

Температурная зависимость трещиностойкости при смешанных I+III модах с учетом предварительного термомеханического нагружения

В. В. Покровский, В. Н. Ежов, В. Г. Сидяченко

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Представлены результаты экспериментальных исследований и теоретического обобщения влияния предварительного термомеханического нагружения на характеристики статической трещиностойкости теплоустойчивой стали 15Х2НМФА(II). Установлено, что составляющая продольного сдвига уменьшает “положительный эффект” предварительного термомеханического нагружения, заключающийся в увеличении трещиностойкости. Наблюдается уменьшение трещиностойкости при продольном сдвиге по отношению к таковой при нормальном отрыве выше температуры критической хрупкости материала, что необходимо учитывать в расчетах ресурса оборудования по критериям трещиностойкости.

Ключевые слова: трещиностойкость при продольном сдвиге, предварительное термомеханическое нагружение, модифицированный компактный образец.

Введение. Большинство работ в механике разрушения посвящено изучению трещин нормального отрыва. Однако вследствие произвольного расположения плоскости трещины к внешним нагрузкам ее берега смещаются в разных направлениях, в результате чего разрушение происходит при смешанных модах нагружения. Обзор известных данных показывает, что отсутствие нормативной базы (стандартов) и единой экспериментальной методики (образцов) по исследованию трещиностойкости при смешанных модах нагружения приводит к значительному разбросу экспериментально полученных критических значений коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) [1–3]. Приведенные на рис. 1 данные свидетельствуют о том, что при нагружении по моде II, соответствующей углу $\psi = 90^\circ$, отношение K_{IIc}/K_{Ic} для алюминиевых сплавов, а также для конструкционных материалов изменяется от 0,5 до 4 [1], а по данным работы [3] – от 0,1 до 1,5. Следовательно, не для всех материалов удовлетворяется критерий “максимальных нормальных напряжений”, в соответствии с которым критические КИН соотносятся как $K_{IIIc} \approx K_{IIc} \approx 0,866K_{Ic}$ [4]. Поэтому необходимо экспериментально уточнять данные по характеристикам трещиностойкости при нагружении по модам II и III.

Обобщение приведенных в [4–7] данных говорит о том, что поведение хрупких материалов в случае нагружения при смешанных модах удовлетворительно описывается моделями максимальных нормальных напряжений, минимальной плотности энергии деформации, максимальной скорости высвобождения энергии деформации и т.д.

В относительно пластичных материалах трещина может развиваться как по моде I, так и по моде III. В этом случае модели строятся на основе повреждения при нормальном отрыве и продольном сдвиге (максимальные сдвиговые или касательные деформации) [3, 8].

Предварительное термомеханическое нагружение (ПТН), которое способствует повышению сопротивления хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей с трещинами, положено в основу перспективного метода повышения ресурса безопасной эксплуатации корпусов энергетических реакторов типа ВВЭР. Большинство экспериментальных и теоретических исследований посвящено изучению ПТН образцов с трещинами при нормальном отрыве (мода I) [9, 10]. Данные исследований по оценке влияния ПТН на характеристики вязкости разрушения при смешанном нагружении

немногочисленны [11–13]. Так, в работе [11] для корпусных реакторных сталей показано, что ПТН по моде I вызывает рост вязкости разрушения на нижнем шельфе температурной зависимости. Однако при этом отмечается, что увеличение составляющей поперечного сдвига (мода II) способствует переходу от хрупкого характера разрушения к вязкому даже в условиях низких (-120°C) температур [11]. В этих случаях ПТН по моде I или II не оказывает влияния на вязкость разрушения при поперечном сдвиге (мода II). Если ПТН осуществляется по моде II, вязкость разрушения по моде I снижается на 60% по сравнению с исходной (рис. 2).

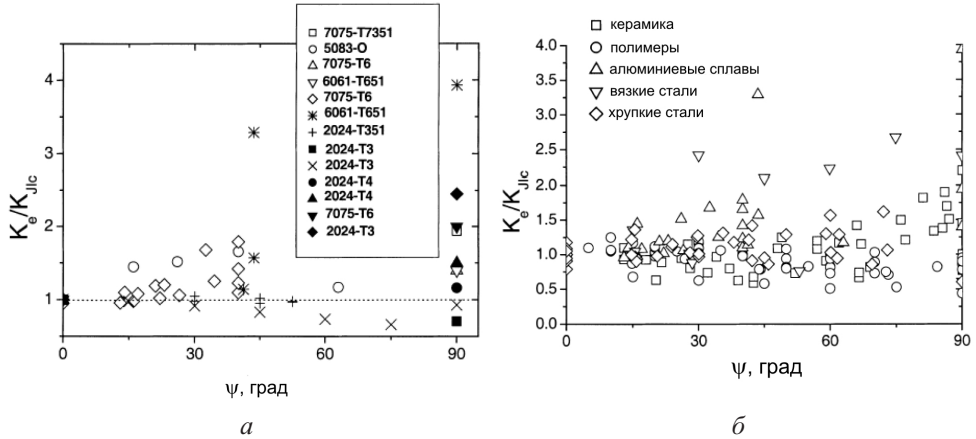


Рис. 1. Зависимость нормированной вязкости разрушения при смешанных I+II модах нагружения $K_e/K_{J_{Ic}} = \sqrt{J_I + J_{II}} / \sqrt{J_{Ic}}$ от $\psi = \text{tg}^{-1}(K_{II}/K_I)$ для разных материалов по данным [1].

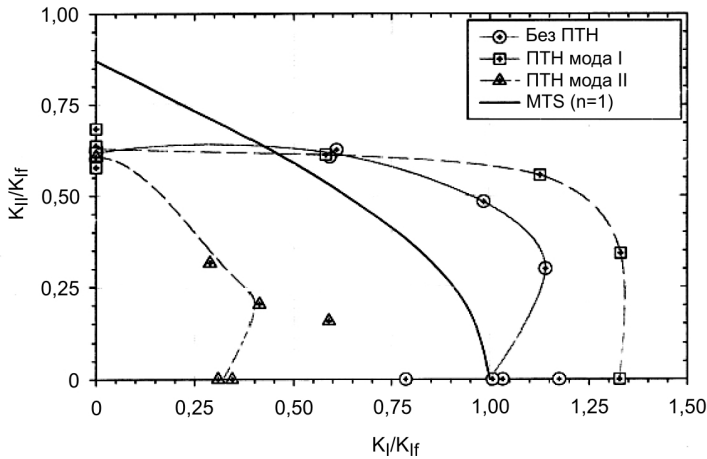


Рис. 2. Влияние ПТН на вязкость разрушения при смешанных I+II модах нагружения [11].

С учетом отмеченного выше цель работы заключается в исследовании влияния температуры на характеристики трещиностойкости материалов при смешанных I+III модах нагружения с учетом ПТН и сравнение их с ранее [13] полученными температурными зависимостями вязкости разрушения по модам I и III.

Методика экспериментальных исследований. Характеристики статической трещиностойкости при продольном сдвиге (мода III) и при комбинации отрыва с продольным сдвигом (мода I+III) исследовали на сервогидравлических установках.

Испытательный комплекс “Гидропульс 400” (фирма Schenck, Германия) предназначен для статических, повторно-статических, циклических испытаний образцов различной геометрии при растяжении (сжатии) в широком диапазоне скоростей нагружения и деформаций при температурах испытаний $-196...1000^{\circ}\text{C}$. Установка ViSS Vi-00-701 позволяет одновременно испытывать образец на растяжение и кручение.

Охлаждение образца до указанных температур осуществлялось за счет подачи хладагента (жидкий азот или его пары) в контактный охладитель, представляющий собой выполненную из меди замкнутую полость.

Для получения характеристик трещиностойкости при нагружении по моде III использовали круглые цилиндрические образцы диаметром 15 мм с кольцевым концентратором ($d_{\text{кон}} = 11$ мм) и радиусом надреза 0,1 мм.

Для исследования характеристик трещиностойкости при комбинированном нагружении по моде I+III использовали модернизированный компактный образец (рис. 3) [14].

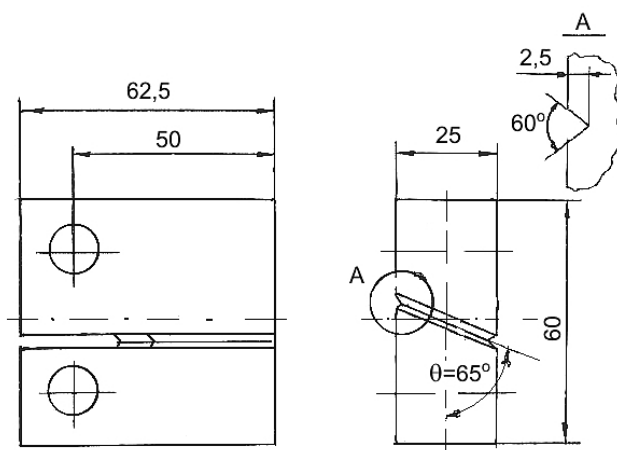


Рис. 3. Модернизированный компактный образец с косою трещиной [14].

Для оценки значений вязкости разрушения K_I и K_{III} использовали данные работы [14]. Приложенную к образцу нагрузку раскладывали на составляющие

$$\begin{aligned} F_I &= F \sin \theta; \\ F_{III} &= F \cos \theta. \end{aligned} \quad (1)$$

Для учета наличия направляющих прорезей в образце, расположенных под углом θ , вводится поправка по нетто-сечению образца:

$$t_{\text{net}} = 0,8t/\sin \theta. \quad (2)$$

Значение K можно оценить согласно разложению приложенной нагрузки на F_I и F_{III} по формулам

$$K_I = \frac{F_I}{0,8t\sqrt{W}} f(a/W)(\sin \theta)^2; \quad (3)$$

$$K_{III} = \frac{F_{III}}{0,8t\sqrt{W}} f(a/W)(\sin \theta \cos \theta), \quad (4)$$

где $f(a/W)$ – тарировочная функция, учитывающая особенности нагружения и геометрию образца [15].

При выбранном угле $\theta = 65^\circ$ отношение $K_I/K_{III} = 2,14$ выполнялось при всех испытаниях. В соответствии с рекомендациями работы [16] по полученным данным строили зависимость эквивалентного коэффициента интенсивности напряжений K_e от температуры:

$$K_e = \sqrt{\frac{K_I^2}{2} + \sqrt{\frac{K_I^4}{4} + 4K_{III}^4}}. \quad (5)$$

Результаты исследований и их обсуждение. Исследовали сталь 15X2НМФА(II), которая относится к легированным конструкционным сталям и применяется для изготовления корпусов атомных реакторов ВВЭР. Сталь подвергали термической обработке, которая имитирует радиационное охрупчивание. Механические характеристики стали определяли при испытании на растяжение цилиндрических образцов согласно ГОСТ 1497-84 (табл. 1). Исследования проводили при температуре, соответствующей температуре ПТН (180, 20°C), и температуре испытаний после ПТН (–150, –196°).

Т а б л и ц а 1

Механические характеристики стали 15X2НМФА(II) при растяжении

$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2},$ МПа	$\sigma_B,$ МПа
180	590	668
20	636	735
–150	970	1024
–196	1125	1168

Методика получения критических значений КИН при продольном сдвиге цилиндрических образцов с кольцевой трещиной представлена ранее [17], а данные по K_{Ic} заимствованы из [9].

Результаты исследования вязкости разрушения при нагружении по модам I или III представлены в табл. 2. Обработку результатов проводили согласно рекомендациям работы [18].

Т а б л и ц а 2

Сводная таблица температурной зависимости характеристик трещиностойкости стали 15X2НМФА(II)

КИН	$T, ^\circ\text{C}$					
	–196	–150	–90	20	100	180
K_{Ic}	40	60	92	140	210	220
K_{IIIc}	42,5	38	35,1	24	25	25,6

Анализ полученных данных показывает, что по мере снижения температуры испытаний критические значения характеристик вязкости разрушения при нормальном отрыве (K_{Ic}), определенные на стандартных компактных образцах, значительно уменьшаются и становятся приблизительно равными таковым при продольном сдвиге

(K_{IIIc}) при температуре -196°C , полученным при кручении цилиндрических образцов с кольцевой трещиной. Характеристика K_{IIIc} при этом несколько увеличивается с понижением температуры. Такое поведение отмечается и для других материалов [3].

Для оценки корректности результатов проводили расчеты размеров областей пластической деформации в вершине трещины. Полученные данные сравнивали с геометрическими размерами образцов с использованием подходов Ирвина [19]:

$$r_{pIII} = \frac{3}{2\pi} \left(\frac{K_{IIIc}}{\sigma_{0,2}} \right)^2. \quad (6)$$

Результаты расчетов r_{pIII} представлены в табл. 3. Там же приведены значения размеров исходных трещин и исследуемых образцов. Как видно, размеры областей пластической деформации существенно меньше размеров образца и начальной длины трещины l .

В табл. 4 представлены значения K_I и K_{III} , рассчитанные по критической нагрузке F согласно формулам (3), (4) при совместном нагружении по моде I+III.

Т а б л и ц а 3

Размеры областей пластической деформации при разрушении стали 15X2НМФА(II) по моде III

r_{pIII} , мм, при T , $^{\circ}\text{C}$				l , мм	$d_{\text{кон}}/2$, мм
180	20	-150	-196	2,8...3,2	5,5
0,899	0,679	0,732	0,680		

Т а б л и ц а 4

Характеристики трещиностойкости стали 15X2НМФА(II) при нагружении по моде I+III при разной температуре

T , $^{\circ}\text{C}$	K_I , МПа · м ^{1/2}	K_{III} , МПа · м ^{1/2}	K_I/K_{Ic}	K_{III}/K_{IIIc}	F , кН
180	57,4	26,6	0,26	1,04	32,8
-90	68	32	0,744	0,91	54,0
-196	34,2	16	0,85	0,37	18,7
-196	38,5	18	0,96	0,42	31,5

На рис. 4 приведены изломы модернизированных компактных и цилиндрических образцов, испытанных при различных температурах. С понижением температуры трещина изменяет плоскость развития в соответствии с критерием максимальных нормальных напряжений и стремится перейти к разрушению нормальным отрывом как при чистом сдвиге (кручение цилиндрического образца, рис. 4,а), так и при смешанных I+III модах нагружения (рис. 4,б).

На рис. 5 представлены зависимости характеристик вязкости разрушения стали 15X2НМФА(II) по модам I и III от температуры, а также результаты расчетов K_e по формуле (5) при исследовании разрушения по смешанным модам I+III после ПТН и без такового.

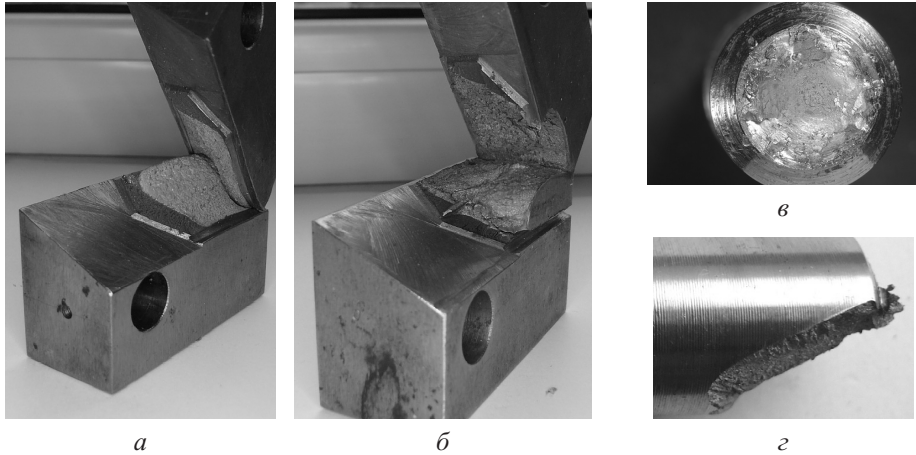


Рис. 4. Изломы образцов: *a, б* – с косым надрезом, модернизированные компактные; *в, г* – цилиндрические: *a, в* – $T = 180^{\circ}\text{C}$; *б* – $T = -90^{\circ}\text{C}$; *г* – $T = -196^{\circ}\text{C}$.

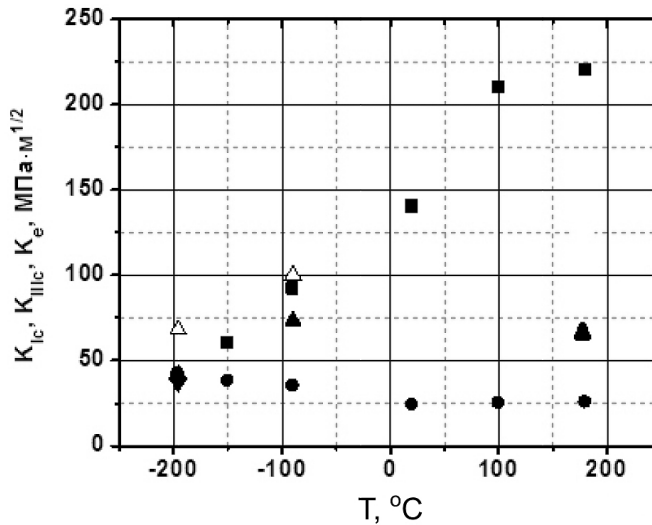


Рис. 5. Температурная зависимость вязкости разрушения: ■ – K_{Ic} ; ● – K_{IIIc} ; ▲ – K_e ; △ – K_e (после ПТН).

Для модернизированного компактного образца значения K_e после ПТН увеличиваются на 75% при температуре -196°C , при которой составляющая хрупкого разрушения выражена больше, чем при температуре -90°C , когда повышение K_e составляет 33% по сравнению с этой же характеристикой без ПТН. Как известно из ранее [13] выполненных исследований, повышение вязкости разрушения в результате ПТН в наибольшей степени проявляется при хрупком разрушении. Так, в случае нормального отрыва ПТН может повышать вязкость разрушения K_{Ic} в два раза и более, в том числе и для исследуемого материала [9]. Анализ приведенных на рис. 5 данных показывает, что компонента продольного сдвига несколько уменьшает влияние ПТН на хрупкую вязкость разрушения.

По результатам экспериментальных исследований можно построить диаграмму предельного состояния тел с трещинами (рис. 6). Учитывая, что при смешанных макромеханизмах разрушения граничные условия отображаются как

$$\frac{K_I}{K_{Ic}} = f\left(\frac{K_{III}}{K_{IIIc}}\right), \quad (7)$$

для описания поверхности предельного состояния можно воспользоваться рекомендациями работы [3]:

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIc}}\right)^2 = 1. \quad (8)$$

По этой диаграмме можно оценить допустимую величину прикладываемых усилий к элементам конструкций. Как видно из рис. 6, данные по характеристикам трещиностойкости, полученные при различных температурах на модернизированном компактном образце с фиксированным углом наклона трещины (рис. 3), удовлетворительно описываются критериальной кривой (8).

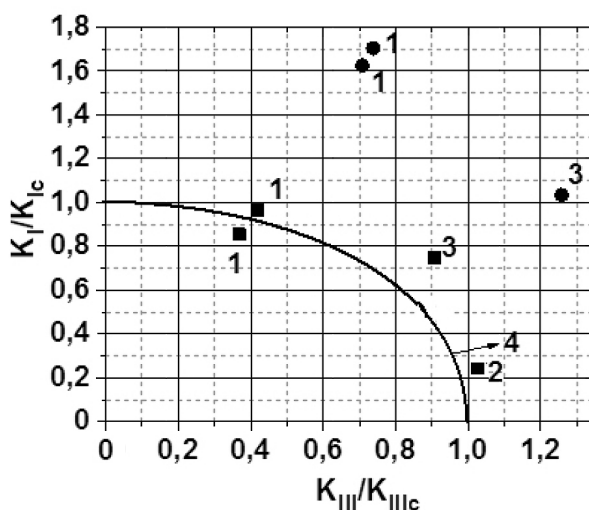


Рис. 6. Диаграмма предельного состояния для материала 15X2NMFA(II) при разной температуре: ■ – без ПТН; ● – после ПТН. (1 – $T = -196^\circ\text{C}$; 2 – $T = -180^\circ\text{C}$; 3 – $T = -90^\circ\text{C}$; 4 – расчет по формуле (8).)

Как указывалось выше, ПТН способствует повышению сопротивления хрупкому разрушению. В исследуемых модернизированных компактных образцах при совместном нагружении по моде I+III ПТН осуществляется по схеме с полной разгрузкой, т.е. образец нагревается выше температуры вязкохрупкого перехода (180°C) и нагружается до $(0,8...0,9)K_e$, затем разгружается и охлаждается. Выполненные исследования по выбранной схеме ПТН показывают, что при понижении температуры отмеченное выше увеличение эквивалентной характеристики трещиностойкости K_e происходит из-за преобладания составляющей нормального отрыва при температуре -196°C , в то время как при температуре -90°C пластические свойства материала обуславливают увеличение составляющей продольного сдвига. После ПТН наблюдается незначительный рост вязкости разрушения при продольном сдвиге, при этом составляющая вязкости разрушения при нормальном отрыве изменяется мало.

В табл. 5 представлены результаты исследования образцов и исходные данные для расчета по формулам (1)–(4).

Т а б л и ц а 5

Характеристики трещиностойкости стали 15Х2НМФА(II) при нагружении по моде I+III при различных температурах с учетом ПТН

$T, ^\circ\text{C}$	$K_I, \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	$K_{III}, \text{МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$	K_I/K_{Ic}	K_{III}/K_{IIIc}	$P, \text{кН}$	$l, \text{мм}$
-90	95	44,4	1,03	1,26	62,2	22,46
-196	65	30,3	1,62	0,71	43,7	22,02
-196	68	31	1,7	0,74	39,4	24,56

Выводы

1. Применение модифицированного компактного образца с косою трещиной позволяет удовлетворительно описать экспериментальные данные по статической вязкости разрушения, в том числе с учетом ПТН, и изучить вклад составляющих нормального отрыва и продольного сдвига в эффект ПТН.

2. Установлено, что составляющая продольного сдвига уменьшает “положительный эффект” предварительного термомеханического нагружения.

3. Сравнение критических значений коэффициентов интенсивности напряжений при нормальном отрыве и продольном сдвиге при температурах ниже и выше температуры изменения характера разрушения от хрупкого к вязкому свидетельствует о необходимости модификации нормативных документов по оценке предельной несущей способности конструктивных элементов с трещинами, в частности корпусов атомных энергетических реакторов, оборудования 1- и 2-го контуров, трубопроводов, газо- и нефтепроводов, а также других ответственных конструкций.

Резюме

Наведено результати експериментальних досліджень і теоретичного обґрунтування впливу попереднього термомеханічного навантаження на характеристики статичної тріщиностійкості теплостійкої сталі 15Х2НМФА(II). Установлено, що складова поздовжнього зсуву зменшує “позитивний ефект” попереднього термомеханічного навантаження. Відмічається зменшення тріщиностійкості при поздовжньому зсуві відносно такої при нормальному відриві вище за температуру критичної крихкості матеріалу, що необхідно враховувати при розрахунку ресурсу обладнання за критеріями тріщиностійкості.

1. *Laukkanen A.* Analysis of experimental factors in elastic-plastic small specimen mixed-mode I-II fracture mechanical testing // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2001. – **24**. – P. 193–206.
2. *Ярема С. Я., Иваницкая Г. С.* Предельное равновесие и развитие косых трещин. Обзор критериев // *Физ.-хим. механика материалов.* – 1986. – № 1. – С. 45–57.
3. *Иваницкий Я. Л.* Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов в условиях сложного нагружения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Львов, 2005. – 40 с.
4. *Erdogan F. and Sih G. C.* On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear // *J. Basic Eng.* - T. ASME. – 1963. – **85**, No. 4. – P. 519–527.
5. *Черепанов Г. П.* Механика хрупкого разрушения. – М.: Наука, 1974. – 640 с.

6. *Maiti S. K. and Smith R. A.* Theoretical and experimental studies on the extension of cracks subjected to concentrated loading near their faces to compare the criteria for mixed mode brittle fracture // *J. Mech. Phys. Solids.* – 1983. – **31**, No. 5. – P. 389–403.
7. *Sih G. C. and Cha B. C.* A fracture criterion for three dimensional crack problems // *Eng. Fract. Mech.* – 1974. – **6**, No. 4. – P. 699–723.
8. *Chao Y. J. and Zhu X. K.* A simple theory for describing the transition between tensile and shear mechanisms in mode I, II, III and mixed-mode fracture // *Mixed-Mode Crack Behavior* / K. J. Miller and D. L. McDowell (Eds.). – ASTM STP 1359. – ASTM International, 1999. – P. 86–110.
9. *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. Pip.* – 1994. – **58**. – P. 9–24.
10. *Chell G. C., Haigh J. R., and Vitek V. A.* A theory of warm pre-stressing: experimental validation and the implication for elastic – plastic failure criteria // *Int. J. Fracture.* – 1981. – **17**, No. 1. – P. 61–82.
11. *Swankie T. D. and Smith D. J.* Low temperature mixed mode fracture of a pressure vessel steel subject to prior loading // *Eng. Fract. Mech.* – 1998. – **61**. – P. 387–405.
12. *Ayatollahi M. R. and Mostafavi M.* Mode I preloading-mode II fracture in warm pre-stressing // *Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures* / E. E. Gdoutos (Ed.). – Proc. of the 16th Eur. Conf. of Fracture (July 3–7, 2006, Alexandroupolis, Greece), 2006. – P. 1171–1172.
13. *Покровский В. В., Сидяченко В. Г.* Влияние предварительного термомеханического нагружения по модам I и II на вязкость разрушения теплоустойчивых корпусных сталей // *Пробл. прочности.* – 2013. – № 1. – С. 80–90.
14. *Manoharan M., Hirth J. P., and Rosenfeld A. R.* Combined mode I – mode III fracture of a high carbon steel // *Scripta Metall.* – 1989. – **23**. – P. 763–766.
15. *ASTM E1820-01.* Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness. – ASTM International. – West Conshohocken, PA, 2001
16. *Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф.* Задачи термопрочности, вибродиагностики и ресурса энергетических агрегатов. – Харьков: ХНАДУ, 2011. – 444 с.
17. *Сидяченко В. Г.* Расчетно-экспериментальное исследование трещиностойкости при продольном сдвиге // *Пробл. прочности.* – 2015. – № 4. – С. 121–129.
18. *Liu S., Chao Y., and Zhu Y.* Tensile-shear transition in mixed mode I/III fracture // *Int. J. Solids Struct.* – 2004. – **41**. – P. 6147–6172.
19. *Anderson T. L.* Fracture Mechanics Fundamentals and Applications. – CRC Press, USA, 2005. – 641 p.

Поступила 16. 06. 2016