

## МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РАССЛОЕНИЯ-РАЗРЫВА

Н.В. Туманов, С.А. Черкасова

Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ),  
111250, Москва, Авиамоторная 2,  
E-mail: [Tumanov@ciam.ru](mailto:Tumanov@ciam.ru)

Описан сложный высокоэнергоемкий механизм разрушения (механизм периодического расслоения-разрыва — МПРР), который действует на II этапе кинетики усталостных трещин и приводит к формированию бороздок на поверхности излома. Процесс разрушения при реализации МПРР происходит в рамках высокоупорядоченной деформационной структуры, которая формируется перед фронтом трещины при циклическом нагружении под действием локальной интенсивной пластической деформации. МПРР представляет собой последовательное чередование (в каждом цикле нагружения) хрупкого поперечного расслоения вдоль границ разориентации деформационного происхождения (первичное разрушение) и последующего пластичного разрыва перемычки между расслоением и фронтом трещины (вторичное разрушение). Разработана математическая модель зарождения первичного разрушения, позволяющая прогнозировать скорость роста трещины. Приведены результаты верификации модели.

### Введение

Усталость металлических материалов обусловлена сильной локализацией и глубоким развитием пластической деформации под действием переменных напряжений, что связано с формированием высокоупорядоченных деформационных структур. Последние играют двойную роль в развитии усталости. С одной стороны, их эволюция сопровождается ростом внутренних напряжений и микроразрушениями, которые приводят к образованию и росту усталостных трещин. С другой стороны, структурирование качественно изменяет свойства материала и может обеспечить большую вязкость разрушения, не свойственную материалу в исходном состоянии. Эта особенность отражена в модели механизма периодического расслоения-разрыва (МПРР), вызывающего устойчивый рост усталостных трещин и образование бороздок на поверхности разрушения [1,2]. Настоящая работа посвящена обоснованию и верификации модели МПРР.

### Модель механизма периодического расслоения-разрыва

**Экспериментальные предпосылки.** В результате многочисленных экспериментов установлена стадийность кинетики усталостных трещин (КУТ) и выделен II этап КУТ, соответствующий наиболее протяженному II участку диаграммы « $V — \Delta K$ » ( $V$  — скорость роста трещины в мкм/цикл,  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$  — размах коэффициента интенсивности напряжений (КИН)  $K$ ,  $K_{max}$  и  $K_{min}$  — максимальное и минимальное значение КИН в цикле нагружения). На макроуровне этот этап характеризуется уменьшением  $\partial V / \partial \Delta K$ , стабилизацией роста трещины (переходом от скачкообразного роста к равномерному) и переориентацией поверхности разрушения перпендикулярно оси растяжения. Одновременно на по-

верхности разрушения появляется периодический мезорельеф — усталостные бороздки с шагом (периодом рельефа)  $S$  (рис.1,а). Бороздки являются следами фронтов мезотрещин и, следовательно, ортогональны направлениям их роста. В ряде работ установлена количественная связь между макро- и мезохарактеристиками нагружения и разрушения: образование бороздки происходит в каждом цикле нагружения, величина  $S$  пропорциональна  $\Delta K^2$ . В [3] для нескольких сплавов (титановых, алюминиевых и сталей) получена экспериментальная зависимость  $V = S = 5.4 (\Delta K / E)^{2.1}$  ( $E$  — модуль упругости), которая затем была аппроксимирована соотношением

$$S = 6(\Delta K / E)^2 \quad (1)$$

с безразмерным коэффициентом (эксперименты в [3] проводились в условиях плоской деформации при частотах  $10 \div 30$  Гц, температуре  $t = 20^\circ\text{C}$  и коэффициенте асимметрии цикла нагружения  $R = 0$ , т.е. при  $\Delta K = K_{max}$ ). Если учесть, что прочность межатомных связей на отрыв (предельная или теоретическая прочность)  $\sigma_{пр} \approx 0.1E$ , то соотношение (1) связывает параметры, характеризующие нагрузку и разрушение на всех масштабных уровнях. Целью работы является определение механизма формирования этой связи, т.е. реконструкция механизма разрушения, действующего на II этапе КУТ и приводящего к зависимости (1).

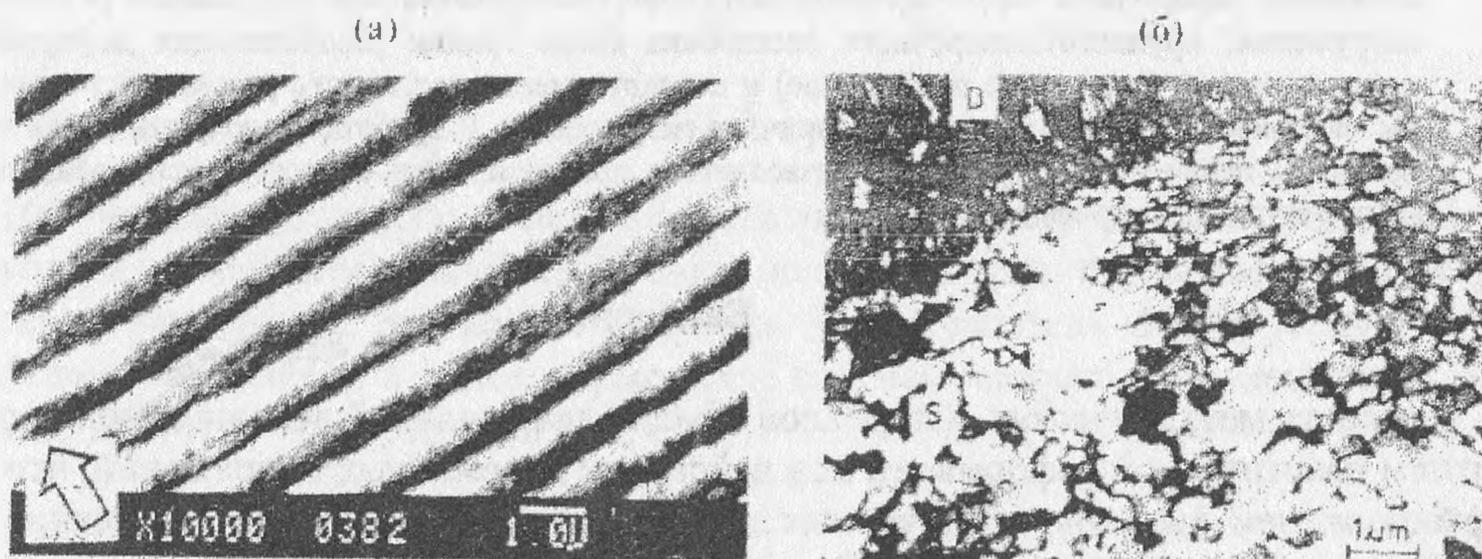


Рис. 1. Усталостные бороздки (а) (никелевый сплав ЭИ 698, внизу справа — масштаб в мкм,  $\uparrow$  — направление роста трещины) и субмикроструктурная структура в монокристалле меди под усталостной бороздкой (б) [4] (сечение вдоль бороздки, D — предохраняющий слой на поверхности разрушения, S — структура подповерхностного слоя)

**Физические основы.** Параметр  $K$  характеризует линейно-упругое напряженное состояние окрестности вершины идеальной трещины (разреза нулевой толщины) в однородной и изотропной сплошной среде в поле одноосного растяжения вдоль оси, перпендикулярной плоскости трещины. Отсюда следует, что стадия разрушения, приводящая к зависимости (1), должна быть упругохрупкой, а ее характерный масштаб (шаг бороздок) должен существенно превышать размер структурных элементов материала в окрестности фронта трещины в направлении, ортогональном ее фронту. При шаге бороздок порядка  $0.1 \div 1$  мкм это означает, что на II этапе КУТ перед фронтом усталостной трещины в глубине пластической зоны находится субмикроструктурный материал, диспергированный в процессе циклического нагружения в результате многократной высокоградиентной ин-

тенсивной пластической деформации (рис. 1, б). Именно такая фрагментированная структура соответствует состоянию предразрушения сильнодеформированных металлических материалов [5]. При этом на фоне идеальной субмикроструктурной структуры (свободной от решеточных дислокаций) вдоль оси максимальной главной деформации располагаются протяженные большеугловые границы разориентации — ножевые границы (НГ) [5]. Последние являются мощными источниками далекодействующих упругих напряжений, что приводит к расслоению материала вдоль этих границ [5]. При наличии такой структуры перед фронтом трещины можно предположить, что образованию усталостной бороздки соответствует цикл разрушения, происходящий следующим образом [1, 2] (рис. 2): сначала структурированный материал перед фронтом трещины (рис. 2, а, б) расслаивается вдоль НГ (хрупкое первичное разрушение, определяющее шаг бороздок) (рис. 2, в, д), а затем происходит разрыв перемычки между расслоением и фронтом трещины (вторичное пластическое разрушение) (рис. 2, е, ж). В этом случае поверхность разрушения, состоящая из бороздок (остатков разорванных перемычек), перпендикулярна НГ, т.е. направлению максимальной главной деформации перед фронтом трещины, а приращение длины трещины в цикле разрушения равно расстоянию от фронта трещины до очага первичного разрушения, которое, в свою очередь, равно шагу бороздок. Поскольку циклы разрушения и нагружения при формировании усталостных бороздок совпадают, вычисление указанного расстояния определяет скорость роста трещины (в мкм/цикл).

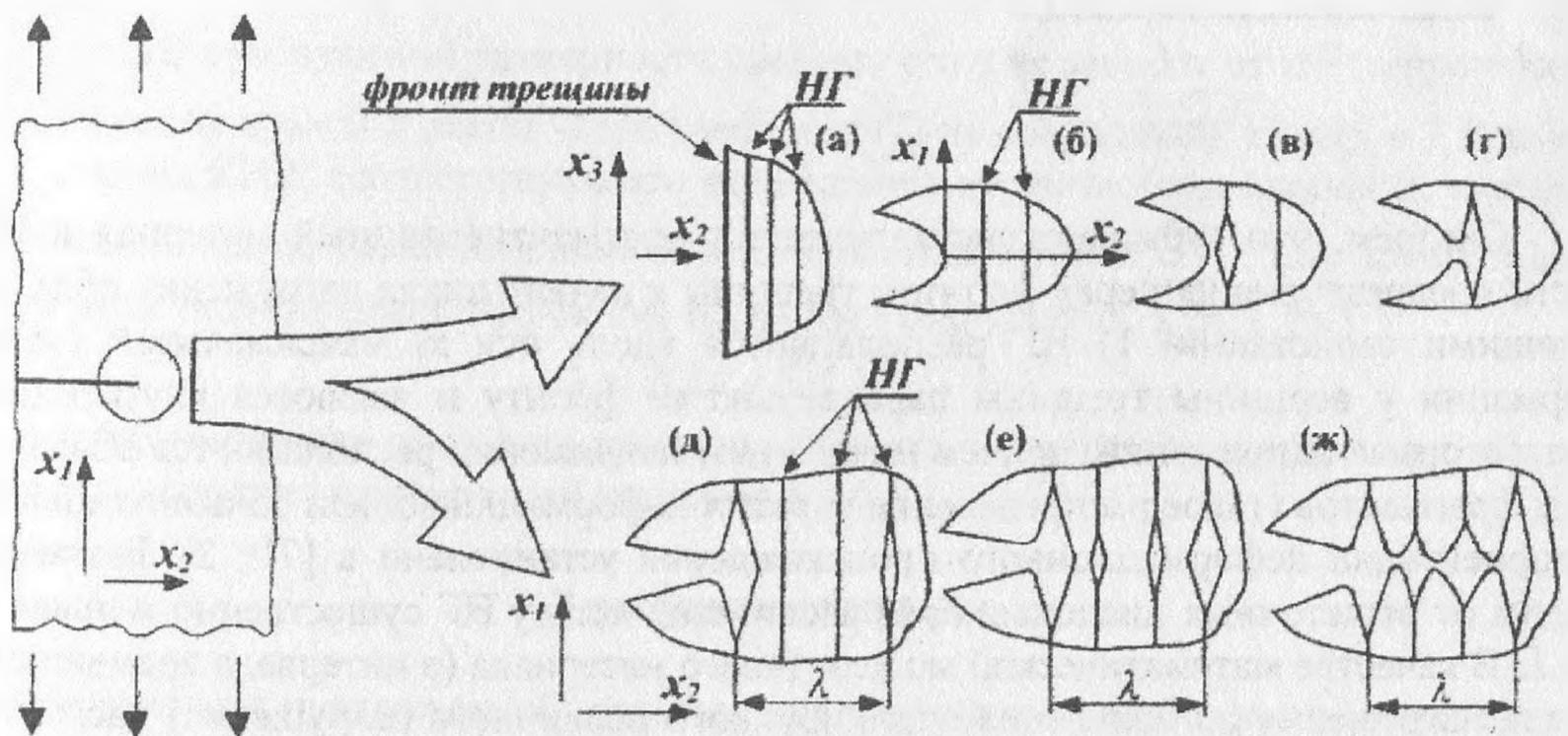


Рис. 2. Схемы формирования Т-образной вершины трещины (б, в, г) и действия механизма периодического расслоения-разрыва (д, е, ж)

**Математическая модель зарождения первичного разрушения.** Как видно на рис. 2, расслоение перед фронтом трещины приводит к образованию Т-образной вершины. Представим ее в виде полубесконечной идеальной трещины с Т-образной вершиной в однородном и изотропном бесконечном упругом теле в поле одноосного растяжения вдоль оси  $x_1$ , перпендикулярной плоскости трещины  $x_2 x_3$  (рис. 2, 3). Симметричное расслоение глубиной  $L$  у вершины основной трещины лежит в плоскости  $x_1 x_3$ ; деформация — плоская; фронт трещины — прямолинейный; ось  $x_3$  параллельна фронту трещины; оси  $x_1$  и  $x_2$  обра-

зуют подвижную прямоугольную систему координат с началом, расположенным на пересечении плоскостей расслоения и основной трещины. Оси  $x_1$  и  $x_2$  — главные оси локального напряженного состояния у фронта трещины в плоскости  $x_1 = 0$ . Распределение в этой плоскости главных напряжений  $\sigma_2^{ext}$  вдоль оси  $x_2$

$$\sigma_2^{ext} = F(x_2)K / \sqrt{L}, \quad (2)$$

где  $F(x_2)$  — функция, приведенная на рис.3;  $x_2$  — расстояние от вершины трещины, отнесенное к величине  $L$ ;  $K$  — КИН без учета Т-образной формы вершины трещины [6]. Как видно,  $F_{max} \approx 0.19$  при  $x_2 \approx 2$ .

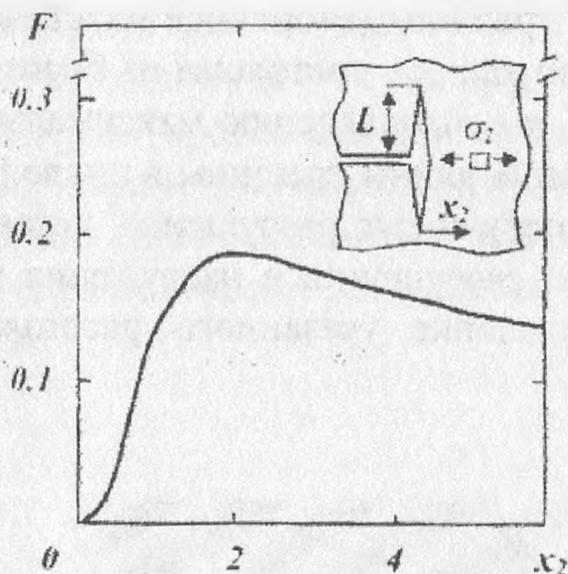


Рис.3. Распределение напряжений  $\sigma_2$  перед Т-образной вершиной трещины в плоскости  $x_1 = 0$  [6].

Считаем, что субмикроструктурный фрагментированный материал и НГ в области предразрушения перед фронтом трещины к началу цикла нагружения обладают следующими свойствами: 1) НГ располагаются вдоль оси  $x_1$  максимальной главной деформации у вершины трещины параллельно ее фронту и являются внутренними концентраторами напряжений, причем максимумы напряжений располагаются вблизи от НГ в теле фрагментов (такое распределение упругих деформаций вблизи большеугловых границ разориентации деформационного происхождения установлено в [7]); 2) фрагменты свободны от решеточных дислокаций; 3) расстояние между НГ существенно меньше величины  $L$ . В качестве математической модели такого материала (в интервале времени от начала цикла нагружения до появления очага хрупкого первичного разрушения) рассмотрим однородную и изотропную по упругим свойствам сплошную среду со стационарными полями внутренних напряжений вдоль НГ, обладающую предельной прочностью на отрыв  $\sigma_{np}$  (равной прочности межатомных связей).

Проведем мысленный эксперимент, увеличивая по закону  $K(t)$  нагрузку в отнулевом цикле нагружения ( $R = 0$ ) до величины  $K^*$ , соответствующей зарождению первичного разрушения. Предположим, что это разрушение происходит под действием  $\sigma_2$ , а его очаг располагается в плоскости  $x_1 = 0$ . Условием такого разрушения является

$$\sigma_2^{ext}(x_2, t) + \sigma_2^{int}(x_2) = \sigma_{np}, \quad (3)$$

где  $\sigma_2^{int}$  — внутренние растягивающие напряжения вблизи НГ в плоскости  $x_1 = 0$  (зависимостью  $\sigma_2^{int}$  от координаты  $x_3$  пренебрегаем). Запишем (3) в виде

$$\sigma_2^{int}(x_2, t) = \alpha(x_2)\sigma_{np}, \quad (4)$$

где  $\alpha = 1 - \sigma_2^{int} / \sigma_{np}$ ;  $\alpha\sigma_{np}$  — условная (эффективная) предельная прочность, уменьшенная за счет растягивающих внутренних напряжений вблизи НГ. Считая, что до появления очага первичного разрушения форма вершины трещины не изменяется, из (2) и (4) имеем

$$P\beta\Delta K / \sqrt{L} = \sigma_{np}, \quad (5)$$

где  $P(x_2) = F(x_2)/\alpha(x_2)$ ;  $\beta = K(t)/\Delta K$ . Координата  $x_2^*$  очага первичного разрушения (пронормированная по величине  $L$ ) является точкой максимума функции  $P(x_2)$ . Расстояние  $\lambda$  от фронта трещины до этого очага (рис. 2, d)

$$\lambda = x_2^* L^*, \quad (6)$$

где  $L^*$  определяется из (5) при  $P = P_{max}$ . В случае равнонапряженных ножевых границ ( $\sigma_2^{int}(x_2) = \sigma_0$ ,  $\alpha_0 = 1 - \sigma_0 / \sigma_{np}$ ) первичное разрушение произойдет вдоль НГ, ближайшей к координате  $x_2 = 2$  (соответствующей  $\sigma_{2max}^{ext}$ , и уравнение (5) примет вид

$$0.19\beta\Delta K / \alpha_0 \sqrt{L} \approx \sigma_{np},$$

откуда  $L^* \approx 3.6 \times 10^{-2} (\beta^*/\alpha_0)^2 (\Delta K / \sigma_{np})^2$ , где  $\beta^* = K^*/\Delta K$ . Принимая  $\sigma_{np} = 0.1E$ , из (6) получим

$$\lambda = 2L^* = 7.2\gamma^2 (\Delta K / E)^2, \quad (7)$$

где  $\gamma = \beta^* / \alpha_0$ . Из соображений размерности следует, что  $\gamma$  не зависит от  $\Delta K$  (в противном случае размерности правой и левой части равенства (7) не совпадают). Если  $\gamma \approx 1$  (т.е. отношение значения КИН, соответствующего зарождению первичного разрушения, к размаху КИН приблизительно равно отношению величины напряжения  $\sigma_2^{ext}$ , при которой достигается уровень теоретической прочности  $\sigma_{np}$  в очаге разрушения, к  $\sigma_{np}$ ), то

$$\lambda \approx 7(\Delta K / E)^2, \quad (8)$$

и теоретическое расстояние от фронта трещины до очага первичного разрушения близко к шагу бороздок согласно эмпирической зависимости (1).

### Верификация модели

В соответствии с предложенной моделью каждая усталостная бороздка представляет собой остаток двухмерной шейки после пластичного разрыва своеобразного двухмерного субмикроструктурного мезообразца — перемычки между расслоением и Т-образным фронтом трещины (см. рис. 2). В процессе развития и разрушения этой шейки, внутри нее формируются вторичные расслоения вдоль внутренних НГ и возникают внутренние шейки (рис. 2, e). Расслоения (как основные, так и вторичные) и сильнодеформированные остатки разорванных перемычек между ними (усталостные бороздки) показаны на рис. 4. Видна фрактальная структура бороздок (внутри основных бороздок имеются вторичные расслоения и бороздки, внутри которых при большом увеличении можно рассмотреть бороздки следующего масштабного уровня), свидетельствующая о самоподобии процессов, происходящих на различных этапах деформации и разрушения перемычки между основным расслоением и фронтом трещины.



Рис.4. Профиль и поверхность усталостных бороздок (титановый сплав ВТ-18У)

Для проверки соотношения (8) исследована усталостная трещина, распространявшаяся в процессе циклических испытаний в ступице диска осевого компрессора от начальной поверхностной полуэллиптической трещины (рис.5) (материал диска — титановый сплав ВТ-18У, температура испытаний  $t = 450^\circ\text{C}$ ).

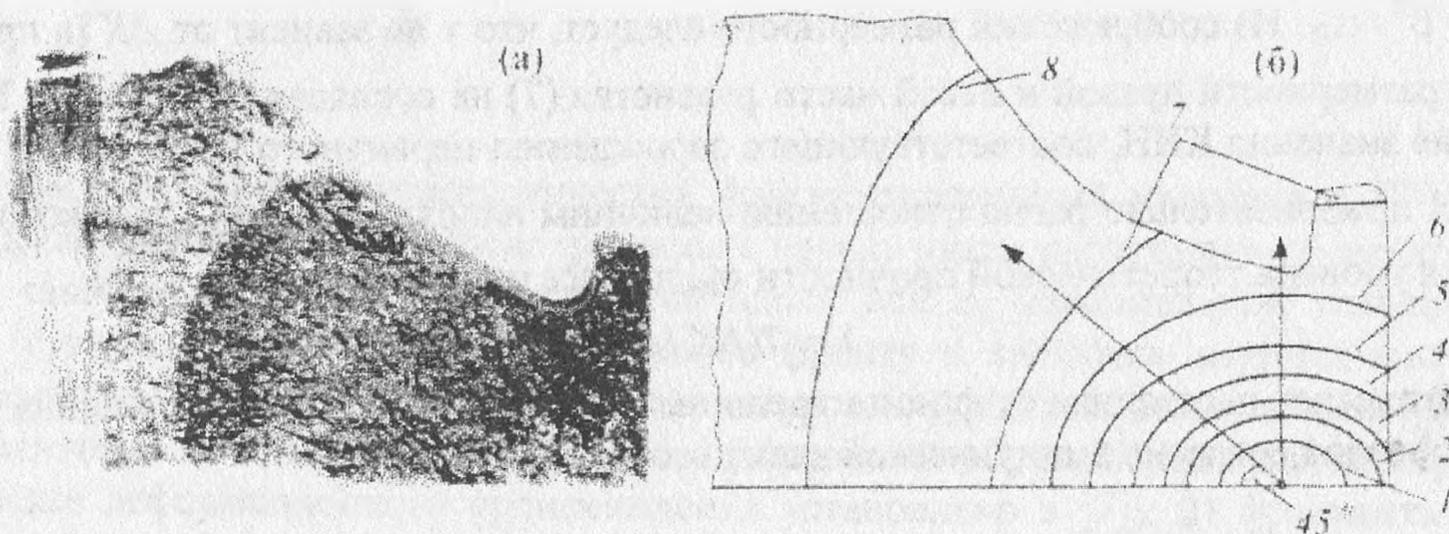


Рис.5. Поверхность разрушения ступицы диска компрессора (а) и схема макролиний, визуализирующих положение фронта трещины при остановках испытаний (б) (1-я линия соответствует началу циклических испытаний, а 2÷8 линии — семи остановкам; участок излома после 8-й линии образовался при вскрытии трещины после окончания циклических испытаний).

Проведено 4000 циклов нагружения с периодом 3 мин; испытания прерывались после первой 1000 циклов и далее через каждые следующие 500 циклов. Следы всех остановок видны на поверхности излома в виде макролиний (рис.5,б). Почти вся поверхность разрушения покрыта усталостными бороздками. Общее число бороздок вдоль выбранного направления, а также их число между макролиниями соответствует общему числу циклов нагружения и числу циклов между остановками (подсчеты проводились вдоль направлений, показанных на рис.5,б стрелками). Шаг бороздок изменяется от  $0.5\div 0.8$  мкм (сразу после 1-й линии) до  $15\div 20$  мкм (перед 8-й линией). Средний шаг бороздок  $S$  в окрестности

первых пяти эллиптических макролиний, измеренный вдоль малой оси эллипсов (с центром в очаге разрушения), приведен в таблице. Там же указаны размеры большой  $a$  и малой  $b$  полуоси эллипсов и значения  $\Delta K$  в вершинах малой оси, рассчитанные для эллиптической трещины по формуле [8]

$$\Delta K = A\Delta\sigma\sqrt{\pi b} / (\pi/8) \left[ 3 + (b/a)^2 \right],$$

где  $A = 1.12$  для поверхностной трещины (линии 1+3) и  $A = 1.2$  для угловой трещины (линии 4 и 5),  $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ,  $\sigma_{\max} = 42$  кгс/мм и  $\sigma_{\min} = 5$  кгс/мм — максимальные и минимальные номинальные напряжения в цикле нагружения ( $R \approx 0.1$ ). В рассматриваемой области величину  $\Delta\sigma$  можно считать постоянной и не учитывать влияние близости фронта трещины к свободной поверхности ступицы (это влияние начинает сказываться только вблизи 6-й макролинии). В таблице приведены также значения  $\lambda$ , вычисленные по формуле (8) с учетом 30%-го снижения модуля упругости титана при  $t = 450^\circ\text{C}$  [9].

Т а б л и ц а

Номер усталостной линии	Длина полуосей эллипсов, мм		$\Delta K$ , МПа $\sqrt{м}$	$\lambda$ , мкм	$S$ , мкм
	$a$	$b$			
1	2.8	2.5	24	0.67	0.7
2	3.8	3.4	28	0.92	0.95
2	4.3	3.85	30	1.07	1.1
4	4.9	4.4	34	1.36	1.5
5	6.0	5.35	37.5	1.65	1.7

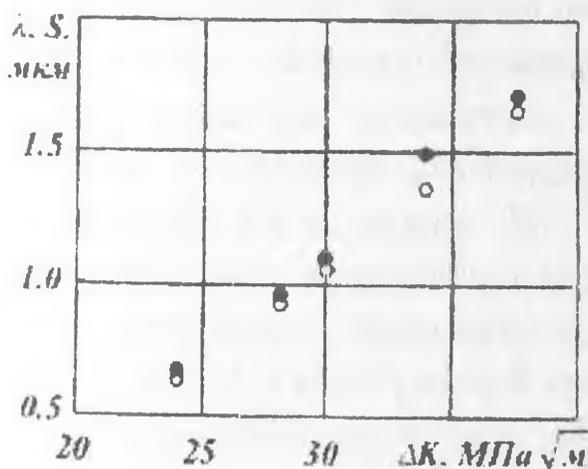


Рис.6. Сравнение расчетного  $\lambda$  (о) и экспериментального  $S$  (•) приращеня длины трещины в цикле нагружения.

Как видно на рис.6, величины  $\lambda$  и  $S$  практически совпадают. Тогда, заменив в (8)  $\lambda$  на  $S$ , имеем  $\Delta K \approx 0.4E\sqrt{S}$ , откуда перед 8-й макролинией при  $S = 15 \div 20$  мкм получим  $\Delta K \approx 120 \div 140$  МПа $\sqrt{м}$ , что вдвое выше вязкости разрушения  $K_{Ic}$ . Это подтверждает эффективность МПРР, при котором в каждом цикле нагружения поперечные мезорасслоения задерживают рост трещины. В результате живучесть конструкций (работоспособность при наличии трещин) значительно повышается.

**Список литературы**

1. Туманов Н.В. В сб. Механизмы деформации и разрушения перспективных материалов (Труды XXXV семинара («Актуальные проблемы прочности»). Псков, Т.1, 1999, С. 307-314.
2. Tumanov N.V. In Proc. 7<sup>th</sup> Conf. on Fatigue. Ed. R.X.Wu, EMAS, Vol.2, 1999, P. 765-770.
3. Bates R.C. and Clark W.G. Trans. Quart., ASM, **62**(2), 1969, 380-389.
4. Klesnil M. and Lukáš P. Fatigue of Metallic Materials. Amsterdam, Elsevier Science, 1992, 270 p.
5. Рыбин В.~. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М., Metallurgia, 1986, 224 с.
6. He MY., Heredia FE., Wissuchek D.J. et al. Acta metall mater., **41**(4), 1993, 1223-1228.
7. Валиев Р.З., Исламгалиев Р.К. Физ. мет. и металловед., **87**(3), 1999, 46-52.
8. Брок Д. Основы механики разрушения. М., Высшая школа, 1980, 368 с.
9. Физические величины. Справочник. М., Энергоатомиздат, 1991, 1232 с.