

Циклическая трещиностойкость образцов из сплава ЭК79-ИД, упрочненных поверхностным пластическим деформированием

Д. В. Павленко^а, Б. А. Грязнов^б, В. К. Яценко^а, В. Н. Ежов^б, М. Р. Орлов^в

^а Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

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

^в ОАО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина

Рассматривается влияние пластического деформирования поверхностного слоя образцов из сплава ЭК79-ИД на характеристики циклической трещиностойкости в диапазоне рабочих температур. Установлено, что пластическое упрочнение поверхностного слоя приводит к повышению порогового коэффициента интенсивности напряжений при комнатной и повышенной температурах.

Ключевые слова: циклическая трещиностойкость, пластическое упрочнение поверхностного слоя, пороговый коэффициент интенсивности напряжений.

Деформационное упрочнение поверхностного слоя широко применяется с целью повышения несущей способности деталей, работающих при знакопеременном нагружении и в условиях умеренно повышенных температур [1–3]. Предел выносливости при этом увеличивается за счет изменения физико-механических характеристик материала поверхностного слоя (формирование в нем благоприятных сжимающих остаточных напряжений, повышение твердости, предела текучести, дробление блоков кристаллической мозаики и формирование ячеистой дислокационной структуры) [4]. Наряду с пределом выносливости важной характеристикой несущей способности ответственных деталей авиационных двигателей является их живучесть, т.е. способность сопротивляться развитию трещин. Повышение живучести таких деталей двигателя, как рабочие лопатки компрессора, вентилятора, турбины, дисков, валов и т.д., способствует росту надежности и безопасности эксплуатации двигателя в целом.

Результаты исследований влияния поверхностного пластически деформированного слоя, имеющего по сравнению с сердцевиной образца пониженный запас пластичности, на характеристики циклической трещиностойкости практически отсутствуют.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании влияния поверхностного наклепа на характеристики циклической трещиностойкости деформируемого жаропрочного сплава на никелевой основе ЭК79-ИД при комнатной и повышенной температурах. Испытания образцов и обработку полученных экспериментальных данных проводили по рекомендации работы [5] и в соответствии с методическими указаниями [6]. Для гармонического нагружения образцов использовали электродинамический вибростенд ВЭДС-400М. Испытания осуществляли при температурах 20 и 500°C, что соответствует диапазону изменения рабочих температур лопаток центробежного колеса компрессора высокого давления двигателя Д-27 на взлетном режиме.

Образцы толщиной рабочей части 2 мм, что соответствует толщине натурной лопатки центробежного колеса компрессора (рис. 1), вырезали из ступичной части натурного центробежного колеса компрессора высокого давления. Для устранения дефектного слоя после механической обработки их подвергали шлифованию и высокотемпературному вакуумному отжигу.

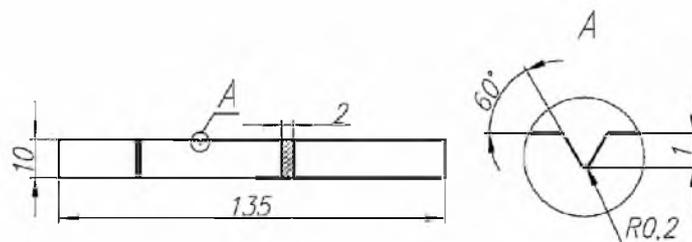


Рис. 1. Образец для испытаний на циклическую трещиностойкость.

Испытания образцов проводили в исходном состоянии и после деформационного упрочнения боковых поверхностей металлическими шариками диаметром 1,6 мм на ультразвуковой установке. Для построения диаграммы роста усталостных трещин испытывали 5–7 образцов при одинаковых условиях. Степень наклепа поверхностного слоя определяли по изменению микротвердости поверхности образцов до и после упрочнения на приборе ПМТ-3, оснащенный приставкой для автоматического вдавливания индентора. Для исследованных образцов величина поверхностного наклепа $S = 30\%$, а его глубина, определенная на косом шлифе, составляла 25...30 мкм.

Величину и характер распределения в поверхностном слое остаточных напряжений первого рода определяли методом послойного удаления тонких слоев металла электрополированием на приборе ПИОН-2. Эпюра остаточных напряжений в поверхностном слое образцов после ультразвукового упрочнения имела характерный для дробеударного упрочнения подслоный максимум. При этом величина сжимающих остаточных напряжений составляла $-180...-200$ МПа, максимальное значение напряжений в подслое материала достигало $-500...-520$ МПа на глубине 50 мкм от поверхности. Общая глубина залегания остаточных напряжений составляла 250...270 мкм.

Нагружение образцов осуществляли симметричным изгибом относительно оси максимальной жесткости. Частота нагружения при первой изгибной форме колебаний изменялась в диапазоне 570...440 Гц по мере роста трещины. Образцы нагревали в печи сопротивления (рис. 2). Температуру в зоне распространения трещины измеряли хромель-алюмелевой термопарой, подключенной к потенциометру КСП-4.

Начальную трещину длиной 0,8–1,2 мм выращивали из острого концентратора глубиной 1 мм и радиусом у вершины 0,2 мм при амплитуде напряжений 280 МПа, что на 5...10% превышало предел выносливости призматических образцов из исследуемого сплава при комнатной температуре. Для измерений размаха колебаний консольного торца образца и размера трещины использовали бинокулярные микроскопы МБС-9 с ценой деления 0,014 мм. Один микроскоп располагали перед печью напротив окна

7 (рис. 2), другой – сбоку печи напротив трещины 8. Для наблюдения за ростом трещины во время испытаний использовали лампу стробоскопического прибора, помещенную в один из окуляров микроскопа. Скорость роста трещины dl/dN определяли путем деления приращения трещины Δl на число циклов ΔN , за которое произошло приращение.

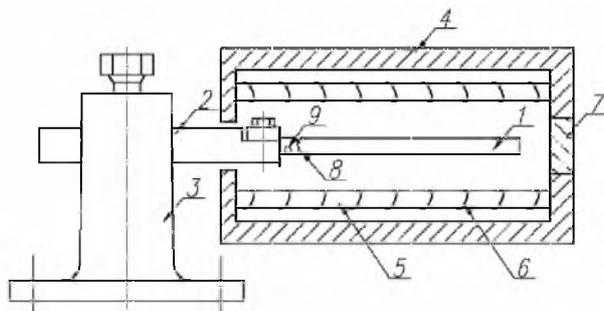


Рис. 2. Схема печи для нагрева образцов при испытании на трещиностойкость [6]: 1 – образец; 2 – удлинитель; 3 – захват; 4 – печь сопротивления; 5 – фарфоровые стержни; 6 – нагревательные спирали; 7 – окно из кварцевого стекла; 8 – усталостная трещина; 9 – хромель-алюмелевая термопара.

Размах коэффициента интенсивности напряжений ΔK_I вычисляли по известной методике для чистого изгиба образца с боковой трещиной методом податливости [6, 7]:

$$\Delta K_I = \sigma \sqrt{l} \left[1,99 - 2,47 \left(\frac{l}{b} \right) + 12,97 \left(\frac{l}{b} \right)^2 - 23,17 \left(\frac{l}{b} \right)^3 + \right. \\ \left. + 24,80 \left(\frac{l}{b} \right)^4 \right] \quad (\text{МПа}\sqrt{\text{м}}), \quad (1)$$

где σ – амплитуда напряжений на поверхности образца без трещины, МПа; l – длина трещины, м; b – высота образца, м.

На каждом образце путем варьирования амплитуды колебаний свободного конца реализовали 7–12 различных значений ΔK_I , для каждого из которых фиксировали скорость роста трещины. Экспериментальные данные, представленные в двойных логарифмических координатах $dl/dN - \Delta K_I$, обрабатывали на ЭВМ с использованием стандартных статистических методов. Линейный участок диаграммы роста усталостных трещин описывали с помощью уравнения Париса

$$\frac{dl}{dN} = A(\Delta K_I)^n \quad (\text{м/цикл}), \quad (2)$$

где A и n – эмпирические коэффициенты; ΔK_I – размах коэффициента интенсивности напряжений, $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Результаты испытаний на трещиностойкость образцов в исходном и упрочненном состоянии представлены в табл. 1 и на рис. 3. Деформация поверхностного слоя приводит к росту порогового коэффициента интенсивности напряжений ΔK_{th} как при комнатной, так и при повышенной температуре. Причем с повышением температуры испытаний величина ΔK_{th} для исходных и упрочненных образцов уменьшается. Скорость роста трещины зависит от температуры испытаний и состояния поверхностного слоя образцов. Если повышение температуры приводит к ее увеличению, то пластическое деформирование поверхностного слоя – к снижению (рис. 3).

Причиной увеличения порогового коэффициента интенсивности напряжений и снижения скорости роста трещины в образцах, поверхностный слой которых подвергали деформационному упрочнению, вероятно, являлись сжимающие остаточные напряжения, которые приводили к торможению развития фронта трещины на поверхности образца.

Т а б л и ц а 1

Характеристики циклической трещиностойкости испытанных образцов

$t, ^\circ\text{C}$	Состояние поверхностного слоя	$\Delta K_{th}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	A	n	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_{в*}, \text{МПа}$
20	Исходное	10,55	$5,93 \cdot 10^{-23}$	12,34	950	1380
	После упрочнения ($S = 30\%$)	13,00	$4,86 \cdot 10^{-20}$	8,97	–	–
500	Исходное	7,43	$7,08 \cdot 10^{-16}$	6,81	805	1260
	После упрочнения ($S = 30\%$)	9,55	$4,60 \cdot 10^{-18}$	8,18	–	–

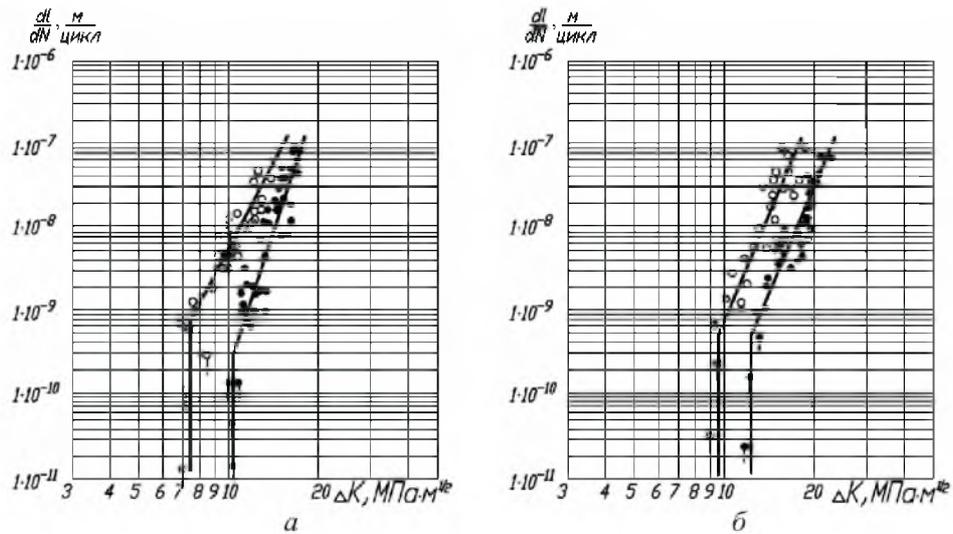


Рис. 3. Диаграммы роста усталостных трещин в исходных (а) и упрочненных (б) образцах при температуре 20 (●) и 500°C (○).

Фрактограммы изломов образцов, полученных на растровом электронном микроскопе JSM T300 при ускоряющем напряжении 20...30 кВ вторичных электронов, показаны на рис. 4.

Фрактографический анализ изломов позволил установить следующие особенности развития усталостных трещин в образцах, разрушенных при $t = 20$ и 500°C . В образцах, испытанных при комнатной температуре, наиболее четко проявляется кристаллографическая ориентация поверхностей разрушения, о чем свидетельствует выраженная кристаллографическая гранка (рис. 4,а).

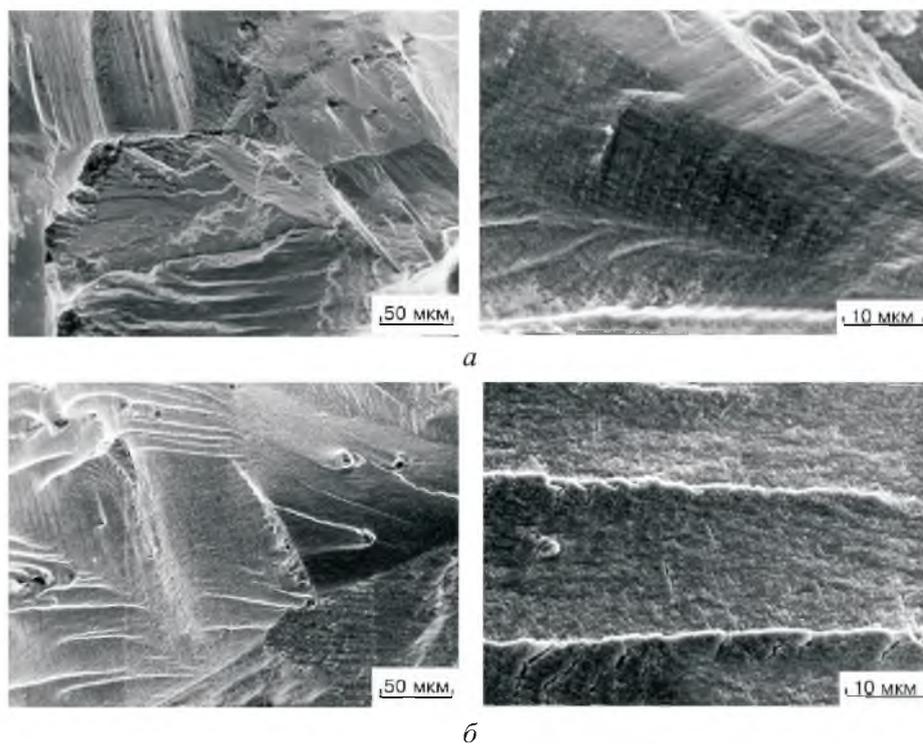


Рис. 4. Фрактограммы изломов образцов ($\Delta K_I = 22...24 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$): а – $t = 20^\circ\text{C}$; б – $t = 500^\circ\text{C}$. (Направление движения трещины справа – налево.)

Известно, что для никеля и его сплавов, имеющих ГЦК-решетку, системой наиболее легкого скольжения в диапазоне температур $20...400^\circ\text{C}$ является система $\{111\}\langle 011\rangle$ [8]. Высокая локальность деформации при развитии усталостной трещины предопределяла малую шероховатость образующихся в процессе разрушения поверхностей излома, которые ориентированы по кристаллографическим плоскостям $\{111\}$. В процессе движения фронта трещины происходило ее ветвление в пределах одного зерна, связанное с отклонением кристаллографической плоскости относительно направления действия максимальных напряжений сдвига и огибанием крупных карбидов. Из рис. 4,а видно, что в одном зерне направление движения усталостной трещины изменилось на 90° , что вызвано неоднородностью упругопластического состояния металла в зоне локальной пластической

деформации, которая обусловлена высокой анизотропией упругих характеристик и высокоугловой разориентировкой смежных зерен.

Поверхности излома образцов, испытанных при температуре 500°C (рис. 4,б), имеют большую шероховатость. В изломах наблюдается однонаправленность движения фронта трещины, нет четко выраженной кристаллографической ориентации поверхностей разрушения, что определяется активизацией процесса поперечного скольжения дислокаций, их размножением и образованием неподвижной ячеистой дислокационной структуры, ограничивающей скольжение в системе $\{111\}\langle 011\rangle$. Учитывая, что разрушение зерен сплава при температуре 20°C происходило только в системе наиболее легкого скольжения, в отдельных зернах направление движения трещины изменялось за счет участия в процессе разрушения смежных кристаллографических плоскостей $\{111\}$. Общая длина линии фронта трещины может значительно превышать поперечный размер образца.

В процессе испытаний образец до полного разрушения не довели, что позволило при последующем его доломе изучить форму фронта остановившейся трещины. Образование отдельных “язычков” свидетельствует о дискретном характере развития фронта трещины (рис. 5). Фронт трещины – волнистый, на поверхности излома наблюдается в виде “язычков”, направление которых совпадает с направлением движения трещины. Наиболее характерно выражены “языки” в изломах образцов, испытанных при температуре 500°C, что указывает на более вязкий характер усталостного разрушения. С понижением температуры до 20°C линия фронта трещины становится более ломаной.

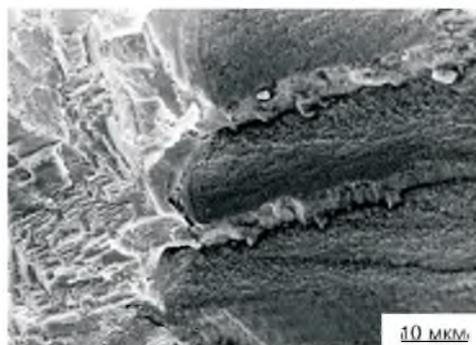


Рис. 5. Форма фронта остановившейся трещины. (Направление движения трещины справа – налево.)

В табл. 2 приведены значения механических характеристик и порогового коэффициента интенсивности напряжений для жаропрочных сплавов на никелевой основе, применяемых в авиадвигателестроении [7].

Сравнение экспериментально полученных значений ΔK_{th} для сплава ЭК79-ИД с аналогичными данными для других сплавов показало, что наряду с максимальной прочностью исследуемый сплав обладает максимальной величиной порогового коэффициента интенсивности напряжений во всем диапазоне рабочих температур. Пластически деформированный и охрупченный в результате ультразвукового упрочнения металлическими шари-

Т а б л и ц а 2

Значения механических характеристик и размаха порогового коэффициента интенсивности напряжений для поликристаллических никелевых сплавов при различной температуре [7]

Сплав	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\Delta K_{th}, \text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
ЖС6КП	20	1325	825	5,44
	800	1025	775	5,35
	1000	480	275	3,17
ЖС6У	20	1025	1070	8,71
	600	–	830	7,27
	800	–	450	6,47
ЭИ437Б	20	1180	730	9,08
	700	1070	690	6,47

ками поверхностный слой не приводит к снижению способности материала сопротивляться развитию усталостных трещин. При исследованных толщине образцов, характеристиках упрочненного слоя и температурах наблюдается повышение значения порогового коэффициента интенсивности напряжений на 20...25% по сравнению с образцами без упрочнения.

Резюме

Розглядається вплив пластичної деформації поверхневого шару зразків зі сплаву ЕК79-ІД на характеристики циклічної тріщиностійкості в діапазоні робочих температур. Установлено, що пластичне зміцнення поверхневого шару зразків призводить до підвищення граничного коефіцієнта інтенсивності напружень за кімнатної та підвищеної температур.

1. Брондз Л. Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
2. Рыковский Б. П., Смирнов В. А., Щетинин Г. М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. – М.: Машиностроение, 1985. – 152 с.
3. Богуслаев В. А., Яценко В. К., Павленко Д. В. и др. Модель выносливости лопаток центробежного колеса компрессора // Технологические системы. – 2002. – № 5. – С. 52 – 56.
4. Сулима А. М., Шулов В. А., Ягодкин Ю. Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. – М.: Машиностроение, 1988. – 240 с.
5. Прокопенко А. В., Ежов В. Н. Методика испытаний на трещиностойкость при вибрационном нагружении и высокой температуре // Пробл. прочности. – 1983. – № 3. – С. 27 – 31.
6. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости при механическом нагружении. Методические указания. – М., 1993. – 53 с.

7. *Троценко В. Т.* Исследование пороговых коэффициентов интенсивности напряжений материалов при циклическом нагружении. Сообщ. 1. Методики и результаты исследований // Пробл. прочности. – 1998. – № 4. – С. 5 – 15.
8. *Шалин В. Е., Светлов И. Л., Коганов Е. Б. и др.* Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.

Поступила 22. 04. 2003