

## Влияние накопленных повреждений на расчетную скорость малоцикловой трещины

© Н.К. Веретимус, Д.К. Веретимус

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Изучено влияние циклических повреждений на закономерности образования и роста трещины при термомеханическом нагружении. Для сплава ЭИ437Б и корпусной стали 15Х2НМФА получена зависимость скорости роста трещины и числа циклов, за которое трещина прорастет на длину  $\Delta l$ , от циклического повреждения. Обоснована необходимость учета влияния кинетических полей накопленных повреждений на скорость роста трещины.*

**Ключевые слова:** повреждения, поля повреждений, скорость роста трещины, малоцикловое разрушение, долговечность.

В последнее время большое внимание уделяется тяжелым социальным, экономическим и экологическим последствиям, к которым приводят аварии и катастрофы, происходящие в результате эксплуатации сложных технических систем.

Концепция максимальной гипотетической аварии включает в себя определение прочности и поврежденности элементов конструкций на базе исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) высоконагруженных несущих элементов системы с учетом внешних и внутренних динамических нагрузок. В соответствии с этой концепцией весьма актуальным является определение расчетно-экспериментальным способом ресурсных характеристик несущего элемента конструкции, подверженного малоцикловому изотермическому и неизотермическому термомеханическому нагружению, с учетом процессов накопления эксплуатационных повреждений.

Наиболее экономичным способом решения задачи о процессах накопления повреждений и исчерпания ресурса [1, 2] является математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений для расчетного определения ресурса [1–3]. Однако этот способ с использованием экспериментальных данных о механических свойствах конструкционных материалов не всегда позволяет получить достаточную точность, так как учесть все многообразие нагрузок и конструктивных форм, а также их динамику в процессе эксплуатации крайне сложно.

В математической модели необходимо наиболее полно отразить процессы, происходящие в материале изделия при нагружении. Для конструкций современного машиностроения (энергетического и транспортного, авиации, ракетной техники, реакторостроения и т. п.) в

связи с интенсификацией рабочих и технологических процессов характерна повторяемость и цикличность механического и термического нагружения, работа в условиях переходных и форсированных режимов эксплуатации [1–10]. Воздействие периодически повторяющихся нагрузок на рассматриваемый объект приводит к необратимым процессам в материале, вызывающим образование в изделии трещин, а впоследствии и его разрушение. Наличие высоких термомеханических циклических нагрузок предопределяет малоцикловое разрушение исследуемого объекта при числе циклов нагружения до  $10^5$ .

В соответствии с деформационно-кинетическим критерием малоциклового разрушения достижение предельного состояния определяется суммой относительных усталостного и квазистатического повреждений, критическое значение этой суммы принимают равным единице [1–3]. Оценку накопленных повреждений проводят на основе линейного закона их суммирования.

Было исследовано развитие малоциклового трещины во вращающемся модельном диске с отверстием и в толстостенной трубе при их изотермическом циклическом нагружении [2]. Проведен расчет числа циклов нагружения до разрушения указанных несущих элементов конструкций с использованием уравнения скорости роста трещины в величинах коэффициентов интенсивности деформаций и с учетом анализа полей накопленных повреждений. Получены зависимости длины трещины и скорости развития трещины от числа циклов нагружения. Проанализировано, как учет или отсутствие учета полей накопленных повреждений влияет на расчетную длину и скорость развития трещины.

Расчет проводили при предельной пластической деформации в статической составляющей повреждений:

$$e_f(N) = e_{f0} (1 - d_s) [1 - d_f(N)]^{P_N}, \quad (1)$$

где  $N$  — число циклов нагружения;  $e_{f0}$  — предельная разрушающая деформация при отсутствии повреждения (при  $d = 0$ );  $d_s$  — определенное через односторонне накопленную пластическую деформацию статическое повреждение;  $d_f$  — определенное через амплитуды пластических деформаций усталостное повреждение;  $P_N$  — характеристика материала, которая изменяется от 0 до  $m_{e0}$  ( $m_{e0}$  — показатель степени в уравнении кривой малоциклового разрушения).

На основе анализа кинетики НДС диска и толстостенной трубы при изотермическом нагружении [2, 11] можно предположить, что трещина образуется на внутренней поверхности несущего элемента и прорастание трещины в обоих случаях происходит от внутренней стенки изделия к внешней. Для определения числа циклов до разру-

шения используют коэффициент интенсивности напряжений (КИН) [2, 8–11]:

$$\Delta \bar{K}_I = \bar{S}_{in} \sqrt{\pi l} f_1(\bar{K}), \quad (2)$$

где  $\bar{S}_{in}$  — размах относительных номинальных напряжений в координатах  $S - \varepsilon$ ;  $l$  — длина трещины;  $f_1(\bar{K}) = 1,25 - 0,25\sqrt[3]{1 - (l/H)^3}$  ( $H$  — толщина материала, через который должна пройти трещина).

Разрушающая деформация в вершине трещины

$$\bar{e}_{fP} = \frac{D_e \ln(1/1 - \psi)}{I e_T} = \frac{D_e \ln(1/1 - \psi)}{I \sigma_T/E},$$

где  $D_e$  — коэффициент снижения предельных пластических деформаций в вершине трещины вследствие объемности напряженного состояния;  $I$  — коэффициент повышения первого главного напряжения в вершине трещины в случае объемного напряженного состояния;  $\psi$  — сужение в шейке;  $\sigma_T$  — предел текучести;  $e_T$  — соответствующая ему деформация;  $E$  — модуль упругости первого рода [1, 2, 8, 9].

Показатель упрочнения в первом полуцикле определяется уравнением

$$m(k)_P = \frac{\lg(\bar{e}_{fP}^{mP})}{\lg\left[\bar{e}_{fP}^{mP} + \frac{A}{2}(\bar{e}_{fP} - 1)F(k)\right]}, \quad (3)$$

где  $m$  — показатель упрочнения;  $A$  — параметр диаграммы циклического деформирования;  $F(k) = \exp\left[C(\bar{e}_{fP} - 1)(k - 1)\right]$ ;  $k$  — число полуциклов нагружения;  $C$  — параметр, характеризующий интенсивность циклического разупрочнения. Индекс  $P$  означает, что величина зависит от уровня вероятности  $P$  и значений основных механических свойств.

Коэффициент асимметрии цикла номинальных напряжений, при котором происходит закрытие трещины,

$$r_{\bar{\sigma}_{nP}} = 1 - 2 \frac{1 - \frac{1}{P_{keP}^{(1)}}}{P_{keP}^{(1)}},$$

где

$$P_{keP}^{(1)} = \frac{2 - 0,5\left[1 - m(k)_P\right](1 - \bar{S}_{in})}{1 + m(k)_P}.$$

Если значение коэффициента меньше нуля, то принимают  $r_{\sigma n P} = 0$ .  
 Постоянная в уравнении для скорости роста трещины

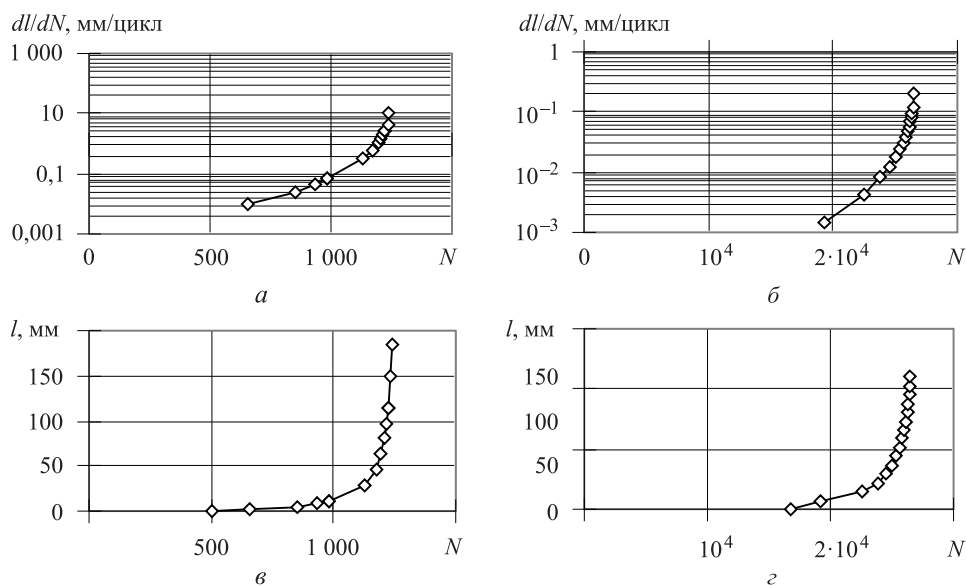
$$C_{\sigma P} = \frac{1}{2\pi \bar{e}_{fP}^2}. \quad (4)$$

Если принять, что значение функции  $f(r/l) = 1$ , уравнение скорости роста трещины [1, 2, 8, 9] без учета значений функции  $f(r/l)^2$  имеет вид

$$\frac{dl}{dN} = C_{\sigma P} \Delta \bar{K}_I^{\gamma_{K_I}} \frac{1}{1 - C_{\sigma P} \Delta \bar{K}_I^{\gamma_{K_I}} / l}, \quad (5)$$

где  $\gamma_{K_I} = 2p_{keP}^{(1)}$ .

Зависимость скорости роста трещины от числа циклов для диска [2, 11] ( $n = 17\,500$  об/мин,  $t = 20$  °С) и толстостенной трубы ( $p_1 = 400$  МПа,  $t = 20$  °С) при изотермическом нагружении представлена на рис. 1. На рисунке видно, что и в диске при  $N > 1\,200$  циклов, и в трубе при  $N > 25\,000$  циклов скорость роста трещины резко возрастает. Однако при числе циклов нагружения, близком к числу циклов до разрушения, скорость прорастания трещины в диске приблизительно на два порядка выше, чем в толстостенной трубе.



**Рис. 1.** Зависимость скорости прорастания трещины (а, б) и ее длины (в, з) от числа циклов нагружения для диска (а, в) при  $n = 17500$  об/мин,  $t = 20$  °С и толстостенной трубы (б, з) при  $p_1 = 400$  МПа,  $t = 20$  °С

Число циклов, за которое трещина прорастает от начального (внутреннего)  $r_n$  до конечного (внешнего)  $r_k$  радиуса, составляет

$$\Delta N = \int_{r_n}^{r_k} \frac{1 - C_{\sigma P} \Delta \bar{K}_I^{\gamma_{K1}} / l}{C_{\sigma P} \Delta \bar{K}_I^{\gamma_{K1}}} dl. \quad (6)$$

Предельное число циклов до разрушения

$$N_p = N_0 + \Delta N, \quad (7)$$

где  $N_0$  — число циклов до зарождения трещины в изделии;  $\Delta N$  — число циклов, необходимое для разрушения изделия с трещиной.

График зависимости длины трещины в несущем элементе от числа циклов нагружения (см. рис. 1) показывает, что по достижении трещиной определенной длины происходит ускоренное разрушение изделия.

Так, у диска ( $n = 17\,500$  об/мин,  $t = 20$  °С) при длине трещины  $l > 28$  мм ( $l/H \approx 15\%$ , т. е. примерно 15 % материала повреждено) остаточное число циклов до полного разрушения составляет около 9 % расчетной долговечности  $N_p$  до разрушения — см. (6). Тот же эффект наблюдается и у толстостенной трубы ( $p_1 = 400$  МПа,  $t = 20$  °С): при длине трещины  $l > 30$  мм ( $l/H \approx 20\%$ , т. е. примерно 20 % материала повреждено) остаточное число циклов до полного разрушения составляет около 10 % расчетной долговечности до разрушения. В результате расчета найдено, что долговечность до разрушения диска  $N_p = 1\,300$  циклов, трубы —  $N_p = 26\,500$  циклов.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что трещина, длина которой равна 1/5 толщины несущего элемента ( $l \approx 0,2H$ ), чрезвычайно опасна, поскольку дальнейшее разрушение изделия протекает со скоростью, значительно большей, чем в начале процесса трещинообразования.

Расчет был проведен без учета полей накопленных повреждений. Установим влияние повреждений, предварительно накопленных на траектории трещины и увеличивающихся по мере ее продвижения, на ресурсные характеристики несущего элемента. Для этого получим зависимость скорости роста трещины от циклической составляющей повреждения при постоянном значении КИН — см. (2). Используем выражение (1) для определения разрушающей деформации:

$$e_f = e_{f0} (1 - d_s) (1 - d_f)^{P_N}$$

и, подставив выражение (1) в уравнения (3) и (4), получим итоговую систему уравнений для определения скорости роста трещины:

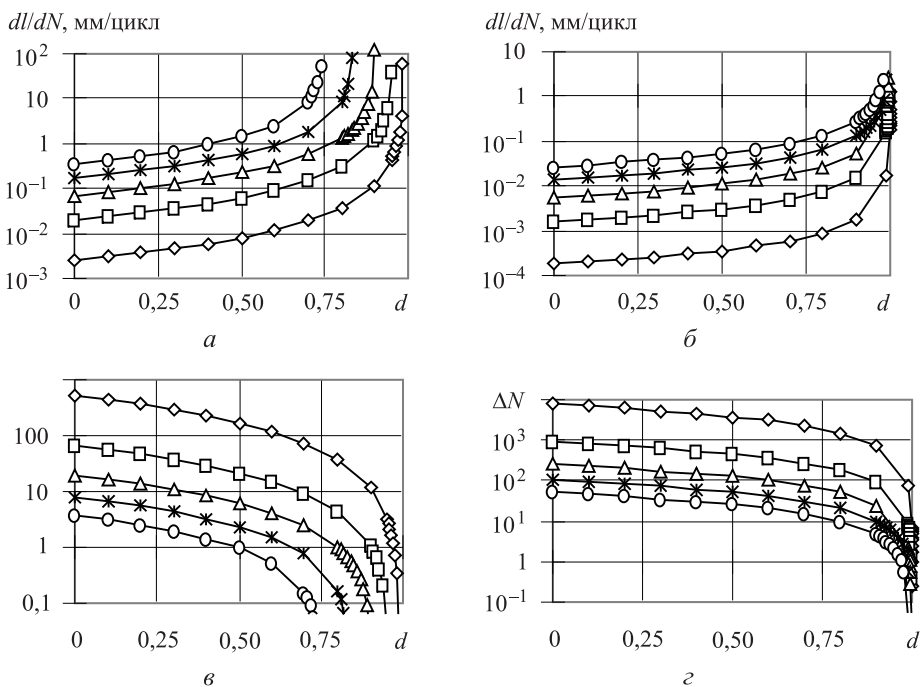
$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dl}{dN} &= \frac{\Delta \bar{K}_I^{\gamma_{K_I}^{(d)}}}{2\pi \bar{e}_{f_0}^2 (1-d_s)^2 (1-d_f)^{2P_N}} \cdot \frac{1}{1 - \Delta \bar{K}_I^{\gamma_{K_I}^{(d)}} / \left( 2\pi \bar{e}_{f_0}^2 (1-d_s)^2 (1-d_f)^{2P_N} l \right)}; \\
 \Delta \bar{K}_I &= \bar{S}_{in} \sqrt{\pi l} \left( 1,25 - 0,25 \sqrt[3]{1 - (l/H)^3} \right); \\
 \gamma_{K_I}^{(d)} &= 2 \frac{2 - 0,5 \left[ 1 - m(k)_P^{(d)} \right] (1 - \bar{S}_{in})}{1 + m(k)_P^{(d)}}; \\
 m(k)_P^{(d)} &= \frac{\lg \left[ \bar{e}_{f_0}^{m_P} (1-d_s)^{m_P} (1-d_f)^{m_P P_N} \right]}{\lg \left\{ \bar{e}_{f_0}^{m_P} (1-d_s)^{m_P} (1-d_f)^{m_P P_N} + \frac{A}{2} \left[ \bar{e}_{f_0} (1-d_s) (1-d_f)^{P_N} - 1 \right] F(k) \right\}}; \\
 F(k) &= \exp \left\{ C \left[ \bar{e}_{f_0} (1-d_s) (1-d_f)^{P_N} - 1 \right] (k-1) \right\}
 \end{aligned} \right\} (8)$$

и систему уравнений для числа циклов, за которое трещина прорастает от внутреннего  $r_{in}$  до внешнего  $r_k$  радиуса:

$$\left. \begin{aligned}
 \Delta N &= \int_{r_{in}}^{r_k} \frac{\left[ 1 - \Delta \bar{K}_I^{\gamma_{K_I}^{(d)}} / \left( 2\pi \bar{e}_{f_0}^2 (1-d_s)^2 (1-d_f)^{2P_N} l \right) \right] \left[ 2\pi \bar{e}_{f_0}^2 (1-d_s)^2 (1-d_f)^{2P_N} \right]}{\Delta \bar{K}_I^{\gamma_{K_I}^{(d)}}} dl; \\
 \Delta \bar{K}_I &= \bar{S}_{in} \sqrt{\pi l} \left( 1,25 - 0,25 \sqrt[3]{1 - (l/H)^3} \right); \\
 \gamma_{K_I}^{(d)} &= 2 \frac{2 - 0,5 \left[ 1 - m(k)_P^{(d)} \right] (1 - \bar{S}_{in})}{1 + m(k)_P^{(d)}}; \\
 m(k)_P^{(d)} &= \frac{\lg \left[ \bar{e}_{f_0}^{m_P} (1-d_s)^{m_P} (1-d_f)^{m_P P_N} \right]}{\lg \left\{ \bar{e}_{f_0}^{m_P} (1-d_s)^{m_P} (1-d_f)^{m_P P_N} + \frac{A}{2} \left[ \bar{e}_{f_0} (1-d_s) (1-d_f)^{P_N} - 1 \right] F(k) \right\}}; \\
 F(k) &= \exp \left\{ C \left[ \bar{e}_{f_0} (1-d_s) (1-d_f)^{P_N} - 1 \right] (k-1) \right\}.
 \end{aligned} \right\} (9)$$

Таким образом, получена зависимость скорости роста трещины и числа циклов, за которое трещина прорастает на длину  $\Delta l$ , от циклического повреждения, определяемая с помощью систем уравнений (8) и (9) для сплава ЭИ437Б и корпусной стали 15Х2НМФА соответственно (см. рис. 2). Поскольку при принятых запасах по прочности и долговечности усталостная составляющая повреждения  $d_f$  превалирует над квазистатической  $d_s$ , в проведенном расчете принято, что  $d \approx d_f$ . На рис. 2 видно, что при повреждении  $d \approx 0,2$  скорость роста

трещины  $dl/dN$  увеличивается для сплава ЭИ437Б в 1,5 раза, для стали 15Х2НМФА в 1,25 раза по сравнению со значениями скорости роста трещины в неповрежденном материале ( $d = 0$ ). Такое увеличение скорости  $dl/dN$  существенно — уменьшается число циклов  $\Delta N$ , за которое трещина прорастает на длину  $\Delta l$ , для сплава ЭИ437Б на 50 %, для стали 15Х2НМФА — на 25 %.



**Рис. 2.** Зависимость скорости роста трещины (*а, б*) и числа циклов (*в, г*), за которое трещина прорастает на длину  $\Delta l$ , от повреждения  $d$  для сплава ЭИ437Б (*а, в*) и стали 15Х2НМФА (*б, г*) при  $l = 2,7$  мм:

—◇—  $\Delta\bar{K} = 1$ ; —□—  $\Delta\bar{K} = 2$ ; —△—  $\Delta\bar{K} = 3$ ; —\*—  $\Delta\bar{K} = 4$ ; —○—  $\Delta\bar{K} = 5$

При дальнейшем росте повреждений наблюдается и дальнейшее увеличение скорости роста трещины. Так, при  $d = 0,5$  скорость  $dl/dN$  увеличивается для сплава ЭИ437Б в 3–4 раза, а для стали 15Х2НМФА — в 2 раза, при этом число циклов  $\Delta N$  уменьшается в то же число раз. При повреждении  $d$  на уровне 0,95 скорость роста трещины возрастает на два порядка. При значении  $d$ , стремящемся к единице,  $dl/dN$  стремится к бесконечности, а  $\Delta N$  — к нулю.

Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что неучет накопленных повреждений может приводить к существенному занижению расчетных значений скорости роста трещины, а следовательно, к завышению ожидаемого числа циклов до разрушения несущего элемента конструкции, что крайне опасно.

В результате исследования показано, что при фиксированном значении КИН скорость роста трещины  $dl/dN$  в поврежденных зонах увеличивается по сравнению с ее значениями, полученными без учета повреждений.

Таким образом, расчет несущих элементов конструкций на малоцикловую усталость необходимо проводить с учетом полей накопленных в изделии повреждений.

На базе проведенных исследований предложена единая система уравнений и их параметров для описания полей накопленных повреждений и скоростей роста трещин в переменных полях накопленных повреждений. В этой системе отражены статические и циклические свойства материалов, режимы термомеханического нагружения, уровни концентрации напряжений, объемность напряженного состояния.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Веретимус Н.К., Веретимус Д.К. Расчетно-экспериментальная оценка накопления повреждений при неизотермическом нагружении. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2013, т. 79, № 2, с. 51–55.
- [2] Веретимус Н.К. Деформирование и разрушение несущих элементов с учетом полей накопленных повреждений. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2006, 16 с.
- [3] Махутов Н.А., Гаденин М.М. Исследования нелинейных эффектов деформирования и критериев разрушения. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2005, т. 71, № 8, с. 57–67.
- [4] Махутов Н.А., Пермяков В.Н., Кравцова Ю.А., Ботвина Л.Р. Оценка состояния материала продуктопровода после его длительной эксплуатации. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2007, т. 73, № 2, с. 54–57.
- [5] Махутов Н.А., Петров В.П., Куксова В.И., Москвитин Г.В. Современные тенденции развития научных исследований по проблемам машиноведения и машиностроения. *Проблемы машиностроения и автоматизации*, 2008, № 3, с. 3–19.
- [6] Махутов Н.А., Резников Д.О. Оценка уязвимости технических систем и ее место в процедуре анализа риска. *Проблемы анализа риска*, 2008, т. 5, № 3, с. 76–89.
- [7] Махутов Н.А., Лисин Ю.В., Гаденин М.М., Пермяков В.Н., Федота В.И., Аладинский В.В. Обеспечение защищенности магистральных нефтепродуктопроводов по критериям рисков. *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*, 2012, № 3, с. 10–16.
- [8] Сосновский Л.А., Махутов Н.А. Общий подход к оценке интенсивности повреждения при циклическом деформировании, трении и комплексном нагружении. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2005, т. 71, № 2, с. 38–40.
- [9] Махутов Н.А. Усталость металлов в широком диапазоне числа циклов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2004, т. 70, № 4, с. 37–41.
- [10] Махутов Н.А., Коссов В.С., Оганьян Э.С. К вопросу оценки ресурса и безопасности эксплуатации конструкций подвижного состава. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2007, т. 73, № 11, с. 43–47.



- [11] Веретимус Н.К., Веретимус Д.К. Определение предельного числа циклов до образования трещины на базе анализа соотношения градиентов накопленного повреждения и интенсивности деформаций. *Деформация и разрушение материалов: Сб. статей по материалам Первой междунар. конф., Москва, 13–16 ноября 2006 г., Ин-т металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН*. Москва, Интерконтакт Наука, 2006, с. 613–616.

Статья поступила в редакцию 25.05.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Веретимус Н.К., Веретимус Д.К. Влияние накопленных повреждений на расчетную скорость малоциклового трещины. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 11.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/msm/smme/1425.html>

**Веретимус Надежда Константиновна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 26 публикаций в области малоциклового разрушения с учетом полей накопленных повреждений. Область научных интересов: малоцикловое разрушение с учетом полей накопленных повреждений; техническая педагогика. e-mail: [nkvmhts@yandex.ru](mailto:nkvmhts@yandex.ru)

**Веретимус Диана Константиновна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 21 публикации в области малоциклового разрушения с учетом полей накопленных повреждений. Область научных интересов: малоцикловое разрушение с учетом полей накопленных повреждений; системы с рекуперацией энергии; техническая педагогика. e-mail: [dkvrgu@yandex.ru](mailto:dkvrgu@yandex.ru)

## Effect of the cumulative damage on the designed rate of the low-cycle crack

© N.K. Veretimus, D.K. Veretimus

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article considers the effect of cyclical patterns of damage on the formation and growth of cracks under thermomechanical loading. The dependence of the crack growth rate and number of cycles, for which the length of the crack will grow by  $\Delta l$ , on cyclical damage to EI437BU steel alloy and 15H2NMFA hull plate is obtained. The necessity of taking into account the effect of accumulated damage kinetic fields to the crack growth rate is justified.*

**Keywords:** damage, damage fields, crack growth rate, low-cycle fracture, durability.

### REFERENCES

- [1] Veretimus N.K., Veretimus D.K. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2013, vol. 79, no. 2, pp. 51–55.
- [2] Veretimus N.K. *Deformirovanie i razrushenie nesushchikh elementov s uchetom poley nakoplennykh povrezhdeniy* [ Straining and destruction of bearing elements taking into account fields of accumulated damage] . Abstract of the Candidate of Engineering Sciences Thesis, Moscow, 2006, 16 p.
- [3] Makhutov N.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2005, vol. 71, no. 8, pp. 57–67.
- [4] Makhutov N.A., Permyakov V.N., Kravtsova Yu.A., Botvina L.P. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2007, vol. 73, no. 2, pp. 54–57.
- [5] Makhutov N.A., Petrov V.P., Kuskova V.I., Moskvitin G.V. *Problemy mashinostroeniya i avtomatizatsii – Problems of mechanical engineering and automation*, 2008, no. 3, pp. 3–19.
- [6] Makhutov N.A., Reznikov D.O. *Problemy analiza riska – Problems of risk analysis*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 76–89.
- [7] Makhutov N.A., Lisin Yu.V., Gadenin M.M., Permyakov V.N., Fedota V.I., Aladinskiy V.V. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefiti i nefteproduktov – Science and Technology of Pipeline Transport of Oil and Oil Products*, 2012, no. 3, pp. 10–16.
- [8] Sosnovskiy L.A., Makhutov N.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2005, vol. 71, no. 2, pp. 38–40.
- [9] Makhutov N.A. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2004, vol. 70, no. 4, pp. 37–41.
- [10] Makhutov N.A., Kossov V.S., Oganyan E.S. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2007, vol. 73, no. 11, pp. 43–47.
- [11] Veretimus N.K., Veretimus D.K. *Opreделение predelnogo chisla tsiklov do obrazovaniya treshchiny na baze analiza sootnosheniya gradientov nakoplennogo povrezhdeniya i intensivnosti deformatsiy* [Determining the limit number of cycles before the fracture occurs on the basis of the analysis of the damage accumulation gradient ratio and intensity of deformation].

*Deformatsiya i razrushenie materialov. Sbornik statey po materialam Pervoy mezhdunarodnoy konferentsii, Moskva, 13–16 noyabrya 2006 g., Institut metallurgii i materialovedeniya imeni A.A. Baikova RAN* [Deformation and fracture of materials. Proceedings of the First International Conference (November 13-16, 2006), Moscow, A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS]. Moscow, Interkontakt Nauka Publ., 2006, pp. 613–616.

**Veretimus N.K.**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of 26 publications in the field of low-cycle fracture considering accumulated damage fields. Research interests: low-cycle fracture considering accumulated damage fields. e-mail: [nkvmhts@yandex.ru](mailto:nkvmhts@yandex.ru)

**Veretimus D.K.**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University. Author of 21 publications in the field of low-cycle fracture considering accumulated damage fields. Research interests: low-cycle fracture considering accumulated damage fields, system with energy recovery, engineering pedagogy. e-mail: [dkvrgu@yandex.ru](mailto:dkvrgu@yandex.ru)