

## Влияние предварительного термомеханического нагружения по модам I и II на вязкость разрушения теплоустойчивых корпусных сталей

**В. В. Покровский, В. Г. Сидяченко**

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

*Представлены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния предварительного термомеханического нагружения по модам I и II на трещиностойкость образцов при испытаниях на четырехточечный изгиб. Образцы подвергали повторному нагружению по модам II и I. Исследования выполняли на теплоустойчивых реакторных сталях. Предложен алгоритм численной оценки вязкости разрушения с учетом предварительного термомеханического нагружения при смешанных видах нагружения.*

**Ключевые слова:** моды нагружения, предварительное термомеханическое нагружение, теплоустойчивые реакторные стали.

**Введение.** Предварительное термомеханическое нагружение (ПТН) способствует повышению сопротивления хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей с трещинами и является фундаментальной основой перспективного метода увеличения ресурса для обеспечения безопасной эксплуатации корпусов энергетических реакторов типа ВВЭР. Многочисленные экспериментальные данные о влиянии ПТН на хрупкую прочность теплоустойчивых сталей ограничены исследованием трещиностойкости по механизму нормального отрыва (мода I) [1–5]. Сведения о влиянии ПТН по различным модам на вязкость разрушения сталей с трещинами весьма ограничены и противоречивы [6–11]. В то же время в реальных конструкциях ориентация плоскости трещин по отношению к приложенным нагрузкам является произвольной. Поэтому важно учитывать, что ПТН и последующее эксплуатационное нагружение приводят к деформированию изделия с трещиной не по моде I, а по любой другой, в том числе по смешанным (I + II или I + III).

В целом имеющиеся данные для корпусных реакторных сталей свидетельствуют о том, что ПТН по моде I вызывает увеличение вязкости разрушения на нижнем шельфе температурной зависимости [1–6]. Однако при этом отмечается, что рост составляющей поперечного сдвига (мода II) способствует переходу от хрупкого (скользкого) характера разрушения к вязкому (ямочному) даже в условиях низких ( $-120^{\circ}\text{C}$ ) температур [6]. В этих случаях ПТН по модам I и II не оказывает влияния на вязкость разрушения при поперечном сдвиге. Если ПТН проводится по моде II, вязкость разрушения по моде I снижается на 60% по сравнению с исходной [6].

Конечноэлементный анализ пластины с наклонной трещиной, подверженной ПТН при различных модах нагружения [7], подтвердил данные ранее полученных экспериментальных исследований [6], за исключением случая снижения вязкости разрушения по моде I после ПТН по моде II. Согласно данным расчетов наблюдается обратная тенденция, т.е. увеличение вязкости

разрушения на 190...280% в зависимости от относительной длины трещины [7].

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение влияния ПТН по модам I и II на вязкость разрушения по модам II и I реакторных сталей, а также применение численного моделирования к анализу полученных экспериментальных данных.

**Методика экспериментальных и численных исследований.** Экспериментальные исследования выполняли на теплоустойчивых корпусных сталях 15X2НМФА(II) и 15X2МФА(II). Механические свойства материалов приведены в таблице.

Механические свойства исследованных материалов

Материал	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_B, \text{МПа}$
15X2МФА(II)	180	949	1129
	20	1014	1193
	-150	1311	1486
15X2НМФА(II)	180	590	668
	20	636	735
	-150	970	1024

Для исследования влияния ПТН по смешанным (I + II) модам нагружения образец должен удовлетворять следующим требованиям: реализация полного диапазона мод нагружения (I + II); компактность и возможность испытаний при высоких и низких температурах; простота в изготовлении; возможность иницирования трещины по моде нагружения I. Этим требованиям удовлетворяет призматический образец, изготовленный для испытаний на несимметричный трех- или четырехточечный изгиб (рис. 1).

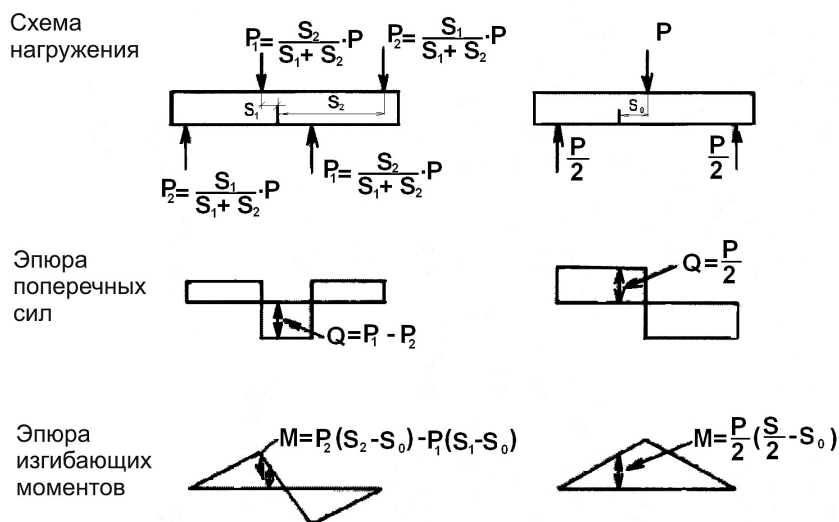


Рис. 1. Схема нагружения образцов при испытаниях на несимметричный трех- и четырехточечный изгиб.

Видно, что при испытании образцов на трехточечный изгиб с увеличением расстояния  $S_0$  отношение мод  $K_{II}/K_I$  повышается. Поскольку при проведении эксперимента часто методически невозможно расположить трещину близко к опорам, отношение мод  $K_{II}/K_I$ , как правило, меньше 0,5. В то же время при испытаниях образцов на четырехточечный изгиб отношение  $K_{II}/K_I$  возрастает незначительно с уменьшением  $S_0$ . Таким образом, в данном случае целесообразно применять как одну, так и другую схемы нагружения.

Для исследования характеристик статической трещиностойкости при поперечном сдвиге и оценки влияния ПТН на вязкость разрушения использовалась сервогидравлическая испытательная установка фирмы Schenck.

Практическая реализация схемы нагружения (рис. 1) и зависимости для определения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) приведены в работах [9, 10].

Для исследования характеристик трещиностойкости при поперечном сдвиге использовали призматические образцы ( $270 \times 40 \times 20$  мм) с утоненной до 10 мм толщиной рабочей части и предварительно выращенной по моде I трещиной усталости относительной длины  $0,5W$ . Нагружение осуществлялось в жестком режиме с постоянной скоростью перемещения подвижного захвата около 0,5 мм/мин. В процессе эксперимента записывалась диаграмма нагрузка–перемещение активного захвата. При определении КИН использовались нагрузка, рассчитанная по 5%-ной секущей из этой диаграммы, и длина трещины, соответствующая ее страгиванию, которая уточнялась по изломам образцов. Таким образом, под вязкостью разрушения будем подразумевать условное значение КИН, соответствующее страгиванию трещины.

Предварительное термомеханическое нагружение по схеме с полной разгрузкой, а именно: образец нагревался до температуры выше хрупко-вязкого перехода – нагружался до уровня 85...90% критического значения КИН  $K_c$  при соответствующей моде нагружения – охлаждался – разрушался. При этом изучали следующие комбинации влияния ПТН на трещиностойкость:

- по моде I – разрушение по моде II;
- по моде II – разрушение по моде I;
- по моде II – разрушение по моде II.

Численные исследования по оценке влияния ПТН по моде II на вязкость разрушения по моде I проводили с помощью программного комплекса ANSYS. Конечноэлементную модель образца с трещиной для испытаний на четырехточечный несимметричный изгиб строили в предположении плоского деформированного состояния, упругопластического поведения материала с кинематическим законом упрочнения и геометрической нелинейности. Механические свойства материалов для расчета при соответствующих температурах приведены в таблице. Вершина трещины моделировалась в виде математического разреза шестиузловыми треугольными конечными элементами Plane183, размер которых составляет 125 мкм, что приблизительно соответствует размеру зерна для данного материала [12].

**Экспериментальные данные и их анализ.** Предварительное термомеханическое нагружение оказывает влияние на сопротивление хрупкому разрушению теплоустойчивых сталей при определенных термосиловых режимах. Поэтому для проведения экспериментальных исследований по оценке влияния ПТН на прочностные характеристики теплоустойчивых сталей необходимо знать величины вязкости разрушения, а также установить характер их разрушения в зависимости от температуры испытаний.

Были проведены испытания на вязкость разрушения при нагружении по моде II. Полученные данные сравнивали с температурной зависимостью вязкости разрушения при нагружении по моде I [13].

Закономерности изменения вязкости разрушения свидетельствуют о различном поведении реакторных сталей в зависимости от температуры испытаний (рис. 2).

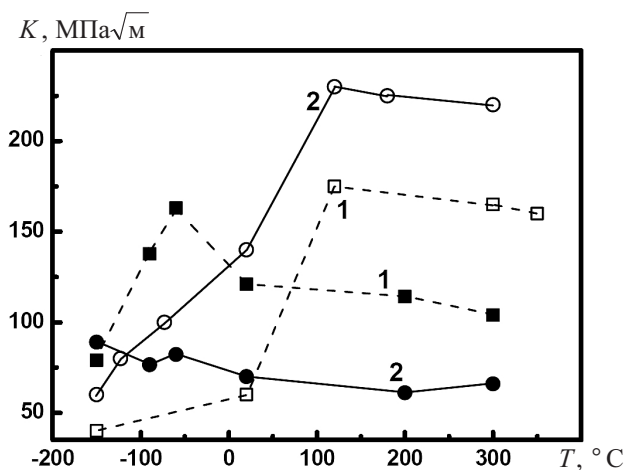


Рис. 2. Зависимость вязкости разрушения реакторных сталей 15X2МФА(II) – 1 и 15X2НМФА(II) – 2 при нагружении по модам I (светлые точки) и II (темные точки) от температуры.

Характер разрушения СТ-1 образцов из стали 15X2МФА(II) при  $T = 20^\circ\text{C}$  хрупкий, при этом температура хрупковязкого перехода при  $K_{Ic} = 100 \text{ МПа}\sqrt{м}$  составляет  $50 \dots 70^\circ\text{C}$ , для стали 15X2НМФА(II)  $T = -50 \dots -70^\circ\text{C}$ .

Анализ разрушения стали 15X2МФА(II) при нагружении по моде II показывает, что оно хрупкое при  $T = -150 \dots -90^\circ\text{C}$ , о чем свидетельствуют ручейстый характер излома и угол распространения трещины, составляющий примерно  $70^\circ$  относительно первоначальной плоскости трещины при доломе образца, что соответствует критерию максимальных нормальных напряжений (обобщенный отрыв). В то же время при температуре испытаний  $-60^\circ\text{C}$  отмечается незначительное вязкое подрастание трещины в плоскости максимальных сдвиговых деформаций, предшествующее хрупкому долому образца. А при  $20^\circ\text{C}$  и выше трещина прорастала в плоскости максимальных касательных деформаций вплоть до разрушения.

Анализ изломов образцов стали 15X2НМФА(II), испытанных при поперечном сдвиге, показывает, что при всех исследованных температурах наблюдается инициирование трещины в направлении максимальных касательных

деформаций, и угол отклонения от первоначальной плоскости трещины был незначительный (около  $5...8^\circ$ ).

Таким образом, из рис. 2 следует, что переход к нагружению по моде II приводит к снижению вязкости разрушения, определенной по страгиванию трещины при температуре выше температуры хрупковязкого перехода. Если полученные данные представить в относительных величинах (рис. 3), видно, что критерию обобщенного нормального отрыва, при котором выполняется соотношение  $K_{IIc} \approx 0,866K_{Ic}$  или  $K_{Ic}/K_{IIc} \approx 1,155$ , отвечают температуры  $-90$  и  $85^\circ\text{C}$  для сталей 15X2НМФА(II) и 15X2МФА(II) соответственно.

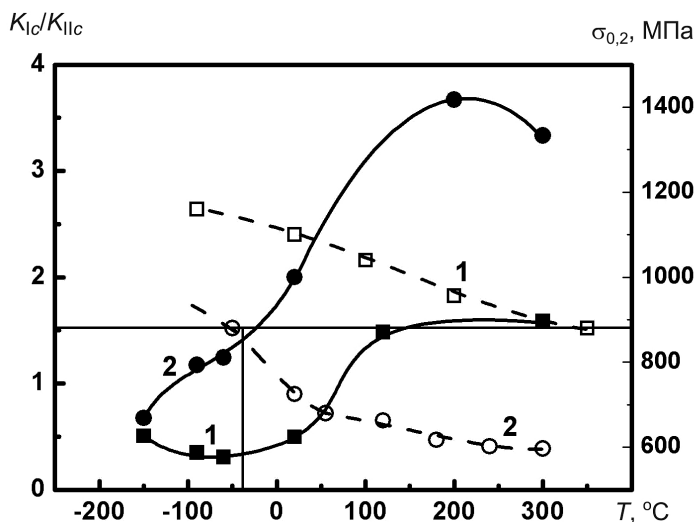


Рис. 3. Температурная зависимость относительной вязкости разрушения (темные точки) и условного предела текучести (светлые точки) реакторных сталей 15X2МФА(II) – 1 и 15X2НМФА(II) – 2.

Выполненные экспериментальные исследования, а также обзор литературных источников показывают, что при нагружении по смешанным модам (I + II) или по моде II у вершины трещины образуется неоднородное поле напряжений. При этом подразумевается, что один берег трещины у ее вершины затупляется, здесь отмечаются растягивающие напряжения, другой (противоположный) – заостряется, в этой области доминируют деформации сдвига. Преобладание одного из механизмов зависит от коэффициента смешанности нагрузок, деформационного упрочнения, пластических свойств и микроструктуры материала. Это в конечном итоге определяет направление дальнейшего развития трещины и величины характеристик трещиностойкости в случае нагружения при поперечном сдвиге. Имеют место следующие закономерности: для пластичных материалов вязкость разрушения при смешанных модах уменьшается с увеличением при нагружении сдвиговой компоненты (по моде II), для хрупких материалов наблюдается обратная тенденция. Поэтому расчеты на трещиностойкость элементов конструкций, которые деформируются по моде II и изготовлены из пластичных материалов, на основе характеристик вязкости разрушения, полученных по стандартной методике, могут привести к неконсервативной оценке.

Обобщение полученных экспериментальных данных и известных из литературных источников [14] показывает, что увеличение условного предела текучести приводит к повышению  $K_{IIc}$  и уменьшению  $K_{Ic}$ . Так, для стали 9ХФ в зависимости от термообработки увеличение  $\sigma_{0,2}$  от 350 до 450 МПа вызывает рост  $K_{IIc}$  на 16% и снижение  $K_{Ic}$  на 33% (рис. 4). Таким образом, отношение  $K_{Ic}/K_{IIc}$  с увеличением  $\sigma_{0,2}$  уменьшается, что характерно также для исследованных сталей, особенно в диапазоне температур  $-50...200^\circ\text{C}$  (рис. 3, 4).

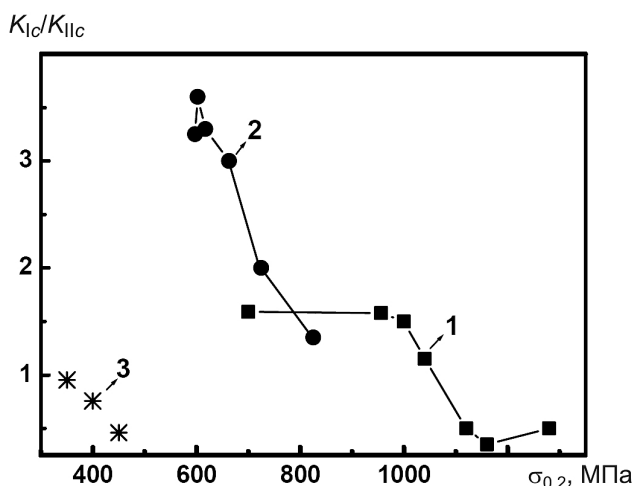


Рис. 4. Зависимость отношения вязкости разрушения при нормальном отрыве и поперечном сдвиге от условного предела текучести сталей 15X2MФА(II) – 1, 15X2НМФА(II) – 2 и 9ХФ – 3 [14].

Итак, отношение трещиностойкости при нормальном отрыве и поперечном сдвиге в общем виде можно представить так:

$$\frac{K_{Ic}}{K_{IIc}} = F(\sigma_{0,2}, n, \Psi, d), \quad (1)$$

где  $n$  – коэффициент деформационного упрочнения;  $\Psi$  – коэффициент смешанности мод;  $d$  – размер зерна.

Предварительное термомеханическое нагружение проводили при температуре  $180^\circ\text{C}$ . Это обусловлено тем, что для изучаемых материалов при этой температуре имеет место вязкое разрушение. Нагружение осуществляли до уровня, составляющего 85% величины соответствующего критического значения КИН при указанных виде нагружения и температуре. На рис. 5 приведены данные, иллюстрирующие влияние ПТН по моде II на статическую вязкость разрушения, полученную при аналогичном виде нагружения.

Видно, что ПТН по моде II по схеме “с полной разгрузкой” для стали 15X2НМФА(II) как при  $T = 20^\circ\text{C}$ , так и  $-150^\circ\text{C}$  не влияет на вязкость разрушения. В то же время для стали 15X2MФА(II) при  $T = -150^\circ\text{C}$  вязкость разрушения увеличивается в 1,8 раза по сравнению с величиной  $K_{IIc}$  при  $K_{ПТН} = 100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (рис. 5).

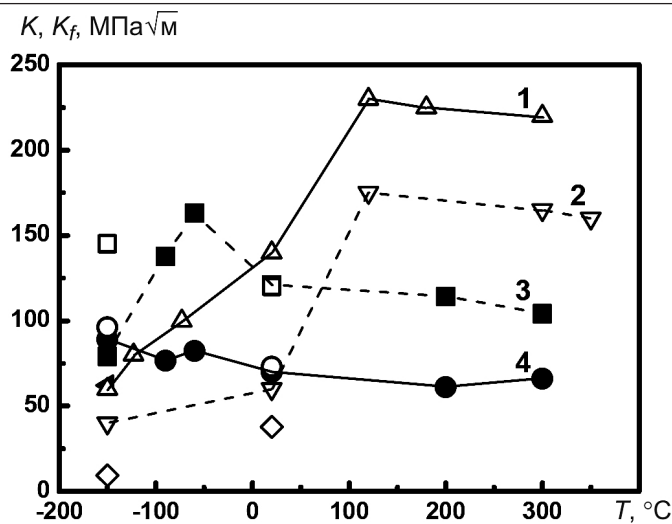


Рис. 5. Температурная зависимость вязкости разрушения при различных видах нагружения: 1, 2 – мода I; 3, 4 – мода II;  $\circ$ ,  $\square$  – ПТН по моде II, разрушение по моде II;  $\diamond$ ,  $\blacktriangleleft$  – ПТН по моде II, разрушение по моде I; 1, 4,  $\circ$ ,  $\blacktriangleleft$  – сталь 15X2НМФА(II); 2, 3,  $\square$ ,  $\diamond$  – сталь 15X2МФА(II). ( $K_f$  – вязкость разрушения после ПТН.)

Анализ изломов соответствующих образцов показывает, что для обеих сталей ПТН не влияет на угол распространения трещины при нагружении по моде II. При этом для стали 15X2НМФА(II), у которой условный предел текучести ниже, чем у 15X2МФА(II), при  $T = -150^\circ\text{C}$  и нагружении по моде II после соответствующего ПТН по этой же моде наблюдается пластическое подрастание трещины примерно на 6,5–7 мм аналогично таковому без ПТН.

Анализ экспериментальных данных, полученных для стали 15X2МФА(II) при оценке влияния ПТН по моде II на характеристики статической трещиностойкости по моде I, свидетельствует о том, что после ПТН величина  $K_f$  составляет 24 и 64% от  $K_{Ic}$  при  $T = -150$  и  $20^\circ\text{C}$  соответственно. Вместе с тем для более пластичной стали 15X2НМФА(II) ПТН по моде II не влияет на  $K_f$ , и  $K_f = K_{Ic}$  (рис. 5).

Такое расхождение в характеристиках вязкости разрушения исследованных сталей после ПТН по моде II может быть обусловлено особенностями деформирования у вершины трещины. Как отмечалось выше, при поперечном сдвиге трещины один берег у ее вершины затупляется, и в этой области локализуется максимальное гидростатическое напряжение, а у заостренного берега трещины – эквивалентная пластическая деформация [15, 16]. Интенсивность этих процессов может быть разной в зависимости от механических свойств материала. Так, в случае преобладания остаточного несимметричного затупления одного берега трещины в результате ПТН у другого берега возникает область растягивающих остаточных напряжений, что приводит к перераспределению напряжений при повторном нагружении по моде I и снижению вязкости разрушения. Если при ПТН по моде II в плоскости трещины доминируют процессы пластического деформирования, то это мало влияет на вязкость разрушения по моде I.



**Численное моделирование ПТН.** Смоделируем наиболее неблагоприятный случай понижения  $K_f$  по моде I при  $T = -150^\circ\text{C}$  после ПТН по моде II для стали 15X2МФА(II).

Критерием хрупкого разрушения при  $T = -150^\circ\text{C}$  было достижение максимальным растягивающим напряжением критического значения  $\sigma_c$  на характеристическом расстоянии  $r_c$  от вершины трещины [17, 18]:

$$\sigma_{\max}|_{r=r_c} = \sigma_c. \quad (2)$$

Моделирование осуществлялось по следующему алгоритму. На первом этапе определяли распределение нормальных напряжений у вершины трещины при нагружении до уровня  $K_{Ic} = 40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  (трехточечный изгиб) при  $T = -150^\circ\text{C}$  (рис. 6). Характеристику материала  $r_c = 170 \text{ мкм}$  определяли как расстояние от вершины трещины до места, где нормальные напряжения в плоскости трещины достигают величины напряжения отрыва. На втором этапе моделировался эффект ПТН: нагружение по моде II (четырёхточечный изгиб) при  $T = 180^\circ\text{C}$  и затем полная разгрузка. Распределение напряжений при ПТН и остаточных напряжений после разгрузки в зависимости от угла  $\alpha$  в слое на расстоянии  $r_c$  от вершины трещины представлено на рис. 7. Отсчет угла  $\alpha$  показан на схеме рис. 8,а. На третьем этапе осуществляли нагружение по моде I при  $T = -150^\circ\text{C}$  до разных уровней КИН и строили распределение максимальных растягивающих напряжений на расстоянии  $r_c$  от вершины трещины с учетом предыстории нагружения, т.е. ПТН по моде II (рис. 8,б).

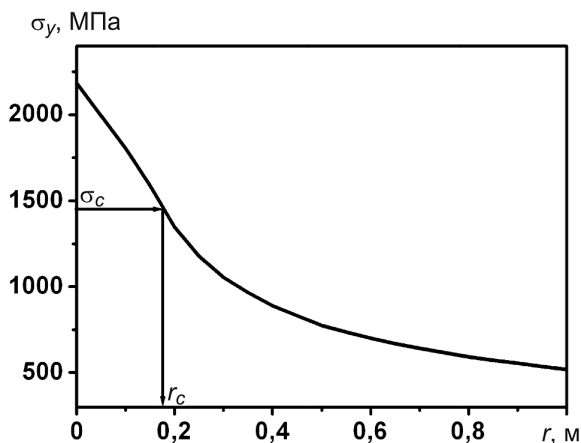


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений  $\sigma_y$  у вершины трещины отрыва при  $T = -150^\circ\text{C}$  для стали 15X2МФА(II).

Из рис. 8,б видно, что критическое напряжение  $\sigma_c$  на расстоянии  $r_c$  от вершины трещины после ПТН достигается при  $K_f = 22 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ , что в два раза меньше  $K_{Ic} = 40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$  без ПТН. При этом максимальные растягивающие напряжения отклоняются от плоскости трещины приблизительно на  $72^\circ$ , что соответствует экспериментально установленному углу отклонения



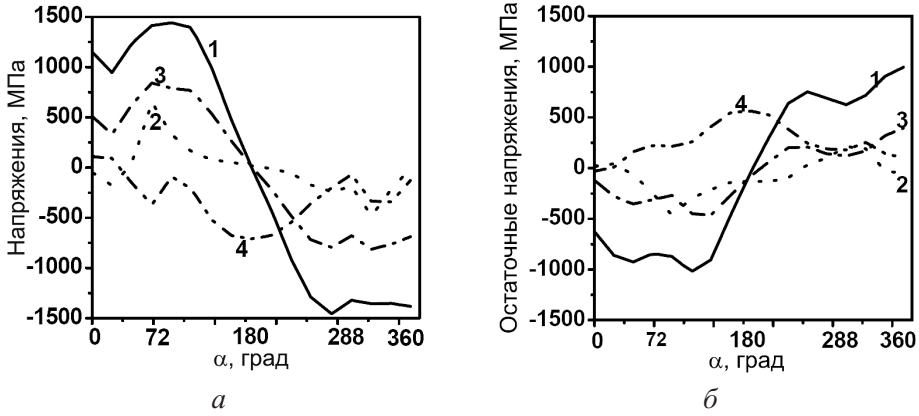


Рис. 7. Распределение напряжений при ПТН,  $T = 180^\circ\text{C}$  (а) и остаточных напряжений после разгрузки (б) в зависимости от угла  $\alpha$  в слое на расстоянии  $r_c$  от вершины трещины, мода II: 1 –  $\sigma_x$ ; 2 –  $\sigma_y$ ; 3 –  $\sigma_z$ ; 4 –  $\tau_{xy}$ .

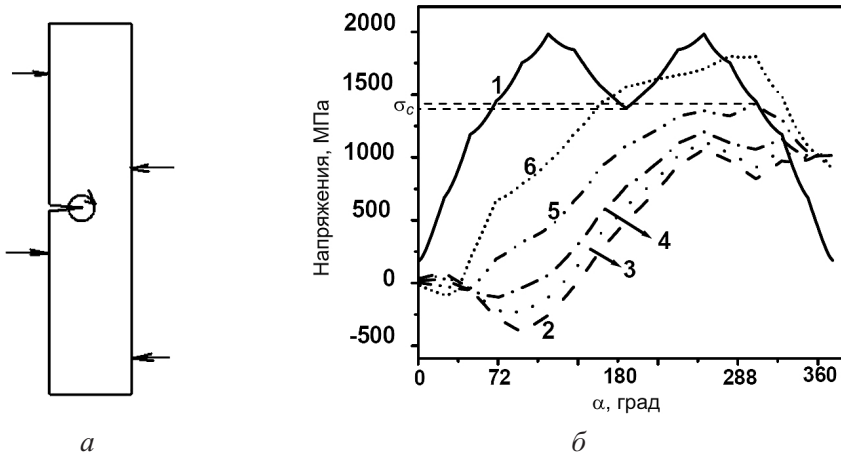


Рис. 8. Схема нагружения по моде II и система отсчета угла  $\alpha$  (а), а также распределение напряжений в зависимости от угла  $\alpha$  в слое на расстоянии  $r_c$  от вершины трещины,  $T = -150^\circ\text{C}$ , мода I (б): 1 – без ПТН,  $K_{Ic} = 40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; 2–6 после ПТН (2 –  $K_I = 0,44 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; 3 –  $K_I = 4,4 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; 4 –  $K_I = 9,6 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; 5 –  $K_I = 22 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ; 6 –  $K_I = 40 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ).

распространения трещины по моде I после ПТН по моде II. Несмотря на то что смоделированное значение  $K_f$  не совпало с экспериментально определенным ( $10 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ ) при использовании упрощенной двухмерной модели и других принятых допущений, тенденция к его уменьшению по моде I после ПТН по моде II подтвердилась.

### Выводы

1. Показано, что характеристики трещиностойкости при поперечном сдвиге (мода II) меньше, чем при нормальном отрыве (мода I), при температуре выше температуры хрупковязкого перехода, и наоборот.

2. Установлено, что вязкость разрушения по моде II охрупченных реакторных сталей после ПТН по моде II увеличивается, по моде I уменьшается,

что обусловлено несимметричной вдоль берегов трещины системой остаточных напряжений. Для пластичных материалов влияние ПТН на вязкость разрушения незначительное.

Для объяснения полученных экспериментальных результатов и построения модели разрушения после ПТН по моде II необходимо проводить трехмерный упругопластический численный анализ напряженного состояния у вершины трещины, выполненный для материалов с различными механическими свойствами.

## Резюме

Представлено результати експериментальних досліджень щодо оцінки впливу попереднього термомеханічного навантаження по модах I і II на тріщиностійкість зразків при випробуваннях на чотириточковий згин. Зразки повторно навантажували по модах II і I. Дослідження виконано на теплостійких реакторних сталях. Запропоновано алгоритм чисельної оцінки в'язкості руйнування з урахуванням попереднього термомеханічного навантаження за змішаних схем деформування.

1. *Pokrovsky V. V., Troshchenko V. T., Koptmsky G. A., et al.* The influence of plastic prestraining on brittle fracture resistance of metallic materials with cracks // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 1995. – **18**, No. 6. – P. 731 – 746.
2. *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. Press. Vess. Piping.* – 1994. – **58**. – P. 9 – 24.
3. *Timofeev B. T. and Smirnov V. I.* Calculated and experimental estimation of preliminary loading effect at elevated temperatures on fracture toughness of pressure vessel materials // *Ibid.* – 1995. – **63**. – P. 135 – 140.
4. *Chell G. G., 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. Fract.* – 1981. – **17**, No. 1. – P. 61 – 82.
5. *Smith D. J., Hadidimoud S., and Fowler H.* The effects of warm pre-stressing on cleavage fracture. Part 1: evaluation of experiments // *Eng. Fract. Mech.* – 2004. – **71**. – P. 2015 – 2032.
6. *Swankie T. D. and Smith D. J.* Low temperature mixed mode fracture of a pressure vessel steel subject to prior loading // *Ibid.* – 1998. – **61**. – P. 387 – 405.
7. *Ayatollahi M. R. and Mostafavi M.* Finite element analysis of a center crack specimen warm pre-stressed under different modes of loading // *Comput. Mater. Sci.* – 2007. – **38**. – P. 847 – 856.
8. *Pokrovsky V. V. and Sydiachenko V. G.* Prediction of influence of warm prestressing on the fracture toughness of heat resistant steels under mixed mode deformation // *Proc. of Int. Conf. "Strength of Materials and Structural Elements"*. – Kyiv, 2010. – **2**. – P. 52 – 53.

9. Покровский В. В., Ежов В. Н., Сидяченко В. Г., Коваль Ю. И. Исследование закономерностей развития трещин при смешанных модах нагружения // Механическая усталость металлов: Тр. 13 Междунар. коллоквиума. – Тернополь, 2006. – С. 259 – 265.
10. Сидяченко В. Г. Методика исследования трещиностойкости реакторных сталей при смешанных I + II модах нагружения // Вест. КПИ. Сер. Машиностроение. – 2011. – Вып. 63. – С. 83 – 86.
11. Покровский В. В., Сидяченко В. Г. Прогнозирование влияния предварительного термомеханического нагружения на вязкость разрушения корпусных теплоустойчивых сталей при смешанных схемах деформирования // Прочность материалов и элементов конструкций: Тр. междунар. конф. – Киев, 2011. – С. 340 – 347.
12. Ясний П. В., Окіпний І. Б., Пиндус Ю. І. Оцінка крихкої міцності сталі корпусу атомного реактора після попереднього термомеханічного навантаження // Пробл. прочності. – 2010. – № 1. – С. 46 – 53.
13. Pokrovskii V. V. and Ivanchenko A. G. Influence of the modes of thermo-mechanical preloading on the resistance of heat-resistant steels to brittle fracture // Strength Mater. – 1999. – **31**, No. 2. – P. 200 – 209.
14. Иваницкий Я. Л. Методы оценки трещиностойкости конструкционных материалов в условиях сложного нагружения: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Львов, 2005. – 24 с.
15. Laukkanen A. Ductile elastic-plastic mixed mode I-II crack propagation mechanisms and fracture resistance in metallic materials // Proc. of ECF12, Fracture from Defects (Sheffield, UK), 1998. – P. 667 – 672.
16. Laukkanen A., Wallin K., and Rintamaa R. Evaluation of the effects of mixed mode I-II loading on elastic-plastic ductile fracture of metallic materials // Mixed Mode Crack Behavior, ASTM STP 1359, 1999. – P. 3 – 20.
17. Pisarenko G. S. and Krasowsky A. J. Analysis of kinetics of quasibrittle fracture of crystalline materials // Proc. of Int. Conf. on Mechanical Behavior of Materials. – Kyoto, 1972. – **1**. – P. 421 – 432.
18. Ritchie R. O., Knott J. F., and Rice J. R. On the relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel // J. Mech. Phys. Solids. – 1973. – **21**, No. 6. – P. 395 – 410.

Поступила 26. 04. 2011