

УДК 620.192.46

П.В. Ясній, д.т.н., проф.

І.Б. Окіпний, зав. лаб.

Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя

О.Т. Цирульник, с.н.с.

Фізико-механічний інститут НАН України

Ю.М. Никифорчин, к.т.н., доц.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ВПЛИВ НАВОДНЮВАННЯ НА ЕФЕКТ ПОПЕРЕДНЬОГО ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Представлено методику і результати експериментальних досліджень впливу попереднього термомеханічного навантаження у поєднанні з електролітичним наводнюванням на напружено-деформований стан у вершині тріщини і крихку міцність теплостійкої сталі 15Х2МФА.

Попереднє термомеханічне навантаження (ПТН) тіл з тріщинами полягає в навантаженні тіла при температурі, яка перевищує температуру в'язко-крихкого переходу і призводить до значного підвищення опору крихкому руйнуванню [1]. Загалом підвищення опору матеріалів крихкому руйнуванню після ПТН обумовлено зміною напружено-деформованого стану та деформаційним зміцненням матеріалу у вершині тріщини та її затупленням [1–3].

Оскільки ПТН розробляється як один з перспективних методів збільшення строку експлуатації важливих вузлів атомних енергетичних установок, які працюють під високим тиском, необхідно врахувати вплив сукупних чинників на цей ефект, зокрема абсорбованого водню. Джерелами наводнювання матеріалу корпусу реактора є водень, який утворюється внаслідок електрохімічних реакцій, а також водень металургійного і технологічного походження [4]. Також можливе наводнювання металу корпусу реактора в умовах пониження температури від робочої до температури перехідних режимів під час його зупинки чи пуску, яке інтенсифікується ще й нейтронним опроміненням [5, 6]. Окрім того, опромінення посилює негативний вплив водню на пластичність матеріалу корпусу реактора, тобто матеріал швидше переходить до крихкого стану.

Метою роботи є виявлення основних закономірностей впливу сумісної дії ПТН і водню на залишкове розкриття вершини тріщини і опір крихкому руйнуванню теплостійкої сталі.

Методика дослідження. Вплив водню і ПТН на крихку міцність та залишкове розкриття вершини тріщини сталі 15Х2МФА досліджували за позacentрового розтягу компактних зразків товщиною $t = 19$ і 25 мм (рис. 1) на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100 з керуванням від ПК.

Зразки, основні розміри яких подано в табл. 1, вирізали із темплету розміром $120 \times 65 \times 120$ мм (рис. 2).

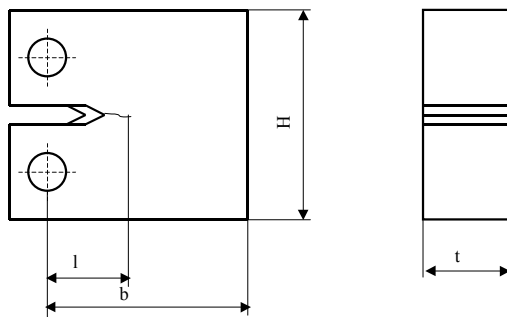


Рис. 1. Компактний зразок для випробування

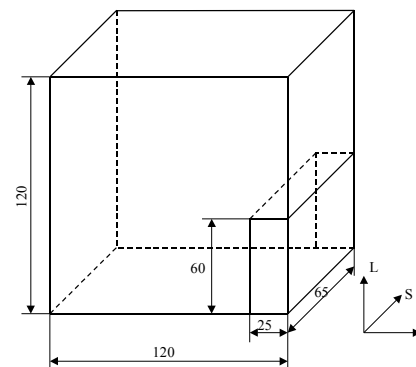


Рис. 2. Схема вирізки компактних зразків

Таблиця 1

t, мм	b, мм	H, мм
19	40	48
25	50	60

Досліджували вплив електролітичного наводнювання і попереднього термомеханічного навантаження на крихку міцність корпусної реакторної сталі 15Х2МФА після термообробки, яка

моделює окрихчення матеріалу на середині терміну експлуатації реактора типу ВВЕР-440: гартування з 1000 °С, 6 год. в олії; відпуск 6 год. – за 620 °С – на повітрі.

Попередньо на всіх зразках вирощували втомні тріщини за коефіцієнта асиметрії циклу навантажування $R = K_{\min}/K_{\max} = 0,1$ та частоти навантажування 40 Гц згідно з рекомендаціями [7] (тут K_{\min} , K_{\max} – найменший і найбільший коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН)). Відносна довжина тріщини становила $(0,45 \dots 0,55)b$ (b – ширина зразка).

Оскільки величина розвантаження майже не впливає на критичний КІН K_f сталі 15Х2МФА, в експериментах була використана схема ПТН з повним розвантаженням (рис. 3) [8].

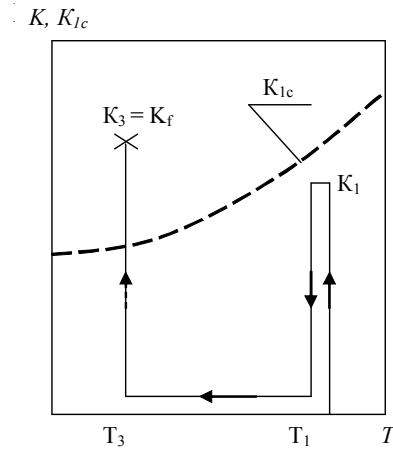


Рис. 3. Схема проведення попереднього термомеханічного навантаження з повним розвантаженням

Попереднє термомеханічне навантаження всіх зразків здійснювали при температурі $T_1 = 350$ °С і $\bar{K}_1 = \frac{K_1}{K_Q^{5\%}} = 0,85$ за методикою [9] (де K_1 – максимальний КІН при термомеханічному навантаженні;

$K_Q^{5\%}$ – критичне значення КІН, визначеного за допомогою 5 % січної на діаграмі руйнування при температурі 350 °С). Після чого зразок розвантажували, охолоджували до кімнатної температури. Згодом зразки перед випробуванням на в'язкість руйнування наводнювали електролітичним способом [10]. Перед наводненням зразки хімічно знежирювали за температури 80 °С впродовж 30 хв. у водному розчині й промивали в гарчій, а потім – у холодній воді. Електролітичне наводнювання проводили у розчині сірчаної кислоти (рН0) за густини струму 10 А/дм² та температури 25 °С впродовж 2 год. Згодом проводили електрохімічне нікелювання, яке є підкладкою для мідного покриття протягом 30 хв. за температури 35 °С і густини струму 5 А/дм². Мідне покриття наносили для запобігання виходу з металу абсорбованого водню у водному розчині впродовж 30 хв. за температури 25 °С і густини струму 5 А/дм².

Зразки з тріщиною деформували розтягом (ПТН) і розтягом з одночасним накладанням низькоамплітудної циклічної складової (комбіноване ПТН) при $\Delta K = 20$ МПа√м і частоті $f = 25$ Гц. Під час ПТН при 350 °С записували зусилля P і розкриття берегів надрізу Δ_1 , а при 20 °С ще і переміщення берегів тріщини поблизу її вершини Δ_2 на двокоординатний самопишучий потенціометр і на магнітоносій.

Після ПТН на металографічному мікроскопі типу МІМ-10 при 20 °С вимірювали залишкове розкриття берегів тріщини на віддалі до 2 мм від її вершини з кроком 0,2 мм.

Залишкове розкриття вістря тріщини δ_{res} після розвантаження при 350 °С визначали з діаграми $P - \Delta_1$ і перераховували у вершину за формулою [11]:

$$\delta_{res} = \frac{0,4(b-l)}{0,4b + 0,6l + z} \Delta_1, \tag{1}$$

де z – відстань від осі прикладання сили до лінії вимірювання переміщення Δ_1 ; l – довжина тріщини.

Критичне розкриття вершини тріщини δ_f визначали за результатами вимірювання двома датчиками переміщення за формулою [12]:

$$\delta_f = \Delta_2 \left(\frac{r_1}{r_2} - \frac{\Delta_1}{\Delta_2} \right) / \left(\frac{r_1}{r_2} - 1 \right); \tag{2}$$

де Δ_1 і Δ_2 – покази датчиків на відстані r_1 і r_2 від вершини тріщини. Згідно з [12] $r_1 \geq 5 \div 6$ мм, $r_2 = 2 \div 3$ мм.

Результати дослідження та їх обговорення. Стандартні механічні властивості сталі 15Х2МФА після термообробки, яка моделює окрихчення матеріалу на середині терміну експлуатації реактора типу ВВЕР-440 за одновісного розтягу 5 мм циліндричних зразків наведені в табл. 2. Підвищення температури випробувань до 350 °С дещо знижує характеристики міцності сталі.

Таблиця 2

T випробувань, °С	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %
20	900	1000	15,8	–
350	790	878	10,0	56,1

Залишкове $\delta_{res}(r)$ і усереднене залишкове розкриття тріщини на поверхні зразка, виміряного на мікроскопі МІМ-10, залежить від відстані до вістря тріщини (рис. 4). Найбільшого значення $\delta_{res}(r)$ досягає на відстані 0,4...0,6 мм від вершини тріщини (r).

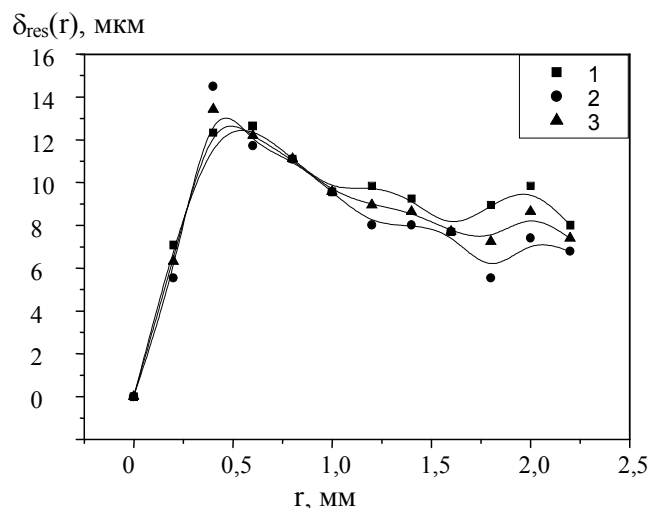


Рис. 4. Залежність $\delta_{res}(r)$ в сталі 15Х2МФА після ПТН за температури 350 °С від відстані до її вістря. Лицева поверхня зразка (1); зворотна поверхня зразка (2); усереднені значення (3)

В подальшому спостерігається зменшення залишкового розкриття тріщини в міру віддалення від вершини тріщини. Слід зазначити, що на рис. 3 подано лише дані по одному зразку після комбінованого ПТН при 350 °С і $\bar{K}_I = 0,85$. Для інших режимів ПТН отримано подібні залежності.

Залишкове розкриття тріщини також обчислювали за формулою (1). На рис. 5 представлено залежність залишкового розкриття тріщини, обчисленого за формулою (1), від розмаху КІН при ПТН. Максимальний КІН при ПТН був в межах 93...102 МПа $\sqrt{м}$. Циклічна складова за комбінованого ПТН ДК зменшує залишкове розкриття вершини тріщини, як для зразків товщиною $t = 19$ мм, так і 25 мм (рис. 5). Зазначимо, що значення δ_{res} для зразків товщиною 25 мм дещо вищі порівняно зі зразками товщиною 19 мм.

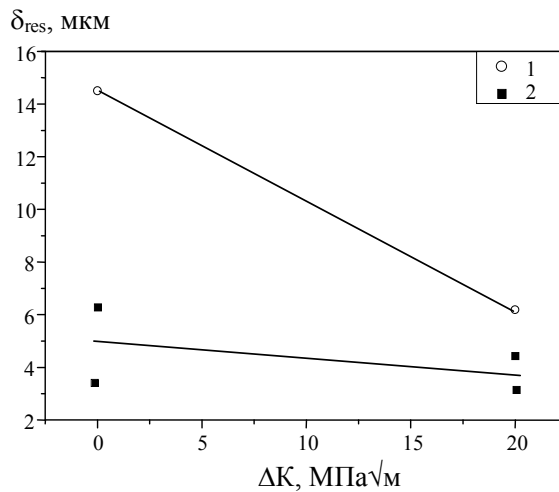


Рис. 5. Залежність δ_{res} в сталі 15X2МФА при 350 °С обчислене за формулою (1) від розмаху напружень ΔK при ПТН (товщина 25 мм (1) і 19 мм (2))

Існує чітка залежність критичного КІН K_f після ПТН від критичного розкриття вершини тріщини, обчисленого як без врахування (а), так і з урахуванням залишкового розкриття вершини тріщини (б) (рис. 6).

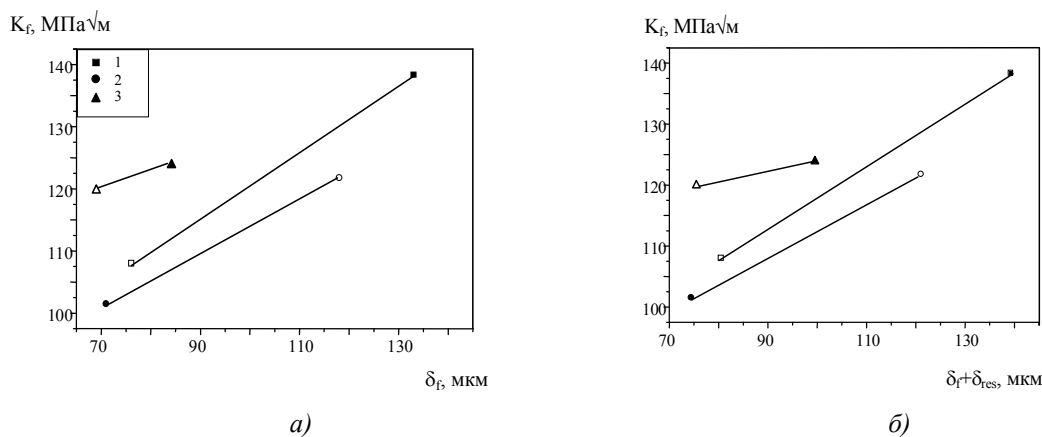


Рис. 6. Залежність K_f наводненої (2, 3) і ненаводненої (1) сталі 15X2МФА при 20 °С від δ_f (а) і від $\delta_f + \delta_{res}$ (б), обчисленого за формулою (1). Товщина 19 мм (1, 2) і 25 мм (3)

Що більше зростають внаслідок ПТН δ_f чи $\delta_f + \delta_{res}$ наводнених і ненаводнених зразків обох типорозмірів, то більші значення критичного K_f отримано при їх руйнуванні. Ці значення дещо більші для зразків товщиною 25 мм, що може бути обумовлено ефектом масштабу, який для сталі 15X2МФА полягає у збільшенні критичного КІН із збільшенням товщини зразків [13].

На рис. 7 подано залежність критичного КІН від розмаху КІН при ПТН сталі 15X2МФА. Критичний КІН K_f вказаної сталі після комбінованого ПТН майже не чутливий до наводнення.

Зазначимо, що додаткова циклічна складова зменшує критичний КІН K_f ненаводненої сталі 15X2МФА і дещо підвищує K_f наводненої, порівняно з ПТН.

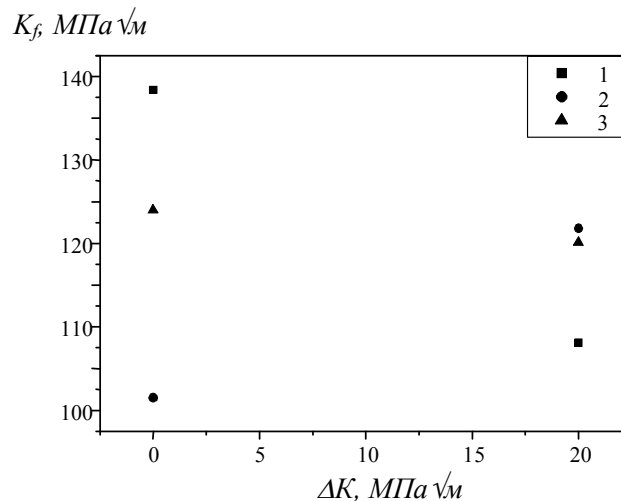


Рис. 7. Залежність K_f сталі 15X2MФА при 20 °С ненаводненої (1) і наводненої (2, 3) від розмаху КІН ΔK . Товщина 19 мм (1, 2) і 25 мм (3)

За величину в'язкості руйнування K_{1c} сталі 15X2MФА при статичному навантаженні було взято значення, отримане на зразках товщиною 25 мм в роботі [14].

Незалежно від режимів навантаження (ПТН чи комбіноване ПТН) на повітрі та в агресивному середовищі (електролітичний водень) в усіх випадках опір крихкому руйнуванню досліджуваної сталі підвищувався порівняно з K_{1c} . Так, за статичного ПТН опір крихкому руйнуванню збільшився на 40 % для ненаводненого матеріалу товщиною 19 мм і на 35 % та 20 % для наводненого матеріалу товщиною 25 мм і 19 мм відповідно. Отже за статичного ПТН електролітичне наводнювання знижує критичний КІН K_f зразків товщиною 19 мм і 25 мм порівняно з ненаводненим матеріалом. За комбінованого ПТН опір крихкому руйнуванню збільшився на 25 % для ненаводненого матеріалу товщиною 19 мм і на 30 % – для наводненого матеріалу незалежно від товщини. Отже електролітичне наводнювання за комбінованого ПТН дещо підвищує опір крихкому руйнуванню порівняно з комбінованим ПТН ненаводненого матеріалу, що може бути пов'язане із розкидом його властивостей, однак залишається меншим порівняно із статичним ПТН ненаводненого матеріалу.

Висновки:

1. Виявлено, що незалежно від товщини зразків (19 і 25 мм) комбіноване попереднє термомеханічне навантаження знижує залишкове розкриття вершини тріщини в сталі 15X2MФА.
2. Незалежно від товщини зразків і схеми ПТН зі збільшенням критичного КІН K_f зростає критичне розкриття вершини тріщини наводненої і ненаводненої сталі 15X2MФА.
3. В усіх випадках, незалежно від режимів навантаження, отримано підвищення опору крихкому руйнуванню досліджуваної сталі порівняно з K_{1c} . Після ПТН і наступного наводнювання критичний КІН K_f сталі збільшується на 20–35 % порівняно з в'язкістю руйнування K_{1c} залежно від товщини зразків. Також ПТН збільшує критичний КІН ненаводненого матеріалу приблизно на 40 % і на 25 % за комбіноване ПТН.
4. За ПТН електролітичне наводнювання понижує значення критичного КІН K_f порівняно із ненаводненим матеріалом.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Pokrovsky V.V., Troshchenko V.T., Kaplunenko V.G., et al. A promising method for enhancing resistance of pressure vessels to brittle fracture // Int. J. Pres. Ves. s Piping. – 1994. – P. 9–24.
2. Nakamura H., Kobayashi H., Kodaira T., Nakamura H. К влиянию предварительного нагружения на вязкость разрушения стали А533В1 // Материалы Международной конференции по разрушению. – М.: НИИИнформэнергомаш. – 1985. – Вып. 3. – С. 27–38.
3. Reed P.A.S., Knott J.F. An investigation of the warm prestressing (WPS) effect in А533В weld metal // Fatigue Fract. Engin. Mater. Struc. – 1992. – № 12. – P. 1251–1270.
4. Мелехов Р.К., Похмурський В.І. Конструкційні матеріали енергетичного обладнання. Властивості і деградація. – К.: Наук. думка, 2003. – 384 с.

5. *Parkins R.N.* Some electrochemical aspects of mechanisms of corrosion fatigue // *Metal. Sci.* – 1979. – № 7. – P. 381–386.
6. Радиационное повреждение стали корпусов водо-водяных реакторов / Под. общ. ред. И.В. Горынина. – М.: Энергоиздат, 1981. – 192 с.
7. ГОСТ 25.506-85. Расчет и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при статическом нагружении – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
8. *Ясний П.В.* Пластично деформовані матеріали: втрома і тріщиноотривкість. – Львів: Світ, 1998. – 292 с.
9. *Ясний П., Гуцайлюк В., Пишняк П.* Вплив комбінованого попереднього термомеханічного навантаження на опір крихкому руйнуванню теплостійкої сталі // *Вісник ТДТУ.* – 2003. – Т. 8. – № 4. – С. 5–12.
10. *Цирульник О., Окіпний І.* Вплив водню і пластичної деформації на напруження сколювання теплостійкої сталі // *Вісник ТДТУ.* – 2006. – Т. 11. – № 1. – С. 5–11.
11. *Schwalbe K. N.* Basic Engineering methods of fracture mechanics and fatigue. GKSS – Forschungszentrum Geesthaht. – November 2001. – 165 p.
12. Механика разрушения и прочность материалов: Справочное пособие: В 4-х т. / Под ред. В.В. Панасюка. – Т. 3: Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения. – К.: Наук. думка, 1988. – 435 с.
13. *Троценко В.Т., Покровский В.В., Каплуненко В.Г.* Прогнозирование трещиностойкости теплоустойчивых сталей с учетом влияния размеров образцов. Сообщение 1. Результаты экспериментальных исследований // *Проблемы прочности.* – 1997. – № 1. – С. 5–25.
14. *Ясний П.В., Подкозьін В.Ю., Ковальчук Я.О.* Деклараційний патент на винахід 23231А, F16L57/0. Спосіб підвищення стійкості елемента конструкції до поширення тріщин. Опуб. бюл. № 4/19.05.1998.

ЯСНИЙ Петро Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства, проректор з наукової роботи Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування.

Тел.: 8(035) 25-36-74.

E-mail: yasniy@networkacad.net

ОКІПНИЙ Ігор Богданович – завідувач лабораторії кафедри матеріалознавства Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя.

Наукові інтереси:

– механіка руйнування.

Тел.: 8(035) 25-35-09.

E-mail: kafmat@tu.edu.te.ua

ЦИРУЛЬНИК Олександр Тимофійович – старший науковий співробітник Фізико-механічного інституту ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Наукові інтереси:

– корозійне та корозійно-механічне руйнування матеріалів.

Тел.: 8(0322) 63-21-33.

E-mail: tsyrunlyk@ipm.lviv.ua

НИКИФОРЧИН Юрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри зносостійкості та відновлення деталей Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Наукові інтереси:

– дослідження конструкційної міцності матеріалів енергетичного та нафто-хімічного обладнання;

– розроблення методів підвищення роботоздатності та довговічності конструкцій.

Тел.: 8(0342) 24-82-41.

Подано 25.02.2007