

УДК 621.793.7

С.А. ВОЙТЕНКО¹, О.В. ПОКАТОВ¹, С.Е. МАРКОВИЧ², В.Н. ФАНДЕЕВ³¹ОАО «Мотор-Сич», Запорожье, Украина²Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина³ОАО «Днепропетровский агрегатный завод», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ОТ СТЕПЕНИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Проведен анализ циклической трещиностойкости образцов из титанового сплава BT5-1, имеющих различные степени остаточной поперечной деформации. Исследовано влияние предварительной деформации на параметры диаграммы роста усталостных трещин.

трещиностойкость, коэффициент интенсивности напряжений, усталостные трещины, периодическое нагружение

Введение

Применение технологических процессов (холодная и горячая прокатка, волочение, гибка, вальцовка и т.п.) на стадии изготовления, а также однократных перегрузок отдельных конструктивных элементов в процессе эксплуатации может оказывать существенное влияние на циклическую трещиностойкость материала, в частности, на скорость роста усталостных трещин, которая во многих случаях определяет ресурс конструкции [1]. Исследование влияния предварительного деформирования на трещиностойкость представляет также интерес с точки зрения оптимизации режимов технологической обработки по параметрам циклической трещиностойкости. Это особенно важно, так как влияние предварительной пластической деформации на скорость роста усталостных трещин неоднозначно.

Формулирование проблемы. Как показывают результаты многих исследований, скорость в деформированном материале может увеличиваться [2, 3], уменьшаться [4] или оставаться неизменной по сравнению с недеформированным материалом [5]. Т.е. четкой корреляции между степенью пластической деформации, пределом выносливости и пара-

метрами трещиностойкости пока не существует. В работе [6] установлено, что с точки зрения усталостной прочности данный сплав очень чувствителен к предварительному деформированию: в узкой области малых пластических деформаций незначительное изменение степени деформации ведет к резкому изменению значения предела выносливости. В связи с этим представляется важным установить, оказывают ли предварительные пластические деформации столь же существенное влияние на характеристики трещиностойкости при периодическом нагружении, как на предел выносливости.

Решение проблемы. Исследование диаграмм роста усталостных трещин

Для оценки трещиностойкости при многоцикловом нагружении в качестве комплексной характеристики принята диаграмма роста усталостных трещин, отражающая зависимость скорости развития трещин от параметров нагруженности материала в ее вершине, выраженных через коэффициент интенсивности напряжений. Скорость роста трещин экспериментально определялась в широком диапазоне КИН, поэтому ее аналитическое описание производилось на основании полной зависимости [7]

$V = A[(K - K_{th}/(K_{fc} - K))^m]$ по экспериментально определенным значениям K_{th} , K_{fc} и n значениям скорости развития трещины db/dN .

Величина K_{th} задает левую асимптоту диаграммы роста усталостных трещин. Для оценки K_{fc} определялось критическое значение КИН при квазистатическом нагружении K_c путем долома образца с трещиной усталости при $a/d = 0,3$ после испытания этого образца на циклическую третино-стойкость. Определение K_c проводилось в соответствии с ГОСТ 25.506-85 [8]. Статическое нагружение образца велось по схеме четырехточечного изгиба с записью диаграммы «нагрузка – прогиб» на испытательной машине УМ-9-10М.

Статические испытания показали, что величина K_{fc} составляет $103 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ и является практически одинаковой как для недеформированных образцов, так и для деформированных до разных степеней остаточной деформации.

В данной НИР строились диаграммы роста усталостных трещин для четырех серий образцов диаметром 20 мм с различными степенями предварительной поперечной пластической деформации (0%, 0,2%, 0,5%, 3,0%). Образцы испытывались при консольном нагружении изгибом с вращением. Трещина инициировалась от концентратора в расчетном сечении.

В области коэффициентов интенсивности напряжений, соответствующих стабильному росту трещин (10^{-9} – 10^{-6} м/цикл), скорости развития усталостных трещин определялись путем графического дифференцирования эмпирической зависимости изменения глубины трещины от числа циклов нагружения, полученной при постоянном номинальном напряжении. На участке диаграммы роста усталостных трещин с низкими коэффициентами интенсивности напряжений, близких к K_{th} , скорости развития трещин уточнялись по средним значениям, полученным при испытании с постоянным уровнем КИН в вершине трещины. На рис. 1, в частности,

приведены графические зависимости изменений размера трещины от числа циклов нагружения при постоянном $K = 5,73 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ для различных степеней предварительной пластической деформации.

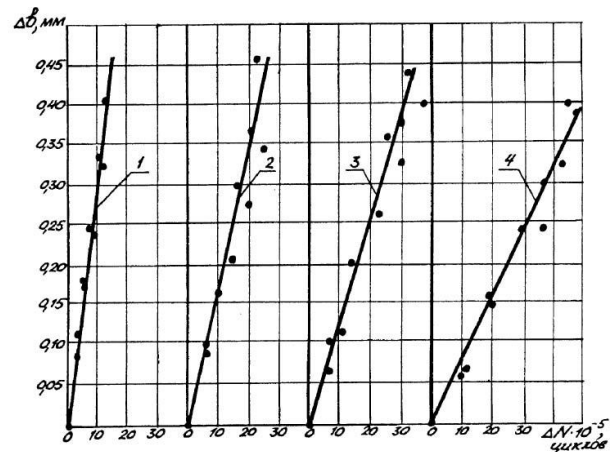


Рис. 1. Зависимость глубины трещины от числа циклов нагружения при постоянном

$$K = 5,73 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2};$$

$$1 - \varepsilon' = 0\%; 2 - \varepsilon' = 0,2\%;$$

$$3 - \varepsilon' = 0,5\%; 4 - \varepsilon' = 3,0\%$$

Как видно из рисунка, по мере возрастания степени деформации наклоны соответствующих прямых 1, 2, 3 и 4 увеличиваются, а, значит, увеличиваются и скорости развития трещин в припороговой области. Параметры зависимости скорости распространения трещин от коэффициента интенсивности напряжений находились на основании линейного регрессионного анализа по стандартной программе. Логарифмируя формулу Яремы-Микитишина [7], получим линейную зависимость между $\lg V$ и $\lg[(K - K_{th}/(K_{fc} - K))]$:

$$\lg V = \lg A + m \cdot \lg[(K - K_{th}/(K_{fc} - K))]. \quad (1)$$

Статистическая обработка экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила найти величины $\lg A$ и m .

Значения параметров A и m , полученные в результате обработки данных испытаний, для четырех уровней предварительной деформированности, приведены в табл. 1.

С повышением степени деформации наблюдается незначительное снижение величины A .

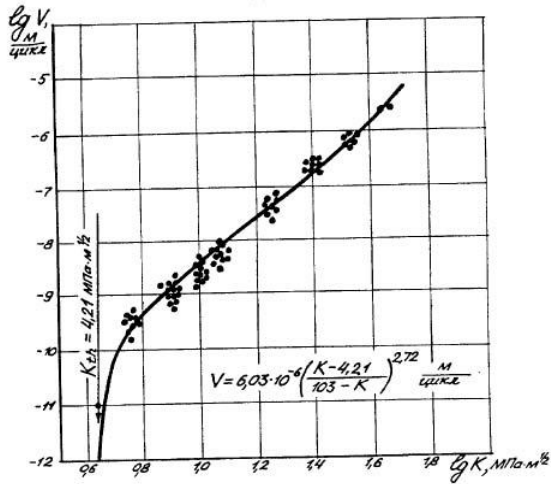


Рис. 2. Диаграмма роста усталостных трещин для недеформированного сплава ВТ5-1

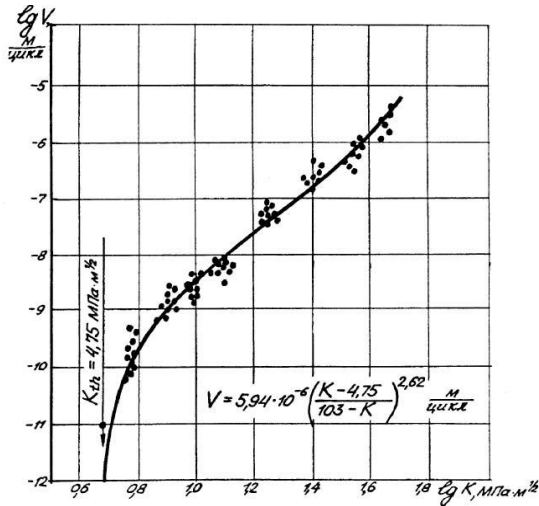


Рис. 3. Диаграмма роста усталостных трещин для деформированного сплава ВТ5-1. Остаточная деформация 0,2%

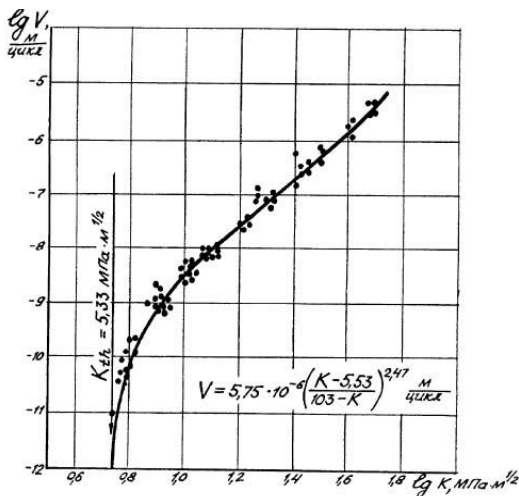


Рис. 4. Диаграмма роста усталостных трещин для деформированного сплава ВТ5-1. Остаточная деформация 3,0%

Таблица 1

Влияние предварительной пластической деформации на параметры диаграммы роста усталостной трещины

$\varepsilon', \%$	$A, \text{ м/цикл}$	m
0	6,03	2,72
0,2	5,94	2,62
0,5	5,90	2,603
3,0	5,75	2,47

Экспериментальные значения скоростей распространения трещин и графики, полученные по уравнению Яремы-Микитишина с известными величинами $K_{нр}$, K_{fc} , A , m , для недеформированного сплава типа ВТ5-1 и предварительно пластически деформированного растяжением до величин поперечной остаточной деформации 0,2%, 0,5% и 3,0%, представлены соответственно на рисунках 2 – 4.

Заключение

Сравнение полученных диаграмм роста усталостных трещин позволяет заключить, что для коэффициентов интенсивности напряжений, не превышающих $10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, скорости развития трещин тем меньше, чем больше степень предварительного пластического растяжения (рис. 5).

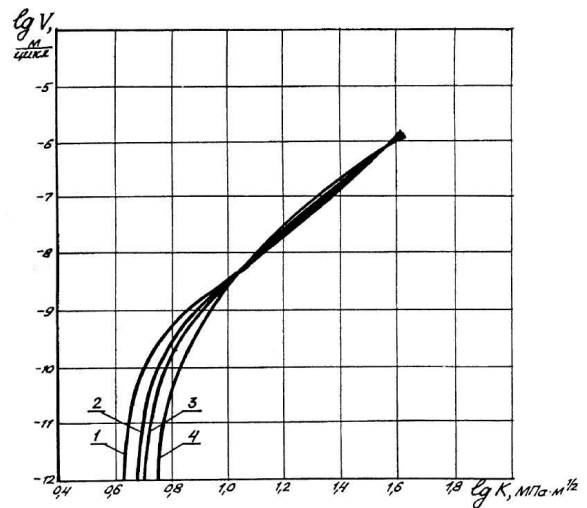


Рис. 5. Сравнение диаграмм роста усталостных трещин сплава типа ВТ5-1:

1 – недеформированного; 2 – деформированного до величины остаточной деформации 0,2%; 3 – деформированного до величины остаточной деформации 0,5%; 4 – деформированного до величины остаточной деформации 3,0%

Так, например, деформирование материала до степени остаточной деформации 3,0% приводит к тому, что при коэффициенте интенсивности напряжений, меньшем $5,53 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, трещина не развивается, в то время как в недеформированном материале при тех же параметрах нагруженности трещина растет со скоростью выше 10^{-10} м/цикл.

Сравнение диаграмм также дает возможность сделать вывод, что при коэффициенте интенсивности напряжения, превышающем $10 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ скорость распространения трещин практически не зависит от степени предварительной деформированности.

Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными работы [9], в которой установлено, что влияние предварительного пластического деформирования холодной прокаткой на скорость роста трещин свыше 10^{-9} м/цикл является незначительным.

Литература

1. Влияние однократной предварительной пластической деформации на трещиностойкость. Сообщение 1. Скорость роста усталостных трещин в теплоустойчивой стали / В.Т. Трощенко, Н.В. Ясний, В.В. Покровский и др. // Проблемы прочности. – 1988. – № 12. – С. 9-14.
2. Нешпор Г.С. Исследование кинетики и вязкости разрушения алюминиевых сплавов // Технология легких сплавов. – 1974. – № 6. – С. 53-61.
3. Влияние холодной деформации на скорость развития усталостной трещины в стали ОЗХ11Н10М2Т /

А.Д. Бухалов, В.П. Вылежнев, Ю.Н. Симонов и др. // Вопросы металловедения стали и титановых сплавов. – Пермь. – 1978. – С. 14-17.

4. Кинетика и механизм роста усталостной трещины в железе / О.Н. Романив, Е.А. Шур, А.И. Ткач и др. // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – 17, № 2. – С. 57-66.

5. Кинетика разрушения / П.В. Микляев, Г.С. Нешпор, В.Г. Кудряшов и др. – М.: Металлургия, 1979. – 279 с.

6. Гладковский В.А., Калугин В.Е. Повышение сопротивления усталостному разрушению титановых сплавов // Динамика и прочность механических систем. – Пермь. – 1986. – С. 53-58.

7. Ярема С.Я., Микитишин С.И. Аналитическое описание диаграммы усталостного разрушения материалов // Физико-химическая механика материалов. – 1975. – 11, № 6. – С. 47-54.

8. ГОСТ 25.506-85. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 61 с.

9. Legris L., El Haddat M.H., Topper T.N. The effect of cold rolling on the fatigue properties of a SAE 1010 // Mater. Exp. and Design Fatigue: Proc. Fatigue'81, Warwick, 24-27 March, 1981. – Guildford, 1981. – P. 97-105.

Поступила в редакцию 1.04.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Борисевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.