

# МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СМЕШАННЫХ МОД ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТЕПЛОУСТОЙЧИВЫХ СТАЛЕЙ С УЧЕТОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

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

Институт проблем прочности имени Г.С.Писаренко НАН Украины, Украина

It is set that the component of longitudinal shear diminishes the "positive effect of PTS", i.e. increase of fracture toughness as a result of preliminary thermo mechanical loading. It is shown that during determination of fracture toughness  $K_{IIIc}$  at the loading of prismatic specimen of eventual thickness by a longitudinal shear, on front of crack displacement will be realized as in transversal (mode II) so in longitudinal (mode III) directions.

Большинство экспериментальных и теоретических исследований посвящены изучению трещин нормального отрыва (мода I). Однако, в настоящее время известны экспериментальные данные, свидетельствующие о том, что критические значения характеристик трещиностойкости при нагружении по модам II и III могут отличаться от таковых по моде I как в большую, так и в меньшую сторону в зависимости от механических характеристик материалов, их структуры и т.д. [1, 2]. Кроме того, ограничены данные об исследовании влияния предварительного термомеханического нагружения (ПТН) образцов с трещинами на характеристики вязкости разрушения при смешанном нагружении. А известная информация свидетельствует о неоднозначности такого влияния, т.е. для одних материалов вязкость разрушения увеличивается в результате ПТН, а для других наоборот уменьшается [3, 4].

Технологические дефекты материала, микротрещины, царапины, задиры, возникающие при изготовлении детали, ориентированы произвольным образом по отношению к приложенным к ней нагрузкам. При этом смещение берегов трещины в общем случае происходит по смешанным модам I+II+III. Поэтому чрезвычайно важно иметь достоверную информацию о критическом значении характеристик трещиностойкости материала при нагружениях отличных от моды I и располагать надёжными средствами для расчета трещиностойкости в этих случаях.

**Методики экспериментальных исследований, материалы и образцы.** Исследование характеристик статической трещиностойкости при продольном сдвиге (мода III) и при комбинации отрыва с продольным сдвигом (мода I+III) выполнялись на сервогидравлических испытательных установках фирм Schenck и BiSS Bi-00-701. Охлаждение образца до указанных температур осуществлялось за счет подачи хладагента – жидкого азота или его паров, в контактный охладитель, представляющий собой выполненную из меди замкнутую полость.

Для получения характеристик трещиностойкости по моде нагружения III использовали круглые цилиндрические образцы диаметром 15 мм с кольцевым концентратором с радиусом надреза 0.1 мм [5]. Характеристики трещиностойкости, полученные на этих образцах сравнивали с таковыми полученными на призматических образцах с боковой трещиной для испытаний на поперечный несимметричный трёхточечный и четырёхточечный изгиб рис. 1. Образец нагружался таким образом, что фронт трещины был вдоль приложенных нагрузок рис. 2.

Для исследования характеристик трещиностойкости при комбинированном нагружении по моде I+III использовали модернизированный компактный образец представленный на рис. 3 [6].

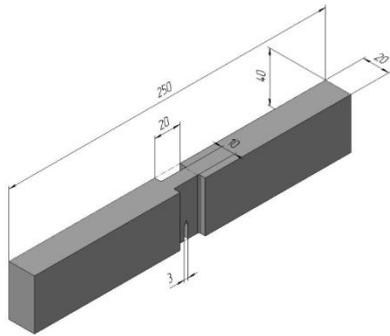


Рис.1. Образец для испытаний на четырёхточечный изгиб по моде II и по модам II+III

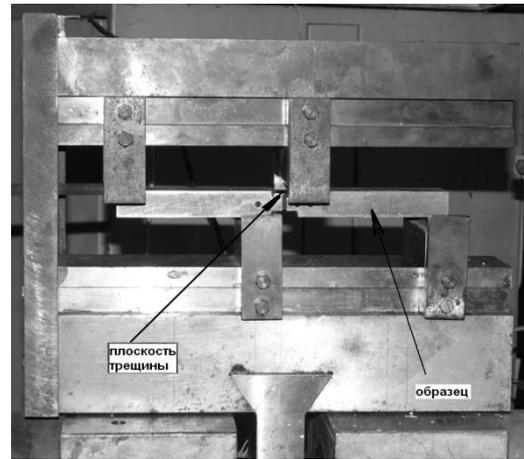


Рис.2. Приспособление для нагружения образца на несимметричный четырёхточечный изгиб.

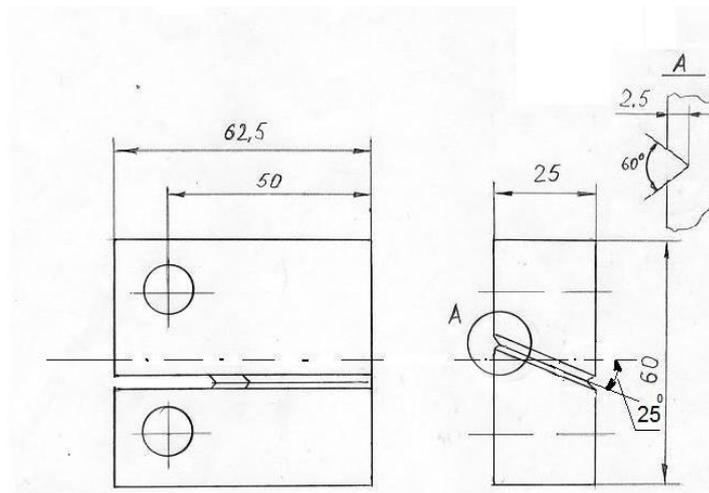


Рис.3. Модифицированный компактный образец с косой трещиной [6].

Экспериментальные исследования выполнялись на теплоустойчивых корпусных сталях 15X2НМФА(II) и 15X2МФА(II). Механические свойства материалов приведены в табл.1.

Таблица 1. Механические свойства исследованных материалов

Материал	t, °C	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа
15X2МФА(II)	180	949	1129
	20	1014	1193
	-150	1311	1486
15X2НМФА(II)	180	590	668
	20	636	735
	-150	970	1024

Коэффициенты интенсивности напряжений в цилиндрических образцах рассчитывали по [5], в образцах на рис.3 по рекомендациям работы [6]. А для образца рис.1 были выполнены расчеты коэффициентов интенсивности напряжений по фронту трещины [5], результаты которых приведены на рис.4.

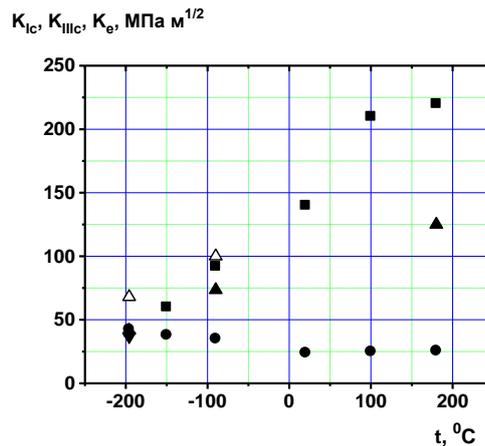
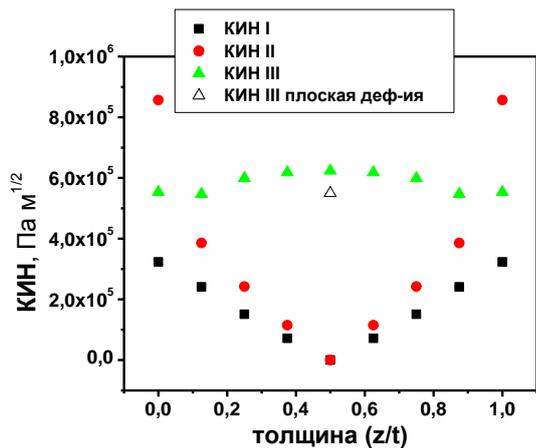


Рис.4. Изменение КИН по толщине образца.

Рис.5. Температурная зависимость вязкости разрушения сталь 15Х2НМФА(II): ■ -  $K_{Ic}$ , ● -  $K_{IIc}$ , ▲ -  $K_e$ , △ -  $K_e$  - после ПТН.

Из результатов расчета видно, что составляющая продольного сдвига  $K_{III}$  по толщине образца изменяется до 13% от срединного сечения к поверхности и приблизительно на 12 % расходится с решением для плоской деформации, при этом составляющая поперечного сдвига  $K_{II}$  от срединного сечения к поверхности монотонно увеличивается и на поверхности превышает  $K_{III}$ .

#### Результаты исследований.

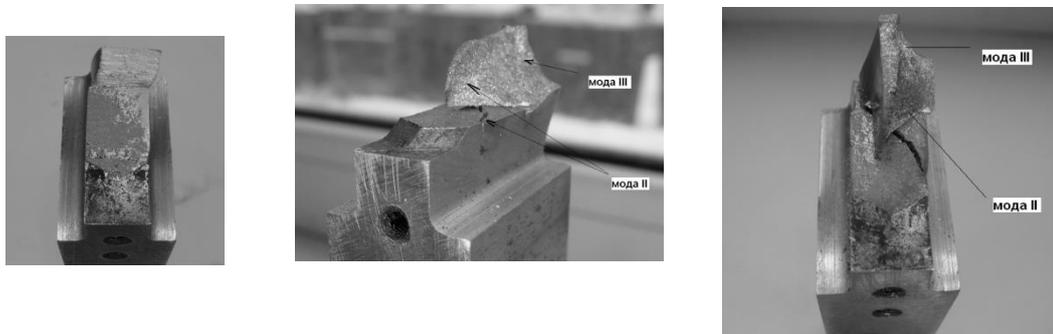
При выбранном угле  $\theta = 25^\circ$  для образца рис.3 отношение  $K_I / K_{III} = 2.14$  выполнялось при всех испытаниях. В соответствии с рекомендациями работы [7] по полученным данным строили зависимость эквивалентного коэффициента интенсивности напряжений  $K_e$  от температуры:

$$K_e = \sqrt{\frac{K_I^2}{2} + \sqrt{\frac{K_I^4}{4} + 4K_{III}^4}} \quad (1)$$

Предварительное термомеханическое нагружение (ПТН) способствует повышению сопротивления хрупкому разрушению. В исследуемых модернизированных компактных образцах при совместном нагружении по моде I+III ПТН осуществлялось по схеме с полной разгрузкой, т.е. образец нагревался выше температуры хрупко-вязкого перехода ( $+180^\circ\text{C}$ ) и нагружался до  $0,8 \dots 0,9 K_e$  затем разгружался и охлаждался. Выполненные исследования по выбранной схеме ПТН показали, что при понижении температуры увеличение в результате ПТН эквивалентной характеристики трещиностойкости  $K_e$ , происходит за счет преобладания составляющей нормального отрыва при температуре  $-196^\circ\text{C}$ , в то время как при температуре  $-90^\circ\text{C}$  за счет пластических свойств материала увеличивается составляющая продольного сдвига, и после ПТН наблюдается незначительное увеличение вязкости разрушения при продольном сдвиге, при этом составляющая вязкости разрушения при нормальном отрыве изменяется мало.

При анализе изломов призматических образцов видно, что при температуре  $+20^\circ\text{C}$  разрушение было в плоскости сдвига, т.е. в плоскости максимальных касательных напряжений при этом  $K_{Ic} > K_{IIc}$  (рис.6,а), в то время как при температуре  $-150^\circ\text{C}$  излом

имеет сложную форму при  $K_{IC}/K_{IIIc}=0.685$  (рис.6,б ). Следует отметить плоскость характерную для разрушения по моде II при низких температурах и плоскость разрушения по моде III. Что подтверждает сложный характер изменения  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  по толщине образца показанный ранее расчетным путем (рис.4). Такое связанное изменение характеристик  $K_{II}$ ,  $K_{III}$  по фронту трещины при нагружении призматического образца с трещиной конечной толщины поперечным сдвигом, неоднократно отмечалось в научной литературе в работах Котоусова и др.



а,  $K_{IC}/K_{IIIc}=1.5$

б,  $K_{IC}/K_{IIIc}=0.685$

б,  $K_{IC}/K_{IIIc}=0.685$

**Рис.6.** Фотографии изломов образцов при деформировании по схеме рис.2, сталь 15Х2МФА(II): а – температура  $+20^{\circ}\text{C}$ , б - температура  $-150^{\circ}\text{C}$ .

## Выводы

Трехмерный расчет КИН в образце на четырехточечный изгиб с продольной краевой трещиной показал, что наряду с компонентой продольного сдвига ( $K_{III}$ ), которая по толщине образца изменяется мало, присутствует компонента поперечного сдвига ( $K_{II}$ ), которая в центре образца равна нулю, а на свободных поверхностях превышает  $K_{III}$ .

В результате применения модифицированного компактного образца с косоугольной трещиной для исследования трещиностойкости при смешанных I+III модах нагружения было установлено, что составляющая продольного сдвига уменьшает «положительный эффект ПТН», т.е. увеличение трещиностойкости в результате предварительного термомеханического нагружения.

## Литература

1. Laukkanen A. Analysis of experimental factors in elastic-plastic small specimen mixed-mode I-II fracture mechanical testing /A. Laukkanen // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2001. – 24. – P.193-206.
2. Іваницький Я. Л. Методи оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів за умов складного навантаження: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 01.02.04. «Механіка деформівного твердого тіла» / Я.Л. Іваницький. – Львів, 2005. – 41 с.
3. Swankie, T.D. Low temperature mixed mode fracture of a pressure vessel steel subject to prior loading/ T.D.Swankie, D.J.Smith // *Eng. Fract. Mech.*– 1998. – Vol. 61. – P.387-405.
4. Pokrovsky, V.V. Prediction of influence of warm prestressing on the fracture toughness of heat resistant steels under mixed mode deformation/ V.V. Pokrovsky, V.G. Sydiachenko // *Int. conf. "Strength of Materials and Structural Elements": Abstracts of Papers, Kyiv, 2011* – pp.340-347.
5. Сидяченко В.Г. Расчетно-экспериментальное исследование трещиностойкости при продольном сдвиге / В.Г. Сидяченко // *Пробл. прочности.* – 2015. - N 4. – С. 121-130.
6. Manoharan, M., Hirth, J.P. and Rosenfield, A.R. (1989). Combined mode I - mode III fracture of a high carbon steel. *Scripta metallurgica*, 23, 763-766.
7. Задачи термочинства, вибродіагностики и ресурса енергетических агрегатов / Н.Г.Шульженко, П.П.Гонтаровский, Б.Ф. Зайцев – Харьков: ХНАДУ, 2011. – 444 с.