

УДК 621.165:620.169

ЗМІНА УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ СТАЛІ 12Х1МФ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПАРОГОНІВ ТЕС

О. І. БАЛИЦЬКИЙ¹, І. В. РІПЕЙ², О. Я. ОНИЩАК²

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів;

² ВАТ "Західенерго", Львів

Виявлено, що у вихідному стані ударна в'язкість сталі 12Х1МФ за кімнатної температури найчастіше вища, ніж за підвищеної (545°C), як для металу із задовільною, так і бракованою мікроструктурою. Показано, що в умовах тривалої експлуатації парогонів ТЕС ударна в'язкість сталі за кімнатної температури зазвичай знижується, водночас за робочої змінюється несуттєво, а отже, опір крихкому руйнуванню металу стає нижчим, ніж за підвищеної (робочої). Виявлено випадки анізотропії ударної в'язкості металу, вирізаного зі згину парогону з тріщиноподібними дефектами. Визначено кореляційну залежність ударної в'язкості за кімнатної температури із відносним звуженням, одержаним під час випроб на статичний розтяг.

Ключові слова: ударна в'язкість, температура випроб, анізотропія, тривала експлуатація.

Оцінювання стану металу парогонів ТЕС надзвичайно актуальне, оскільки експлуатують їх за умов повзучості і більшість з них відпрацювала понад два–три гарантійних терміни ($24 \cdot 10^4 \dots 32 \cdot 10^4$ h). Лабораторні дослідження вирізок парогінних труб, виготовлених з малолегованих теплотривких сталей, окрім стандартних механічних випроб за кімнатної температури, карбідного аналізу та оцінки мікроструктури, передбачають короточасні механічні випроби за підвищеної (робочої) температури [1]. Короточасна міцність сталі за підвищеної температури регламентована на рівні $\sigma_{0,2}^{550^\circ\text{C}} \geq 180$ МПа [1], а ударна в'язкість – ні, хоча вважають, що вона повинна перевищувати допустиме значення *KCU* за кімнатної температури [2].

Нижче проаналізовано ударну в'язкість сталі 12Х1МФ за кімнатної та підвищеної температур у вихідному стані та після різних термінів експлуатації залежно від напрямку вирізання зразків, структури металу та з урахуванням характеристик за розтягу.

Матеріали та випроби. Досліджували метал, вирізаний з труб у вихідному стані та після їх тривалої експлуатації на парогонях. На ударний згин випробовували зразки з U-подібним концентратором першого типу (ГОСТ 9454 [3]), оскільки саме для них регламентовано рівні *KCU* за кімнатної температури [4]. Під час експерименту за робочої температури (545°C) зразки перегрівали на 15...20°C, попередньо розташовуючи їх в печі типу SNOL 8,2/1100, обладнаній цифровим терморегулятором. Роботу, затрачену на руйнування зразків, визначали за показами маятникового копра моделі 2130 КМ-03.

Паралельно на статичний розтяг за кімнатної температури вивчали циліндричні зразки діаметром 6 mm та довжиною робочої частини 30 mm (тип III

згідно з ГОСТ 1497) [5]. Структуру металу досліджували на оптичному мікроскопі ММО-1600 після травлення шліфів у 4%-му спиртовому розчині азотної кислоти.

Обговорення результатів. У більшості випадків ударна в'язкість сталі у вихідному стані і на початковому етапі експлуатації ($< 5 \cdot 10^4$ h) за кімнатної температури є більша, ніж за робочої. Це зумовлене тим, що за підвищеної температури робота, затрачена на зародження та поширення тріщини, менша внаслідок нижчої когезивної міцності металу. Така закономірність властива і сталі з задовільною ферито-перлітною структурою з дрібнодисперсними карбідами (бал 4 згідно з додатком № 2 до ТУ 14-3-460 [4]) (рис. 1а) і сталі з бракованою мікроструктурою внаслідок перегрівання вище регламентованої температури відпуску (750°C) (бал 8 згідно з [3]) (рис. 1б). У першому випадку ударна в'язкість металу за кімнатної температури становила $2,65 \text{ MJ/m}^2$, а за робочої – $1,31 \text{ MJ/m}^2$. У другому – за робочої температури зменшилась в 1,9 разів порівняно з результатами випроб за кімнатної температури зразків як поздовжньої ($2,96 \text{ MJ/m}^2$), так і поперечної ($1,95 \text{ MJ/m}^2$) орієнтацій. В обидвох випадках за робочої температури вона перевищувала допустимі значення за кімнатної ($\geq 0,5 \text{ MJ/m}^2$ – для зразків поперечної орієнтації і $\geq 0,6 \text{ MJ/m}^2$ – для поздовжньої).

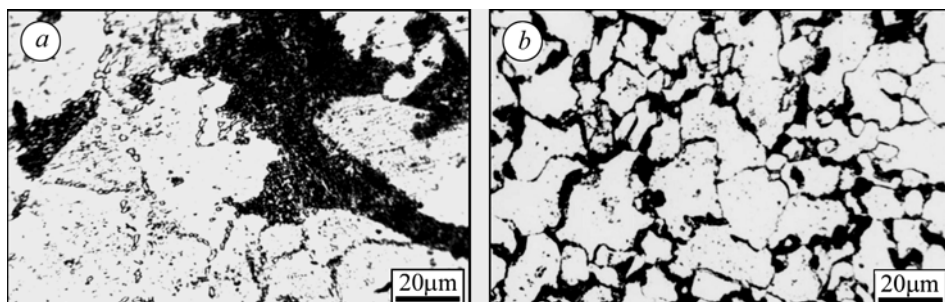


Рис. 1. Рекомендована (а) та бракована (б) структура сталі 12Х1МФ у вихідному стані.

Fig. 1. Recommended (a) and defective (b) structure of 12X1MΦ steel in the initial state.

Внаслідок тривалої експлуатації ударна в'язкість металу парогонів за кімнатної температури зазвичай знижується (рис. 2а), що зумовлено старінням, зміщенням перехідної температури крихкості в область додатних температур, навіть вищих за кімнатну, а також розвитком мікропошкоджуваності та наводнювання сталі [6–8]. Водночас за робочої температури вона змінюється мало (рис. 2б). Тому після тривалого напрацювання опір крихкому руйнуванню тут вищий, ніж за кімнатної (рис. 2). Не слід відкидати впливу нагрівання та витримки сталі при $560 \div 565^\circ\text{C}$ перед випробами, коли залишковий (рухливий) водень десорбує з металу. Позитивний ефект витримання у вакуумі за підвищених температур, пов'язаний із дегазацією металу, простежено раніше [8, 9].

Для попередження небезпечних крихких руйнувань парогонів важливо знати температуру в'язко-крихкого переходу у вихідному стані та після тривалого напрацювання. Тут зразки з U-подібним концентратором недостатньо чутливі до змін опору крихкому руйнуванню порівняно зі зразками Шарпі з V-подібним концентратором [10]. Загалом деградація сталі під час тривалої експлуатації проявляється у зниженні енергії руйнування за випроб на удар та статичної тріщиностійкості, визначеної за методом J -інтеграла.

Аналіз результатів досліджень за короткочасного розтягу зразків, вирізаних з парогінних труб після тривалої експлуатації, свідчить, що за кімнатної температури характеристики розтягу не залежать від орієнтації зразків: зі збільшенням часу експлуатації міцність знижується незначно, а пластичність збільшується. Водночас ударна в'язкість має певні особливості. Для зразків поперечної орієнтації вона завжди менша і за кімнатної, і за робочої температур (рис. 2) та інколи не відповідає вимогам ТУ 14-3-460, хоча для поздовжніх досить висока. Зокрема, під час випроб за кімнатної температури металу розтягнутої ділянки згину парогону $\text{Ø}273 \times 36$ mm, пошкодженого після $133 \cdot 10^3$ h експлуатації, виявлено, що ударна в'язкість поздовжніх зразків є задовільна ($1,33 \text{ MJ/m}^2$), а поперечних – менша більш ніж у десять разів ($0,12 \text{ MJ/m}^2$), що не відповідає вимогам [4].

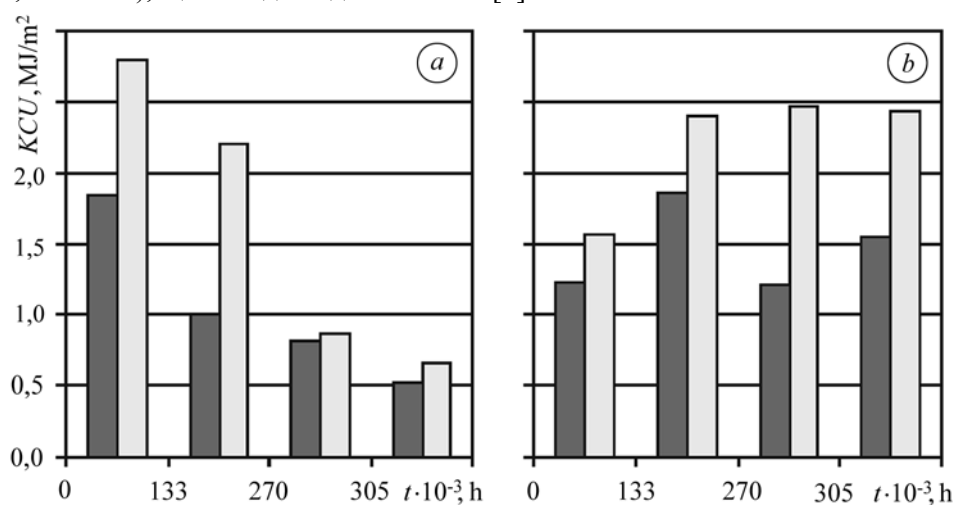


Рис. 2. Гістограми ударної в'язкості KCU за кімнатної (а) та робочої (б) температури сталі 12X1МФ під час її експлуатації на парогоні: темні стовпчики – поперечні зразки; світлі – поздовжні. (Випробувано метал прямих ділянок згинів.)

Fig. 2. Histograms of impact toughness KCU at room (a) and service temperature (b) of 12X1MF steel during its exploitation on pipeline: dark columns – transversal specimens, light – longitudinal. (Metal of direct bend sections was tested.)

Згідно з працею [11] яскраво виражена анізотропія за кімнатної температури властива насамперед сталі з субмікроскопічними і мікроскопічними порами. Тоді ударна в'язкість поперечних зразків суттєво знижується, а поздовжніх незначно. Пов'язано це з тим, що мікротріщини на поперечних зразках розташовані здебільш у площині, яка перетинає вісь надрізу, де і відбувається руйнування. Мікротріщини у поздовжніх зразках викликають “розшарування зразка”, оскільки розташовані у площинах, перпендикулярних до площини руйнування. Відомо, що утворення тріщини вздовж осі труби, за відсутності защемлень, імовірніше, оскільки в поздовжньому перерізі труби діють вдвічі більші розтягувальні напруження, ніж у поперечному [12].

Якщо виготовити поперечні зразки для оцінювання ударної в'язкості металу неможливо, слід урахувати можливе її зниження у цьому напрямі. Тоді доцільно випробувати нестандартні зразки малих розмірів [13].

Простежено зміни характеру руйнування зразків на удар. Якщо за кімнатної температури злам крихкий, зазвичай з незначними губами втягування, то після випроб за робочої температури тріщина галузиться, поширюючись у

площині, перпендикулярній до концентратора, ніби розщеплюючи частини металу (рис. 2). Насамперед це притаманно зразкам поздовжньої орієнтації.

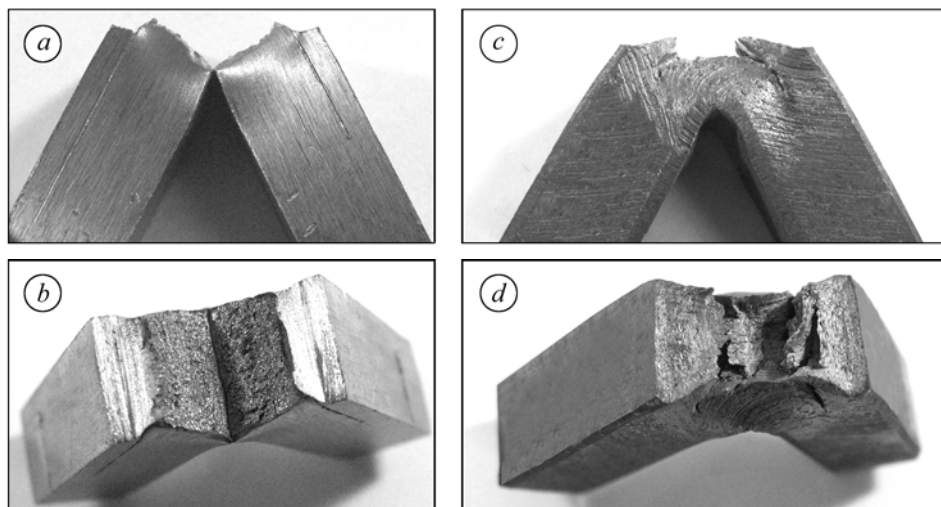


Рис. 3. Зразки після випроб на ударний згин за кімнатної (20°C) (a, b) та робочої (545°C) (c, d) температур.

Fig. 3. Specimens after impact bending testing at room (20°C) (a, b) and service (545°C) (c, d) temperatures.

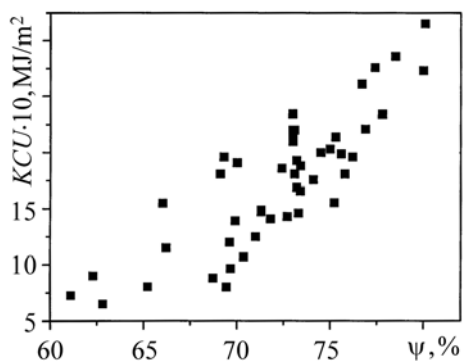


Рис. 4. Кореляційна залежність ударної в'язкості та відносного звуження сталі 12Х1МФ при 20°C.

Fig. 4. Correlation dependence of impact toughness and relative reduction in area for 12X1MФ steel at 20°C.

Відомо [14], що зниження відносного звуження найчастіше супроводжується падінням ударної в'язкості, хоча протилежна тенденція справджується не завжди. Для сталі 12Х1МФ кореляційну залежність між відносним звуженням та ударною в'язкістю, одержану за результатами випроб при кімнатній температурі металу більше 40 вирізок з парогінних труб, наведено на рис. 4. Для значень відносного звуження від 65 до 75% розкид даних ударної в'язкості більший, ніж для низьких ($\psi < 65\%$) та високих ($\psi > 75\%$) значень.

ВИСНОВКИ

Ударна в'язкість сталі 12Х1МФ у вихідному стані за кімнатної температури є вища, ніж за робочої. На відміну від вихідного стану, після тривалої експлуатації опір крихкому руйнуванню металу парогону за цієї температури є нижчий, ніж за робочої. Металу парогону з тріщиноподібними дефектами властива анізотропія ударної в'язкості.

Зниження відносного звуження зазвичай супроводжується падінням ударної в'язкості, хоча розкид значень суттєвий. Для запобігання пошкодам парогонів слід надійно оцінити зміну опору крихкому руйнуванню сталі під час експлуатації. Для цього доцільно визначати енергію руйнування під час

випробувань на ударний згин зразків з V-подібним концентратором та в'язкість руйнування як вихідного металу, так і напрацьованого.

РЕЗЮМЕ. В отличие от исходного состояния после длительной эксплуатации ударная вязкость металла паропровода при комнатной температуре ниже, чем при рабочей. Он при наличии трещиноподобных дефектов характеризуется анизотропией ударной вязкости. Снижение относительного сужения, как правило, сопровождается падением ударной вязкости, хотя разброс значений существенный.

SUMMARY. Contrary to the initial state the impact toughness of pipe-line metal after long-time service at room temperature is lower than than at the service one. The pipeline metal in the presence of crack-like defects is characterized by the anisotropy of impact toughness. The decrease of the relative narrowing in area is accompanied, as a rule, by the decrease of impact toughness, although the scattering of values is significant.

1. *СОУ МПЕ 40.1.17.401:2004.* Контроль металу і продовження терміну експлуатації основних елементів котлів, турбін і трубопроводів теплових електростанцій. Типова інструкція. – К.: Об'єднання енергетичних підприємств “Галузевий резервно-інвестиційний фонд розвитку енергетики”, 2005. – 76 с.
2. *Бугай Н. В., Мухомад Г. В., Красовский А. Я.* Повышение надежности котлов электростанций. – К.: Техника, 1986. – 176 с.
3. *ГОСТ 9454-78 (СТ СЭВ 472-77, СТ СЭВ 473-77).* Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 10 с.
4. *ТУ 14-3-460-2003.* Труби сталеві безшовні для парових котлів і трубопроводів. – Дніпропетровськ: ДП “Наук.-досл. та констр.-техн. ін-т трубої промисловості ім. Я. Ю. Осади”, 2003. – 41 с.
5. *ГОСТ 1497-84 (ИСО 6892-84, СТ СЭВ 471-88).* Металлы. Методы испытаний на растяжение. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 39 с.
6. *Балицький О., Piney I., Процах Х.* Надійність парогонів ТЕС під час тривалої експлуатації // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 4. – С. 36–39.
(*Balyts'kyi O. I., Ripei I. V., and Protsakh Kh. A.* Reliability of Steam Pipelines of Thermal Power Plants in the Course of Long-Term Operation / Materials Science. – 2006. – **42**, № 4. – P. 461–465.)
7. *Вайнман А. Б., Мелехов Р. К., Смян О. Д.* Водородное охрупчивание элементов котлов высокого давления. – К.: Наук. думка, 1990. – 272 с.
8. *Студент О. З., Марков А. Д., Никифорчин Г. М.* Особливості впливу водню на властивості та механізм руйнування металу зварних з'єднань паропроводів ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2006. – № 4. – С. 26–35.
(*Student O. Z., Markov A. D., and Nykyforchyn H. M.* Specific Features of the Influence of Hydrogen on the Properties and Mechanism of Fracture of the Metal of Welded Joints of Steam Pipelines at Thermal Power Plants // Materials Science. – 2006. – **42**, № 4. – P. 451–460.)
9. *Кречковська Г., Марков А., Piney I.* Властивості сталі 15X1M1Ф після експлуатації на головному парогоні ТЕС // Фіз.-хім. механіка матеріалів. Спец. випуск № 7. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2008. – С. 844–847.
10. *Property changes of 12Cr1MoV with 10CrMo910 main steam piping after long-term high-temperature service / Hong Xu, Xue-Kun Huang, Zhen Yang, Ji-ti Pan // Eng. Failure Analysis.* – 2003. – № 10. – P. 245–250.
11. *Антикайн П. А.* Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
12. *Мейкляр М. В.* Как работает металл парового котла. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 95 с.
13. *Foulds J. and Viswanathan R.* Small Punch Testing for Determining the Material Toughness of Low Alloy Steel Components in Service // J. of Eng. Mat. and Tech. – 1994. – **116**, № 4. – P. 457–464.
14. *Справочник по сталям и методам их испытаний / Пер. с нем.* – М.: Металлургиздат, 1958. – 920 с.

Одержано 18.10.2008