

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. Сообщение 2. Влияние эксплуатационных и технологических факторов

В. Т. Трощенко, В. В. Покровский

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

Рассмотрено влияние температуры, асимметрии цикла нагружения, размеров образцов, предварительного пластического деформирования, повреждения материала в процессе малоциклового нагружения на величину циклической вязкости разрушения теплоустойчивых, высокопрочных хромомолибденовых и других сталей. Проанализирована степень этого влияния в зависимости от различных варьируемых в процессе исследования факторов.

Ключевые слова: циклическая вязкость разрушения, температура, асимметрия цикла нагружения, размеры образца, предварительное пластическое деформирование.

Введение. В предыдущей работе [1] проведен анализ характеристик вязкости разрушения различных сплавов в условиях циклического нагружения (K_{fc}) и показано, что для циклически разупрочняющихся сталей в охрупченном состоянии (когда выдерживаются условия плоской деформации), вызванном термообработкой или низкими температурами испытания, циклическая вязкость разрушения может быть существенно (до 60%) ниже, чем вязкость разрушения этих материалов при статическом нагружении. Были рассмотрены также особенности перехода от стабильного развития усталостной трещины в этих сталях к окончательному разрушению с учетом возникновения хрупких скачков трещины, которые могут иметь место при величинах коэффициентов интенсивности напряжений K_{fc}^1 более низких, чем K_{fc} . Кратко проанализированы исследования циклической вязкости разрушения [2–8].

В настоящем сообщении с использованием результатов, полученных преимущественно в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, рассматривается влияние на характеристики K_{fc} и K_{fc}^1 температуры, асимметрии цикла нагружения, размеров образцов, предварительного пластического деформирования, повреждения материала в процессе малоциклового нагружения [9–25].

Температура испытания. Впервые значительное снижение характеристик циклической вязкости разрушения сталей по сравнению с характеристиками вязкости разрушения при статическом нагружении было обнару-

жено при испытании высокопрочных сталей в условиях низких температур [5, 9, 10]. В работе [1] для всех исследованных сталей, охрупчивающихся при низких температурах, отмечается уменьшение как статической, так и циклической вязкости разрушения с понижением температуры испытания. Наиболее существенно характеристики статической и циклической вязкости разрушения отличаются при низких температурах, если выдерживаются условия плоской деформации или близкие к ним. Температурные зависимости характеристик $K_{Ic}(K_c)$, K_{fc}^1 и K_{fc} для сталей 15X2МФА (I) и 15X2МФАА приведены на рис. 1 [11]. Здесь и далее величины K_{Ic} и K_c обозначают вязкость разрушения, найденную по максимальной нагрузке или по методу 5%-ной секущей соответственно, при соблюдении и не соблюдении условий плоской деформации.

Как видно, для обеих сталей при температурах, при которых выдерживаются условия плоской деформации, характеристики циклической вязкости разрушения K_{fc} и K_{fc}^1 существенно ниже, чем характеристики статической вязкости разрушения. При более высоких температурах, когда характеристики вязкости разрушения могут рассматриваться лишь как условные, их величины значительно увеличиваются и нет четких закономерностей в их соотношениях.

Температуры, характеризующие переход к разрушению образцов с трещинами в условиях плоской деформации, существенно ниже, чем критические температуры хрупкости, найденные при ударных испытаниях образцов с надрезом (рис. 1).

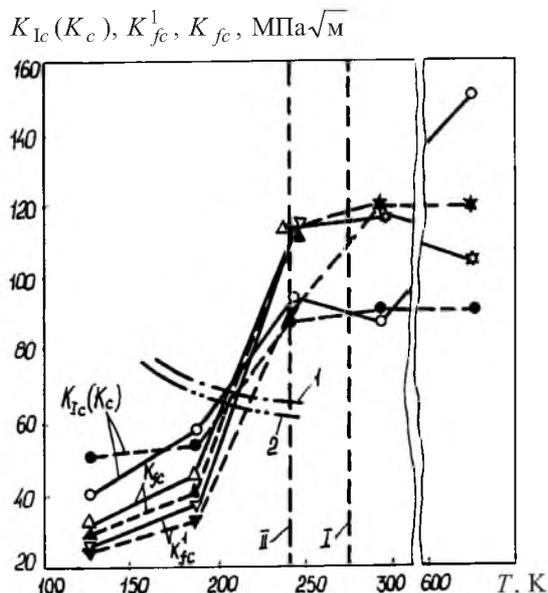


Рис. 1. Зависимости характеристик вязкости разрушения сталей 15X2МФА (I) (штриховые линии) и 15X2МФАА (сплошные линии) от температуры испытания. (Штрихпунктирные линии 1 и 2 – зависимости, полученные при $t \geq 2,5(K_{max}/\sigma_{0,2})^2$, вертикальные штриховые линии I и II – температуры вязкохрупкого перехода, найденные по результатам ударных испытаний образцов с надрезом для сталей 15X2МФА (I) и 15X2МФАА соответственно.)

На рис. 2 показаны температурные зависимости $K_{Ic}(K_c)$, K_{fc} и K_{fc}^1 для исследуемых хромомолибденовых сталей [12]. Для них, как и для теплоустойчивых сталей, в условиях низких температур наблюдается значительное отличие характеристик статической и циклической вязкости разрушения.

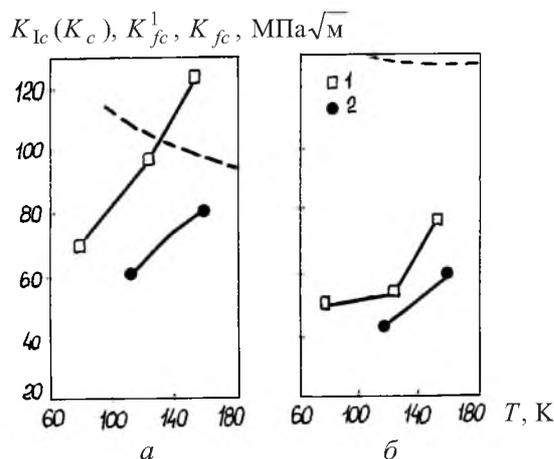


Рис. 2. Соотношение характеристик вязкости разрушения для хромомолибденовых сталей VI [1] (а) и VII [1] (б) при статическом и циклическом нагружении: 1 – $K_{Ic}(K_c)$; 2 – K_{fc} . (Штриховые линии – выполнение условий плоской деформации.)

Приведенные на рис. 3 данные [11] свидетельствуют, что размер первого скачка трещины a_c , т.е. скачка, соответствующего коэффициенту интенсивности напряжений K_{fc}^1 , который характеризует размер зоны усталостного повреждения в вершине трещины, возрастает с повышением температуры. При понижении температуры от 293 до 123 К величина a_c для исследуемых сталей уменьшается на порядок. При этом температурная зависимость a_c для стали 15X2МФАА сдвинута относительно такой же зависимости для стали 15X2МФА (I) в сторону более высоких температур. Аналогичные результаты были получены в работе [13].

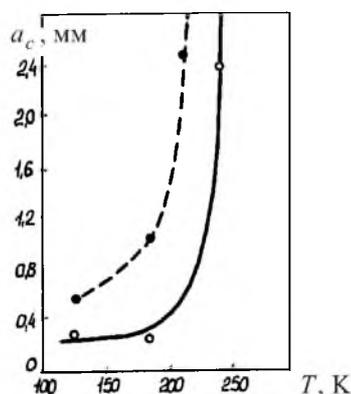


Рис. 3. Зависимости длины скачка трещины от температуры испытаний для сталей 15X2МФАА (сплошная линия) и 15X2МФА (I) (штриховая линия).

Асимметрия цикла нагружения. Влияние асимметрии цикла нагружения $R = K_{\min}/K_{\max}$ на скорость развития усталостной трещины da/dN и характеристики циклической вязкости разрушения сталей исследовалось в работах [14–16]. Результаты исследований теплоустойчивых сталей 15X2МФА (I), 15X2МФА (II) и аустенитной стали 08X18H10T при различных асимметриях цикла в координатах $da/dN - \Delta K_I$ и $da/dN - K_{I_{\max}}$ приведены на рис. 4 [14]. Исследовались компактные образцы толщиной 150 мм при комнатной температуре. В этих условиях образцы из стали 15X2МФА (I) разрушались без существенной утяжки, однако критерий $t \geq 2,5(K_{fc}/\sigma_{0,2})^2$ не выдерживался, образцы из стали 15X2МФА (II) разрушались в условиях плоской деформации, а из стали 08X18H10T разрушались вязко. Скачкообразный характер развития усталостной трещины при переходе от стабильного развития трещины к нестабильному наблюдался только для стали 15X2МФА (II).

Как было показано в работе [15], диаграммы роста усталостных трещин (РУТ) в координатах $da/dN - K_{I_{\max}}$, полученные на образцах толщиной 25 мм, полностью совпадали с диаграммами для образцов толщиной 150 мм (рис. 4, б). На рис. 4 точки со стрелками соответствуют случаям полного разрушения образцов. Для стали 15X2МФА (II) стрелками отмечены также условия перехода к скачкообразному развитию трещины (рис. 4, б, д). Приведенные данные свидетельствуют, что для всех исследованных сталей, независимо от того разрушались они при циклической нагрузке в условиях плоской деформации или нет, значения коэффициентов интенсивности напряжений, соответствующие полному разрушению (K_{fc}), не зависят от асимметрии цикла нагружения. Не зависит от асимметрии цикла нагружения и величина K_{fc}^I для стали 15X2МФА (II), которая определяет условия перехода к нестабильному развитию усталостной трещины.

Как следует из рис. 4, а–в, величины размахов коэффициентов интенсивности напряжений ΔK_I , соответствующие полному разрушению образцов в процессе циклического нагружения, не остаются инвариантными к асимметрии цикла нагружения – уменьшаются с увеличением асимметрии цикла нагружения.

Ранее [15] было также установлено, что зона усталостного повреждения в вершине трещины при циклическом нагружении, равная протяженности хрупкого скачка трещины a_c , не зависит от асимметрии цикла нагружения и полностью определяется величиной K_{fc}^i . Приведенные результаты показывают, что критическая скорость развития трещин как в начале скачкообразного развития усталостной трещины, так и при полном разрушении, независимо от того выдерживаются условия плоской деформации или нет, уменьшается с увеличением асимметрии цикла нагружения.

Зависимости характеристик циклической вязкости разрушения K_{fc} сталей от асимметрии цикла нагружения R приведены на рис. 5 [14–18], где в скобках указаны значения $K_{Ic}(K_Q^{\max})$, полученные для сталей при статическом нагружении, темные точки – результаты, полученные в условиях плоской деформации.

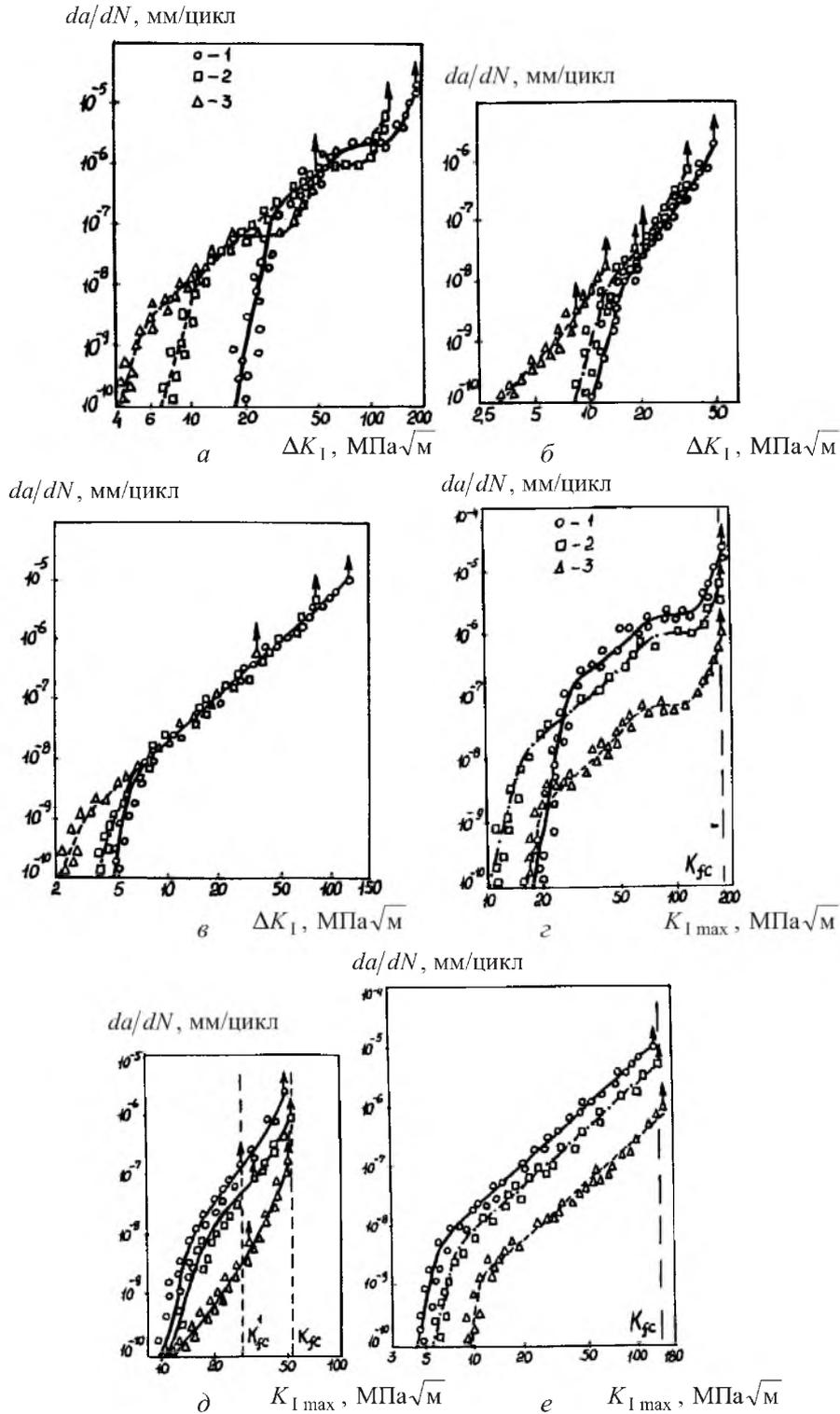


Рис. 4. Зависимости $da/dN - \Delta K_I$ (*a*-*в*) и $da/dN - K_{I \max}$ (*г*-*е*) для сталей 15X2MФА (I) (*a*, *г*), 15X2MФА (II) (*б*, *д*) и 08X18N10T (*в*, *е*) при различных асимметриях цикла нагружения: 1 - $R = 0,1$; 2 - $R = 0,35$; 3 - $R = 0,75$.

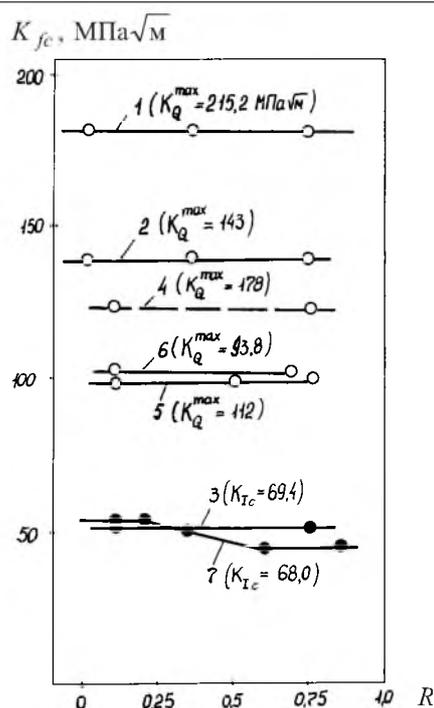


Рис. 5. Зависимости характеристик циклической вязкости разрушения от асимметрии цикла нагружения для различных теплоустойчивых сталей: 1, 5 – сталь 15X2MФА (I); 2 – сталь 08X18H10T; 3, 4, 7 – сталь 15X2MФА (II); 6 – сталь 10XMФТ (1–3 образцы толщиной 150 мм; 4–7 – образцы толщиной 25 мм; штриховая линия – $T_{исп} = 623$ К; сплошные линии – $T_{исп} = 293$ К).

Полученные данные позволяют заключить, что основными факторами, определяющими циклическую вязкость разрушения в условиях плоской деформации, являются максимальные в цикле значения коэффициентов интенсивности напряжений и размеры зон усталостного повреждения в вершине трещины, которые, как видно, не зависят от асимметрии цикла нагружения.

Тот факт, что условные характеристики циклической вязкости разрушения, получаемые при вязком разрушении, также не зависят от асимметрии цикла нагружения, нуждается в дополнительном исследовании.

Размеры образцов. Размеры образцов, в первую очередь их толщина, являются, как известно, одним из основных факторов, который, наряду с понижением температуры испытания, приводит к стеснению деформации в вершине трещины и реализации условий плоской деформации.

Анализ многочисленных экспериментальных данных показал, что в случае, когда выдерживаются условия плоской деформации, характеристики статической вязкости разрушения не зависят от размеров образцов. Если эти условия не выдерживаются, то с увеличением размеров образцов указанные характеристики возрастают.

В работе [19] установлено, что соответствие характеристик вязкости разрушения образцов разных размеров из теплоустойчивых сталей может быть получено при использовании энергетических методов их оценки.

На рис. 6 на основании результатов работ [14, 20] построены зависимости статической $K_{Ic}(K_Q^{\max})$ и циклической K_{fc} вязкости разрушения от толщины исследуемых образцов из сталей 15X2МФА (II), 08X18Н10Т и 15X2МФА (I).

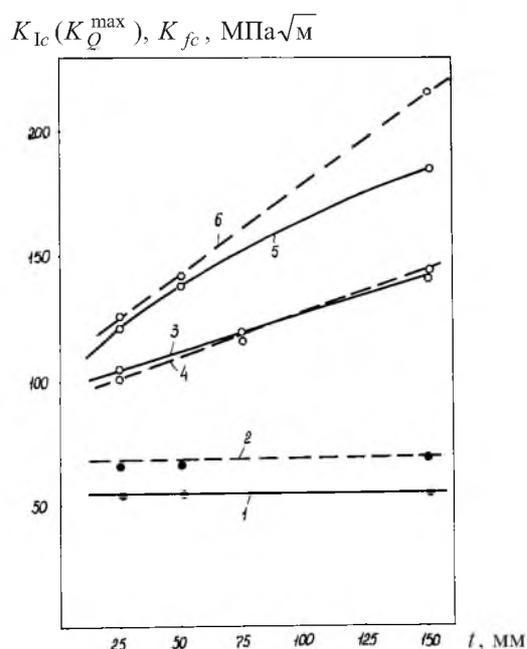


Рис. 6. Зависимости циклической (сплошные линии) и статической (штриховые линии) характеристик вязкости разрушения сталей 15X2МФА (II) – 1, 2, 08X18Н10Т – 3, 4 и 15X2МФА (I) – 5, 6 от толщины образца (темные точки соответствуют результатам, полученным при выдержке условий плоской деформации).

Из данных рисунка следует, что для стали 15X2МФА (II), которая разрушалась в условиях плоской деформации, характеристики вязкости разрушения как при статическом, так и при циклическом нагружении не зависят от размеров образцов. В случае сталей, для которых условия плоской деформации не выдерживались, наблюдается рост значений K_Q^{\max} и K_{fc} с увеличением размеров образцов. О закономерностях скачкообразного развития трещин в образцах больших размеров из стали 15X2МФА (II) можно судить из данных сообщения 1.

Предварительное пластическое деформирование. Предварительное пластическое деформирование металлов и сплавов приводит к существенному изменению их свойств, в первую очередь к исчерпанию пластичности и охрупчиванию материала, что проявляется в уменьшении остаточного удлинения при разрушении, повышении твердости, снижении температуры вязкохрупкого перехода и т.п. Все это обуславливает необходимость исследовать влияние предварительного пластического деформирования на циклическую вязкость разрушения сталей. Данному вопросу посвящены работы [21–23]. В них компактные образцы изготовляли из предварительно пластически деформированных заготовок. Пластическую деформацию определяли по формуле

$$e_p = \ln\left(\frac{F_0}{F}\right), \quad (1)$$

где F_0, F – площадь поперечного сечения образца до и после пластического деформирования.

Предварительное деформирование изучаемых сталей проводили в условиях комнатной температуры при деформациях как ниже, так и выше деформаций, соответствующих максимальному равномерному удлинению.

Сталь 15Х2МФА (I) исследовали при температурах 123 и 183 К, сталь 15Х2МФА (II) – при комнатной температуре, асимметрия цикла нагружения $R = 0,1$. Полученные зависимости статической $K_{Ic}(K_c)$ и циклической K_{fc} вязкости разрушения, а также величины K_{fc}^1 от предварительной пластической деформации e_p приведены на рис. 7. Здесь штриховыми линиями с двумя пунктирами показаны зависимости, определяющие условия плоской деформации для рассматриваемых сталей, штриховыми – максимальные размеры пор x_{max} в направлении, перпендикулярном плоскости трещин, возникающих в процессе предварительного пластического деформирования, вертикальными штрихпунктирными – значения пластической деформации, соответствующие пределу прочности.

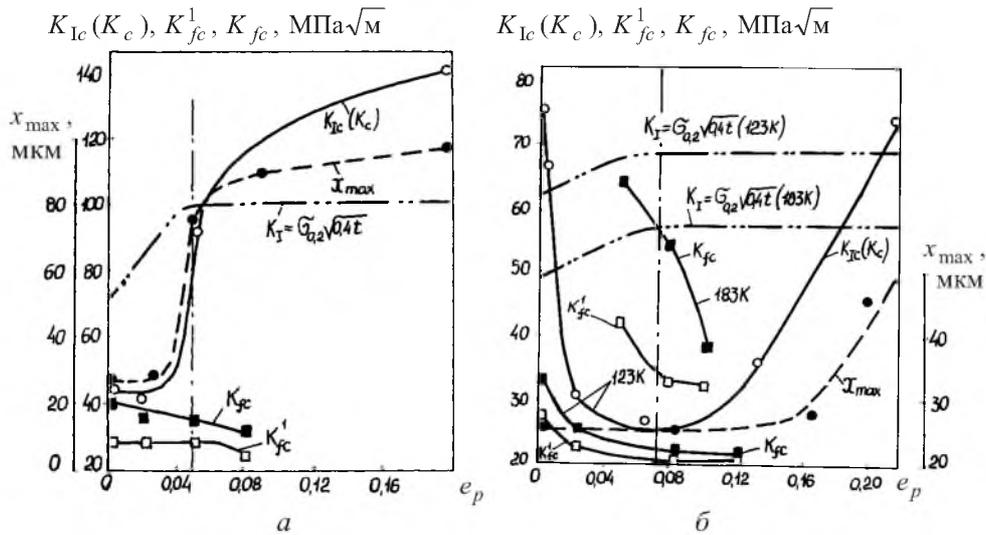


Рис. 7. Зависимости характеристик вязкости разрушения и размера пор от предварительной пластической деформации сталей 15Х2МФА (II) – а и 15Х2МФА (I) – б.

Представленные зависимости вязкости разрушения от предварительной пластической деформации имеют весьма сложный характер. Это объясняется тем, что пластическое деформирование приводит к исчерпанию пластичности, деформационному упрочнению, изменению структуры материала, в том числе к возникновению пор, иницированию остаточных напряжений и т.п. Влияние всех этих факторов на вязкость разрушения исследованных материалов может различаться как количественно, так и качественно, что весьма трудно поддается анализу.

Из полученных результатов (рис. 7) следуют такие основные выводы. Циклическая вязкость разрушения пластически деформированных сталей в условиях плоской деформации существенно ниже, чем статическая вязкость разрушения. Наибольшее снижение циклической вязкости разрушения отмечается для охрупченной стали 15Х2МФА (II) при пластической деформации около 0,08. Оно составляет более 60%. Еще более низкое значение имеет величина K_{fc}^1 , характеризующая переход от стабильного развития усталостной трещины к нестабильному. Наиболее существенное отличие значений K_{fc}^1 и K_{fc} наблюдается для стали 15Х2МФА (I) при температуре 183 К.

Зависимости размеров хрупких скачков трещины a_c^i при ее нестабильном развитии от коэффициентов интенсивности напряжений K_{fc}^i для стали 15Х2МФА (II) после различной предварительной пластической деформации приведены на рис. 8 [21]. Как видно, размер зоны усталостного повреждения в вершине трещины, который определяется величиной a_c^i , существенно зависит от предварительной пластической деформации, причем эта зависимость является немонотонной. Из рис. 7 следует, что характер влияния предварительной пластической деформации на величины вязкости разрушения при статическом и циклическом нагружении отличается. Так, для обеих рассматриваемых сталей величины K_{fc}^1 и K_{fc} монотонно уменьшаются с увеличением предварительной пластической деформацией, в то время как статическая вязкость разрушения, в том числе в условиях плоской деформации, может как уменьшаться, так и увеличиваться с ростом предварительной пластической деформации. Наблюдается корреляция между максимальным размером пор x_{max} и величиной статической вязкости разрушения для стали 15Х2МФА (II), в то же время такая корреляция отсутствует в случае циклической вязкости разрушения.

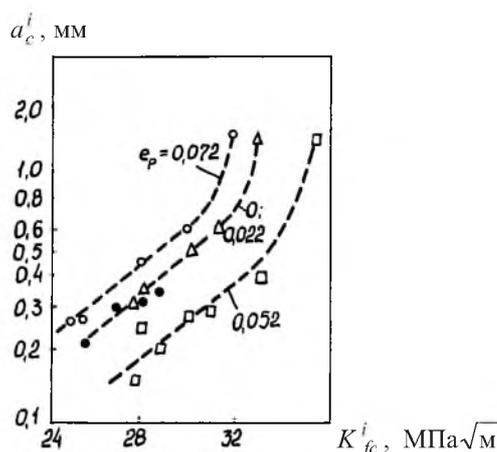


Рис. 8. Зависимости длины хрупкого скачка трещины a_c^i от K_{fc}^i для стали 15Х2МФА (II) после различной предварительной пластической деформации.

Более подробно закономерности влияния предварительной плоской деформации на циклическую вязкость разрушения изучены в работах [21–23].

Предварительное циклическое упругопластическое деформирование.

Предварительное циклическое упругопластическое деформирование заготовок, из которых в дальнейшем вырезали компактные образцы для исследования статической и циклической вязкости разрушения, проводили в условиях жесткого ($\varepsilon_a = \text{const}$) нагружения при симметричном цикле нагружения и комнатной температуре. Амплитуда деформации $\varepsilon_a = 0,3; 0,45$ и $0,7\%$, относительная наработка $\bar{N} = 0,3; 0,6$ и $0,85$ ($\bar{N} = N/N_T$, где N_T – число циклов нагружения до появления трещины длиной $0,5-1,0$ мм на поверхности).

Сталь 15Х2МФА (I) исследовали при температуре 123 К, сталь 15Х2МФА (II) – при температуре 293 К, коэффициент асимметрии цикла при определении циклической вязкости разрушения составлял $0,1$ [24]. Результаты исследования влияния предварительной циклической наработки на статическую и циклическую вязкость разрушения рассматриваемых сталей приведены на рис. 9 в виде зависимостей $K_{Ic}(K_c)$, K_{fc} и K_{fc}^1 от относительной наработки \bar{N} при различных амплитудах деформации ε_a [18].

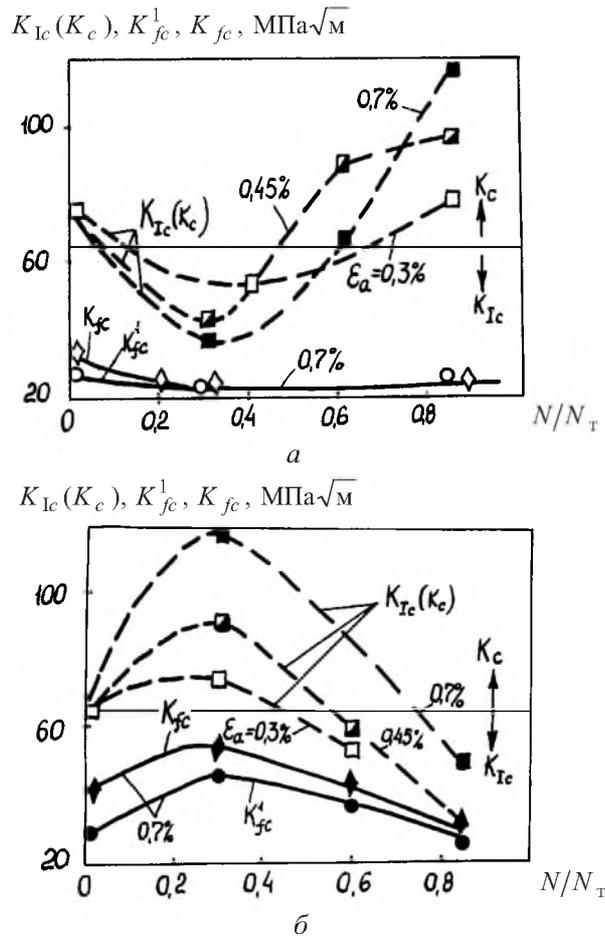


Рис. 9. Зависимости характеристик вязкости разрушения сталей 15Х2МФА (I) при 123 К (а) и 15Х2МФА (II) при 293 К (б) от циклической наработки.

На рисунке отмечен уровень коэффициентов интенсивности напряжений, ниже которых выдерживаются условия плоской деформации, а выше – не выдерживаются.

Видно, что характер влияния предварительной циклической упруго-пластической деформации на сопротивление хрупкому разрушению исследуемых сталей при статическом и циклическом нагружении довольно сложный. С увеличением относительной наработки \bar{N} до 0,3 статическая и циклическая вязкость разрушения стали 15Х2МФА (I) при 123 К уменьшаются, а при большей наработке статическая вязкость разрушения увеличивается, а циклическая остается практически неизменной.

В случае стали 15Х2МФА (II) влияние предварительной упруго-пластической деформации на сопротивление хрупкому разрушению носит иной характер по сравнению со сталью 15Х2МФА (I). При небольшой циклической наработке ($\bar{N} \leq 0,3$) характеристики вязкости разрушения в условиях статического и циклического нагружения увеличиваются, при более высоких наработках – уменьшаются.

Во всем диапазоне исследованных наработок отличие характеристик статической и циклической вязкости разрушения остается весьма заметным, особенно (рис. 9), когда характеристики вязкости разрушения при циклическом нагружении определяются в условиях плоской деформации, а при определении характеристик статической вязкости разрушения такие условия не выдерживались. Аналогичная закономерность наблюдается и в результатах, приведенных на рис. 8.

В работе [25] было показано, что значительное снижение циклической вязкости разрушения может иметь место в деталях, длительно эксплуатирующихся в условиях циклического нагружения.

Заключение. Таким образом, рассмотрено влияние температуры испытания, асимметрии цикла нагружения, размеров образцов, предварительного пластического деформирования, повреждения материала в процессе малоциклового нагружения на характеристики циклической вязкости разрушения и на соотношение характеристик статической и циклической вязкости разрушения. Показано, что для циклически разупрочняющихся сталей, когда при разрушении выдерживаются условия плоской деформации, достигаемой либо термообработкой сталей, либо низкой температурой испытания, циклическая вязкость разрушения может быть существенно ниже статической.

Проанализировано влияние на характеристики циклической вязкости разрушения исследованных сталей перечисленных выше факторов.

Резюме

Розглянуто вплив температури, асиметрії циклу навантаження, розміру зразків, попереднього пластичного деформування, пошкодження матеріалу в процесі малоциклового навантаження на величину циклічної в'язкості руйнування теплотривких, високоміцних хромомолібденових та інших сталей. Проаналізовано ступінь цього впливу в залежності від різних варіюваних у процесі дослідження чинників.

1. Троценко В. Т., Покровский В. В. Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. Сообщ. 1. Методики и материалы исследования и общие закономерности // Пробл. прочности. – 2003. – № 1. – С. 5 – 23.
2. Иванова В. С. Концепция циклической вязкости разрушения // Циклическая вязкость разрушения металлов и сплавов. – М.: Наука, 1981. – С. 5 – 19.
3. Yokobori T. and Aizawa T. A proposal for the concept of fatigue fracture toughness // Rep. Res. Inst. Str. Fract. Mater. – 1970. – 6. – P. 19 – 23.
4. Иванова В. С., Кудряшов В. Г. Метод определения вязкости разрушения (K_{Ic}) по данным испытания образцов на усталость // Пробл. прочности. – 1970. – № 3. – С. 17 – 19.
5. Ярема С. Я., Харин Е. Л. Зависимость длительности периода развития трещины при повторно-ударном нагружении // Там же. – № 8. – С. 28 – 32.
6. Satoh K., Toyoda M., and Nayma M. Transition behaviors to cleavage fracture of low-toughness material with fatigue crack growth // J. of Zosen Kyokai Ronbunshu. – 1979. – 146. – P. 490 – 496.
7. Kitsunai Y. Fractographic study of fatigue crack propagation at low temperature // J. Soc. Mater. Sci. – 1985. – 34 (381). – P. 50 – 55.
8. Kitsunai Y. Ductile-brittle transition behavior of structural steel in fatigue crack growth under low temperature // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. – 1986. – A52 (476). – P. 896 – 901.
9. Троценко В. Т., Покровский В. В. Исследование закономерностей усталостного и хрупкого разрушения стали 15Г2АФДпс при низких температурах // Пробл. прочности. – 1973. – № 3. – С. 11 – 17.
10. Kawasaki T., Nakanishi S., Sawaki Y. Fracture toughness and fatigue crack propagation in high-strength steel from temperature to -180°C // Eng. Fract. Mech. – 1975. – 7. – P. 465 – 472.
11. Покровский В. В., Токарев П. В., Ясний П. В. и др. Влияние температуры испытаний на трещиностойкость корпусной стали с различным содержанием примесей // Пробл. прочности. – 1988. – № 1. – С. 11 – 16.
12. Троценко В. Т., Покровский В. В., Ясний П. В. и др. Влияние температуры на характеристики трещиностойкости стали разного уровня прочности // Там же. – № 9. – С. 8 – 13.
13. Троценко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В. Влияние температуры испытания на трещиностойкость конструкционных теплоустойчивых сталей // Физ.-хим. механика материалов. – 1986. – № 1. – С. 98 – 106.
14. Покровский В. В., Каплуненко В. Г., Звездин Ю. И., Тимофеев Б. Т. Влияние асимметрии цикла нагружения на характеристики циклической трещиностойкости теплоустойчивых сталей // Пробл. прочности. – 1987. – № 11. – С. 8 – 13.
15. Троценко В. Т., Покровский В. В., Каплуненко В. Г., Тимофеев Б. Т. Влияние размеров образцов и асимметрии цикла на закономерности нестабильного развития трещин при циклическом нагружении // Там же. – № 3. – С. 8 – 12.

16. Троценко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В. Прогнозирование влияния асимметрии цикла нагружения на циклическую вязкость разрушения конструкционных сплавов // Там же. – 1985. – № 11. – С. 30 – 35.
17. Троценко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В., Попов А. А. Влияние температуры и асимметрии нагружения на циклическую трещиностойкость стали 15Х2НМФА // Там же. – 1981. – № 10. – С. 3 – 7.
18. Троценко В. Т., Покровский В. В., Ярусевич В. Л. и др. Исследование влияния температуры на трещиностойкость стали и сварного соединения // Там же. – 1988. – № 2. – С. 8 – 14.
19. Красовский А. Я., Кашталян Ю. А., Красико В. Н. Исследование трещиностойкости корпусных сталей при статическом и динамическом нагружении с учетом эффекта масштаба испытываемых образцов. – Киев, 1982. – 62 с. – (Препр. / АН УССР, Ин-т пробл. прочности).
20. Троценко В. Т., Ясний П. В., Покровский В. В. и др. Влияние размеров образцов на трещиностойкость корпусных теплоустойчивых сталей // Пробл. прочности. – 1982. – № 10. – С. 3 – 11.
21. Троценко В. Т., Покровский В. В., Ясний П. В. и др. Влияние однократной предварительной пластической деформации на трещиностойкость // Там же. – 1988. – № 12. – С. 9 – 14.
22. Троценко В. Т., Покровский В. В., Ясний П. В. и др. Влияние однократной предварительной пластической деформации на сопротивление хрупкому разрушению // Физ.-хим. механика материалов. – 1989. – № 6. – С. 3 – 12.
23. Ясний П. В., Покровский В. В., Штукатурова А. С. и др. Исследование влияния предварительной пластической деформации на механические свойства и микроструктуру конструкционной стали // Пробл. прочности. – 1988. – № 9. – С. 41 – 45.
24. Троценко В. Т., Ясний П. В., Токарев П. В., Тимофеев Б. Т. Влияние предварительной циклической пластической деформации на трещиностойкость // Там же. – 1989. – № 11. – С. 14 – 20.
25. Покровский В. В., Ясний П. В., Костенко Н. А. и др. Влияние эксплуатационной наработки на трещиностойкость материала корпуса автосцепки грузового вагона подвижного состава // Там же. – 1988. – № 2. – С. 28 – 32.

Поступила 19. 03. 2002