оцінки водневої деградації сталей нафто- та паропроводів [Текст] / 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.
5. Student, O.Z. An accelerated method of hydrogen degradation of structural steels by thermocycling / O.Z. Student // Фіз.-хім. механіка матеріалів.– 1998. – Т. 34, №4. – С. 45 – 52.
6. Effect of high-temperature degradation of heat-resistant steel on mechanical and fractographic peculiarities of fatigue crack growth / Student O.Z., Dudzinski W., Kaminska A., Nykyforchyn H.M. // Фіз.-хім. механіка матеріалів.– 1999. – Т. 35, №4. – С. 49 – 58.
7. Вірак, В.М. Оптимальне управління нестационарними температурними режимами [Текст] / В.М. Вірак. – К.: Наук. думка, 1979. – 360 с.
8. Panasyuk, V.V. Strength and Fracture of Solids with Cracks / V.V. Panasyuk. – Lviv: NASU, Karpenko Physico-Mechanical Institute, 2002. – 468 p.
9. Вплив експлуатаційної пошкодженості паропровідної сталі 12Х1МФ на характеристики її тріщиностійкості [Текст] / О.М. Романів, Г.М. Никифорчин, О.З. Студент та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1998. – Т. 34, №1. – С. 101 – 104. (Effect of damage in service of 12Kh1MF steam-pipe steel on its crack resistance characteristics / O.M. Romaniv, H.M. Nykyforchyn, I.R. Dzyoba, O.Z. Student et al. // Materials Science.– 1998. – Т. 34, №1, P. 110 – 114).
10. Landes, J.D. Test results from J-integral studies: an attempt to establish a  $J_{Ic}$  testing procedure / J.D. Landes, J.A. Begley // Fracture Analysis, STP 560. – N.Y.: ASTM, 1974. – P. 170 – 186.

11. Dzioba, I. Metody eksperymentalne stosowane do wyznaczenia inicjacji i propagacji szczelin dla materiałów sprężysto-plastycznych / Dzioba I., Molasy R., Lis Z. // XVI Sympozjum Międzysekcijnego Zespołu Zmęczenia i Mechanika Pękania Materiałów i Konstrukcji, Bydgoszcz, maj 1996, Wydaw. Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. – Str. 52 – 55.
12. Кречковська, Г.В. Оцінювання впливу теплових змін у високотемпературному воденьвмісному середовищі на деградацію сталей парогонів ТЕС [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: спец. 05.02.01 «Матеріалознавство» / Г. В. Кречковська. – Львів, 2012. – 20 с.
13. Вайнман, А.Б. Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления [Текст] / А.Б. Вайнман, Р.К. Мелехов, О.Д. Смиян; отв. ред. Василенко И.И. – К.: Наук. думка, 1990. – 272 с.
14. Похмурський, В.І. Вплив водню на дифузійні процеси в металах [Текст] / В.І. Похмурський, В.В. Федоров. – Львів: Еней, 1998. – 207 с.
15. Кречковська, Г. Вплив тривалої експлуатації сталі 15Х1М1Ф у високотемпературній парі на її властивості [Текст] / Г. Кречковська, О. Студент // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2010. – Т. 2, спецвип. 8. – С. 788 – 793.
16. Структурна мікропошкодженість сталей парогонів ТЕС [Текст] / О.П. Остап, А.І. Кондир, О.В. Вольдемаров та ін. // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 13 – 23. (Structural microdamageability of steels of the steam pipelines of thermal power plants / O.P. Ostash, A.I. Kondyr, O.V. Vol'demarov et al. // Materials Science. – 2009 – V. 45, № 3. – P. 340 – 349).
17. Кречковська, Г. Фрактографічні ознаки деградації сталі 15Х1М1Ф після випроб на статичну тріщиностійкість [Текст] / Г. Кречковська // Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи: зб ХХІ відкр. наук.-техн. конф. молодих наук. і спец. ФМІ НАНУ: Львів, 2009. – Л.: ФМІ НАН України, 2009. – С. 150 – 153.

*Отримано 29.08.2013*