

С.Р. Игнатович, С.И. Йовенко, М.И. Андрищенко, Ф. Нинасивинча Сото

## ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ НАЛИЧИИ МАЛЫХ ТРЕЩИН

*Рассмотрены результаты экспериментальных и теоретических исследований поведения рассеянных малых трещин в сплаве на основе никеля ЭИ698ВД при малоцикловогой усталости. Приведена функция распределения остаточного ресурса, полученная на базе разработанной стохастической модели прогнозирования плотности распределения длины трещин с учетом их случайного роста.*

Принцип "безопасного повреждения" (живучести) предусматривает возможность эксплуатации авиационных конструкций с контролируемыми повреждениями (усталостные трещины, коррозия, случайные повреждения) [1]. Для реализации концепции "безопасного повреждения" применительно к усталостным трещинам необходимо проводить исследования, направленные на обоснование размеров допускаемых<sup>1</sup> и предельных (критических) трещин, выявление кинетических характеристик распространения трещин, разработку методологий расчетной оценки остаточной "прочности" (долговечности) конструкций, получение данных, необходимых при составлении программы контрольных осмотров. Размерные параметры контролируемых повреждений конструкции должны устанавливаться с учетом возможности их контролепригодности при используемой технологии дефектоскопии [1]. Современные методы неразрушающего контроля обеспечивают надежную идентификацию трещин от 10 мкм [2], что позволяет при обоснованной периодичности осмотров производить достоверный мониторинг поврежденности и наиболее полно использовать ресурсные возможности авиационных конструкций.

В настоящее время актуальны вопросы зарождения и роста усталостных малых (микрометровых,  $10-10^3$  мкм [3]) трещин (МТ). Данный вид поврежденности встречается в элементах конструкции планера и в ответственных конструктивных элементах авиационных газотурбинных двигателей. Непрерывно протекающие во времени процессы зарождения и распространения МТ, которые случайно рассеяны в объеме или на поверхности нагруженного материала и имеют неоднородные размеры, классифицируются как многоочаговое [1] или множественное [4] разрушение (МР). Ключевым вопросом МР является изучение размерной неоднородности рассеянных трещин, которая характеризуется статистическим распределением их количества по размерам [5]. МР предшествует образованию макроскопических трещин и является инкубационной стадией макроскопического разрушения. В настоящее время широко изучают поведение индивидуальных МТ [6]. Коллективные эффекты в системе рассеянных поверхностных МТ при усталости изучены недостаточно. Особенности развития системы неоднородных по размерам усталостных трещин, в частности, закономерности случайного накопления трещин, особенности статистического распределения их размеров отражены в работах [7; 8]. Различные подходы к моделированию размерной неоднородности МТ как фактора поврежденности деталей при малоцикловогой усталости представлены в работах [9-11]. Вопросы прогнозирования предельного состояния по критерию формирования трещины пороговой длины рассматривались в работах [12; 13].

<sup>1</sup> Такие трещины трактуются как "частичное разрушение" [1].

В классической постановке [12] задача вероятностного прогнозирования предельного состояния сводится к определению функции распределения наработки до этого предельного состояния - функции распределения ресурса изделия. Для решения этой задачи при развитой системе рассеянных на поверхности нагруженного материала неоднородных по размерам трещин необходимо располагать информацией о статистическом распределении длины таких трещин во времени. Плотность распределения  $f_a(a; t)$  длины трещины  $a$  является базовой характеристикой размерной неоднородности дефектов, и на ее основе решается задача прогнозирования остаточного ресурса.

Пусть при контроле выявлены плотность вероятности длины трещины  $f_a(a'; t')$  и математическое ожидание  $m'_a$  длины трещины в момент времени  $t = t'$ . Необходимо оценить условную функцию плотности распределения длины трещины  $f_a(a; t' + \tau | a'; t')$  на предстоящий период времени  $\tau$  при условии, что при  $t = t'$  имеется  $f_a(a'; t')$ . Тогда остаточный ресурс  $T_r$  определится из условия пересечения прогнозируемой плотности вероятности с заданным предельным уровнем  $a_*$  (рис. 1). Функция распределения остаточного ресурса  $T_r$  будет равна

$$F_T(T_r; a_*) = \int_{a_*}^{\infty} f_a(a; t' + T_r | a'; t') da. \quad (1)$$

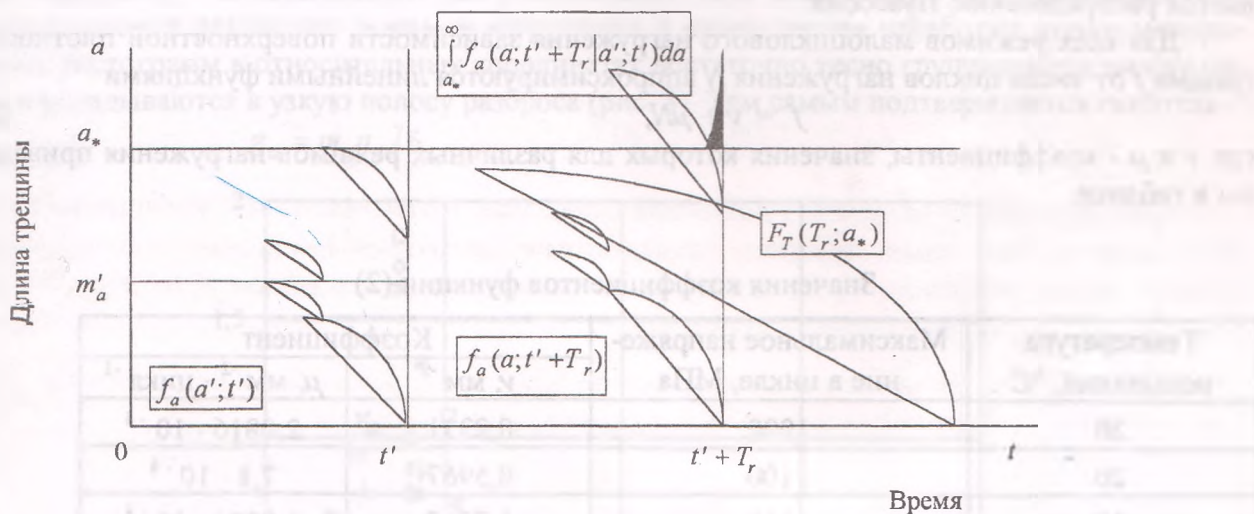


Рис. 1. Схема прогнозирования остаточного ресурса.

На основании изложенного подхода экспериментально изучены распределения длины рассеянных поверхностных трещин при малоцикловом нагружении сплава ЭИ698ВД, получены числовые параметры таких распределений при различных условиях нагружения, теоретически обосновано обобщенное распределение длины трещины для экспериментально подтвержденных кинетических характеристик зарождения и распространения трещин. Конечной задачей является разработка на базе полученных результатов методики прогнозирования остаточного ресурса деталей по критерию формирования трещины предельной длины.

Испытания образцов круглого сечения с диаметром рабочей части 5 мм проводили с целью получения информации по кинетике развития процессов зарождения и роста поверхностных коротких трещин. МР никелевого сплава изучалось при малоцикловом изотермическом нагружении (коэффициент асимметрии цикла  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0$ ). Нагружение перио-

дически прерывалось для проведения контроля состояния поверхности образцов методом цветной капиллярной дефектоскопии. При наличии трещин (идентифицировались трещины длиной более 30 мкм) образцы исследовали под микроскопом, определяли длину и координаты каждой трещины на поверхности. Значения координат давали возможность при периодическом контроле классифицировать два вида трещин:

- трещины, образованные в течение последнего этапа наработки;
- трещины, возникшие на более ранних стадиях нагружения.

Кроме этого по координатам отслеживалось изменение длины каждой трещины в процессе циклического нагружения, определялась скорость роста каждой трещины. Объем выборок по значениям длины и скорости роста поверхностных трещин составлял от 30 до 300 штук, что позволяло получить адекватные статистические характеристики поля рассеянных дефектов.

При малоциклового усталости образование и распространение рассеянных микрометровых трещин являются доминирующими процессами повреждаемости вплоть до полного разрушения образцов. На их поверхности происходит непрерывное зарождение новых и рост уже имеющихся малых трещин. Первые малые трещины образуются на ранней стадии нагружения, и практически весь период долговечности сплава (85 - 98 %) связан с развитием системы рассеянных микрометровых трещин.

Распределение трещин на поверхности рабочей части образцов однородно и подчиняется распределению Пуассона.

Для всех режимов малоциклового нагружения зависимости поверхностной плотности трещин  $f$  от числа циклов нагружения  $N$  аппроксимируются линейными функциями

$$f = \nu + \mu N, \quad (2)$$

где  $\nu$  и  $\mu$  - коэффициенты, значения которых для различных режимов нагружения приведены в таблице.

Значения коэффициентов функции (2)

Температура испытаний, °С	Максимальное напряжение в цикле, МПа	Коэффициент	
		$\nu$ , мм <sup>-2</sup>	$\mu$ , мм <sup>-2</sup> · цикл <sup>-1</sup>
20	1000	0,2331	$2,0816 \cdot 10^{-4}$
20	1100	0,5967	$7,8 \cdot 10^{-4}$
20	1150	1,7717	$1,0234 \cdot 10^{-3}$
400	980	-0,2598	$4,202 \cdot 10^{-4}$
600	850	-1,0038	$6,4923 \cdot 10^{-3}$
600	950	3,0802	$6,804 \cdot 10^{-3}$

Зависимость (2) свидетельствует об однородном точечном пуассоновском потоке зарождения поверхностных трещин с постоянной интенсивностью  $\mu$ . Повышение температуры приводит к интенсификации процессов образования трещин. С увеличением максимального напряжения в цикле интенсивность трещинообразования повышается.

Экспериментальные исследования показали наличие значительного разброса значений скорости распространения поверхностных трещин. Для всех режимов нагружения имеется показательное распределение скорости трещин (рис. 2). Доля нераспространяющихся трещин или трещин, имеющих очень маленькую скорость, составляет значительную величину.

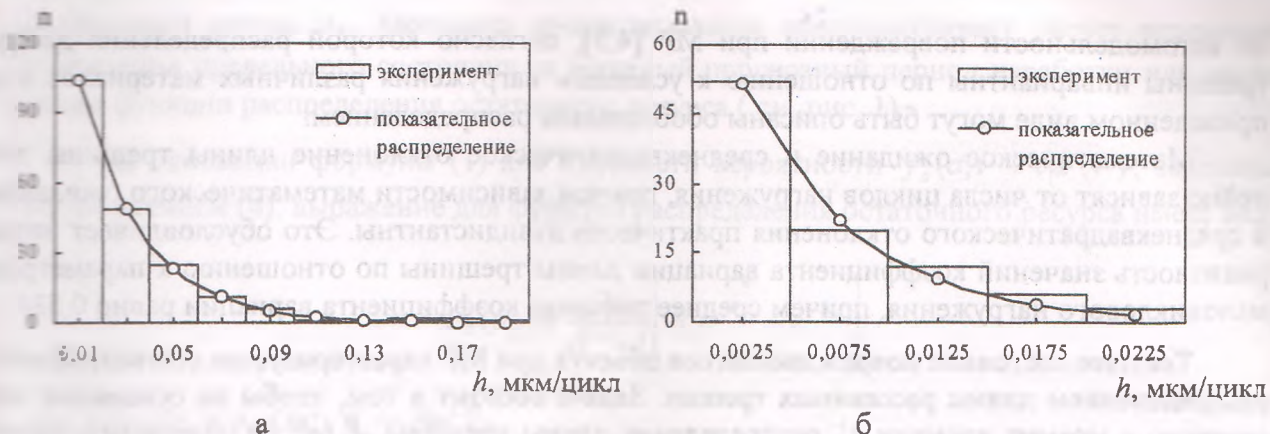


Рис. 2. Экспериментальные распределения количества поверхностных трещин по скоростям роста для различных режимов малоциклового нагружения:

а -  $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_{\max}=1100$  МПа,  $N=1000$  циклов; б -  $T=400^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma_{\max}=980$  МПа,  $N=2000$  циклов

Согласно экспериментальным данным для различных величин циклических напряжений, температуры независимо от продолжительности нагружения длина рассеянных трещин описывается логарифмически-нормальным, а в диапазоне длин, превышающих математическое ожидание, - показательным распределениями. При совмещении всех распределений, полученных для различных режимов нагружения и чисел циклов наработки, точки эмпирических гистограмм в относительных координатах достаточно тесно группируются между собой и укладываются в узкую полосу разброса (рис. 3). Тем самым подтверждается гипотеза

$$g_a = m_a n_a / \delta_n$$

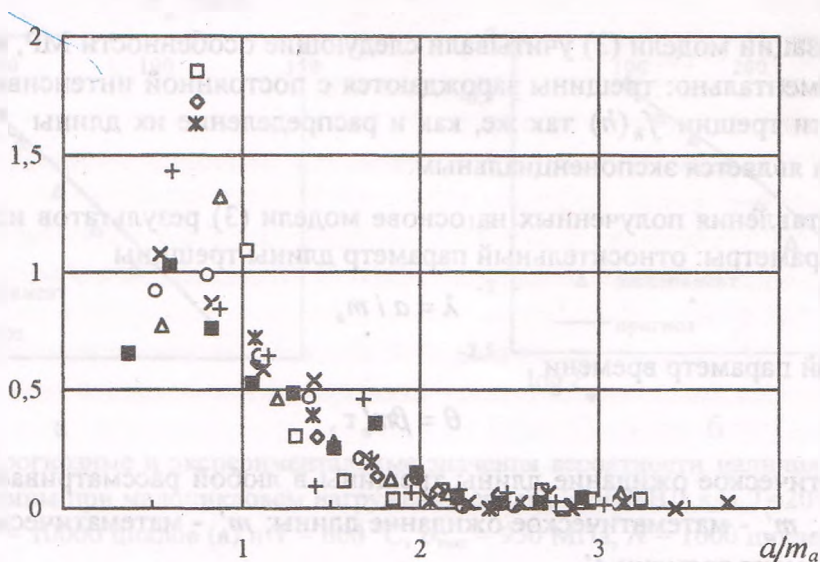


Рис. 3. Обобщение экспериментальных распределений длины трещины, нормированной к ее математическому ожиданию, при различных режимах малоциклового нагружения сплава ЭИ698ВД:

□ -  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{\max}=1000$  МПа;  $N=2000$  циклов; ◇ -  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{\max}=1000$  МПа;  $N=10000$  циклов; Δ -  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{\max}=1100$  МПа;  $N=500$  циклов; ○ -  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{\max}=1100$  МПа;  $N=1500$  циклов; × -  $T=20^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{\max}=1150$  МПа;  $N=500$  циклов; \* -  $T=400^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{\max}=980$  МПа;  $N=2000$  циклов; + -  $T=400^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{\max}=980$  МПа;  $N=5000$  циклов; ■ -  $T=600^{\circ}\text{C}$ ;  $\sigma_{\max}=950$  МПа;  $N=200$  циклов

об автономности повреждений при МР [4,5], согласно которой распределения длины трещины инвариантны по отношению к условиям нагружения различных материалов и в приведенном виде могут быть описаны обобщенным распределением.

Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение длины трещины линейно зависят от числа циклов нагружения, причем зависимости математического ожидания и среднеквадратического отклонения практически эквидистантны. Это обуславливает инвариантность значений коэффициента вариации длины трещины по отношению к параметрам малоциклового нагружения, причем среднее значение коэффициента вариации равно 0,534.

Текущее состояние повреждающегося объекта при МР характеризуется статистическим распределением длины рассеянных трещин. Задача состоит в том, чтобы на основании известного в момент времени  $t'$  распределения длины трещины  $f_a(a'; t')$  определить плотность распределения  $f_a(a; t' + \tau | a'; t')$  в момент времени  $t' + \tau$ , где  $\tau$  - отрезок времени, на который осуществляется прогноз (см. рис. 1). Предельное состояние повреждающегося объекта задано условием наличия трещины недопустимой длины  $a_*$ .

Введем ограниченный временной интервал  $\tau$  и допустим, что каждая трещина может распространяться с постоянной случайной скоростью  $h$  только в пределах данного интервала, причем  $h \in [0, \infty)$ . Пусть  $f_h(h; t')$  - известная плотность вероятности скорости роста трещин, зародившихся до момента времени  $t'$ .

Общее выражение для искомого распределения имеет вид

$$f_a(a; t' + \tau | a'; t') = \mu \int_0^a f_a(a'; t') f_h\left(\frac{a - a'}{\tau}; t'\right) da'. \quad (3)$$

При реализации модели (3) учитывали следующие особенности МР, которые были получены экспериментально: трещины зарождаются с постоянной интенсивностью  $\mu$ , распределение скорости трещин  $f_h(h)$  так же, как и распределение их длины  $f_a(a'; t')$ , в любой момент времени является экспоненциальным.

Для сопоставления полученных на основе модели (3) результатов использовались относительные параметры: относительный параметр длины трещины

$$\lambda = a / m_a$$

и относительный параметр времени

$$\theta = \beta m'_h \tau,$$

где  $m_a$  - математическое ожидание длины трещины в любой рассматриваемый момент времени;  $\beta = 1 / m'_a$ ;  $m'_a$  - математическое ожидание длины;  $m'_h$  - математическое ожидание скорости роста в момент времени  $t'$ .

После интегрирования выражения (3) при  $\mu = \text{const}$  получено распределение

$$f(\lambda; \theta) = \frac{\theta + 1}{\theta - 1} \left[ e^{\frac{(\theta+1)\lambda}{\theta}} - e^{-(\theta+1)\lambda} \right]. \quad (4)$$

Расчеты, проведенные по формуле (4), показали, что кривые полученных распределений подобны. В относительных координатах они для различных значений безразмерного параметра времени  $\theta$  практически совпадают.

Полученное распределение является базовыми для прогнозирования остаточного ресурса объекта до предельного состояния, которое задается условием наличия трещины не-

допустимой длины  $a_*$ . Методика прогнозирования предусматривает расчет вероятности реализации предельного состояния за заданный прогнозный период наработки или определение функции распределения остаточного ресурса ( см. рис. 1).

На основании формулы (1) для плотности вероятности  $f_a(a; t' + \tau | a'; t')$ , задаваемой соотношением (4), выражение для функции распределения остаточного ресурса имеет вид

$$F_T(\theta_r) = \frac{1}{\theta_r - 1} \left( \theta_r e^{-\frac{\lambda_*}{\theta_r}} - e^{-\lambda_*} \right), \quad (5)$$

где  $\lambda_* = \beta a_* = a_* / m'_a$ ;  $\theta_r = \beta m'_h T_r$ .

Для нормированной вероятности предельного состояния  $\gamma$  получено выражение, позволяющее производить расчетную оценку остаточного гамма-процентного ресурса:

$$T_\gamma = \frac{m_l}{2m_h} \left[ \sqrt{4(1-\gamma) \exp(\lambda_*) - 3} - 1 \right]. \quad (6)$$

Исходными данными для прогнозирования остаточного ресурса являются средние значения длины  $m'_a$  и скорости  $m'_h$  роста трещины на момент контроля состояния поверхности объекта.

Достоверность методики прогнозирования подтверждается удовлетворительным согласованием расчетных прогнозных значений вероятности наличия трещин заданной длины с экспериментальными данными, полученными при малоцикловом нагружении сплава ЭИ698ВД (рис. 4).

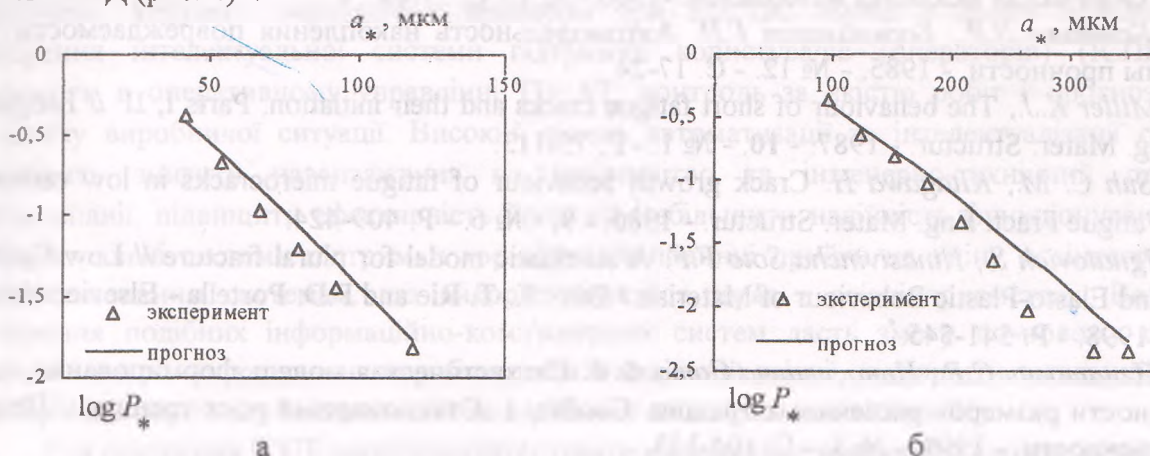


Рис. 4. Прогнозные и экспериментальные значения вероятности наличия трещины заданной длины при малоцикловом нагружении сплава ЭИ698ВД для  $T=20^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_{\max}=1000$  МПа,  $N=10000$  циклов (а) и  $T=600^\circ\text{C}$ ,  $\sigma_{\max}=950$  МПа,  $N=1000$  циклов (б)

На рис. 4 линиями показано изменение логарифма вероятности  $P_*$  - вероятности наличия трещины длиной  $a_*$ . Эту вероятность рассчитывали по формуле (5) для различных  $a_*$  при фиксированном  $\theta_r$  ( $P_* \equiv F_T(\theta_r)$ ). Точками отмечены эмпирические значения вероятности наличия трещины с заданной длиной  $a_*$ . Соответствие расчетных и экспериментальных данных удовлетворительно.

Таким образом установлено, что при асимметричном малоцикловом нагружении хромоникелевого сплава ЭИ698ВД на поверхности образцов происходит непрерывное зарож-

дение новых и рост уже имеющихся малых трещин. Эмпирические распределения длины трещины инвариантны по отношению к наработке и условиям нагружения и могут быть описаны обобщенным распределением.

Большинство эмпирических гистограмм распределения количества трещин по их длинам описываются логарифмически-нормальным распределением и гамма-распределением. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение длины трещины линейно зависят от числа циклов нагружения. В результате исследования установлена инвариантность значений коэффициента вариации длины трещины по отношению к параметрам малоциклового нагружения, значительная неоднородность значений скорости МТ. Для всех видов и режимов нагружения распределения скорости трещин удовлетворительно аппроксимируются экспоненциальным законом.

Разработанная методика дает возможность прогнозировать остаточный ресурс объекта до предельного состояния, задаваемого условием наличия трещины недопустимой длины. Полученное для краткосрочного прогноза выражение позволяет производить расчетную оценку остаточного гамма-процентного ресурса.

#### Список литературы

1. Документ ИКАО "Техническое руководство по летной годности" (Doc 9051-AN/896). ИКАО. 2-е изд. 1987.
2. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник: В 2 т./ Ред. В.В. Клюев. - М.: Машиностроение, 1986. - Т. 1. - 488 с.; Т. 2. - 352 с.
3. Немец Я. Развитие усталостных трещин // Проблемы прочности. - 1988. - № 7. - С. 9-18.
4. Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. Методы подобия в механике и физике разрушения // Физико-химическая механика материалов. - 1986. - № 1. - С. 57-62.
5. Ботвина Л.Р., Баренблатт Г.И. Автомодельность накопления повреждаемости // Проблемы прочности. - 1985. - № 12. - С. 17-24.
6. Miller K.J., The behaviour of short fatigue cracks and their initiation. Parts I, II // Fatigue Fract. Eng. Mater. Structur. - 1987. - 10. - № 1. - P. 75-113.
7. Suh C. M., Kitagawa H. Crack growth behaviour of fatigue microcracks in low carbon steels // Fatigue Fract. Eng. Mater. Structur. - 1986. - 9. - № 6. - P. 409-424.
8. Ignatovich S., Ninasivinha Soto F.F. A stochastic model for plural fracture // Low Cycle Fatigue and Elasto-Plastic Behaviour of Materials / Eds.: K.-T. Rie and P.D. Portella - Elsevier. Amsterdam, 1998. - P. 541-545.
9. Игнатович С.Р., Нинасивинча Сото Ф.Ф. Стохастическая модель формирования неоднородности размеров рассеянных трещин. Сообщ. 1. Стационарный рост трещин // Проблемы прочности. - 1999. - № 3. - С. 104-113.
10. Теоретическое и эмпирические распределения длин рассеянных поверхностных трещин / С.Р. Игнатович, Г.А. Трокоз, С.И. Йовенко, Н.В. Грищенко // Проблемы прочности. - 1992. - № 1. - С. 7-9.
11. Fedelich B., Frenz H., Österle W., Stark K. Experimental and numerical evaluation of fatigue crack initiation and propagation for IN738LC at 850°C // Mechanisms and Mechanics of Damage and Failure, ECF 11, eds. J. Petit. - London: EMAS Chameleon Press, 1996. - P. 1237-1242.
12. Болотин В.В. Ресурс машин и конструкций. - М.: Машиностроение, 1990. - 448 с.
13. Игнатович С.Р. Метод прогнозирования наработки конструкционных материалов до формирования трещины предельной длины // Проблемы прочности. - 1996. - № 5. - С. 69-75.

Стаття надійшла до редакції 27 жовтня 1999 року.