

## ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКИ ПРЕДНАГРУЖЕННЫХ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА АМг6 ПРИ ГИГАЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ В КОРРОЗИОННОЙ СРЕДЕ \*

В.А. Оборин, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

М.А. Сокоиков, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

М.В. Банников, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

Д.Р. Ледон, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

О.Б. Наймарк, *Институт механики сплошных сред УрО РАН*

### Для цитирования:

Оборин В.А., Сокоиков М.А., Банников М.В., Ледон Д.Р., Наймарк О.Б. Долговечность динамически преднагруженных образцов сплава АМг6 при гигацикловой усталости в коррозионной среде // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2022. – № 1. – С. 31–36. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.1.5>

Рассматриваются методика и результаты испытаний динамически преднагруженных образцов из алюминиевого сплава АМг6 в режиме сверхмногоциклового (гигациклового) нагружения (количество циклов  $10^8$ – $10^9$ ). Предварительное нагружение образцов осуществлялось динамическим растяжением на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского при скоростях деформации до  $\sim 10^3$  с<sup>-1</sup>, которое обеспечивало создание контролируемой поврежденности материала для имитации структурных изменений в лопатках вентиляторов авиадвигателей в условиях высокоскоростного соударения с твердыми частицами. После этого образцы подвергали гигацикловому нагружению на ультразвуковой испытательной машине «Shimadzu USF-2000», позволяющей испытывать образцы на базе  $10^8$ – $10^{10}$  циклов с амплитудой до нескольких десятков микрометров и частотой испытаний 20 кГц при воздушном охлаждении и «солевым туманом» (3%NaCl). Морфология поверхностей изломов образцов была детально изучена методами количественной фрактографии.

Отмечается, что при выбранных условиях нагружения существенно возрастает роль внешней среды, морской соляной туман представляет собой один из наиболее агрессивных для летательных аппаратов внешних факторов. На основании полученных данных определены количественные соотношения между механическими свойствами и масштабно-инвариантными (скейлинговыми) характеристиками рельефа поверхностей разрушения,

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590009 «Разработка методических подходов по оценке коррозионного ресурса материалов авиационного назначения при комбинированном (динамическом, ударно-волновом) и последующем гигацикловом нагружении».

формирующихся при динамическом и гигацикловом нагружении по данным профилометрии (интерферометр-профилометр «New-View 5010» с разрешением от 0,1 нм).

**Ключевые слова:** разрушение, гигацикловая усталость, скейлинг, морфология поверхности, уравнение Пэриса, кинетика роста трещины.

### Введение

Элементы конструкции летательных аппаратов подвержены действию сложных комбинированных нагрузок. Учёт влияния случайных статических и динамических нагрузок на долговечность материалов в условиях сверхмногоциклового (гигацикловой) усталости представляется актуальным для авиационного моторостроения в связи с необходимостью оценки надежности (долговечности) элементов конструкций в условиях эксплуатации, например, лопаток газотурбинных двигателей при соударении с твердыми частицами, получившими в литературе название «foreign object damage» [1–4].

Показано, что в области числа циклов нагружения  $10^8$ – $10^{10}$  существенно возрастает роль внешней среды, и проблема оценки ресурса носит междисциплинарный характер [5–7]. Снижение предела усталости может быть вызвано коррозионными процессами, способствующими преодолению усталостной микротрещиной микроструктурных барьеров и зарождению макротрещины. При этом образование поверхностных питтингов не является обязательным, поскольку влияние коррозионной среды, высокого (больше амплитудного) среднего напряжения, способствующего раскрытию малых поверхностных трещин, и низкого циклического напряжения способно привести к развитию трещины критической

длины, вызывающей разрушение. Влияние коррозионной среды может быть недостаточным, чтобы вызвать повреждение материала. Однако совместное действие среды, высокого среднего напряжения цикла, способствующего раскрытию малых усталостных трещин, и низкой приложенной амплитуды напряжения может обеспечить преодоление короткой трещиной структурных барьеров и её подрастание до размера, достаточного для формирования усталостной макротрещины [8].

Настоящая работа направлена на исследование фундаментальных закономерностей разрушения при гигацикловом режиме нагружения, изучению механизмов зарождения и развития усталостных трещин для оценки усталостной и динамической прочности материалов при комбинированном (динамическом) и последующем гигацикловом нагружении в условиях коррозионной среды.

### Материал и условия эксперимента

Исследования проводили на промышленном алюминиевом сплаве АМг6. Его химический состав и некоторые механические свойства представлены в табл. 1 и 2.

Предварительное нагружение образцов (рис. 1) осуществлялось методом динамического растяжения на разрезном стержне Гопкинсона-Кольского (РСГ)

Таблица 1

**Химический состав (в процентном содержании, данные предоставлены производителем)**

Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Be	Ti
92,1	0,10	6,44	0,7	0,24	0,32	0,024	0,0006	0,035

Таблица 2

**Квазистатистические характеристики при растяжении (данные предоставлены производителем)**

Модуль упругости, ГПа	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Максимальное удлинение, %
71	180	355	25

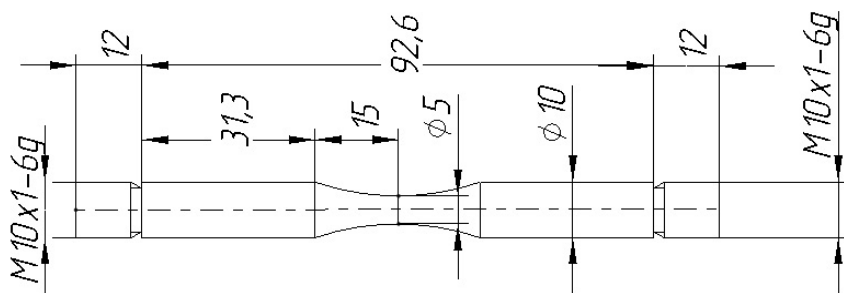


Рис. 1. Геометрия образцов

(рис. 2) при скоростях деформации до  $\sim 10^3 \text{ c}^{-1}$ . С помощью компактной газовой пушки осуществлялось нагружение ударником левого торца мерного (входного) стержня для формирования продольного одномерного импульса сжатия  $\varepsilon_{11}(t)$  (см. рис. 2). Нагружающий импульс сжатия свободно проходит через обойму, экранирующую образец, не вызывая в нем пластической деформации; основная часть волны распространяется через обойму, имеющую высокий предел текучести, во второй (выходной) стержень волной  $\varepsilon_{12}(t)$  и, достигнув свободного торца этого стержня, отражается волной растяжения. Этот импульс растяжения является исходной падающей волной растяжения образца. Импульс растяжения, достигнув образца, частично проходит

через него в первый стержень, частично отражается во второй стержень. Образец при этом претерпевает пластическую деформацию в области, примыкающей к наименьшему сечению, обойма не испытывает растяжения, так как она не скреплена со стержнями.

Образцы, подвергнутые предварительному динамическому нагружению испытывались на гигацикловую усталость. Усталостное нагружение проводилось на испытательной машине резонансного типа «Shimadzu USF-2000» при уровнях напряжений 105–162 МПа и симметричном цикле  $R=-1$ . Охлаждение образцов (рис. 3, а) осуществлялось сжатым воздухом и соляным туманом (3%-ный NaCl). Соляной туман создавали с помощью ультразвукового увлажнителя воздуха.

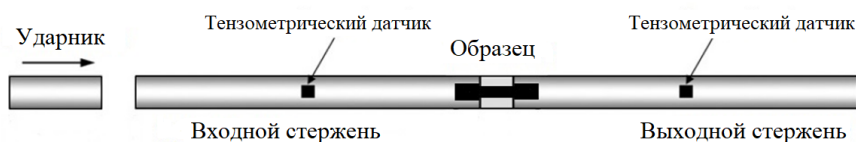


Рис. 2. Разрезной стержень Гопкинсона-Кольского

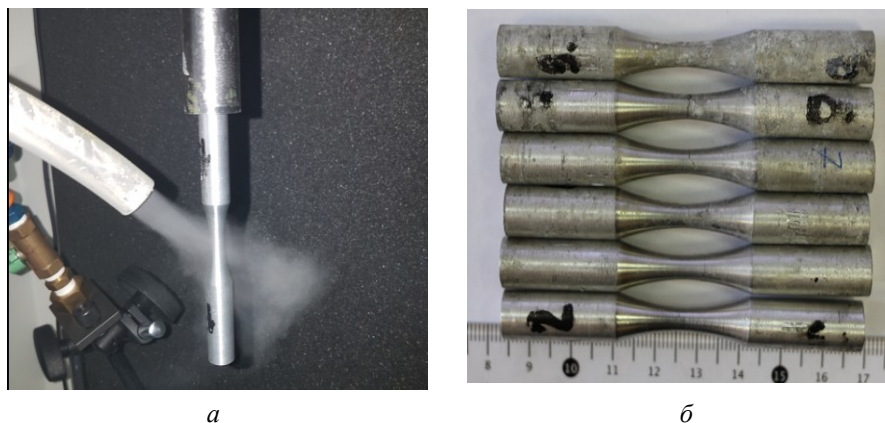


Рис. 3. Испытание образцов на ультразвуковой испытательной машине «Shimadzu USF-2000»: а – при охлаждении солевым туманом 3%-ный NaCl, б – образцы после испытаний

Ультразвуковая испытательная машина позволяет проводить испытания на базе  $10^9$ – $10^{10}$  циклов с амплитудой от одного и до нескольких десятков микрометров частотой 20 кГц, что сокращает время испытания до нескольких дней в отличие от классических усталостных установок, на которых такое число циклов достигается за годы испытаний.

Результаты испытаний представлены на рис. 4. Обнаружено снижение на 15–25% предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава АМгб с уровня напряжения 162 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 121–138 МПа, соответствующего критическому количеству циклов  $\sim 7,5 \cdot 10^8$  (рис. 4, а) при охлаждении сжатым воздухом. Обнаружено снижение предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава с 70 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до 50–60 МПа, что соответствует критическому числу циклов  $\sim 4,2 \cdot 10^8$  при охлаждении соляным туманом (3%-ный NaCl) (рис. 4, б).

### Исследование морфологии поверхностей изломов (фрактальный анализ)

Рельеф на поверхности изломов разрушенных образцов изучали с помощью интерферометра-профилометра New-View 5010» и анализировали методами фрактального анализа [9–11]

для определения условий коррелированного поведения шероховатости, обусловленной многомасштабным развитием поврежденности, для определения условий зарождения и распространения трещин.

При испытаниях сплава АМгб наблюдали два типа разрушения образцов: первый – когда образцы разрушались непосредственно во время эксперимента, второй – когда образцы, обладающие явными признаками разрушения (сильное изменение резонансной частоты испытаний, выход усталостной трещины на поверхность), уже были неспособны продолжать выдерживать усталостную нагрузку на резонансной частоте. Поверхность разрушения образцов первого и второго типа «вскрывали» охлаждением образцов жидким азотом с последующим доломом. Предполагалось, что поверхность разрушения в режиме гигацикловой усталости уже сформировалась в процессе эксперимента и занимает большую часть поверхности разрушения, что сопровождается изменением резонансной частоты испытаний.

При разрушении цилиндрических образцов за число циклов, соответствующих многоциклового усталости ( $10^6$ – $10^7$ ), трещина образуется с поверхности образца. При разрушении предварительно нагруженных образцов из сплава АМгб на базе  $10^8$  циклов и более трещина образуется внутри образца и на поверхности разрушения видна характерная для такого режима усталости область излома –

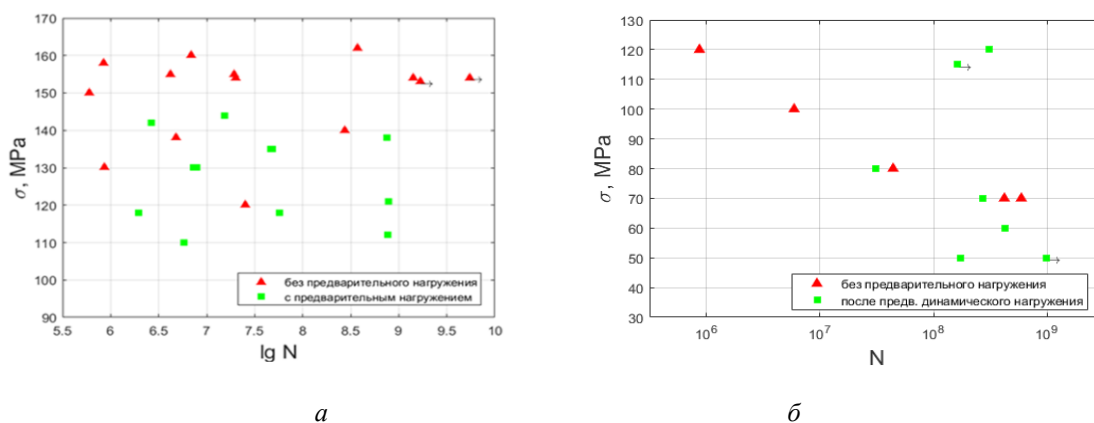


Рис. 4. Долговечность сплава АМгб в случае динамической предварительной нагрузки и при отсутствии предварительной нагрузки: а – воздушное охлаждение; б – охлаждение соляным туманом (3%-ный NaCl)

«рыбий глаз» («fish-eye»), в центре которой находится очаг разрушения, окруженный областью с фрагментированной (субмикрорекристаллической) структурой (рис. 5). Количественный анализ морфологии поверхностей разрушения проводился на интерферометре-профилометре «New-View 5010». Области сканирования распределялись по зоне роста усталостной трещины и анализировались одномерные образы-срезы рельефа поверхности в радиальном направлении.

Для определения минимального (критического) масштаба  $l_{sc}$ , соответствующего установлению длинно-корреляционных взаимодействий, в ансамблях дефектов использовался метод определения показателя Херста [11–12]. По одномерным профилям рельефа поверхности разрушения вычислялась функция  $K(r)$  по формуле

$$K(r) = \left\langle \left( z(x+r) - z(x) \right)^2 \right\rangle_x^{1/2} \propto r^H, \quad (1)$$

где  $K(r)$  – усредненная разность значений

высот рельефа поверхности  $z(x+r)$  и  $z(x)$  на окне размером  $r$ ,  $H$  – показатель Херста (показатель шероховатости).

Представление функции  $K(r)$  в логарифмических координатах в соответствии с соотношением (1) позволяет провести оценку критического масштаба  $l_{sc}$  (рис. 6). Значение нижней границы масштаба скейлинга принималось за значение критического масштаба  $l_{sc}$ , значение верхней границы принималось за значение масштаба связанного с зоной процесса  $L_{pz}$  – областью коррелированного поведения дефектных структур (см. рис. 6).

Сравнение масштабов коррелированного поведения шероховатости рельефа поверхностей разрушения образцов, нагруженных в условиях много- и гигацикловой усталости, позволило выявить существенное уменьшение верхней границы пространственных масштабов, на которой показатель Хёрста остается постоянным для динамически преднагруженных образцов в зоне «fish-eye» (см. рис. 6).

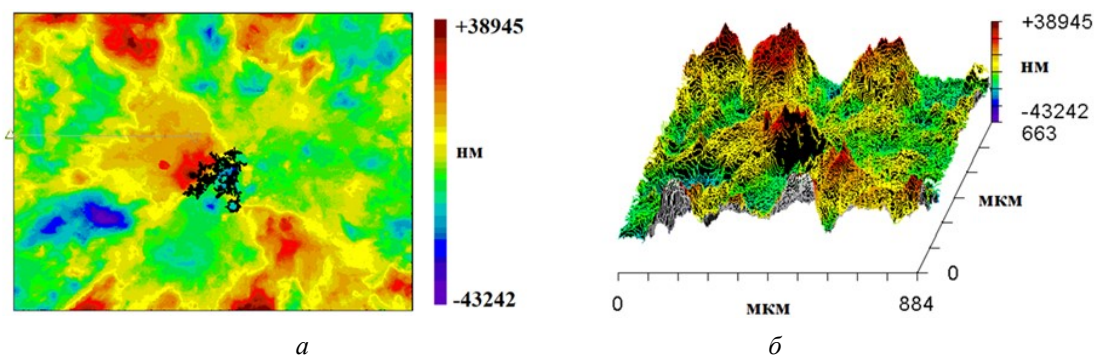


Рис. 5. Морфология поверхности разрушения (увеличение  $\times 80$ ), образец АМгб №2, при воздушном охлаждении ( $\sigma = 120$  МПа,  $N = 7,82 \cdot 10^8$ ): а – карта высот, б – 3-D образ рельефа

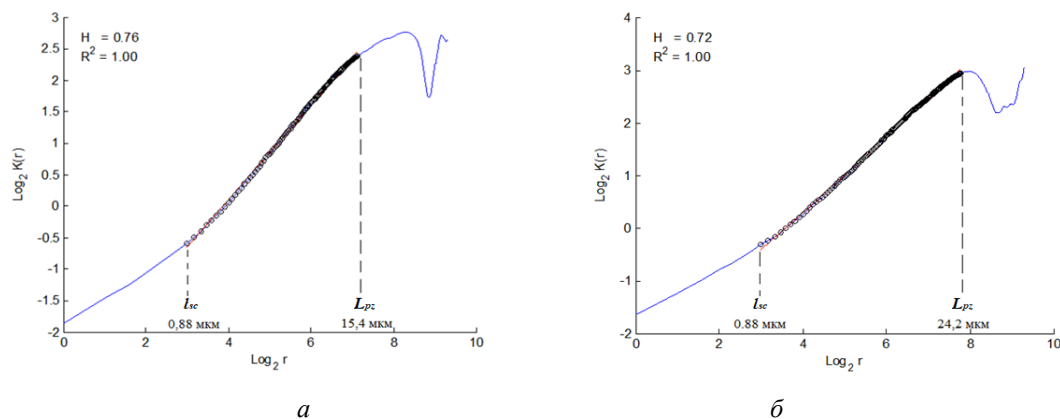


Рис. 6. Характерный вид зависимости  $\log_2 K(r)$  от  $\log_2(r)$  образец АМгб №2 ( $\sigma = 120$  МПа,  $N = 7,82 \cdot 10^8$ ): а – внутри «fish-eye», б – вне «fish-eye»



**Автомодельные закономерности роста усталостной трещины**

Для описания кинетики роста малых трещин («short cracks», меньших размера «трещин Пэриса») предложено феноменологическое соотношение [14–16], которое, наряду с макроскопической характеристикой напряженного состояния в вершине трещины, отражает роль структурных масштабов  $l_{sc}$  на кинетику роста трещин  $dl/dN$  ( $l$  – длина трещины,  $N$  – число циклов):

$$\frac{da}{dN} = l_{sc} \left( \frac{\Delta K_{eff}}{E \sqrt{l_{sc}}} \right)^a, \quad (2)$$

где  $\Delta K_{eff} = \Delta K \left( \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{\beta/\alpha}$  – эффективный коэффициент интенсивности напряжений;  $\Delta K$  – размах коэффициента интенсивности напряжений;  $E$  – модуль Юнга;  $l_{sc}$  – минимальный пространственный

масштаб в окрестности вершины трещины (зоны процесса разрушения), на котором начинают проявляться масштабно-инвариантные закономерности рельефа поверхности разрушения,  $L_{pz}$  – масштаб зоны процесса разрушения в вершине трещины. Значения  $L_{pz}$  и  $l_{sc}$  для образцов с «fish-eye» определены экспериментально на основе исследования корреляционных свойств рельефа поверхности разрушения и вычисления показателя Херста (табл. 3).

На поверхности разрушения можно выделить три характерные области: 1 – очаг разрушения, 2 – зона роста трещины внутри «fish-eye», 3 – зона вблизи с доломом (рис. 7).

Радиусы соответствующих областей были измерены при помощи оптического микроскопа. Для образца №10 (рис. 7, б) они принимают следующие значения: зона 1 –  $l_0 = 76$  мкм, зона 2 –  $l_i = 270$  мкм, зона 3 –  $l_k = 2679$  мкм.

Таблица 3

**Значения показателя Херста  $H$  и критических масштабов  $L_{pz}$  и  $l_{sc}$  для образцов с «fish-eye»**

Номер образца	Удлинение, мм	Скорость ударника, м/с	$\sigma$ , МПа	$\Delta N$ , циклы	Номер зоны	$l_{sc}$ , мкм	$L_{pz}$ , мкм	$H$
2	1,77	40,30	120	$7,82 \cdot 10^8$	1	$0,6 \pm 0,2$	$17,2 \pm 2,2$	$0,63 \pm 0,02$
					2	$0,9 \pm 0,2$	$26,3 \pm 1,9$	$0,62 \pm 0,02$
					3	$0,5 \pm 0,2$	$26,2 \pm 6,1$	$0,49 \pm 0,02$
10	1,74	23,10	138	$7,51 \cdot 10^8$	1	$0,8 \pm 0,2$	$11,6 \pm 2,2$	$0,49 \pm 0,02$
					2	$2,2 \pm 0,9$	$28,4 \pm 3,5$	$0,51 \pm 0,02$
					3	$0,4 \pm 0,2$	$16,6 \pm 1,7$	$0,60 \pm 0,02$

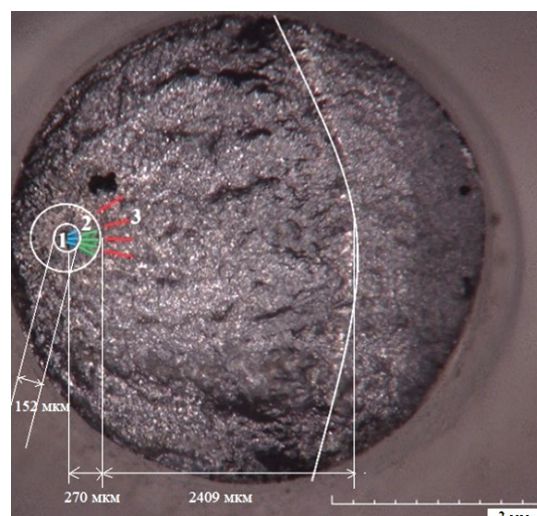
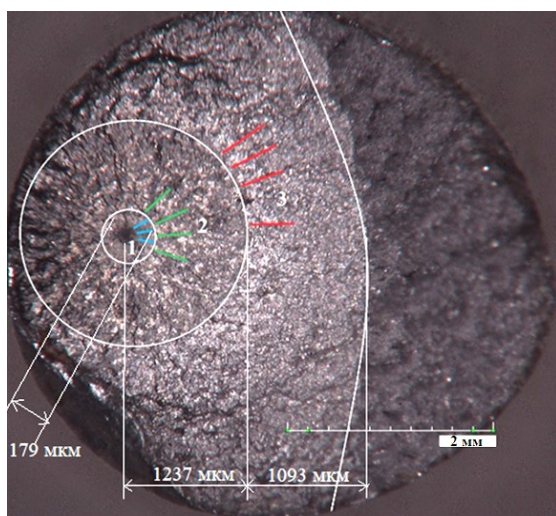


Рис. 7. Поверхность разрушения: а – образца №2, б – образца №10

На основе данных по измерению амплитуды второй гармоники в режиме реального времени [13] в процессе усталостных испытаний определено число циклов, которое ушло на зарождение и рост усталостной трещины (рис. 8). Число циклов, необходимых для зарождения очага разрушения (первый пик, рис. 8),  $N_1=7,43 \cdot 10^8$ . Число циклов, на протяжении которых трещина росла в зоне 2 (рис. 8) – это время между первым и вторым пиками на рисунке 8, примерно  $N_2=1,4 \cdot 10^6$ . Оставшиеся  $N_3=6,6 \cdot 10^6$  циклов – время роста трещины в зоне 3

Для нахождения неизвестных констант  $\alpha$  и  $\beta$  в уравнении (2) выполним следующую

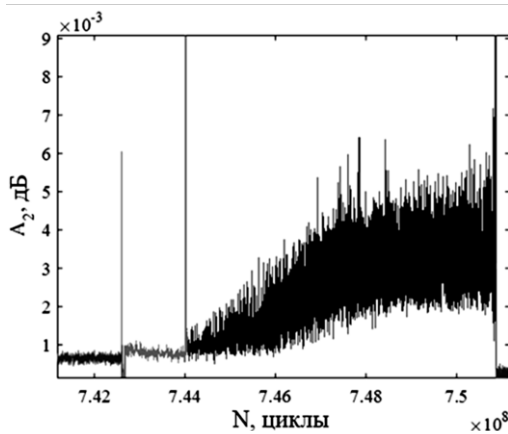


Рис. 8. Амплитуда второй гармоники для образца №10

процедуру. Подставим в уравнение (2) известные константы и число циклов до разрушения. Прделаем эту процедуру для образца № 10 для всех трёх ранее выделенных областей. Получим выражения для зарождения трещины (3) и её роста в области 2 (4) и области 3 (5):

$$N_1 = \frac{2 \left( 0^{1-\frac{\alpha}{2}} - l_0^{1-\frac{\alpha}{2}} \right) \left( \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{-\beta} \pi^{\frac{\alpha}{2}} \left( \frac{\Delta\sigma}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^{-\alpha}}{\alpha - 2} \cdot l_{sc}, \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{2 \left( l_0^{1-\frac{\alpha}{2}} - l_i^{1-\frac{\alpha}{2}} \right) \left( \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{-\beta} \pi^{\frac{\alpha}{2}} \left( \frac{\Delta\sigma}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^{-\alpha}}{\alpha - 2} \cdot l_{sc}, \quad (4)$$

$$N_3 = \frac{2 \left( l_i^{1-\frac{\alpha}{2}} - l_k^{1-\frac{\alpha}{2}} \right) \left( \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{-\beta} \pi^{\frac{\alpha}{2}} \left( \frac{\Delta\sigma}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^{-\alpha}}{\alpha - 2} \cdot l_{sc}. \quad (5)$$

Константы  $\alpha$  и  $\beta$  выбираются таким образом, чтобы при их значениях выражения (3–5) стали тождествами. В уравнениях (3–5) используются значения  $l_{sc}$  и  $L_{pz}$ , соответствующие областям 1, 2 и 3. Для нахождения  $\alpha$  и  $\beta$  решаются задачи оптимизации численно в программном пакете Wolfram Mathematica:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_1 - \frac{2 \left( 0^{1-\frac{\alpha}{2}} - l_0^{1-\frac{\alpha}{2}} \right) \left( \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{-\beta} \pi^{\frac{\alpha}{2}} \left( \frac{\Delta\sigma}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^{-\alpha}}{\alpha - 2} \cdot l_{sc} \rightarrow \min, \quad (6) \\ \alpha > 0, \beta > 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_2 - \frac{2 \left( l_0^{1-\frac{\alpha}{2}} - l_i^{1-\frac{\alpha}{2}} \right) \left( \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{-\beta} \pi^{\frac{\alpha}{2}} \left( \frac{\Delta\sigma}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^{-\alpha}}{\alpha - 2} \cdot l_{sc} \rightarrow \min, \quad (7) \\ \alpha > 0, \beta > 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} N_3 - \frac{2 \left( l_i^{1-\frac{\alpha}{2}} - l_k^{1-\frac{\alpha}{2}} \right) \left( \frac{L_{pz}}{l_{sc}} \right)^{-\beta} \pi^{\frac{\alpha}{2}} \left( \frac{\Delta\sigma}{E\sqrt{l_{sc}}} \right)^{-\alpha}}{\alpha - 2} \cdot l_{sc} \rightarrow \min, \quad (8) \\ \alpha > 0, \beta > 0 \end{array} \right.$$

Значения  $\alpha$  и  $\beta$  получились следующие: зона 1:  $\alpha = 2,82, \beta = 0,45$ ; зона 2:  $\alpha = 3,56, \beta = 1,19$ ; зона 3:  $\alpha = 6,25, \beta = 1,38$ .

График скорости роста усталостной трещины от размера  $l_0$  до  $l_k$  изображён на рис. 9, а для образца №10, на рис. 9, б – для образца № 2.

По рис. 9, а и 9, б видно, что предложенный подход позволяет описать эффект изменения скорости роста усталостной трещины при переходе от одной области к другой. Константы, определённые для одного из образцов (образец № 10),

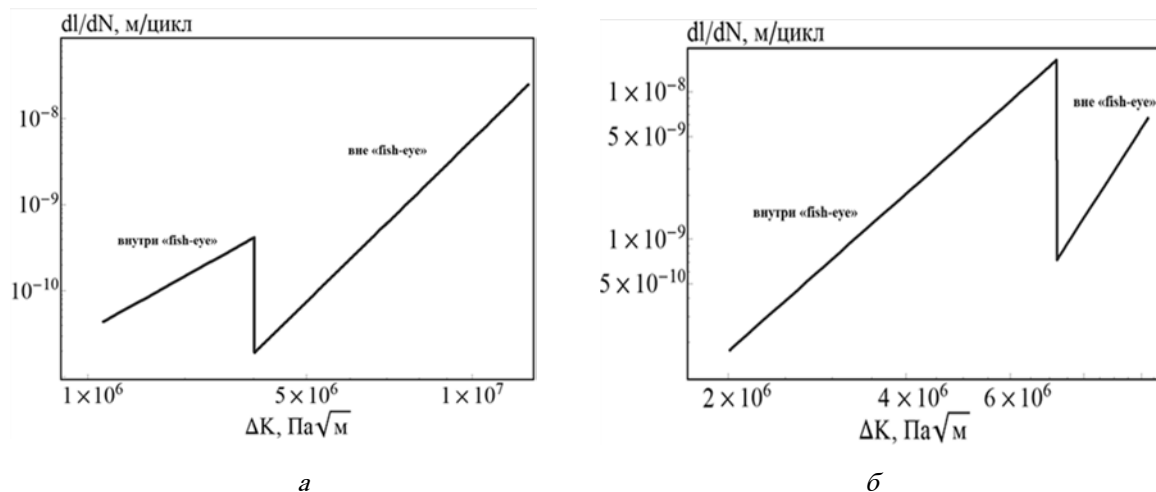


Рис. 9. Кинетическая диаграмма: а – образец № 10; б – образец № 2

дают удовлетворительное предсказание количества циклов до разрушения для других образцов. Например, для образца № 2: экспериментальное число циклов до разрушения –  $7,82 \cdot 10^8$ , предсказанное –  $6,92 \cdot 10^8$  (относительная погрешность 11%). Результаты расчёта для образца № 2 с константами  $\alpha$  и  $\beta$ , полученными на образце № 10, дают качественно непротиворечивые результаты по числу циклов, ушедших на зарождение и рост трещины:  $6,91 \cdot 10^8$  – на зарождение;  $0,56 \cdot 10^6$  – на рост в зоне 2;  $0,58 \cdot 10^6$  – на рост в зоне 3.

### Заключение

Отработана методика проведения экспериментов в условиях коррозионной среды на образцах из сплава АМгб, обнаружено снижение предельного напряжения разрушения предварительно нагруженного сплава с 70 МПа в исходном (недеформированном) до уровня 60 МПа, соответствующего критическому количеству циклов  $\sim 4,2 \cdot 10^8$  при охлаждении образцов солевым туманом (3%NaCl).

Усталостное нагружение предварительно нагруженных образцов из сплава алюминия и магния АМгб показало снижение до  $\sim 25\%$  предельного напряжения

разрушения с уровня напряжения 152 МПа в исходном (недеформированном) состоянии до уровня напряжений 112 МПа, соответствующего критическому количеству циклов  $\sim 10^9$ .

В предварительно нагруженных образцах из сплава АМгб трещина образуется внутри в виде «fish-eye» при количестве циклов  $\sim 7,5 \cdot 10^8$ . Сравнение масштабов коррелированного поведения шероховатости рельефа поверхностей разрушения образцов, нагруженных в условиях много- и гигацикловой усталости, позволило установить существенное уменьшение верхней границы пространственных масштабов, на которой показатель Хёрста остается постоянным для динамически нагруженных образцов в зоне «fish-eye».

Исследование роста усталостной трещины в режиме гигациклового нагружения в сплаве АМгб показало, что распределение шероховатости рельефа поверхностей разрушения в зоне роста трещины характеризуется признаками статистической автомодельности. С наличием масштабных инвариантов связывается универсальный степенной характер кинетического уравнения роста усталостной трещины.

### Библиографический список

1. Peters J.O., Ritchie R.O. Influence of foreign object damage on crack initiation and early crack growth during high-cycle fatigue of Ti-6Al-4V // Eng. Fract. Mech. – 2000. – Vol. 67. – P. 193–207.
2. Spanrad S., Tong J. Characterisation of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens // Materials Science and Engineering A. – 2011 – Vol. 528 – P. 2128–2136.



3. Nowell D., Duó P., Stewart I.F. Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage // *International Journal of Fatigue* – 2003 – Vol. 25 – P. 963–969.
4. Franklin J. Foreign Object Damage in the UK RAF // *National Aerospace FOD Prevention Inc. (NAFPI), 1st Int. Conference.* – London. – 2003.
5. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. – М.: Наука. – 2008. – 334 с.
6. Ботвина Л.Р. Гигацикловая усталость – новая проблема физики и механики разрушения // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2004. – Т. 70. – № 4. – С. 41–51.
7. Crawford B. R. [et al.] Can pitting corrosion change the location of fatigue failures in aircraft? // *International Journal of Fatigue.* – 2014. – Vol. 61. – P. 304–314.
8. Левин Д.М., Широкий И.Ф., Муравлева Л.В. Гигацикловая усталость // *Изв. ТулГУ. Сер. «Физика».* – 2006. – №. 6. – С. 192.
9. Федер Е., Данилов Ю. А., Шукуров А. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
10. Mandelbrot B.B. *The fractal geometry of nature.* – N.Y.: Freeman, 1983. – 480 p.
11. Bouchaud E. Scaling properties of cracks // *J. Phys. Condens. Matter.* – 1997. – 9. – P. 4319–4344.
12. Oborin V.A., Bayandin Y.V., Bilalov D.A., Sokovikov M.A., Chudinov V.V., Naimark O.B. Self-Similar Patterns of Damage Development and Reliability Assessment of AMg6 and D16T Aluminum Alloys under Consecutive Dynamic and Gigacycle Loading // *Physical Mesomechanics.* – 2019. – Т. 22. – №. 2. – P. 141–151.
13. Kumar A. Torbet C.J., Jones J.W., Pollock T.M. Nonlinear ultrasonics for in situ damage detection during high frequency fatigue // *Journal of Applied Physics.* – 2009. – Vol. 106. – №. 2. – P. 024904.
14. Оборин В.А., Банников М.В., Наймарк О.Б., Палин-Лус Т. Масштабная инвариантность роста усталостной трещины при гигацикловом режиме нагружения // *Письма в «Журнал технической физики».* – 2010. – Т. 36. – Вып. 22. – С. 76–82.
15. Varenblatt G.I. Scaling phenomena in fatigue and fracture // *Int. J. of Fracture.* – 2006. – Vol. 138. – P. 19–35.
16. Баренблатт Г.И., Ботвина Л.Р. Автомодельность усталостного разрушения. Накопление поврежденности. – *Изв. АН СССР, Механика твердого тела.* – 1983. – № 4. – С. 161–165.

#### DURABILITY OF THE AMG6 ALLOY UNDER CONSEQUITIVE DYNAMIC AND VHCF OF LOADING IN A CORROSIVE ENVIRONMENT

V.A. Oborin, M.A. Sokovikov, M.V. Bannikov, D.R. Ledon, O.B. Naimark

*Institute of Continuum Mechanics UB RAS*

**For citation:**

Oborin V.A., Sokovikov M.A., Bannikov M.V., Ledon D.R., Naimark O.B. Durability of the AMg6 alloy under consecutive dynamic and vhc of loading in a corrosive environment // *Perm Federal Research Center Journal.* – 2022. – № 1. – P. 56–65. <https://doi.org/10.7242/2658-705X/2022.1.5>

The paper describes an experimental methodology developed for very-high-cycle fatigue testing (number of cycles  $10^8$ – $10^9$ ) of dynamically pre-loaded specimens made of aluminum alloy AMg6. The preloading modes ensured the occurrence of controlled damage, which made it possible to simulate structural changes in the material of fan blades under conditions of high-speed collision with solid particles. The specimens were preloaded by dynamic stretching of specimens on a split Hopkinson pressure bar at strain rates up to  $\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$  followed by ultra-high-cycle loading on a Shimadzu USF-2000 ultrasonic testing machine. This allowed specimen testing during  $10^8$ – $10^{10}$  cycles with amplitudes up to several tens of micrometers and test frequency of 20 kHz under conditions of enhanced cooling with compressed air and salt mist (3%NaCl). The study of fracture surfaces by the fractographic method showed that for this number of loading cycles, the role of the external environment increases significantly, which, in particular, means that the sea salt fog is one of the most aggressive external factors for aircraft. Based on the profilometry data (interferometer-profilometer New-View 5010 with a resolution of 0,1 nm), quantitative correlations have been established between the mechanical properties and scale-invariant characteristics of the relief of fracture surfaces formed in the processes of dynamic and gigacycle loading.

*Keywords: fracture, gigacycle fatigue, scaling, surface morphology, Paris law, crack growth kinetics.*

**Сведения об авторах**

*Оборин Владимир Александрович*, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории физических основ прочности, Институт механики сплошных сред УрО РАН – филиал Пермского федерального исследовательского центра УрО РАН («ИМСС УрО РАН»), 614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1; e-mail: [oborin@icmm.ru](mailto:oborin@icmm.ru)

*Соковиков Михаил Альбертович*, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [sokovikov@icmm.ru](mailto:sokovikov@icmm.ru)

*Банников Михаил Владимирович*, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [mbannikov@icmm.ru](mailto:mbannikov@icmm.ru)

*Ледон Дмитрий Рудольфович*, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер лаборатории физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [ledon@icmm.ru](mailto:ledon@icmm.ru)

*Наймарк Олег Борисович*, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией физических основ прочности, «ИМСС УрО РАН»; e-mail: [naimark@icmm.ru](mailto:naimark@icmm.ru)

*Материал поступил в редакцию 01.02.2022 г.*