

УДК 539.421

## ИССЛЕДОВАНИЕ СКОРОСТИ РОСТА УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ АК6 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ В ОБЛАСТИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ

©2013 И. П. Аистов<sup>1</sup>, К. А. Вансович<sup>1</sup>, А. Н. Крючков<sup>2</sup><sup>1</sup>Омский государственный технический университет<sup>2</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Предложен единый критерий роста усталостных трещин для различной степени двухосности напряжённого состояния. Исследовано напряжённое состояние образца. Установлено влияние двухосного нагружения на скорость роста усталостной трещины и её связь с коэффициентом трёхосности напряжённого состояния, которое может быть вычислено в окрестности вершины трещины.

*Усталостная поверхностная трещина, скорость роста трещины, напряжённое состояние трещины.*

Алюминиевые сплавы нашли широкое применение в машиностроении, т.к. обладают высокими физико-механическими свойствами.

Практика эксплуатации нагруженных несущих конструкций, узлов и агрегатов, использующих детали и элементы, изготовленные из алюминиевых сплавов, показывает, что одной из основных причин происходящих в них разрушений является усталостное разрушение. Анализ причин таких разрушений свидетельствует, что распространение усталостной трещины может происходить в течение длительного периода времени. Это означает, что конструкция, нагруженная статическими или циклическими нагрузками, может сохранять свою прочность даже при наличии трещины. Для того чтобы определить остаточную долговечность такой конструкции, назначить ресурс её работы и периодичность профилактических проверок, необходимо уметь предсказывать, как будет развиваться трещина при заданных режимах эксплуатации и каким будет её критический размер.

С точки зрения механики разрушения скорость роста усталостных трещин зависит от величины размаха коэффициента интенсивности напряжений за цикл нагружения  $\Delta K_I$ . При одноосном

нагружении скорость роста усталостных трещин нормального отрыва удовлетворительно описывается формулой Пэриса [1]

$$da/dN = C \cdot (\Delta K_I)^n, \quad (1)$$

где  $C$ ,  $n$  – константы материала;  $a$  – размер трещины;  $N$  – число циклов нагружения.

Применение этой формулы для описания скорости роста усталостных трещин при двухосном нагружении привело к противоречивому результату: в одних случаях скорость роста трещин оказалась выше полученной экспериментально, а в других ниже [2, 3]. В связи с этим проведено изучение кинетики роста поверхностных трещин, находящихся в поле двухосного напряжённого состояния. Для проведения исследований был выбран хорошо деформирующийся алюминиевый сплав АК6, нашедший широкое применение для изготовления штампованных и кованных деталей сложной формы.

Для испытаний были использованы крестообразные образцы с толщиной рабочей части 10 мм (рис. 1). Двухосное нагружение реализовано на

испытательной машине ГРМ-I с пульсатором при помощи специально разработанных и изготовленных приспособлений (рис. 2).

Степень двухосности номинального напряжённого состояния, т.е. без учёта трещины, определялась величиной коэффициента двухосности нагружения  $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$  (рис. 1). Вертикальные напряжения  $\sigma_y$  направлены перпендикулярно плоскости трещины и в процессе нагружения раскрывают её. Горизонтальные напряжения  $\sigma_x$  направлены параллельно плоскости трещины и, формально, наличие трещины не влияет на их величину. При одноосном растяжении, когда  $\sigma_x = 0$ , считаем, что  $\lambda = 0$ ; при растяжении-сжатии была реализована величина  $\lambda = -0,9$ ; при двухосном растяжении –  $\lambda = +0,9$ .

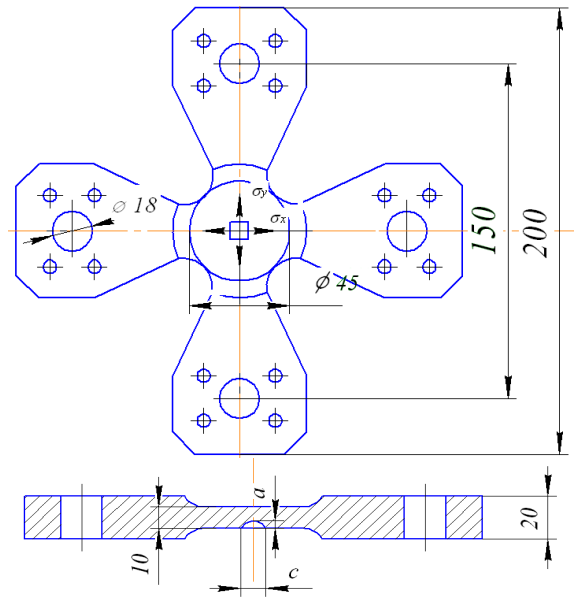
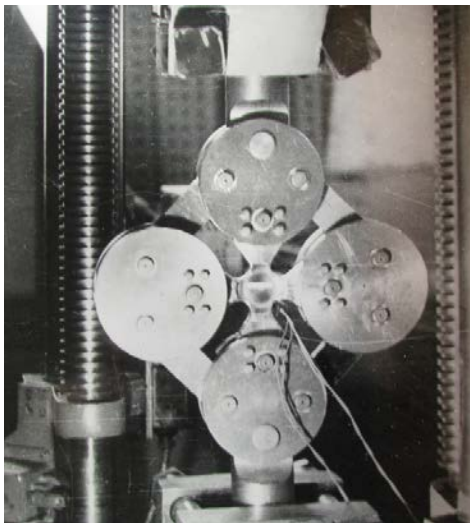


Рис. 1. Образец для двухосных испытаний:  
а – глубина полуэллиптической поверхностной трещины; с – размер трещины на поверхности образца



а



б

Рис. 2. Приспособления для двухосных испытаний:  
а – растяжение-сжатие; б – растяжение-растяжение

Как показали испытания, независимо от формы концентратора, вида нагружения и уровня напряжений с момента зарождения трещины её фронт стремится принять форму полуокружности (рис. 3). В дальнейшем, по мере роста трещины, её полукруглая форма сохраняется почти до момента выхода на заднюю поверхность. Такая

«устойчивая» форма несквозной трещины позволяет определять её глубину  $a$  по результатам измерений размеров трещины  $c$ , сделанных на передней поверхности образца. В проведённых экспериментах считалось, что скорость роста несквозных трещин по всем направлениям, нормальным фронту трещины, одинакова.

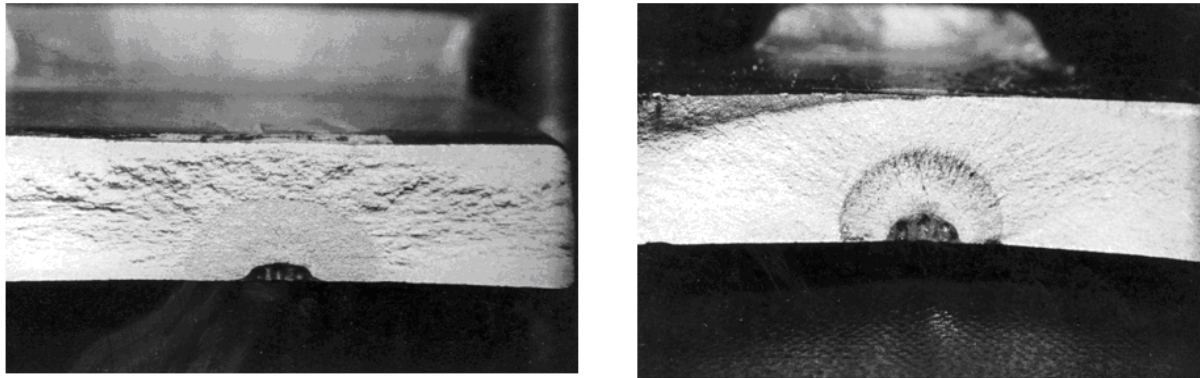


Рис. 3. Определение формы поверхностной трещины

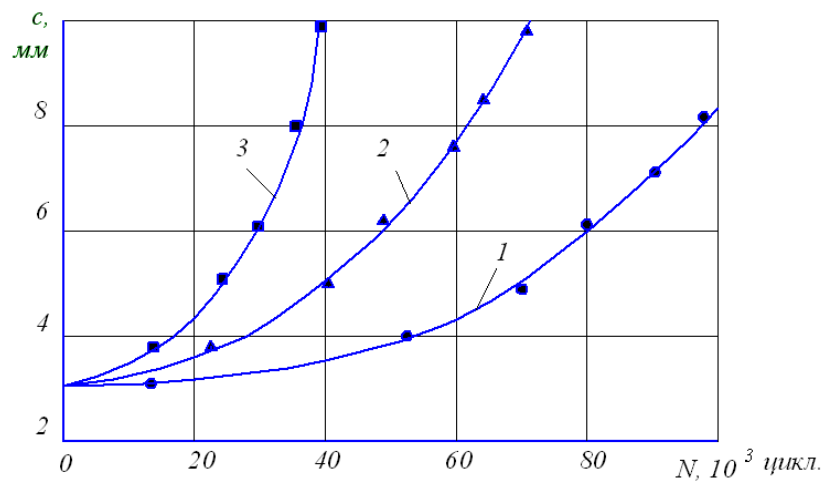


Рис. 4. Влияние способа нагружения крестообразного образца из сплава АК6 на рост усталостных трещин ( $\sigma_y = 120$  МПа):

1 -  $\lambda = - 0,9$ ; 2 -  $\lambda = 0$ ; 3 -  $\lambda = + 0,9$

В процессе испытаний через определённое число циклов нагружения измерялся размер трещины  $c$  по передней поверхности образца. Результаты этих измерений представлены на рис. 4. Графическим дифференцированием этих диаграмм определялась скорость роста усталостных трещин по передней поверхности образца  $dc/dN$ .

При растяжении-сжатии скорость роста трещины оказалась ниже, а при двухосном растяжении – выше, чем при одноосном нагружении. Результаты испытаний представлены в координатах  $da/dN - \Delta K_I$  (рис. 5).

Величина  $K_I$  вычислялась по формуле, которая учитывает только номинальные раскрывающие напряжения ( $\sigma = \sigma_y$ ) [4]:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} / \int_0^{\pi/2} \left( 1 - \frac{c^2 - a^2}{c^2} \sin^2 \varphi \right)^{1/2} d\varphi,$$

где  $\sigma$  – напряжения, перпендикулярные плоскости трещины;  $a$  – глубина полуэллиптической поверхностной трещины;  $c$  – размер трещины на поверхности образца;  $\varphi$  – текущая угловая координата, определяющая положение точки по фронту трещины.

Большой разброс экспериментальных точек на диаграмме не позволил

получить удовлетворительной аппроксимации зависимости  $\ln(da/dN) - \ln \Delta K_I$  одной прямой линией, описываемой формулой Пэриса в логарифмических координатах. Однако для каждого вида нагружения  $\lambda$  результаты испытаний удовлетворительно аппроксимируются тремя прямыми линиями в зависимости от конкретного

вида нагружения. Из этого следует, что скорость роста трещин необходимо связывать не только с величиной раскрывающих напряжений  $\sigma_y$  и коэффициентом интенсивности напряжений  $K_I$ , но и с характеристикой  $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$  напряжённого состояния в области трещины.

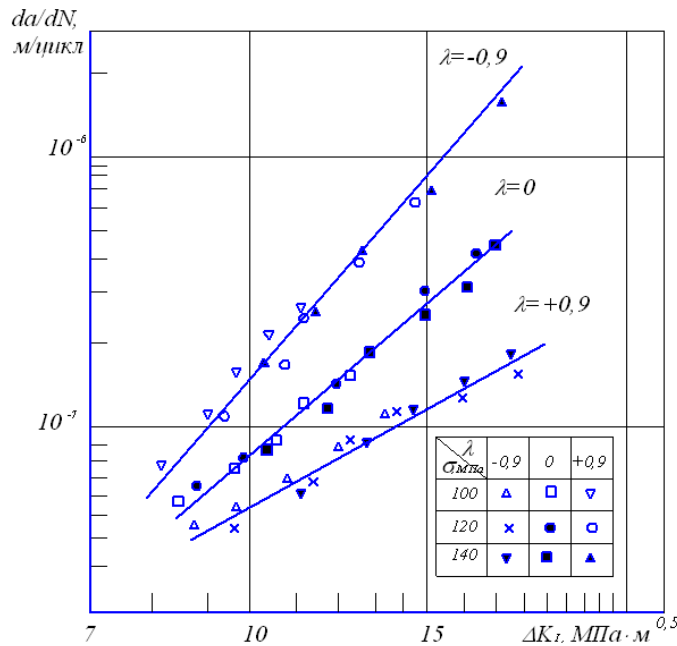


Рис. 5. Влияние вида нагружения  $\lambda$  на кинетические диаграммы усталостного разрушения

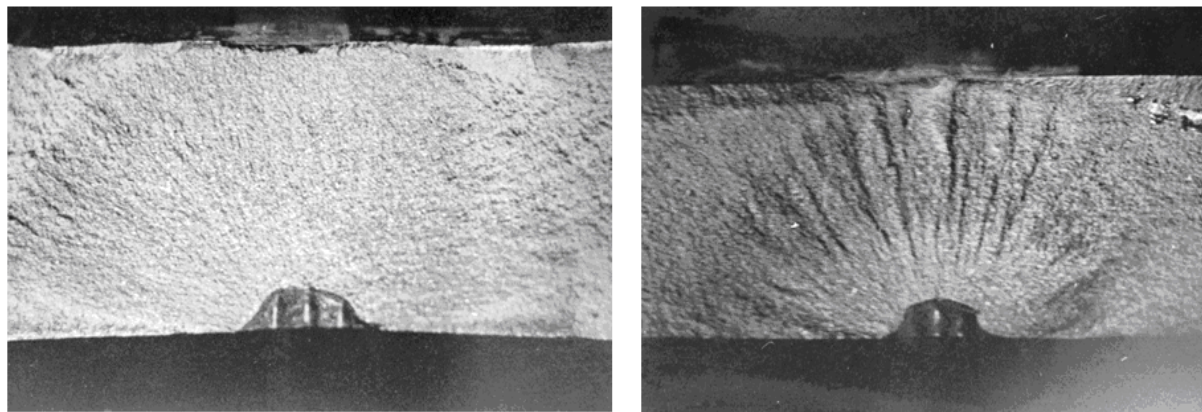
В работе [5] был предложен критерий, определяющий кинетику роста усталостных поверхностных трещин, развивающихся по типу нормального отрыва, на стадии стабильного роста при двухосном стационарном нагружении в виде, аналогичном формуле Пэриса (1):

$$da / dN = C(\sqrt{1 + k\lambda} \cdot \Delta K_I)^n \quad \text{или} \quad da / dN = C(\Delta K_I^*)^n, \quad (2)$$

где  $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$  – коэффициент двухосности напряжённого состояния. Критерий роста трещины  $K_I^*$  был назван эквивалентным коэффициентом интенсивности напряжений.

Однако коэффициент двухосности  $\lambda = \sigma_x / \sigma_y$  представляет собой отношение номинальных напряжений, в поле кото-

рых развивается трещина, и поэтому лишь косвенно влияет на напряжённое состояние в вершине трещины. Разрушение, которое происходит вдоль фронта трещины, определяется локальным напряжённым состоянием в каждой его точке. Поэтому естественно перейти от параметров, характеризующих общее напряжённое состояние в рабочей части образца, к параметрам, характеризующим напряжённое состояние в вершине трещины. Физические явления, определяющие разрушение при развитии усталостных трещин, необходимо связывать с изменением напряжённого состояния в их вершине. В пользу такого подхода свидетельствуют результаты сравнения поверхностей изломов при одноосном и двухосном нагружении (рис. 6).



1)

2)

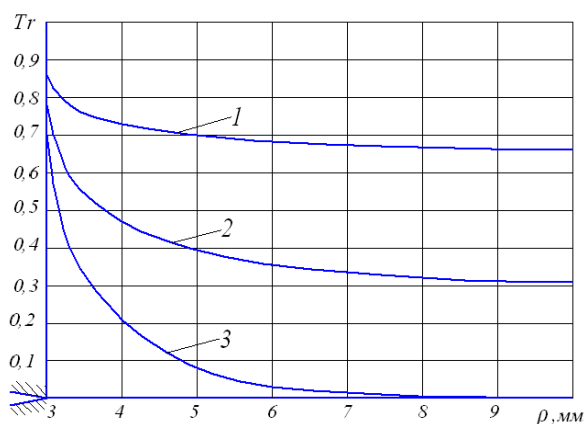
Рис. 6. Сравнение поверхностей разрушения: 1 – одноосное растяжение; 2 – растяжение-сжатие

Представляется целесообразным разработать такой критерий, который позволяет построить единую кинетическую диаграмму, исходя из физических представлений о процессе разрушения.

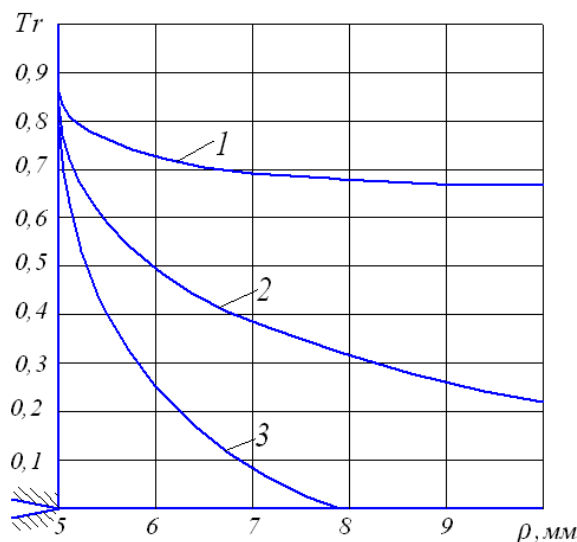
Для выявления характеристики напряжённого состояния, которая бы отражала тенденции в развитии трещины при различных условиях нагружения, рассматривались зависимости типа  $da/dN = f(K_I, \sigma_{ij})$ , где  $\sigma_{ij}$  – тензор напряжений в области распространения усталостной трещины. Для вычисления напряжений  $\sigma_{ij}$  в вершине трещины использовалась программа ANSYS.

В результате проведённых исследований установлено, что за параметр, влияющий на изменение скорости роста усталостной трещины при различной степени двухосности  $\lambda$  напряжённого состояния, можно принять коэффициент трёхосности  $Tr = \sigma_0/|\sigma_1|$ , где  $\sigma_0$  – среднее напряжение;  $\sigma_1$  – наибольшее главное напряжение.

На рис. 7 представлены диаграммы, которые показывают изменение коэффициента трёхосности  $Tr$  при удалении от вершины трещины на расстояние  $\rho$ . Диаграммы построены для срединного сечения смоделированного образца толщиной 10 мм.



а – трещина глубиной  $a = 3,5$  мм



б – трещина глубиной  $a = 7$  мм

Рис. 7. Диаграммы коэффициента трёхосности  $Tr$  в вершине поверхностной трещины при различных видах нагружения: 1 -  $\lambda = -0,9$ ; 2 -  $\lambda = 0$ ; 3 -  $\lambda = +0,9$

Анализ этих диаграмм позволил установить, что для трещин различной глубины ( $a=3,5$  мм и 7 мм) схожими являются отношения коэффициентов трёхосности, вычисленные на расстоянии  $0,1a$  и обозначенные как  $Tr_{0,1}$ .

Коэффициент трёхосности  $Tr$  впервые был предложен Джексоном [6]. Теоретически он может изменяться от  $-1$  (гидростатическое сжатие) до  $+1$  (гидростатическое растяжение). Опыты показали [7], что при изменении коэффициента трёхосности изменяется способность  $Tr$  материала к пластическому деформированию. Увеличение коэффициента трёхосности  $Tr$  увеличивает степень стеснения пластической деформации и разрушение становится более хрупким. Охрупчивание приводит к тому, что большая часть необратимой энергии затрачивается на образование новой поверхности, а не поглощается в результате пластического деформирования.

При определении степени влияния коэффициента трёхосности  $Tr$  на скорость роста трещины были сделаны следующие предположения:

1) скорость роста усталостной трещины в первую очередь зависит от величины раскрывающих напряжений  $\sigma_y$  (рис.1), которые в вершине трещины описываются коэффициентом интенсивности напряжений  $K_I$  и в упругой постановке задачи не зависят от степени двухосности нагружения;

2) влияние двухосного нагружения на скорость роста усталостной трещины связано с коэффициентом трёхосности напряжённого состояния  $Tr_{0,1}$  в вершине трещины;

3) на стадии стабильного роста трещины скорость распространения её определяется единственным параметром

$$K_I^{**} = f(K_I, Tr_{0,1});$$

4) для сплава АК6 считается неизменным показатель степени  $n=4$  как в уравнении Пэриса (1), так и во вновь полученных зависимостях скорости роста трещин от вида напряжённого состояния.

На основании сделанных предположений представим эквивалентный коэффициент интенсивности напряжений в виде

$$K_I^{**} = Tr_{0,1}^x \cdot K_I, \quad (3)$$

где  $x$  – показатель степени, который требуется определить.

Запишем это выражение для двух различных видов нагружения при одинаковых размерах трещины и одинаковом раскрывающем напряжении  $\sigma_y$ :

$$K_{I(1)}^{**} = Tr_{0,1(1)}^x \cdot K_I,$$

$$K_{I(2)}^{**} = Tr_{0,1(2)}^x \cdot K_I.$$

Составим отношение левых и правых частей, прологарифмируем его и получим выражение для определения показателя степени:

$$x = \frac{\ln(K_{I(1)}^{**}/K_{I(2)}^{**})}{\ln(Tr_{0,1(1)}/Tr_{0,1(2)})}. \quad (4)$$

Отношение коэффициентов трёхосности  $Tr_{0,1(1)}/Tr_{0,1(2)}$  для различных видов нагружения можно определить на основе сравнения результатов исследования напряжённого состояния в вершине трещины с использованием метода конечных элементов.

Результаты вычислений приведены в табл. 1.



Таблица 1. Результаты расчётов отношений коэффициентов трёхосности  $Tr_{0,1(1)}/Tr_{0,1(2)}$  и эквивалентных коэффициентов интенсивности напряжений  $K_{I(1)}^{**}/K_{I(2)}^{**}$

N п/п	Глубина трещины $a$ , мм	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$Tr_{0,1(1)}$	$Tr_{0,1(2)}$	$\frac{Tr_{0,1(1)}}{Tr_{0,1(2)}}$	$\frac{da}{dN_1} \cdot 10^7$ , м/цикл	$\frac{da}{dN_2} \cdot 10^7$ , м/цикл	$\frac{da}{dN_1} \cdot \frac{dN_1}{da} \cdot \frac{da}{dN_2}$	$\frac{K_{I(1)}^{**}}{K_{I(2)}^{**}}$
1	3	0,9	0	0,78	0,56	1,39	0,13	0,07	1,86	1,17
2	3	0	-0,9	0,56	0,40	1,40	0,07	0,04	1,75	1,15
3	5	0,9	0	0,78	0,57	1,37	0,30	0,16	1,88	1,17
4	5	0	-0,9	0,57	0,41	1,39	0,16	0,09	1,78	1,16
5	7	0,9	0	0,73	0,52	1,40	0,60	0,34	1,76	1,15
6	7	0	-0,9	0,52	0,36	1,44	0,34	0,19	1,79	1,16

Чтобы определить отношение  $K_{I(1)}^{**}/K_{I(2)}^{**}$ , по аналогии с формулой Пэриса (1) запишем выражение для скорости роста трещины при различных видах нагружения:

$$(da/dN)_{(1)} = C_1 (\Delta K_{I(1)}^{**})^n,$$

$$(da/dN)_{(2)} = C_1 (\Delta K_{I(2)}^{**})^n.$$

Отсюда, с учётом  $n = 4$ , получаем требуемое соотношение

$$\frac{K_{I(1)}^{**}}{K_{I(2)}^{**}} = \left[ \frac{(da/dN)_{(1)}}{(da/dN)_{(2)}} \right]^{1/4}.$$

Отношения скоростей роста усталостных поверхностных трещин  $(da/dN)_{(1)}$  и  $(da/dN)_{(2)}$ , приведённые в табл. 1, определялись при различных видах нагружения для одинаковых размеров трещины.

Усредняя полученные результаты, определим численные значения

$$K_{I(1)}^{**}/K_{I(2)}^{**} \approx 1,16, \quad Tr_{(1)}/Tr_{(2)} \approx 1,40. \quad (5)$$

Подставляя значения (5) в формулу (4), получим  $x \approx 0,44$ . После подстановки этой величины в уравнение (3) определим выражение для эквивалентного коэффи-

циента интенсивности напряжений  $K_I^{**}$  для сплава АК6:

$$K_I^{**} = Tr^{0,44} \cdot K_I.$$

Тогда формулу для определения скорости роста трещины, по аналогии с формулой Пэриса (1), запишем в следующем виде:

$$da/dN = C_1 \cdot (\Delta K_I^{**})^4 \quad \text{или}$$

$$da/dN = C_1 \cdot (Tr^{0,44} \cdot \Delta K_I)^4. \quad (6)$$

В формуле (6) константа  $C_1$  отличается от константы  $C$ , которая присутствует в уравнении (2).

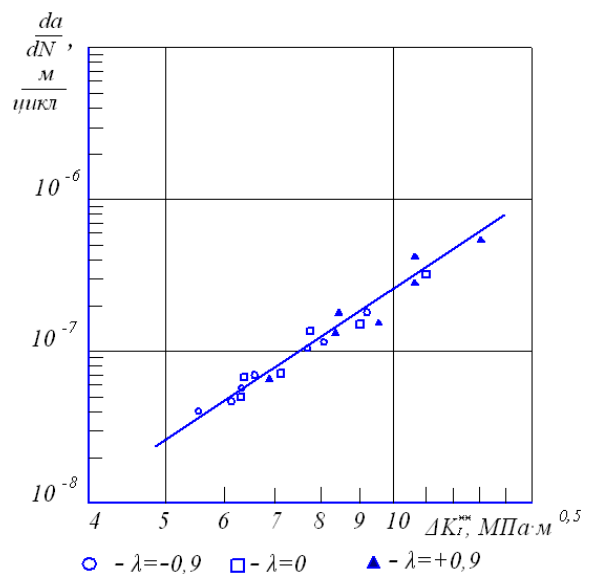


Рис. 8. Обобщённая кинетическая диаграмма

По результатам проведённых экспериментов на рис. 8 приведена обобщённая кинетическая диаграмма, построенная в логарифмических координатах  $da/dN - \Delta K_I^{**}$ .

Из диаграммы следует, что все полученные точки располагаются около прямой и, следовательно, могут быть описаны единым уравнением независимо от вида напряжённого состояния в вершине трещины. Определено, что  $C_1 = 0,95 \cdot 10^{-11}$ . Тогда для сплава АК-6 получим следующее уравнение скорости роста усталостной трещины, учитывающее характер напряжённого состояния в её вершине:

$$da/dN = 0,95 \cdot 10^{-11} (Tr^{0,44} \cdot \Delta K_I)^4. \quad (7)$$

Выражение (7) имеет определённые преимущества по сравнению с формулой (2). Оно позволяет определять изменение скорости роста усталостных трещин в сплаве АК-6 не только от степени двухосности напряжённого состояния в той области, где находится трещина, но и от других причин, вызывающих изменение вида напряжённого состояния в вершине трещины. Такими причинами могут являться: способ нагружения и соотношение между нагрузками, форма и размеры детали и трещины и т.п.

Подход, использованный в данном исследовании, может быть распространён для оценки кинетики роста усталостных трещин в зависимости от характеристик их напряжённого состояния и для других сплавов.

### Библиографический список

1. Paris, P. A Critical Analysis of Crack Propagation Laws [Text] / P. Paris, F. Erdogan // *Jorn. Basic Eng.* – 1963. – Vol. 85, № 4. – P. 528-534.
2. Miller, K.J. Fatigue Under Complex Stress [Text] / K.J. Miller // *Metal Science.* – 1977. – Vol. 2, № 8-9. – P. 432-438.
3. Tanaka, K. Fatigue Crack Propagation in Biaxial Stress Fields [Text] / K. Tanaka, T. Hoshide, A. Yamoda, S. Taird // *Fatigue Eng. Mat.* – 1979. – Vol. 2, № 2. – P. 181-194.
4. Shah, R.C. Stress Intensity Factor an Elliptical Crack Approaching the Surface of a Plate in Bending Stress [Text] / R.C. Shah, A.S. Kobajashi // *Stress Analysis and Growth of Crack.* – ASTM. – 1971. – P. 3-21.
5. Вансович, К.А. Критерий оценки скорости роста усталостных трещин в условиях двухосного нагружения [Текст] / К.А. Вансович, И.П. Аистов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2011. – Т. 13, № 3 (31). – С. 57-61.
6. Jackson, L. Two and three dimensional cases of stress concentration and comparison with fatigue tests [Text] / L. Jackson // *Metals Technol.* – 1944. – Vol.11, № 8. – P.59-71.
7. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов [Текст] / С.И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1961. – Т.2. – 376 с.

## RESEARCH OF GROWTH RATE OF FATIGUE CRACKS IN ALUMINUM AK6 ALLOY DEPENDING ON TENSION CHARACTERISTICS IN THE FIELD OF THEIR PROGRESS

© 2013 I. P. Aistov<sup>1</sup>, K. A. Vansovich<sup>1</sup>, A. N. Kruchkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Omsk State Technical University

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University)



The common growth criterion of fatigue cracks is offered for different degree of the biaxial tension. The specimen tension is investigated. Influence of biaxial loading on growth rate of a fatigue crack and its connection with a triaxial coefficient of a tension which can be calculated in an environ of a crack top is install.

*Fatigue surface cracks, rate of a crack growth, stress crack.*

### **Информация об авторах**

**Аистов Игорь Петрович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная экология и безопасность», ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет». E-mail: [aistov\\_i@mail.ru](mailto:aistov_i@mail.ru). Область научных интересов: механика разрушения.

**Вансович Константин Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа, стандартизация и сертификация», доцент, ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет». E-mail: [vansovichka@mail.ru](mailto:vansovichka@mail.ru). Область научных интересов: механика разрушения.

**Крючков Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры автоматических систем энергетических установок, доцент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: [kan@ssau.ru](mailto:kan@ssau.ru). Область научных интересов: расчёт и проектирование динамических систем.

**Aistov Igor Petrovich**, doctor of technical science, professor of the department of industrial ecology and security, Omsk State Technical University. E-mail: [aistov\\_i@mail.ru](mailto:aistov_i@mail.ru). Area of research: fracture mechanics.

**Vansovich Konstantin Alexandrovich**, candidate of technical science, associate professor of the department of oil and gas engineering, Omsk State Technical University. E-mail: [vansovichka@mail.ru](mailto:vansovichka@mail.ru). Area of research: fracture mechanics.

**Kryuchkov Alexander Nicolaevich**, doctor of technical science, professor of the department of automated systems of power plants, associate professor, Samara State Aerospace University (National Research University). E-mail: [kan@ssau.ru](mailto:kan@ssau.ru). Area of research: calculation and design of dynamic systems.