

УДК 621.452.3.002.3

В.С. Кривцов<sup>1</sup>, В.Н. Павленко<sup>1</sup>, И.В. Волков<sup>1</sup>, Х.В. Раковский<sup>2</sup><sup>1</sup>Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков<sup>2</sup>Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В статье изучено влияние предварительного пластического деформирования на характеристики циклической трещиностойкости титанового сплава. Установлены закономерности изменения форм трещины при периодическом нагружении, зависимости пороговых значений коэффициентов интенсивности напряжений от параметров получения трещины, условия гарантированного неразвития усталостной трещины, влияние параметров нагруженности трещины на скорость ее развития. Приведены практические рекомендации по влиянию величины поперечной остаточной деформации на величину глубины трещины и скорость распространения трещины.

**Ключевые слова:** трещиностойкость, пластическая деформация, коэффициент интенсивности напряжений, титановый сплав.

### Введение

Применение технологических процессов (холодная и горячая прокатка, волочение, гибка, вальцовка и т.п.) на стадии изготовления, а также однократные перегрузки отдельных конструктивных элементов в процессе эксплуатации оказывают существенное влияние на циклическую трещиностойкость материала. Эти факторы влияют и на скорость роста усталостных трещин, которая во многих случаях определяет ресурс конструкции [1].

Исследование влияния предварительного деформирования на трещиностойкость представляет 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. Скорость в деформированном материале может увеличиваться, уменьшаться или оставаться неизменной по сравнению с недеформированным материалом [2, 3].

Изучению влияния пластической деформации на характеристики циклической трещиностойкости металлов посвящены и работы [4, 5]. В них рассматриваются различные типы пластического деформирования: растяжение, сжатие, холодная прокатка. В работе [5] обнаружено, что при повышении степени пластической деформации циклическая и статическая трещиностойкость изменяется экстремально: при малых деформациях эти характеристики возрастают, а затем наблюдается их снижение.

Однозначной связи между характеристиками циклической трещиностойкости и пределом выносливости пока не обнаружено [6] – материалы с сильно различающимися пределами выносливости

могут иметь примерно одинаковые характеристики трещиностойкости, и наоборот.

Поэтому изучения влияния предварительной пластической деформации на предел выносливости титановых сплавов недостаточно для представления полной картины изменения свойств материала при циклическом нагружении.

**Целью статьи** является установление закономерностей влияния предварительного пластического деформирования на характеристики трещиностойкости при периодическом нагружении.

### Основной раздел

Изучение влияния предварительного деформирования на трещиностойкость производилась на образцах круглого сечения с диаметром рабочей части 20 мм из титанового сплава ВТ 5-1 для четырех характерных степеней пластической деформации растяжением. Величина поперечной остаточной деформации  $\epsilon$  образцов – составляла 0%, 0,2%, 0,5%, 3,0%. Для этих степеней деформации изучались: изменения форм трещины при периодическом нагружении, зависимости пороговых значений коэффициентов интенсивности напряжений от параметров получения трещины, условия гарантированного неразвития любой усталостной трещины, влияние параметров нагруженности трещины на скорость ее развития.

Исследование влияния начальных условий получения трещины  $K_n$  на пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН)  $K_t$  и определение наименьшего из возможных величин пороговых КИН –  $K_{t0}$  осуществлялось с применением методики, разработанной в работах [7, 8].

Для вычисления коэффициента интенсивности напряжений, необходимо было установить зависи-

мость формы трещины от ее размеров при изгибе с вращением. Для этого вскрывался ряд трещин различных размеров ( $a/d=0,05 - 0,30$ ) полученных при разных условиях циклического нагружения недеформированного образца. Измеряя соотношение полуосей  $a$  и  $b$  полуэллиптических трещин, и применяя линейный регрессионный анализ, установили, что форма трещины длиной не более  $0,6$  диаметра образца может быть описана уравнением

$$b/a = 0,86 - 0,64a/d. \quad (1)$$

Вскрытие и обмер усталостных трещин в образцах, предварительно деформированных растяжением до величин поперечной остаточной деформации  $0,2\%$ ,  $0,5\%$ ,  $3,0\%$ , показали удовлетворительное соответствие величин  $a$  и  $b$  уравнению линейной регрессии (1). Это позволяет заключить, что предварительное пластическое деформирование не оказывает влияния на форму усталостной трещины.

В результате усталостных испытаний при ступенчатом изменении нагрузки получены значения коэффициентов интенсивности напряжений, при которых трещины, выращенные при различных  $K_{II}$ , растут и не растут. Это дало возможность определить пороговые значения  $K_I$ . Так как база испытаний была принята равной  $10^6$  циклов, определенные пороги  $K_I$  соответствовали КИН, при котором скорость развития трещины не превышала  $10^{-11}$  м/цикл. Испытания проводились на образцах с трещинами размером от  $1$  до  $12$  мм.

По результатам экспериментальных данных для четырех величин остаточной деформации были получены зависимости  $K_I$  от  $K_{II}$ . Определены степени чувствительности пороговых значений КИН к начальным условиям  $\alpha$  и уровень КИН, при котором трещина любых размеров, полученная при любых условиях, не будет развиваться –  $K_{I0}$ .

Результаты исследований показывают, что предварительное пластическое деформирование растяжением оказывает некоторое положительное влияние на такую важную характеристику циклической трещиностойкости, как пороговое значение  $K_{I0}$ . По мере возрастания величины деформации от  $0$  до  $3\%$  происходит незначительное повышение уровня порога  $K_{I0}$  от  $4,21$  до  $5,53$  МПа $\cdot$ м $^{1/2}$ . При этом снижается чувствительность пороговых значений коэффициентов интенсивности напряжений к условиям получения усталостной трещины (рис. 1).

В отличие от влияния предварительного деформирования на предел выносливости сплава типа ВТ5-1 [9], резких изменений характеристик трещиностойкости при остаточной поперечной деформации, равной  $0,2\%$ , не наблюдается. Повышение порога  $K_{I0}$  и уменьшение чувствительности к начальным условиям в исследованном интервале деформаций происходит монотонно.

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.

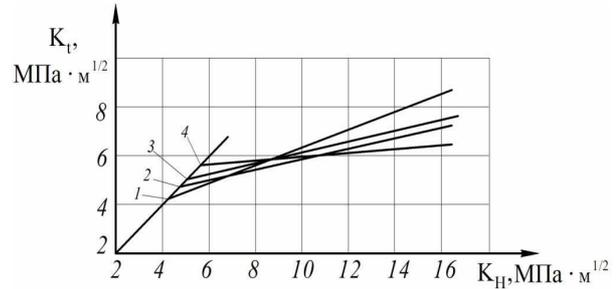


Рис. 1. Сравнение зависимостей  $K_I$  от  $K_{II}$  для недеформированного (1) и деформированного до величины остаточных деформаций  $0,2\%$  (2),  $0,5\%$  (3) и  $3,0\%$  (4) титанового сплава типа ВТ5-1

Скорость роста трещин экспериментально определялась в широком диапазоне КИН, поэтому ее аналитическое описание производилось на основании полной зависимости [10]

$$V = A[K - K_{th}/(K_{fc} - K)]^n \quad (2)$$

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  $a/d=0,30$  после испытания этого образца на циклическую трещиностойкость. Статическое нагружение образца велось по схеме четырехточечного изгиба.

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

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 номиналь-

ном напруженні. На участку діаграми роста усталостних тріщин с низкими коефіцієнтами интенсивности напружений, близьких к  $K_{th}$ , скорости развития тріщин уточнялись по средним значениям, полученным при испытании с постоянным уровнем КИН в вершине тріщины. На рис. 2, в частности, приведены графические зависимости изменений размера тріщины от числа циклов нагружения при постоянном  $K=5,73 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  для различных степеней предварительной пластической деформации.

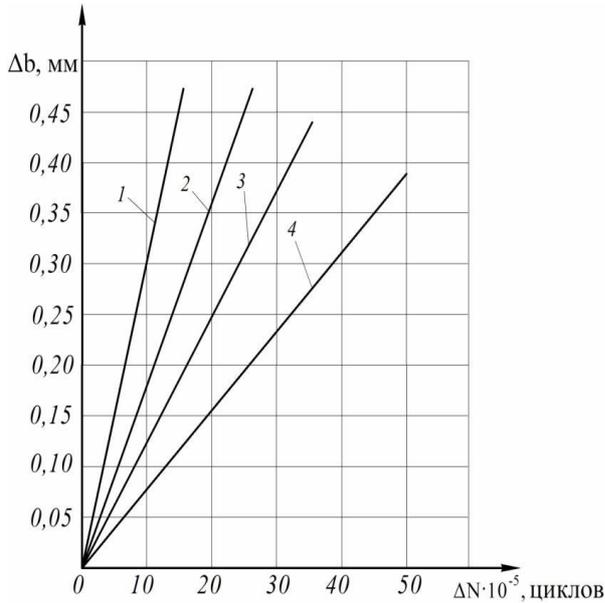


Рис. 2. Зависимость глубины тріщины от числа циклов нагружения при постоянном  $K=5,73 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  для недеформированного – 1 и деформированного до величины остаточных деформаций 0,2% – 2; 0,5% – 3 и 3,0% – 4 титанового сплава типа ВТ5-1

Как видно из рисунка, по мере возрастания степени деформации наклоны соответствующих прямых 1, 2, 3 и 4 увеличиваются, а, значит, увеличиваются и скорости развития тріщин в припороговой области.

Параметры зависимости скорости распространения тріщин от коэффициента интенсивности напружений находились на основании линейного регрессионного анализа. Логарифмируя формулу Яремы-Микитишина [10], получим линейную зависимость между  $\lg V$  и  $\lg [K - K_{th}/(K_{fc} - K)]$

$$\lg V = \lg A + m \cdot \lg [K - K_{th}/(K_{fc} - K)]. \quad (3)$$

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  $A$ .

Таблица 1

Влияние предварительной пластической деформации на параметры диаграммы роста усталостной тріщины

$\varepsilon$	$A \cdot 10^6$ , 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 скорости распространения тріщин и графики, полученные по уравнению Яремы-Микитишина с известными величинами  $K_{th}$ ,  $K_{fc}$ ,  $m$ ,  $m$ , для недеформированного сплава типа ВТ5-1 и предварительно пластически деформированного растяжением до величины поперечной остаточной деформации 0,2%, 0,5% и 3,0%, представлены соответственно на рис. 3.

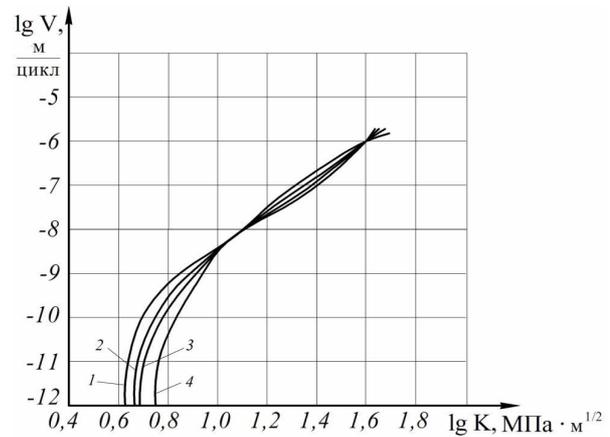


Рис. 3. Сравнение диаграмм роста усталостных тріщин для недеформированного – 1 и деформированного до величины остаточных деформаций 0,2% – 2; 0,5% – 3 и 3,0% – 4 титанового сплава типа ВТ5-1

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

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

Сравнение диаграмм также дает возможность сделать вывод, что при коэффициенте интенсивности напружения, превышающем  $10 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  скорость распространения тріщин практически не зависит от степени предварительной деформированности. Полученные результаты согласуются с эк-

периментальними даними роботи [11], в якій встановлено, що вплив попереднього пластичного деформування холодної прокатки на швидкість росту тріщин вище  $10^{-9}$  м/цикл є незначальним.

### Выводы

Предварительное пластическое деформирование повышает пороговые значения коэффициентов интенсивности напряжений.

По мере возрастания степени деформации титанового сплава увеличиваются и скорости развития трещин в припороговой области.

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.

При коэффициенте интенсивности напряжения, превышающем  $10 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$  скорость распространения трещин практически не зависит от степени предварительной реформированности.

### Список литературы

1. Влияние однократной предварительной пластической деформации на трещиностойкость. Сообщ. 1. Скорость роста усталостных трещин в теплоустойчивой стали / В.Т. Троценко, П.В. Ясний, В.В. Покровский [и др.] // Проблемы прочности. – 1988. – № 12. – С. 9-14.
2. Кинетика и механизм роста усталостной трещины в железе / О.Н. Романив, Е.А. Шур, А.И. Ткач [и др.] // Физико-химическая механика материалов. – 1981. – Т. 17, № 2. – С. 57-66.
3. Микляев П.Г. Кинетика разрушения / П.Г. Микляев, Г.С. Нешипор, В.Г. Кудряшов. – М.: Металлургия, 1979. – 279 с.
4. Георгиев М.Н. Влияние предварительной холодной пластической деформации на трещиностойкость малоуглеродистой стали / М.Н. Георгиев, Ю.Н. Симонов // Изв. АН СССР. Металлы. – 1988. – № 1. – С. 103-106.

5. Гладковский В.А. Повышение сопротивления усталостному разрушению титановых сплавов / В.А. Гладковский, В.Е. Калугин // Динамика и прочность механических систем: межвуз. сб. науч. тр. / М-во высш. и среднего спец. образования РСФСР, Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1986. – С. 53-58.

6. Козаев В.П. Расчеты деталей машин на прочность и долговечность: справочник / В.П. Козаев, Н.А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 224 с.

7. Вассерман Н.Н. Исследование условий нераспространения трещин усталости при круговом изгибе образцов из сплава типа ВТ6 / Н.Н. Вассерман, В.В. Згогурин // Динамика и прочность механических систем: межвуз. сб. науч. тр. / М-во высш. и среднего спец. образования РСФСР, Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1977. – С. 131-133.

8. Вассерман Н.Н. К определению коэффициента интенсивности напряжений при изгибе круглых гладких образцов с трещинами усталости / Н.Н. Вассерман, В.А. Гладковский, В.В. Згогурин // Физико-химическая механика материалов. – 1978. – № 2. – С. 42-48.

9. Влияние предварительной пластической деформации на сопротивление усталости титановых сплавов / В.А. Гладковский, Н.Н. Вассерман, В.Е. Калугин, И.Е. Ковалев // Сопротивление усталости и повышение несущей способности методом поверхностной пластической деформации: тез. докл. научн.-техн. конф. – Пермь, 1988. – С. 30-31.

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

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

Поступила в редакцию 1.12.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., А.И. Долматов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА

В.С. Кривцов, В.Н. Павленко, И.В. Волков, Х.В. Раковский

У статті вивчено вплив попереднього пластичного деформування на характеристики циклічної тріщиностійкості титанового сплаву. Встановлено закономірності зміни форм тріщини при періодичному навантаженні, залежності порогових значень коефіцієнтів інтенсивності напружень від параметрів отримання тріщини, умови гарантованого нерозвитку втомної тріщини, вплив параметрів навантаженості тріщини на швидкість її розвитку. Наведено практичні рекомендації щодо впливу величини поперечної залишкової деформації на величину глибини тріщини і швидкість поширення тріщини.

**Ключові слова:** тріщиностійкість, пластична деформація, коефіцієнт інтенсивності напружень, титановий сплав.

### STUDING OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL HEREDITY ON THE TITANIUM ALLOY CYCLIC CRACK RESISTANT CHARACTERISTICS

V.S. Krivsov, V.N. Pavlenko, I.V. Volkov, Kh.V. Rakovskiy

The article studied the effect of preliminary plastic deformation on the characteristics of cyclic crack resistance of titanium alloy. The regularities of cracks change forms while being under periodic load were established. Dependences of the threshold stress intensity factor on the parameters of obtaining crack, condition of guaranteed fatigue crack, the effect of crack loading parameters on the velocity of its progress, were established. The practical recommendations on the influence of the transverse permanent deformation on the value of crack depth and velocity of propagation of the crack were presented.

**Keywords:** crack resistance, plastic deformation, stress intensity factor, titanium alloy.