

К. А. Бадиков, А. Н. Савкин, А. А. Седов, А. И. Лебедев

**ОЦЕНКА РОСТА ТРЕЩИНЫ В АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ
НА ОСНОВАНИИ УЧЕТА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АМПЛИТУД НАГРУЖЕНИЙ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: badikov_kirill@mail.ru; savkin@vstu.ru; sedoff@yandex.ru; djalixsander@gmail.com

В данной работе рассматривается проблема учета последовательности нагружения, возникающая при расчете долговечности элементов с дефектом в виде трещины в алюминиевом сплаве. Предложена модель определения продолжительности роста усталостных трещин, основанная на связи напряжения раскрытия в окрестности вершины трещины с пороговым значением размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН). Представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных долговечности роста трещины по модели, полученные при регулярном нагружении с перегрузками/недогрузками в различных вариациях. Во всех случаях получено удовлетворительное соответствие с высоким значением коэффициента корреляции.

Ключевые слова: усталостное испытание, перегрузка, околопороговая скорость роста, алюминиевый сплав, взаимодействие амплитуд нагружений

К. А. Badikov, A. N. Savkin, A. A. Sedov, A. I. Lebedev

**EVALUATION OF CRACK GROWTH IN ALUMINUM ALLOY BASED
ON CONSIDERATION OF LOAD AMPLITUDE INTERACTION**

Volgograd State Technical University

This article considers the problem of taking into account the loading sequence that arises when calculating the durability of elements with a defect in the form of a crack in an aluminum alloy. A model for determining the duration of fatigue crack growth is proposed, based on the relationship between the opening stress in the vicinity of the crack tip and the threshold value of the stress intensity factor (SIF) range. The results of comparing the experimental and calculated data on the durability of crack growth according to the model, obtained under regular loading with overloads/underloads in various variations, are presented. In all cases, satisfactory agreement with a high value of the correlation coefficient was obtained.

Keywords: fatigue test, overload, near-threshold growth rate, aluminum alloy, interaction of loading amplitudes

© Бадиков К. А., Савкин А. Н., Седов А. А., Лебедев. А. И., 2025.

* Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (РНФ), проект 23-79-01269.

Введение

В машинах и конструкциях, испытывающих переменные нагрузки в эксплуатации, на поверхности и под поверхностью конструктивных элементов в областях локальных концентраторов напряжений, которыми служат перенапряженные микрообъемы структуры металла, могут возникать микротрещины. Кинетика развития трещин в этих областях существенно зависит от взаимодействия амплитуд внешних нагрузок, окружающей среды и других факторов [1]. Так перегрузочные воздействия способствуют замедлению роста трещины, недогрузочные могут ее увеличивать. Режимы перегрузка-недогрузка, недогрузка-перегрузка также неоднозначно влияют на ее продолжительность. Это вызывает необходимость разработки модели трещиностойкости, учитывающей характер такого силового взаимодействия и его влияния на кинетику роста трещины. В настоящее время среди прочих моделей прогнозирования роста трещины более популярны модели закрытия трещины, учитывающие уменьшение размаха коэффициента интенсивности напряжений (КИН), связанного с асимметрией циклического

нагружения [2]. Одним из недостатков этих моделей является невозможность учета последовательности в истории нагружения.

Модель трещиностойкости Р. Сундера, учитывающая местные напряжения в вершине трещины объясняет природу замедления трещины на основе отложения активных частиц из влаги у вершины трещины и их скопления в наиболее напряженных объемах при росте нагрузки (см. схему модели), что сказывается на зависимости порогового КИН $K_{th} = f(\sigma^*)$ от напряжения вблизи трещины [3, 4]. Эта теория объясняет природу замедления трещины процессами вблизи ее кончика, а именно поглощением активных частиц кислорода и водорода, выделяющихся в результате химических реакций атмосферной влаги и поверхности около кончика трещины с образованием оксидов и гидроксидов (рис. 1, а). Также теория связала величину порогового размаха КИН ΔK_{th} и местных напряжений вблизи вершины, наводимые перегрузками, и постулировала, что эффект перегрузки в околопороговой области скоростей роста вызывается и остаточными местными напряжениями.

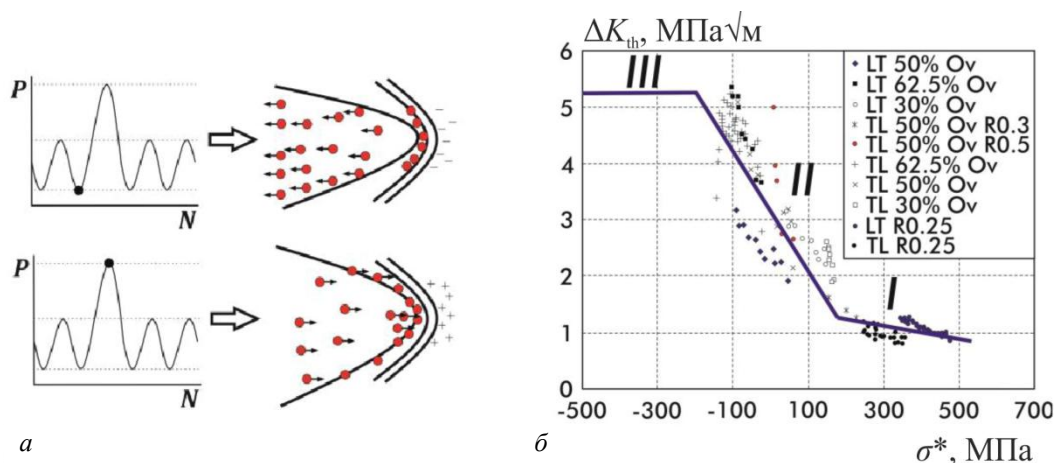


Рис. 1:

а – отложение активных частиц из влаги вершины трещины при минимальной нагрузке и их скопление в наиболее напряженных объемах у вершины при росте нагрузки; б – зависимость порогового размаха КИН от напряжения вблизи трещины σ^* для алюминиевого сплава 2024-T3

Методика исследования

Предлагаемая модель применяет подход учета местных напряжений и деформаций для оценки напряжения σ^* в области концентратора напряжений при анализе усталости. Для данного парциального давления активных частиц и температуры распространение диффузионной

поверхности зависит от градиента упругой деформации в материале на возрастающем полцикле нагрузки. Эта область характеризуется местным напряжением около вершины трещины σ^* , амплитуда которого определяется циклической неупругой реакцией в вершине трещины (рис. 2).

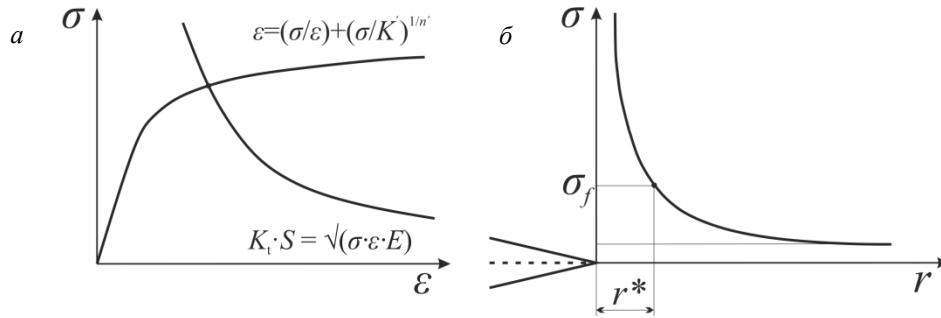


Рис. 2. Иллюстрация сочетания правила Нойбера и уравнения Рэмберга–Осгуда (а); местное напряжение вблизи вершины трещины на некотором удалении от нее (б) [3]

Используя уравнения Нойбера и Рэмберга–Осгуда, можно связать КИН K или его размах ΔK с местным напряжением σ^* на удалении от вершины трещины r^* для монотонного и циклического нагружений соответственно:

$$K = \sqrt{2\pi \cdot r^* \cdot E \cdot \sigma^* \cdot \left(\frac{\sigma^*}{E} + \left(\frac{\sigma^*}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right)}, \quad (1)$$

$$\Delta K = \sqrt{2\pi \cdot r^* \cdot E \cdot \Delta \sigma^* \cdot \left(\frac{\Delta \sigma^*}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma^*}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \right)}. \quad (2)$$

Дальнейшее развитие модели связано с учетом переменного характера порогового размаха КИН ΔK_{th} . Ниже приведено уравнение, предлагаемое для расчета скорости роста усталостной трещины:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_{эфф}^n \cdot \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K_{эфф}} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_c} \right)^q}, \quad (3)$$

За основу была принята формула Формана–Метту, описывающая КДУР на всех трех участках изменения скоростей роста усталостной трещины. Коэффициенты Пэриса C и n предлагается определять по так называемому методу трех испытаний. Была проведена серия из 3 регулярных нагружений компактных образцов из алюминиевого сплава 2024-T3 с максимальной нагрузкой $P_{max} = 2$ кН, частотами нагружения $F = 5$ Гц и записи данных $F_{DAQ} = 2500$ Гц и асимметриями цикла $R_1 = 0,1$, $R_2 = 0,3$ и $R_3 = 0,5$. Значения оказались приблизительно равными значениям, полученными другими авторами. Величины коэффициента p , q и вязкости разрушения K_c приняты постоянными. В испытаниях с перегрузками, проведенных

в рамках настоящей работы, асимметрия цикла изменялась от 0 до 0.75, Размах ΔK определялся размахом нагрузки ΔP истории нагружения. Учет закрытия трещины определяли по уравнению Схайве с учетом асимметрии полуцикла $U=f(R)$, а эффективный КИН оценивали $\Delta K_{эфф} = \Delta K \cdot U$. При известном размахе КИН ΔK для каждого полуцикла по формуле (2) определяли значение местного напряжения σ^* на удалении от вершины трещины r^* , а на основании аналитической зависимости $K_{th}=f(\sigma^*)$ оценивали пороговый КИН, подставляя его в уравнение (3). Таким образом, при прогнозировании усталостной долговечности известная история нагружения позволяла определить $\Delta K_{эфф}$, K_{max} и K_{th} на каждом цикле [5].

При расчете кинетики роста трещины величины C , n , p , q и K_c постоянны и известны, а вводимая история нагружения задает изменение ΔK , K_{max} и ΔK_{th} . Суммирование приращений длин трещин на каждом цикле или в результате каждого повторения истории нагружения позволяет определить долговечность:

$$N_f = \frac{a_f - a_0}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left(\frac{da}{dN} \right)_{ij}} \quad (4)$$

где a_f – критическая длина трещины; a_0 – начальная длина трещины; n – число циклов истории нагружения; m – число повторений истории нагружения; $(da/dN)_{ij}$ – скорость роста трещины и приращение на i цикле j повторения истории нагружения.

Результаты исследования

Были проведены испытания компактных образцов типа С(Т) толщиной 5 мм на трещиностойкость согласно стандарту ASTM E647 при различных видах регулярного и нерегулярного циклического нагружения с изменением различных силовых параметров P_{max} , характера

переменного нагружения OV и асимметрии R . Был проведен проверочный расчет на базе экспериментальных данных и сравнение его с данными, полученными по предлагаемой модели.

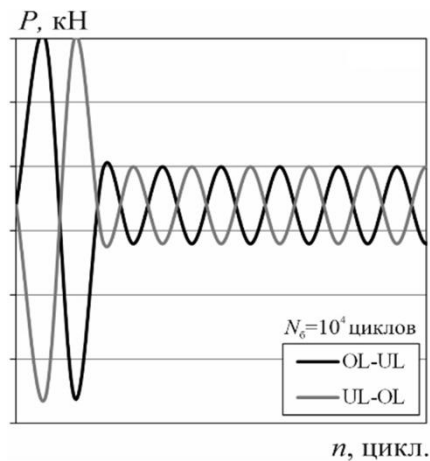


Рис. 3. Схемы режимов нагружения с перегрузками UL-OL и OL-UL

Сравнение производилось на алюминиевом сплаве AL 2024-T3. Начальная длина трещины $a_0 = 14$ мм. План испытаний представлен регулярным нагружением CAL (Constant amplitude loading), а также комбинациями растягивающих и сжимающих полуциклов нагружений типа недогрузка-перегрузка (UL-OL), перегрузка-недогрузка (OL-UL), где уровень перегрузки OV 30-50% по отношению к максимальному базовому регулярному нагружению. После перегрузок частотой $f_1 = 0.1$ Гц происходило регулярное нагружение частотой 25 Гц в течение $N_0 = 10^4$ циклов, а затем нагружение повторялось. Схема режимов нагружения представлены на рис. 3.

В таблице приведены численные значения экспериментальных и расчетных результатов по представленной модели. В испытаниях с 1 по 4 величина $P_{\max}$ базового регулярного нагружения составляла 1,7 кН, с 5 по 10 – 2 кН.

Результаты продолжительности роста трещины AL 2024-T3
(экспериментальные $N_{\text{эксп}}$ и по модели учета локальных напряжений $N_{\text{расч}}$)

№ п/п	Нагружение	$N_{\text{эксп}}$, млн. цикл	$N_{\text{расч}}$, млн. цикл
1	UL-OL $R=0.7$ 50% OV	34.3	31.2
2	OL-UL $R=0.7$ 50% OV	3.28	2.8
3	UL-OL $R=0.7$ 30% OV	2.39	2.12
4	OL-UL $R=0.7$ 30% OV	1.97	1.56
5	UL-OL $R=0.75$ 50% OV	30.4	28.7
6	OL-UL $R=0.75$ 50% OV	3.18	2.72
7	UL-OL $R=0.75$ 40% OV	7.84	6.53
8	OL-UL $R=0.75$ 40% OV	2.09	1.81
9	UL-OL $R=0.75$ 30% OV	3.26	3.01
10	OL-UL $R=0.75$ 30% OV	1.77	1.52
11	CAL $R=0.7$ $P_{\max}=1.7$ кН	1.91	1.9
12	CAL $R=0.75$ $P_{\max}=2$ кН	1.75	1.75
13	CAL $R=0.7$ $P_{\max}=1.5$ кН	2.49	2.49
14	CAL $R=0.1$ $P_{\max}=2.5$ кН	0.046	0.038
15	CAL $R=0.3$ $P_{\max}=2.5$ кН	0.08	0.072
16	CAL $R=0.5$ $P_{\max}=2.5$ кН	0.153	0.141

На рис. 4 показаны результаты расчета по представленной модели в сравнении с экспериментальными данными $N_{\text{эсп.}}$.

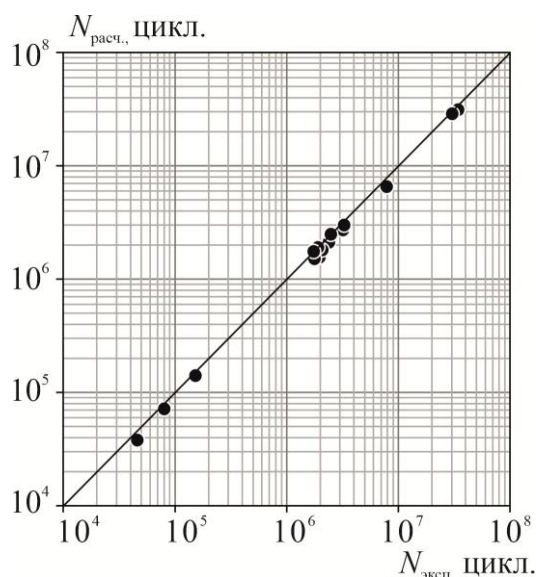


Рис. 4. Взаимосвязь продолжительности роста трещины по предлагаемой модели пластичности экспериментальными данными из работы

Выводы

Полученные результаты по предложенной модели пластичности с учетом локальных напряжений обладают значением коэффициента корреляции равным 0,96. Модель показыва-

ет хорошие результаты, что свидетельствует о том, что физические аспекты, заложенные в ней, позволяют решить проблему учета последовательности нагрузок при разных типах нагружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панасюк, В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов / В. В. Панасюк. – Киев : Наукова думка, 1991. – 416 с.
2. Kiciak, A. Calculation of stress intensity factors and crack opening displacements for cracks subjected to complex stress fields / A. Kiciak, G. Glinka, D. J. Burns // Journal of Pressure Vessel Technology. – Vol. 125. – 2003. – P. 260-266.
3. Sunder, R. Unraveling the Science of Variable Amplitude Fatigue / R. Sunder // Journal of ASTM International. – 2012. – Vol. 9, №1, – 32 p.
4. Sunder, R. Fatigue as process of brittle micro-fracture / R. Sunder // Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures. 2005. - Vol. 28, №3. - P. 289-300.
5. Савкин, А. Н. Approximation Algorithms of Crack Growth Rate Curve Based on Crack Size Variations / А. Н. Савкин, А. В. Андроник, R. Koraddi // Journal of Testing and Evaluation. – 2016. – Vol. 44, No. 1. – С. 310–319.
6. Влияние перегрузок на околопороговую скорость роста усталостных трещин в алюминиевом сплаве 2024-Т3 / А. Н. Савкин, А. В. Андроник, А. А. Седов, К. А. Бадиков // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 9 (219) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2018. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 102–109.
7. Швечков, Е. И. Характеристики трещиностойкости металлических материалов / Е. И. Швечков // Технология легких сплавов. – 2023. – № 2. – С. 62–69.