

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Некоторые особенности роста усталостных трещин на различных стадиях их развития

В. Т. Трощенко

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

Рассмотрены некоторые особенности роста усталостных трещин в металлах на стадиях зарождения и начального развития, стабильного и нестабильного развития, предшествующего полному разрушению.

Показано, что на стадии начального роста усталостных трещин факторами, определяющими их путь, являются: напряженное состояние; локализованное усталостное повреждение, предшествующее зарождению главной усталостной трещины; поверхностные остаточные напряжения; поверхностные технологические и эксплуатационные дефекты; контактные взаимодействия.

Стабильное развитие усталостной трещины прежде всего определяется напряженно-деформированным состоянием конструкции в целом и напряженно-деформированным состоянием в вершине трещины с учетом изменения его вследствие распространения последней, оцениваемое с помощью критериев механики разрушения. Изучены особенности развития усталостных трещин в компрессорных лопатках судовых газовых турбин.

Показано, что в охрупченных сталях при развитии усталостных трещин в условиях плоской деформации полное разрушение происходит при весьма малых размерах трещины. При этом характеристики усталостной вязкости разрушения существенно ниже, чем статической. Рассмотрены особенности нестабильного развития усталостных трещин.

Ключевые слова: усталостная трещина, напряженное состояние, плоская деформация.

Введение. Известно, что часто разрушения в технике происходят вследствие усталости материала, когда в процессе циклического нагружения в нем зарождается и развивается (вплоть до полного разрушения) усталостная трещина.

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию роста усталостных трещин, не все аспекты этой проблемы достаточно хорошо изучены. В частности, закономерности распространения трещин в реальных конструкциях требуют дальнейшего исследования.

При изучении пути развития трещины следует учитывать, что механизмы, а следовательно, и закономерности их роста на стадиях зарождения и начального развития, стабильного развития и полного разрушения могут быть разными.

В данной работе с использованием в первую очередь результатов экспериментальных исследований, полученных в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, рассматриваются особенности развития усталостных трещин в металлах при многоцикловом нагружении на различных стадиях с учетом влияния нелокализованного усталостного повреждения материала, вида нагружения, остаточных напряжений, концентрации напряжений, обусловленных, в частности, технологическими и эксплуатационными дефектами, и т.д. Анализируются условия перехода от распространения трещины в плоскости максимальных касательных напряжений к распространению в плоскости максимальных нормальных напряжений. Приводятся результаты исследования пути усталостных трещин в металлах при фреттинге и обосновывается модель их развития.

Анализируются закономерности развития стабильных усталостных трещин в конструктивных элементах на примере компрессорных лопаток судовых газовых турбин.

Установлено, что в случае разрушения сталей, охрупченных в результате термической обработки, например, имитирующей радиационное охрупчивание материалов корпусов атомных реакторов, при испытаниях в условиях низких температур и т.п. полное разрушение образцов, а следовательно, и конструкций происходит при размерах усталостных трещин, занимающих незначительную часть поперечного сечения детали. Разрушения подобного типа – наиболее опасны, поскольку выявление усталостных трещин с использованием методов неразрушающего контроля весьма затруднительно. Причина таких разрушений заключается в существенном снижении характеристик усталостной вязкости разрушения сталей по сравнению со статической.

Рассматриваются условия перехода от стабильного распространения усталостных трещин к нестабильному.

Зарождение и начальная стадия развития усталостных трещин. Как известно, возникновению главной усталостной трещины в металле, т.е. трещины, которая приводит к полному разрушению образца или детали, предшествует стадия нелокализованного усталостного повреждения, характеризующаяся наличием большого количества локальных зон пластического деформирования. Последние являются очагами образования микроскопических усталостных трещин.

В работах [1–5] было показано, что весьма эффективной характеристикой, позволяющей интегрально оценивать степень нелокализованного усталостного повреждения материала, которое характеризуется в первую очередь числом и размерами микроскопических трещин, служит неупругая деформация за цикл на стадии стабилизации процесса неупругого деформирования [6].

Выполненный в [6] анализ показал, что имеет место четкая корреляция между произведением числа трещин на их средний размер и неупругой деформацией за цикл. Результаты исследования стали 45 при кручении и растяжении–сжатии показаны на рис. 1, где q – произведение количества трещин на их среднюю длину; $q_{\tau_{-1}}$, $q_{\sigma_{-1}}$ – то же при напряжениях, равных пределу выносливости при кручении и растяжении–сжатии; $\Delta\gamma_i$, $\Delta\varepsilon_i$ –

неупругая деформация за цикл при кручении и растяжении–сжатии; $\Delta\gamma_{i(\tau-1)}$, $\Delta\varepsilon_{i(\sigma-1)}$ – то же при напряжениях, равных пределу выносливости.

Циклические неупругие деформации исследовались с использованием методик, описанных ранее [5].

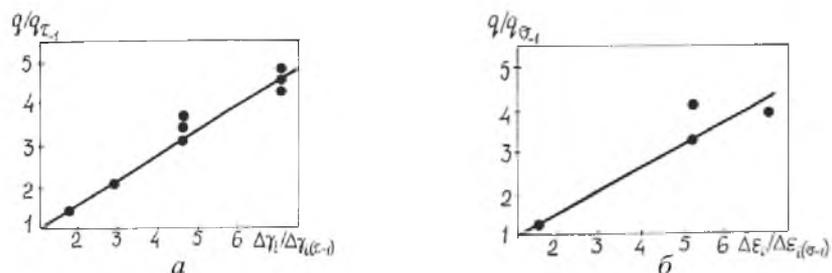


Рис. 1. Зависимость характеристик нелокализованного усталостного повреждения и неупругих циклических деформаций для стали 45: а – кручение; б – растяжение–сжатие.

В табл. 1 приведены механические характеристики сталей и сплавов, результаты исследования которых представлены в статье.

В [6] было показано, что переход от нелокализованного повреждения к локализованному, т.е. в момент формирования трещины таких размеров, при которых она способна при данных условиях нагружения привести к полному разрушению, соответствует числу циклов нагружения, когда рост главной трещины не сопровождается увеличением неупругой деформации за цикл.

Т а б л и ц а 1

Механические характеристики некоторых исследуемых сталей и сплавов

Материал	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %
Стали				
45	339	516	33,4	66,0
40Х	683	803	22,5	70,2
12ХН3А	700	950	11,0	55,0
20Х13	655	755	23,6	61,0
14Х17Н2	782	943	17,5	60,8
15кп	230	380	27,0	69,0
08ГСЮТ	403	540	30,0	75,0
22Г2ТЮ	–	600	16,0	–
15Х12Н2ВМФ	885	1015	16,2	57,0
08Х17Н6Т	840	895	17,3	55,8
15Г2АФДпс	410	508	40,0	75,0
15Х2МФА(І)	584	700	21,0	74,6
15Х2МФА(ІІ)	1100	1157	16,6	67,2
08Х18Н10Т	272	556	54,0	67,8
Титановые сплавы				
BT9	1030	1140	7,0	30,0
BT3-1	968	1032	17,5	42,5
Алюминиевый сплав				
АМг6Н	343	430	7,0	21,0

За размер усталостной трещины, соответствующей переходу от стадии нелокализованного повреждения к стадии локализованного повреждения, может быть принят размер наиболее протяженной трещины при напряжениях, равных пределу выносливости (τ_{-1}, σ_{-1}). В табл. 2 приведены размеры таких трещин для сталей 45, 12ХН3А и 40Х, исследованных при растяжении–сжатии и кручении. Как видно, размер трещин уменьшается с увеличением уровня прочности сталей, при кручении размеры нераспространяющихся трещин существенно больше, чем при растяжении–сжатии. Нераспространяющиеся усталостные трещины наблюдаются также при напряжениях ниже предела выносливости, их размер уменьшается с понижением напряжений, при которых они зарождаются.

При исследовании гладких тонкостенных образцов при растяжении–сжатии и кручении установлено [6], что усталостная трещина развивается в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2.

Т а б л и ц а 2

Размеры трещин при напряжениях, равных пределу выносливости

Сталь	Кручение		Растяжение–сжатие		$2l_{кр}/2l_p$
	τ_{-1} , МПа	$2l_{кр}$, мм	σ_{-1} , МПа	$2l_p$, мм	
45	125	0,15–0,20	220	0,040–0,070	~3,20
12ХН3А	240	0,07–0,10	395	0,020–0,036	~3,03
40Х	245	0,04–0,08	430	–	–

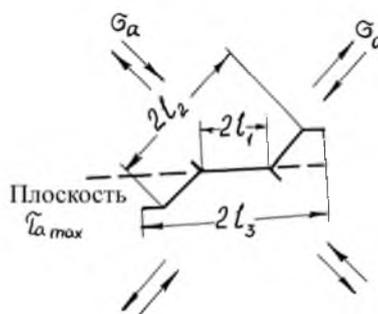


Рис. 2. Схема развития усталостной трещины при кручении.

Расчет коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) K_I, K_{II}, K_{III} для различных стадий развития трещины проводился в соответствии с критериями линейной механики разрушения с использованием представленных в [7, 8] результатов.

Трещина в виде полуэллипса зарождается в плоскости максимальных касательных напряжений. Развитие трещины на первой стадии ($2l_1$) контролируется величиной K_{III} , на второй стадии ($2l_2$) — K_I и на третьей стадии ($2l_3$), когда она становится сквозной, — K_{II} . Размеры трещины и долговечности, соответствующие различным стадиям развития трещины в исследованных образцах, приведены в табл. 3.

дованных образцах при кручении, приведены в табл. 3, где N – число циклов до зарождения трещины, N_f – число циклов до полного разрушения.

Стадия зарождения и развития трещины в плоскости максимальных касательных напряжений занимает до 90% общего числа циклов до разрушения. Максимальный размер трещины на этой стадии уменьшается с понижением напряжений.

Т а б л и ц а 3

Стадии развития трещин

Стадия развития трещины	Напряжения	Сталь 45		Сталь 12ХНЗА		Сталь 40Х	
		$2l$, мм	N/N_f , %	$2l$, мм	N/N_f , %	$2l$, мм	N/N_f , %
1	Высокие ($N_f \approx 10^5$ цикл)	3,0	99,9	0,42	87,0	0,25	75,0
2		0	0	0,60	12,8	1,01	24,0
3		22,0	0,1	22,00	0,2	22,00	1,0
1	Средние ($N_f \approx 10^6$ цикл)	1,0	89,5	0,15	81,6	0,10	72,0
2		1,31	10,3	2,30	18,0	2,20	27,0
3		22,0	0,2	22,00	0,4	22,00	1,0
1	Ниже предела выносливости на базе $5 \cdot 10^6$ цикл	0,2	–	0,10	–	0,08	–
2		0	–	–	–	–	–
3		0	–	–	–	–	–

На рис. 3 приведены зависимости скорости роста усталостных трещин на различных стадиях развития от максимальных значений КИН K_I , K_{II} , K_{III} [9]. Как видно, для сталей 45 и 40Х с ростом приложенных напряжений на первой стадии развития усталостной трещины (кривые 1) наблюдается существенное увеличение ее скорости при одинаковых значениях КИН. Это объясняется тем, что с повышением напряжений возрастает плотность микроскопических поверхностных трещин, что и вызывает изменение скорости их развития. На второй и третьей стадиях диаграммы, когда размер усталостной трещины увеличивается, ее скорость не зависит от уровня напряжений и описывается едиными зависимостями.

Полученные с помощью сканирующего микроскопа микрофотографии поверхностей трещины показали, что механизм разрушения трещины на каждом участке различный [9].

Результаты анализа условий перехода от одного механизма распространения усталостной трещины к другому иллюстрирует рис. 4, на котором приведены зависимости размеров трещины $2l$ и скоростей развития усталостной трещины dl/dN от K_I , K_{II} , K_{III} [9]. Здесь сплошными линиями представлены зависимости, соответствующие экспериментально наблюдаемому развитию трещин, штриховыми – предполагаемые зависимости развития трещины по тому или иному механизму.

Переход трещины от развития по механизму K_{III} к развитию по механизму K_I имеет место при выполнении двух условий: во-первых, если

$K_I > K_{th}$ (K_{th} – пороговое значение коэффициента интенсивности напряжений), и, во-вторых, если скорость распространения трещины по механизму K_I больше, чем по механизму K_{III} , и инициируется тем, что в вершине трещины согласно механизму K_{III} появляются микротрещины, ориентированные под углом 45° к оси образца. Аналогично осуществляется переход развития трещины от механизма K_I к механизму K_{II} .

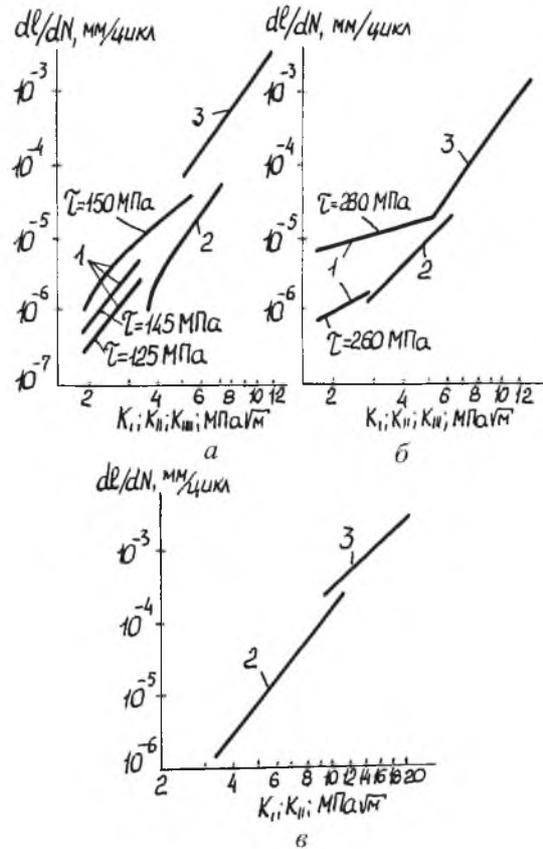


Рис. 3. Зависимости скорости роста усталостных трещин от максимальных значений КИН K_{III} (1), K_I (2) и K_{II} (3) для сталей 45 (а), 40Х (б) и 12ХН3А (в).

При наличии концентраторов напряжения, которые [10] создавались путем сверления отверстия диаметром 1,3 мм в стенке тонкостенного образца, зарождение трещины и ее дальнейшее развитие при кручении и растяжении-сжатии проходило в плоскости максимальных нормальных напряжений.

Определяющими факторами при зарождении и развитии усталостных трещин в реальных конструкциях на начальной стадии являются состояние поверхностного слоя (в первую очередь наличие технологических и эксплуатационных дефектов), а также величина, знак и характер распределения остаточных напряжений.

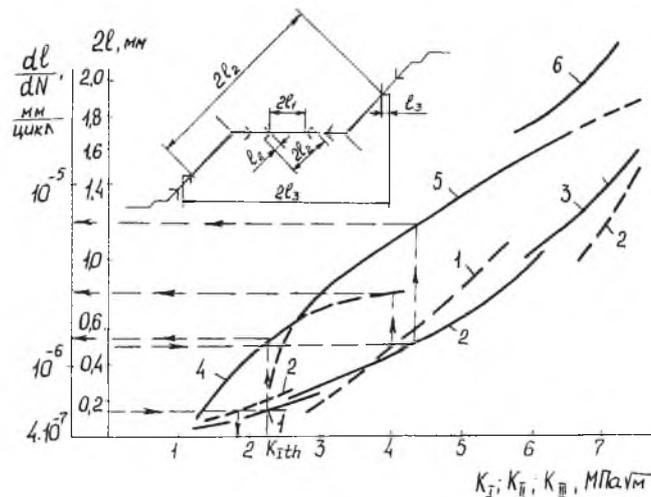


Рис. 4. Зависимости длины трещины $2l$ и скорости ее роста dl/dN от КИН для стали 40X: 1 – $(2l_1 - K_{III})$; 2 – $(2l_2 - K_I)$; 3 – $(2l_3 - K_{II})$; 4 – $(dl/dN - K_{III})$; 5 – $(dl/dN - K_I)$; 6 – $(dl/dN - K_{II})$.

Исследование зарождения усталостных трещин в новых компрессорных лопатках судовых газовых турбин после эксплуатации в течение 12000–16000 ч показало [11], что влияние перечисленных выше факторов способствовало их зарождению в сечениях лопаток, в которых переменные напряжения изгиба были в 3–6,5 раза меньше, чем в максимально напряженном корневом сечении.

Ранее [12–14] исследовалось влияние поверхностных дефектов на зарождение усталостных трещин в образцах из сталей 20X13 и 14X17H2 и титанового сплава BT3-1 с различным уровнем технологических остаточных напряжений в поверхностном слое при кручении и круговом изгибе.

Схематическое представление дефектов в виде отпечатка индентора ($2l_0 = 0,4$ мм, $a = 0,1$ мм), имитирующего забоину, коррозионной язвы ($2l_0 = 1,0$ мм, $a = 0,3$ мм) и неметаллического включения ($2l_0 = 1,4$ мм, $a = 0,02$ мм), нанесенного на поверхность электроискровым методом, а также распределение остаточных напряжений, вызванных нанесением дефектов, главных напряжений от внешней нагрузки и суммарных напряжений, иллюстрирует рис. 5.

Анализ усталостных трещин вблизи дефектов свидетельствует о весьма сложном характере их распространения, зависящем от вида нагружения, геометрии дефектов, уровня концентрации напряжений, соотношения глубины дефекта, а также глубины, знака и величины технологических остаточных напряжений в поверхностном слое и т.п. Особенно существенно влияние технологических остаточных напряжений.

На рис. 6 в виде зависимостей скорости роста усталостных трещин dl/dN от отношения длины трещины на поверхности образца l к первоначальному размеру дефекта l_0 при различных относительных напряже-

ниях τ_a/τ_{-1} показана кинетика начального роста усталостных трещин нормального отрыва из отпечатка индентора (а), язвы травления (б) и неметаллического включения (в) при циклическом кручении образцов из титанового сплава ВТЗ-1. Здесь сплошными линиями представлены кривые развития трещин при нанесении дефектов на полированную поверхность, штриховыми – после предварительного пластического деформирования, приводящего к возникновению в поверхностном слое остаточных сжимающих напряжений. Как видно, наличие последних приводит к торможению развития трещины вплоть до ее полной остановки.

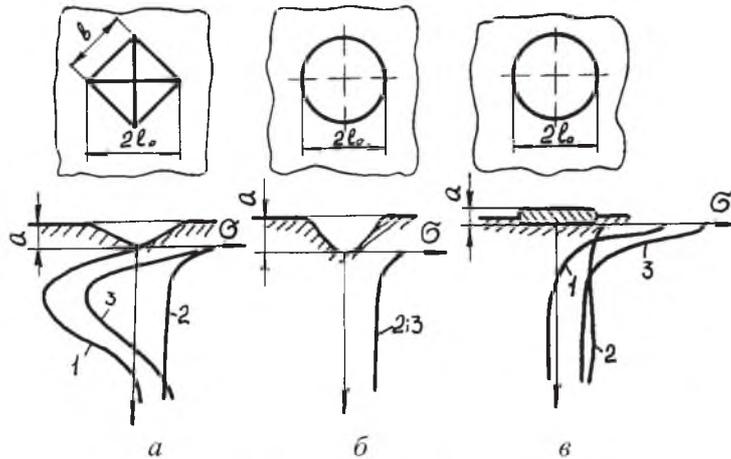


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений (1), напряжений от внешних сил (2) и суммарных напряжений (3) под поверхностными дефектами.

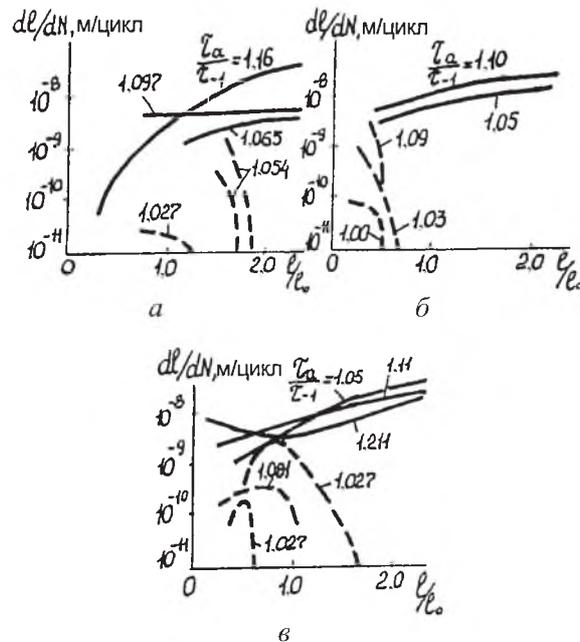


Рис. 6. Кинетика роста усталостных трещин, инициированных дефектами.

В случае если трещина не тормозится остаточными напряжениями, то независимо от дефекта, инициировавшего ее возникновение, и состояния поверхности она развивается в виде полуэллипса и приобретает энергетически устойчивую форму (рис. 7).

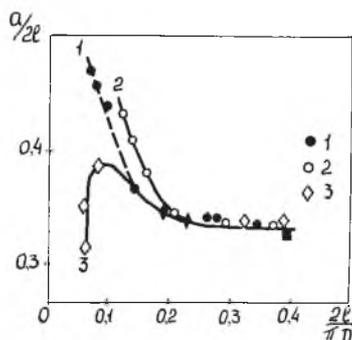


Рис. 7. Развитие полуэллиптической трещины при кручении из отпечатка индентора (2), звы травления (1, 3) в стали 14X17H2 (штриховая линия) и титановом сплаве ВТ3-1 (сплошные линии).

Наряду с технологическими и эксплуатационными дефектами сопротивление усталости материалов существенно снижается в условиях фреттинга, который имеет место в сочленениях при проскальзывании одной контактирующей поверхности относительно другой на малую величину ($1 \cdot 10^{-6} \dots 2,5 \cdot 10^{-1}$ мм). Исследованию усталости металлов в условиях фреттинга посвящено большое количество работ.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию усталостного разрушения металлов при фреттинге с использованием критериев механики разрушения [15–23]. Рассмотрим полученные ранее [18–20] результаты исследования развития усталостных трещин в металлах в условиях фреттинга.

Схема нагружения и развития усталостной трещины при фреттинге показана на рис. 8, где F_{σ} – переменная внешняя нагрузка; $F_Q = \mu F_P$ – сила трения (μ – коэффициент трения, F_P – контактное усилие).

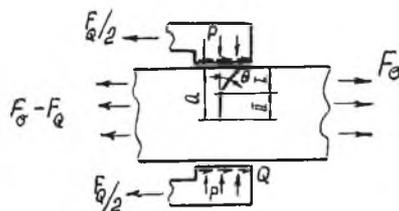


Рис. 8. Схема нагружения и развития усталостной трещины при фреттинге.

Коэффициенты интенсивности напряжения K_I и K_{II} рассчитывались по напряжениям P и Q с использованием формул, приведенных в [15].

Как показывают многочисленные исследования, усталостная трещина в условиях фреттинга зарождается на поверхности и развивается в соответствии со схемой, представленной на рис. 8. Зависимость угла Θ от глубины трещины a в сплавах АМг6Н и ВТ9 показана на рис. 9 [20].

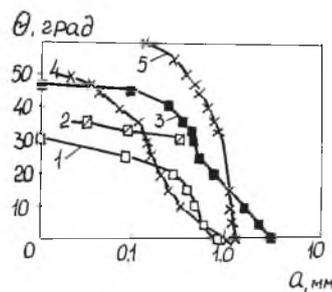


Рис. 9. Зависимость угла Θ от глубины трещины в сплавах АМг6Н (1 – $\sigma_a = 90$ МПа, 2 – $\sigma_a = 75$ МПа) и ВТ9 (3, 4 – $\sigma_a = 210$ МПа, 5 – $\sigma_a = 160$ МПа).

Можно предположить, что на первой стадии развития трещины определяющим является сдвиговой коэффициент интенсивности напряжений [15]:

$$K_{\tau} = \frac{1}{2} \cos \frac{\Theta}{2} [K_I \sin \Theta + K_{II} (3 \cos \Theta - 1)], \quad (1)$$

где K_I и K_{II} – коэффициенты интенсивности напряжений от действия всех компонентов напряжений, имеющих место в поверхностном слое, на второй стадии – нормальный коэффициент интенсивности напряжений [21]:

$$K_{\sigma} = \cos \frac{\Theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\Theta}{2} - \frac{2}{3} K_{II} \cos \Theta \right]. \quad (2)$$

Ранее [18] была предложена и обоснована схема перехода усталостной трещины с первой стадии развития на вторую (рис. 10) и сформулированы условия остановки ее развития.

Рис. 10 иллюстрирует возможное изменение величины K_{τ} по мере продвижения трещины в глубь материала (кривые 1, 2) и изменение K_{σ} (кривая 3), где K_{th} и $K_{\tau th}$ – пороговые коэффициенты интенсивности напряжений при растяжении и сдвиге. Численные значения K_{th} и $K_{\tau th}$ для некоторых исследуемых материалов при различных асимметриях цикла нагружения R приведены в табл. 4, их механические характеристики – в табл. 1.

Условия перехода трещины с первой стадии на вторую, что отмечается при напряжениях выше предела выносливости, следующие: $K_{\tau} \geq K_{\tau th}$; $K_{\sigma} \geq K_{th}$; этим условиям соответствует кривая 1 на рис. 10.

Т а б л и ц а 4

Пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжений

Материал	R	K_{th} , МПа $\sqrt{м}$	$K_{\tau th}$, МПа $\sqrt{м}$	$K_{th}/K_{\tau th}$
Стали 15кп	0	7,86	5,00	1,54
	-1	5,07	2,95	1,72
08ГСЮТ	0	5,54	3,48	1,60
	-1	4,18	2,46	1,70
22Г2ПЮ	0	4,72	3,10	1,52
	-1	3,05	1,83	1,67
	0	2,70	1,86	1,45
Титановый сплав BT9	-1	1,65	1,08	1,53
Алюминиевый сплав АМг6Н	0	4,30	2,94	1,46
	-1	3,82	3,70	1,42

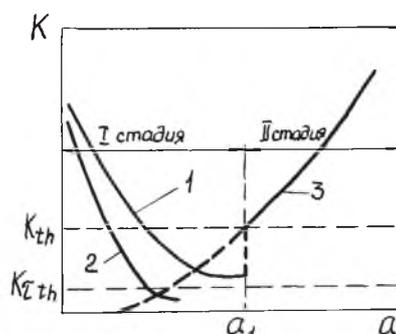


Рис. 10. Схема перехода трещины с первой стадии развития на вторую.

Усталостная трещина не будет распространяться при условии $K_{\tau} < K_{\tau th}$ (на рис. 10 кривая 2), которое имеет место при напряжениях ниже предела выносливости. Рассмотренная схема развития усталостной трещины была подтверждена экспериментально [20].

Основываясь на таком подходе, ранее [18, 20] были построены кривые усталости ряда металлов и показано их хорошее соответствие экспериментальным результатам.

Развитие стабильных усталостных трещин. Под стабильными усталостными трещинами следует понимать трещины таких размеров, когда влияние на их развитие локальных факторов (поверхностные остаточные напряжения, поверхностные технологические и эксплуатационные дефекты небольших размеров, контактное взаимодействие и др.) не является определяющим.

При анализе распространения стабильных трещин в конструкциях одна из наиболее сложных задач — определение КИН или других характеристик напряженно-деформированного состояния в вершине трещины с учетом изменения размеров последней в процессе развития и других факторов.

Рассмотрим это на примере распространения трещины в компрессорных лопатках судовых газовых турбин, для которых разрушение за счет распространения трещин является основным [11, 24, 25]. Конструкция исследованной компрессорной лопатки и ее поперечное сечение показаны на рис. 11. Компрессорная лопатка в процессе эксплуатации подвергается в основном изгибным колебаниям по первой форме, что приводит к возникновению усталостных трещин в различных зонах поперечного сечения. Причем, как уже отмечалось, такие трещины появляются не только в корневом сечении лопатки, где имеют место максимальные изгибные напряжения, но и в других сечениях, что связано с наличием технологических и эксплуатационных дефектов.

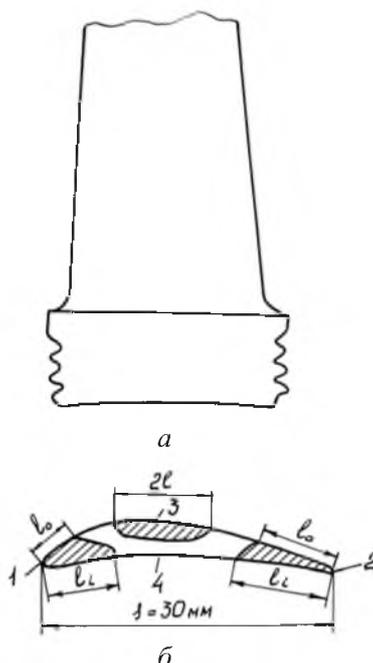


Рис. 11. Схема лопатки (а) и ее поперечного сечения (б): 1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – спинка; 4 – корыто.

Анализ результатов испытаний показал, что в процессе циклического нагружения усталостные трещины развивались в плоскостях, перпендикулярных линии, проходящей через центры тяжести сечений лопаток. Это дает основание утверждать, что при изгибе трещины в лопатках распространяются по механизму отрыва, и основной характеристикой, определяющей их развитие, является величина K_I .

Исследованию на вибрационном стенде в условиях резонанса при частотах около 700 Гц в воздухе и в коррозионной среде, а именно в парах морской воды, соответствующей среднеокеаническому составу, подвергали новые лопатки и после эксплуатации в течение 12000–16000 ч.

В табл. 5 приведены марки сталей, из которых изготавливали лопатки с небольшими конструктивными отличиями, условия испытания и места, в которых зарождались усталостные трещины в процессе испытаний.

Т а б л и ц а 5

Места возникновения усталостных трещин в лопатках

Тип лопатки	Сталь	Состояние лопатки	Среда испытаний	Количество трещин			
				Спинка	Входная кромка	Выходная кромка	Корыто
1	20X13	н	в	10	–	1	–
			с	9	2	–	1
			э	11	1	–	–
			с	8	2	1	–
2	14X17H2	н	в	9	–	2	–
			с	10	3	1	1
			э	4	–	1	–
			с	1	5	–	–
3	1X12H2BMФ	н	в	11	–	–	–
			с	11	1	–	–
			э	10	4	1	–
			с	4	2	–	1

Примечание: в – воздух; с – коррозионная среда; н – новые лопатки; э – лопатки после эксплуатации в течение 12000–16000 ч.

С целью детального исследования закономерностей развития усталостных трещин поверхностные трещины в лопатках на спинке выращивали из сверления диаметром 0,2 мм и глубиной 0,3 мм, с входной и выходной кромок – из острых надрезов глубиной 0,2 мм. В каждой исследуемой лопатке была только одна трещина [24]. Исследовали трещины размером 0,5–15 мм.

Проводилось статическое и динамическое тензометрирование напряженного состояния лопатки, при этом учитывалось изменение жесткости лопатки, обусловленное развитием трещины.

В связи с отсутствием аналитических методов определения КИН для трещин в лопатках был использован с учетом известных результатов экспериментальный метод, основанный на предположении, что равным значениям скорости развития усталостных трещин в одном и том же материале соответствуют равные КИН. Этот метод дает возможность, имея диаграммы развития трещин в специально изготовленных образцах, получить значения КИН для трещин в лопатках при любом их размере. Детальное обоснование метода выполнено ранее [20]. Выражение для определения КИН в соответствующих сечениях лопатки имеет вид

$$K_I = Y\sigma\sqrt{2l}. \quad (3)$$

Здесь σ – напряжение изгиба в корневом сечении лопатки; $2l$ – размер трещины на поверхности; Y – геометрический фактор, полученный путем обработки результатов тарировки по формуле

$$Y = \frac{K_I}{\sigma\sqrt{2l}}, \quad (4)$$

где K_I – значение КИН, соответствующее определенной скорости развития трещин в лопатке и найденное по диаграммам, построенным для образцов.

На рис. 12 приведены зависимости глубины полуэллиптической трещины на спинке лопатки от ее длины на поверхности $2l$ и длины трещины на наружной поверхности кромки лопатки l_0 от длины по внутренней кромке l_i . Глубина трещин в лопатке определялась по излому с учетом отметок, оставленных на его поверхности при изменении режима нагружения.

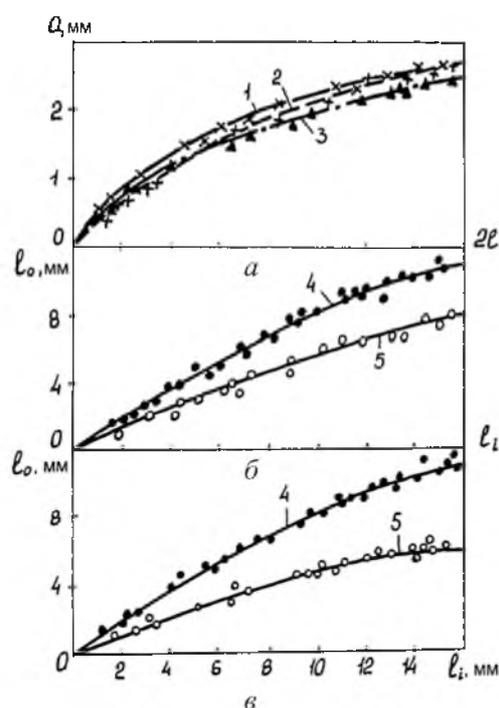


Рис. 12. Зависимости глубины трещины от ее длины на поверхности (а) и длины трещины на наружной поверхности от длины по внутренней поверхности (б, в): 1, 2, 3 – типы лопаток; 4, 5 – трещина соответственно с выходной и входной кромки.

На рис. 13 представлены зависимости величины геометрического фактора Y при развитии трещины по внутренней (Y_1) и наружной (Y_0) кромках лопатки от размера трещин на внутренней кромке l_i , а также зависимости Y при развитии трещины на спинке лопатки на поверхности (Y_s) и в глубине (Y_d) от размера трещины на спинке [24]. Штриховой линией на рис. 13,в показана зависимость усредненного геометрического фактора \bar{Y} для трещин на спинке, полученная с использованием метода упругой податливости.

Видно, что геометрический фактор, а следовательно, и КИН существенно зависят от размера и места расположения трещины. Это приводит к тому, что при одной и той же напряженности лопатки, которая характеризуется величиной напряжений в корневом сечении лопатки, σ , и при одинаковом размере трещины величина КИН в различных местах сечения лопатки может быть существенно разной.

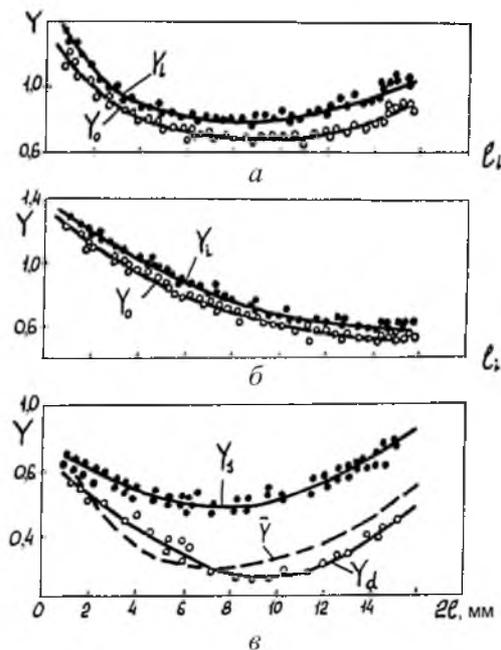


Рис. 13. Экспериментальные зависимости геометрического фактора Y от размера трещины l_i ; a , b – соответственно входная и выходная кромки; v – спинка.

На рис. 14 представлены результаты расчетов условий нераспространения усталостных трещин в лопатках из стали 14X17H2 при их развитии в сечении лопатки из точек 1, 2, 3 [26]. В качестве характеристики нераспространения трещин используется величина σ_{th} , определенная по формуле

$$\sigma_{th} = \frac{K_{th}}{Y\sqrt{2l}}, \quad (5)$$

где K_{th} – пороговый коэффициент интенсивности напряжений, найденный при испытании образцов из стали 14X17H2.

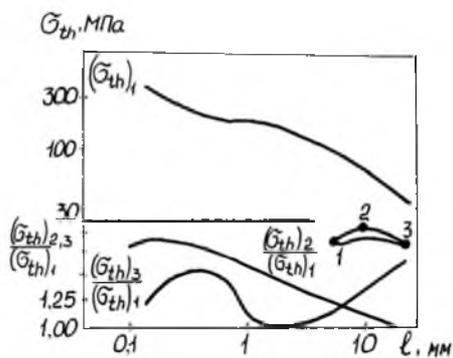


Рис. 14. Результаты расчетов условий нераспространения усталостных трещин в лопатках из стали 14X17H2.

Видно, что при одних и тех же размерах трещины наименьшие пороговые напряжения σ_{th} имеют место при развитии трещины с входной кромки лопатки.

Рис. 15 иллюстрирует зависимости числа циклов нагружения, за которые трещина увеличивается в размерах l , от напряжений, рассчитанные с использованием параметров диаграмм $da/dN - K_I$, полученных при испытании образцов с полуэллиптическими трещинами, и приведенных выше значений геометрического фактора [27, 28]. Как видно, число циклов, за которые трещина растет в указанных пределах на входной и выходной кромках, в 2,5...3 раза ниже, чем на спинке. Эта разница сохраняется при испытаниях в парах раствора морской соли.

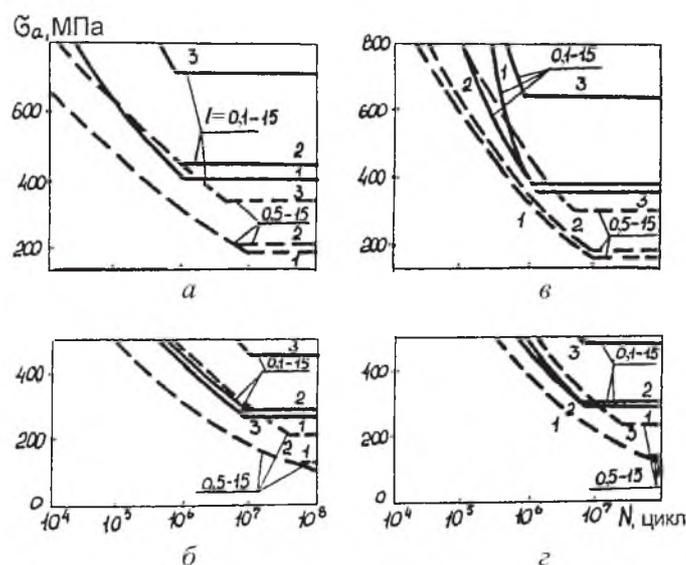


Рис. 15. Кривые развития трещин в лопатках: а, б – сталь 14X17H2, испытания соответственно в воздухе и в растворе соли; в, г – сталь 08X17H6T, испытания соответственно в воздухе и в растворе соли (1, 2 – входная и выходная кромки; 3 – спинка).

Нестабильное развитие усталостной трещины. Исследование пути развития усталостной трещины является весьма актуальным в первую очередь в случае, когда окончательному разрушению предшествует длительная стадия ее развития, и разрушение происходит, если трещина занимает значительную часть поперечного сечения конструкции. В то же время, как показывают исследования, в некоторых случаях усталостное разрушение может иметь место при весьма малых размерах трещин.

На рис. 16 приведены температурные зависимости отношения занятой усталостной трещиной площади F_c к полной площади F поперечного сечения образца диаметром 20 мм из стали 15Г2АФДпс при гармоническом круговом изгибе (светлые точки) и комбинированном изгибе (темные точки), когда на гармоническое нагружение накладывается повторно-ударное нагружение [29–31]. Как видно, при температурах выше 180 К усталостная трещина занимает около 50% площади поперечного сечения образца. С

понижением температуры до 93 К площадь уменьшается до 0,68%. При этом изменяется также характер излома. Если при температурах от 293 до 180 К участок окончательного излома как при гармоническом, так и комбинированном нагружении имеет четко выраженный волокнистый характер, то при температурах ниже 160 К – мелкозернистый кристаллический.

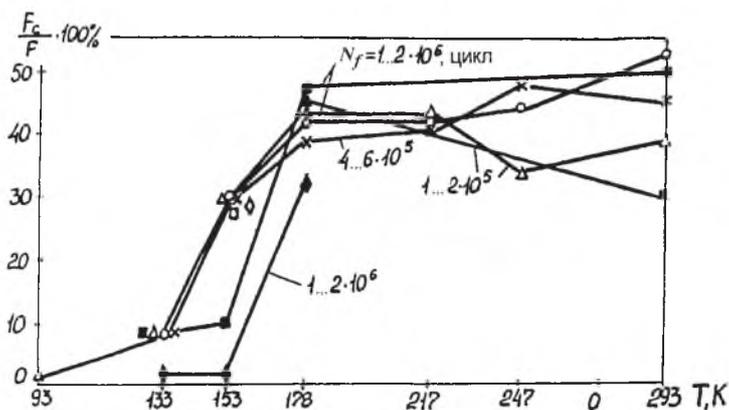


Рис. 16. Зависимость относительной площади, занятой трещиной, от температуры испытания (N_f – число циклов нагружения до разрушения).

В том случае, когда размер усталостной трещины в момент полного разрушения конструкции весьма мал, важно сформулировать критерии предельного состояния материала в этих условиях. Результаты, полученные в работах [32–36], показывают, что для сталей в охрупченном состоянии, что достигается термической обработкой, наводороживанием, низкими температурами испытаний и т.п., имеют место весьма низкие характеристики усталостной вязкости разрушения, под которой следует понимать максимальное значение КИН при разрушении образца с трещиной непосредственно в процессе циклического нагружения, K_{fc} .

Ранее [37–42] исследовалась вязкость разрушения при статическом, K_Q^{max} , и циклическом, K_{fc} , нагружении теплоустойчивых сталей, хромо-молибденовых сталей, а также аустенитных сталей и титановых сплавов. Исследования проводились на образцах толщиной от 10 до 150 мм при различных асимметриях цикла после предварительного пластического деформирования в широком диапазоне (прежде всего низких) температур.

Условия плоской деформации определялись в соответствии с формулой

$$t \geq 2,5 \left(\frac{K_I}{\sigma_{0,2}} \right)^2, \quad (6)$$

где t – толщина компактного образца; K_I – вязкость разрушения; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести.

Наряду с характеристиками вязкости разрушения, соответствующими полному разрушению образца, K_{fc} , в процессе циклического нагружения определялись также величины КИН, K_{fc}^1 , соответствующие первому скачку усталостной трещины, когда они наблюдались. Обобщение полученных результатов представлено на рис. 17, где по оси ординат отложено отношение K_{fc}/K_Q^{\max} , по оси абсцисс – K_Q^{\max} .

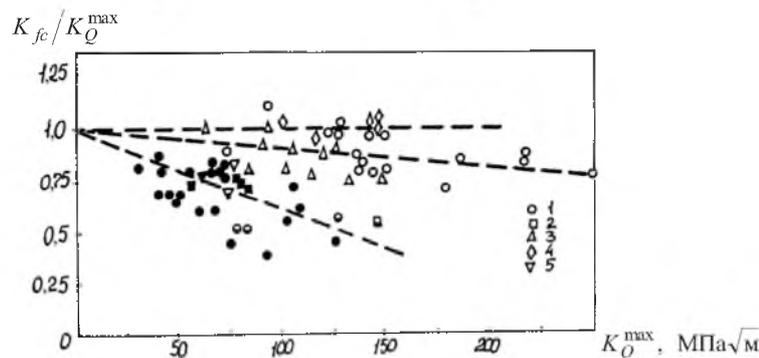


Рис. 17. Сравнение характеристик вязкости разрушения при статическом и циклическом нагружении: 1 – теплоустойчивые стали; 2 – хромомолибденовые стали; 3 – титановые сплавы; 4 – аустенитные стали; 5 – углеродистая сталь. (Светлые точки – условия плоской деформации не выдерживались; темные – условия плоской деформации выдерживались; полузатемненные – условия плоской деформации выдерживались при определении K_{fc} и не выдерживались при определении K_Q^{\max} .)

Приведенные результаты (рис. 17) дают основание сделать следующие выводы.

Циклическая вязкость разрушения для некоторых сталей и условий испытания может быть существенно ниже (до 60%), чем их статическая вязкость разрушения.

Наиболее значительное снижение циклической вязкости разрушения имеет место, когда долом образца при циклическом нагружении происходит в условиях плоской деформации независимо от того, достигаются ли эти условия термической обработкой материала или понижением температуры испытания.

При вязком разрушении характеристики циклической вязкости, которые в данном случае могут рассматриваться лишь как условные характеристики, равны или немного меньше, чем характеристики статической вязкости разрушения.

Зависимость между циклической и статической вязкостью разрушения с учетом приведенных на рис. 17 результатов может быть представлена в виде

$$K_{fc}/K_Q^{\max} = 1 - bK_Q^{\max}, \quad (7)$$

где b – параметр, определяющий интенсивность снижения циклической вязкости разрушения с увеличением K_Q^{\max} .

Согласно полученным данным (рис. 17), при разрушении в условиях плоской деформации среднее значение $b \sim (4...5) \cdot 10^{-3}$, при вязком разрушении – $b \sim 1 \cdot 10^{-3}$.

Ранее установлено [37, 38], что скачкообразный характер развития трещины наблюдается в условиях плоской деформации или близких к ней. Величины коэффициентов интенсивности напряжений, при которых начинается скачкообразное развитие усталостной трещины, K_{fc}^1 , ниже, чем величины K_{fc} , примерно на 20%.

С учетом вышеизложенного величина K_{fc}^1 может рассматриваться как характеристика, определяющая переход от стабильного развития усталостной трещины к нестабильному.

На рис. 18 приведены кинетические диаграммы усталостного разрушения теплоустойчивых сталей 15X2МФА (I), 15X2МФА (II) и аустенитной стали 08X18Н10Т при различных асимметриях цикла. Скачкообразный характер развития усталостной трещины при переходе от стабильного развития трещины к нестабильному наблюдался только для стали 15X2МФА (II), для которой выдерживались условия плоской деформации. Там же точками со стрелкой отмечены случаи полного разрушения образцов. Для стали 15X2МФА (II) точками со стрелкой показано также начало перехода к скачкообразному развитию трещины. Приведенные результаты свидетельствуют, что для всех исследованных сталей независимо от того, разрушались они при циклической нагрузке в условиях плоской деформации или нет, значения K_{fc} , соответствующие полному разрушению образцов, не зависят от асимметрии цикла нагружения. Не зависит от асимметрии цикла нагружения также величина K_{fc}^1 для стали 15X2МФА (II), которая определяет условия перехода от стабильного развития усталостной трещины к нестабильному.

Как следует из рис. 18, а–в, величины размахов коэффициентов интенсивности напряжений ΔK_I , соответствующие полному разрушению образцов в процессе циклического нагружения, не остаются инвариантными к асимметрии цикла нагружения и уменьшаются с ее увеличением.

Детальный анализ влияния асимметрии цикла и размеров образцов на закономерности нестабильного развития усталостной трещины в охрупченной теплоустойчивой стали 15X2МФА (II) при комнатной температуре выполнен ранее [39].

Установлено, что размеры хрупких скачков и зон стабильного развития трещины между скачками не зависят от асимметрии цикла нагружения и размеров образцов и однозначно определяются величиной K_{fc}^i , т.е. максимальной величиной коэффициента интенсивности напряжений в циклах, при которых имеют место эти скачки. В то же время число циклов стабильного развития трещины между скачками определяется размахом коэффициента интенсивности напряжений $\Delta K_{fc}^i = (1 - R)K_{fc}^i$.

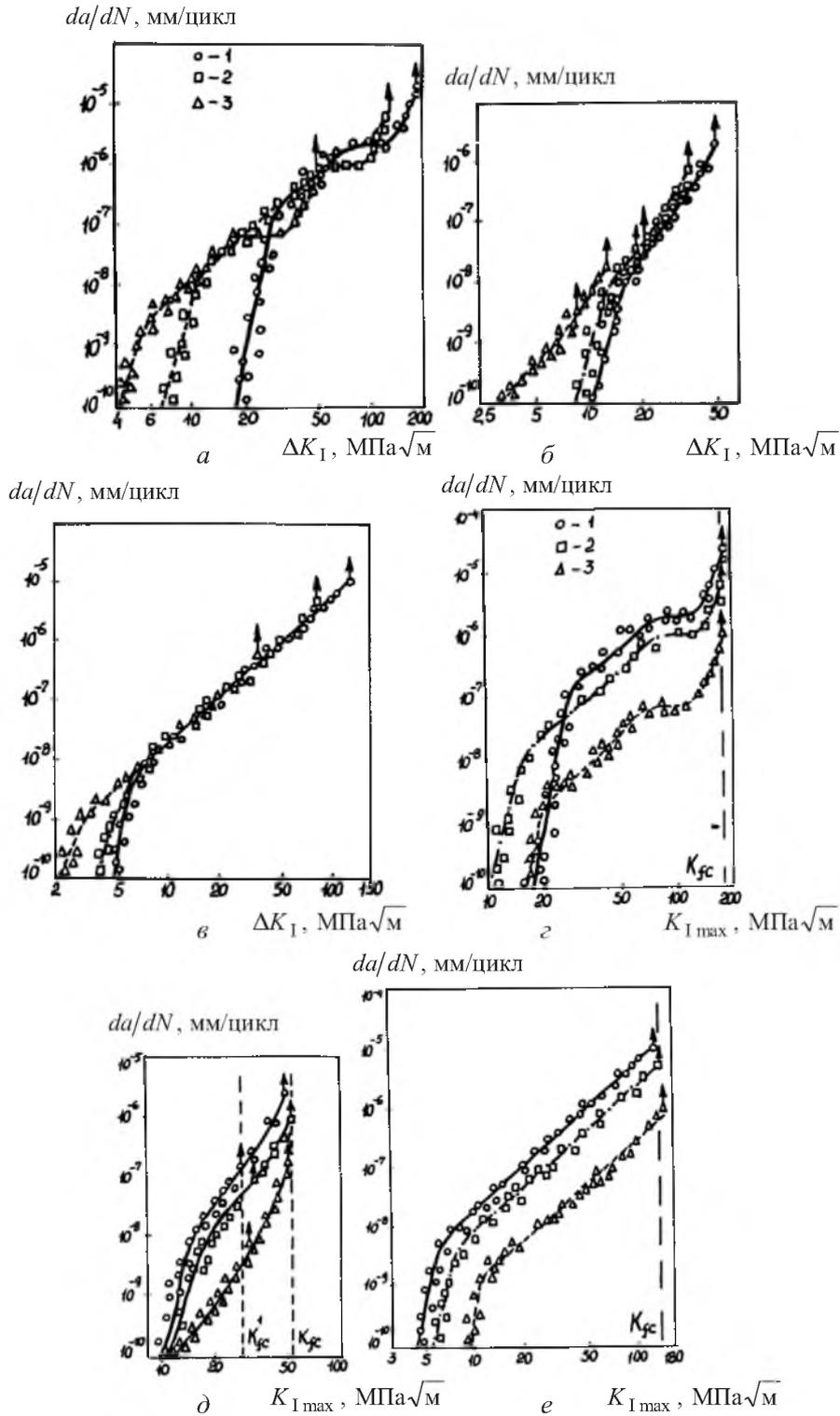


Рис. 18. Кинетические диаграммы усталостного разрушения сталей 15X2MФА (I) – а, г, 15X2MФА (II) – б, д и 08X18N10T – в, е при различных асимметриях цикла нагружения: 1 – $R = 0,1$; 2 – $R = 0,35$; 3 – $R = 0,75$.

Размер хрупкого скачка трещины в условиях плоской деформации может быть найден по формуле [38]

$$d_c^i = \frac{1}{3\pi} (K_{fc}^i / \sigma_{\text{пц}}^{\text{н}})^2, \quad (8)$$

где K_{fc}^i – КИН, соответствующий скачку трещины; $\sigma_{\text{пц}}^{\text{н}}$ – циклический предел пропорциональности.

В работе [43] методом акустической эмиссии исследовалась скорость распространения трещин при их скачках. Установлено, что она может достигать 150 м/с и более.

Модель перехода от стабильного развития усталостных трещин к нестабильному предложена и обоснована ранее [41].

Заключение. Рассмотрены некоторые особенности распространения усталостных трещин в металлах на стадиях зарождения и начального развития, а также стабильного развития и нестабильного, предшествующего полному разрушению.

Показано, что на стадии начального развития усталостных трещин факторами, определяющими их путь, являются: напряженное состояние; локализованное усталостное повреждение, предшествующее зарождению главной усталостной трещины; поверхностные остаточные напряжения; поверхностные технологические и эксплуатационные дефекты; контактные взаимодействия, приводящие к фреттинг-усталости, и т.п.

Стабильное развитие усталостной трещины прежде всего определяется напряженно-деформированным состоянием конструкции в целом и напряженно-деформированным состоянием в вершине трещины с учетом изменения его вследствие распространения трещины, оцениваемое критериями механики разрушения.

Рассмотрены особенности развития усталостных трещин в компрессорных лопатках судовых газовых турбин.

Для охрупченных сталей, в которых при развитии усталостных трещин выдерживается условие плоской деформации, полное разрушение происходит при весьма малых размерах усталостной трещины, причем характеристики усталостной вязкости разрушения в этом случае существенно ниже, чем статической вязкости разрушения. Изучены основные закономерности такого разрушения.

Резюме

Розглянуто деякі особливості росту тріщин від утомленості в металах на стадії зародження та початкового розвитку, стабільного і нестабільного розвитку, що передуює повному руйнуванню.

Показано, що на стадії початкового росту тріщин від утомленості чинниками, за якими визначають їх шлях, є: напружений стан; локалізоване пошкодження від утомленості, що передуює зародженню головної тріщини від утомленості; поверхневі залишкові напруження; поверхневі технологічні та експлуатаційні дефекти; контактна взаємодія.

Згідно з критеріями механіки руйнування, стабільний розвиток тріщини від утомленості в першу чергу визначається напружено-деформованим станом конструкції в цілому і напружено-деформованим станом у вістрі тріщини з урахуванням зміни його внаслідок розповсюдження останньої. Вивчено особливості розвитку тріщин від утомленості в компресорних лопатках судових газових турбін.

Показано, що при розвитку тріщин від утомленості в окрихчених сталях за умови плоскої деформації повне руйнування має місце за дуже малих розмірів тріщини. При цьому характеристики утомної в'язкості руйнування значно нижчі, ніж статичної. Розглянуто особливості нестабільного розвитку тріщин від утомленості.

1. *Troshchenko V. T.* High-Cycle Fatigue and Inelasticity of Metals. Multiaxial and Fatigue Design / A. Pineau, G. Cailletaud, and T. C. Lindley (Eds.). – London: Mech. Eng. Publ. – 1996. – P. 335 – 348.
2. *Troshchenko V. T.* Interrelation between inelasticity and high cycle fatigue of metals: Proc. Ninth Int. Conf. on Fracture (1–5 April 1997, Sydney). – Australia: Pergamon, 1997. – P. 1261 – 1272.
3. *Feeltner G. E. and Morrow J. D.* Microplastic strain hysteresis energy as a criterion for fatigue fracture // Trans. ASME (D). – 1961. – **81**, No. 1. – P. 15 – 22.
4. *Klesnil M. and Lukas P.* Fatigue of Metallic Materials. – Prague: Academia, 1980. – 239 p.
5. *Трощенко В. Т.* Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. – Киев.: Наук. думка, 1981. – 342 с.
6. *Трощенко В. Т., Драган В. И.* Исследование закономерностей неупругого деформирования и усталостного разрушения металлов при кручении // Пробл. прочности. – 1982. – № 5. – С. 3 – 10.
7. *Эмери С.* Эффективный численный метод определения коэффициентов интенсивности напряжений для трещин при растяжении, кручении и изгибе. – Тр. Амер. об-ва инженеров-механиков. Сер. Д. – 1972. – № 2. – С. 143 – 151.
8. *Lakshminarayana H. V. and Murthy M. V.* On stress around an arbitrarily oriented crack in a cylindrical shell // Int. J. Fract. – 1976. – **12**, No. 4. – P. 547 – 566.
9. *Драган В. И., Ясний П. В.* Механизмы развития малых усталостных трещин при кручении // Пробл. прочности. – 1983. – № 1. – С. 38 – 42.
10. *Трощенко В. Т., Драган В. И.* Исследование влияния концентрации напряжений на характеристики сопротивления усталостному разрушению сталей по критерию зарождения трещины // Там же. – 1985. – № 4. – С. 21 – 26.
11. *Трощенко В. Т., Прокопенко А. В., Торгов В. Н. и др.* Изучение влияния эксплуатационной наработки и коррозионной среды на выносливость лопаток компрессора ГТД // Там же. – 1981. – № 4. – С. 5 – 10.

12. Троценко В. Т., Прокопенко А. В., Ляликов С. М. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости конструкционных сталей и сплавов при наличии поверхностных дефектов // Там же. – 1989. – № 8. – С. 10 – 15.
13. Троценко В. Т., Ляликов С. М. Влияние остаточных напряжений на сопротивление усталости металлов при наличии поверхностных дефектов. – III Symposium na temat “Zagadnienia Pelzania Materialow”. – Bialystok, 1989. – P. 401 – 409.
14. Троценко В. Т., Ляликов С. М. Влияние поверхностных дефектов на многоцикловую усталость конструкционных материалов // Пробл. прочности. – 1996. – № 1. – С. 5 – 16.
15. Rooke D. and Jones D. A. Stress Intensity Factors in Fretting Fatigue. – Farnborough. Techn. Rep. RAE 77181, 1977. – 25 p.
16. Otsuka A., Tondo K., Sakakihori K., and Yoshida T. Mode II fatigue crack growth mechanism and its dependency on material in aluminum alloys // J. Jap. Soc. Eng. – 1985. – 34. – P. 1174 – 1182.
17. Nix K. J. and Lindley T. C. The application of fracture mechanics to fretting fatigue // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1985. – 8, No. 2. – P. 143 – 160.
18. Троценко В. Т., Цыбанев Г. В., Хоцяновский А. О. Долговечность сталей при фреттинг-усталости // Пробл. прочности. – 1988. – № 6. – С. 3 – 8.
19. Troshchenko V. T. Threshold fatigue and fretting fatigue of metals: Proc. of III Int. Sump. on Tribo-Fatigue. ISRF (22 – 26 Oct. 2000, Beijing). – 2000. – P. 44 – 50.
20. Troshchenko V. T., Tsybanev G. V., and Khotsyanovsky A. O. Two-parameter model of fretting fatigue crack growth // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1994. – 17, No. 1. – P. 15 – 23.
21. Panasyuk V. V., Datsychyn O. P., and Marchenko H. P. The crack propagation theory under rolling contact // Eng. Fract. Mech. – 1995. – 52, No. 1. – P. 179 – 191.
22. Панасюк В. В., Дацишин О. П., Марченко Г. П. Про ріст тріщин в тілах кочення за умов сухого тертя та зволоження // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2001. – 37, № 1. – С. 7 – 16.
23. Панасюк В. В., Дацишин О. П., Щур Р. Б. Залишкова довговічність твердих тіл, що контактують в умовах фреттинг-втоми // Там же. – 2000. – 36, № 2. – С. 5 – 19.
24. Прокопенко А. В. Экспериментальное определение коэффициента интенсивности напряжений для трещин с криволинейным фронтом в сложных деталях (лопатках ГТД) // Пробл. прочности. – 1981. – № 4. – С. 105 – 111.
25. Прокопенко А. В. Методика испытания компрессорных лопаток ГТД на усталость в коррозионной среде // Там же. – 1980. – № 4. – С. 107 – 109.

26. Троценко В. Т., Прокопенко А. В. Прогнозирование долговечности лопаток компрессоров ГТД // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов. – Куйбышев: Куйбышев. авиац. ин-т, 1981. – С. 112 – 123.
27. Троценко В. Т., Прокопенко А. В. Сопротивление усталости и живучесть компрессорных лопаток судовых газовых двигателей // Пробл. прочности. – 1999. – № 1. – С. 28 – 40.
28. Troshchenko V. T. and Prokopenko A. V. Fatigue strength of gas turbine compressor blades // Eng. Failure Anal. – 2000. – 7. – P. 209 – 220.
29. Троценко В. Т., Покровский В. В. Исследование влияния низких температур на закономерности развития усталостных трещин в стали 15Г2АФДпс // Пробл. прочности. – 1975. – № 10. – С. 8 – 11.
30. Троценко В. Т., Покровский В. В. Исследование закономерностей усталостного разрушения сталей X18H10T, X16H6, 15Г2АФДпс и алюминиевого сплава АМг6 в условиях низких температур // Стали и сплавы криогенной техники. – Киев: Наук. думка, 1977. – С. 157 – 164.
31. Троценко В. Т., Покровский В. В. Исследование закономерностей усталостного и хрупкого разрушения стали 15Г2АФДпс при низких температурах // Пробл. прочности. – 1973. – № 3. – С. 11 – 17.
32. *Определение* характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Методические рекомендации. МР-95. – М.: Междунар. ин-т безопасности сложных техн. систем, 1995. – С. 83 – 180.
33. Ярема С. Я., Хариш Е. Л. Зависимость длительности периода развития трещины при повторно-ударном нагружении // Пробл. прочности. – 1970. – № 8. – С. 28 – 32.
34. Kawasaki T., Nakanishi S., and 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.
35. Troshchenko V. T., Pokrovsky V. V., and Prokopenko A. V. Investigation of the fracture toughness of constructional steels in cyclic loading // Advances in Research on the Strength and Fracture of Materials / M. Taplin (Ed.). – New York; Paris: Pergamon Press, 1977. – 3В. – P. 683 – 686.
36. Троценко В. Т., Прокопенко А. В., Покровский В. В. Исследование характеристик вязкости разрушения при циклическом нагружении. Сообщ. 1 // Пробл. прочности. – 1978. – № 2. – С. 8 – 15.
37. *Циклические деформации и усталость металлов* / Под ред. В. Т. Троценко. – Киев: Наук. думка, 1985. – Т. 2. – 222 с.
38. Троценко В. Т., Покровский В. В., Прокопенко А. В. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении. – Киев: Наук. думка, 1987. – 252 с.
39. 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 // Пробл. прочности. – 1987. – № 3. – С. 8 – 12.
40. Трощенко В. Т., Покровский В. В. Влияние цикличности нагружения на характеристики трещиностойкости сталей. Сообщ. 2 // Там же. – 1980. – № 12. – С. 14 – 17.
41. Troshchenko V. T., Pokrovsky V. V., and Yasniy P. V. Unstable fatigue crack propagation and fatigue fracture toughness of steels // Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct. – 1994. – **17**, No. 9. – P. 991 – 1001.
42. Troshchenko V. T. and Pokrovsky V. V. Fatigue fracture toughness of steels // Engineering Against Fatigue / A. A. Balkema (Ed.). – 1999. – P. 269 – 276.
43. Ясний П. В., Покровский В. В., Стрижало В. А., Добровольский Ю. В. Исследование скорости хрупких скачков трещины с использованием метода акустической эмиссии // Пробл. прочности. – 1987. – № 1. – С. 32 – 36.

Поступила 05. 09. 2003