

Научная статья

1.3.8. Физика конденсированного состояния (физико-математические науки)

УДК 621.7

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.003

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДЛИНЫ УСТАЛОСТНЫХ ТРЕЩИН ПРИ ИХ ЗАЛЕЧИВАНИИ ИМПУЛЬСНЫМ ТОКОМ

**Оксана Владимировна Муругова¹, Марсель Ильясович Нагимов²,
Гульнара Рашитовна Халикова³, Сергей Владимирович Дмитриев^{4†}**

^{1,3,4} Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, 450064, Уфа, Россия

¹ Уфимский университет науки и технологий, ул. Заки Валиди, 32, 450076, Уфа, Россия

^{2,3} Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина, 39, 450001, Уфа, Россия

⁴ Институт физики молекул и кристаллов, Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, Проспект Октября, 71, 450054, Уфа, Россия

¹ murugova.oxana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9510-4029>

² n_marsel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5128-3350>

³ gulnara.r.khalikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6712-8469>

⁴ dmitriev.sergey.v@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

Аннотация. В последнее время ведутся интенсивные исследования по залечиванию усталостных трещин путём пропускания импульсов электрического тока высокой плотности. При этом возникает задача определения на сколько укоротилась трещина за счёт оплавления материала в вершине трещины, вызванного джоулевым разогревом. Сложность решения этой задачи состоит в том, что после частичного заваривания трещины непросто определить местоположение вершины трещины с использованием оптического микроскопа. Определение точного местоположения вершины трещины также затруднено для образцов с загрязненной или корродированной поверхностью. В данной работе предложен подход к оценке длины трещины в образцах на усталостное нагружение, основанный на решении задачи теории упругости в двумерной постановке. Методом конечных элементов решена задача определения раскрытия трещины при нагружении консольно закреплённых образцов изгибающей нагрузкой в упругой области. Рассчитаны максимальные напряжения Мизеса в образце при нагружении единичной изгибающей силой. Величину раскрытия трещины можно измерить с помощью оптического измерительного микроскопа и по результатам расчёта определить длину трещины. Для тестирования предложенного подхода проведены экспериментальные исследования на полосках из титанового сплава ВТ6 с зеркально полированной поверхностью, которая позволила измерить длину усталостной трещины с помощью оптического микроскопа. Было получено три образца с трещинами разной длины, для которых проведены испытания на изгиб с измерением величины раскрытия трещины с помощью оптического микроскопа. Кроме того, длина трещины определялась из конечно-элементного расчёта, связывающего длину трещины с величиной её раскрытия при заданной нагрузке. Экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования.

Ключевые слова: усталостные испытания, усталостная трещина, длина трещины, метод конечных элементов.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 24-11-00139.

Для цитирования: Муругова О.В., Нагимов М.И., Халикова Г.Р., Дмитриев С.В. Методика оценки длины усталостных трещин при их залечивании импульсным током // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2024. Т. 21, № 3. С. 294–303. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.003.

METHOD FOR ESTIMATING THE LENGTH OF FATIGUE CRACKS DURING THEIR HEALING BY PULSED ELECTRIC CURRENT

Oxana V. Murugova¹, Marsel I. Nagimov², Gulnara R. Khalikova³, Sergey V. Dmitriev^{4†}^{1,3,4} Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov St., 1, Ufa, 450064, Russia¹ Ufa University of Science and Technology, Zaki Validi St., 32, Ufa, 450076, Russia^{2,3} Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS, Khalturin St., 39, Ufa, 450001, Russia⁴ Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Centre of RAS, Oktyabrya Ave., 71, Ufa, 450054, Russia¹ murugova.oxana@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9510-4029>² n_marsel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-5128-3350>³ gulnara.r.khalikova@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6712-8469>⁴ dmitriev.sergey.v@gmail.com[†], <https://orcid.org/0000-0002-6744-4445>

Abstract. Recently, intensive research has been conducted on fatigue crack healing by passing pulses of high-density electric current. In this case there is a problem of determining how much the crack has shortened due to melting of the material at the crack tip caused by Joule heating. The difficulty in solving this problem is that after partial welding of the crack it is not easy to determine the location of the crack tip using an optical microscope. Determining the exact location of the crack tip is also difficult for specimens with contaminated or corroded surfaces. In this paper, we propose an approach to estimating the crack length in fatigue-loaded specimens based on the solution of a two-dimensional elasticity theory problem. The problem of determining the crack opening when cantilevered specimens are loaded with a bending load in the elastic region is solved by the finite element method. The maximum Mises stresses in the specimen when loaded with a unit bending force were calculated. The crack opening value can be measured using an optical measuring microscope and the crack length can be determined from the calculation results. To test the proposed approach, experimental studies were carried out on strips of VT6 titanium alloy with mirror polished surface, which allowed measuring the length of fatigue crack using an optical microscope. Three specimens with cracks of different lengths were obtained, for which bending tests were carried out with measurement of the crack opening value using an optical microscope. In addition, the crack length was determined from a finite element calculation relating the crack length to the crack opening at a given load. The experimental results are in good agreement with the modeling results.

Keywords: fatigue tests, fatigue crack, crack length, finite element method.

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 24-11-00139.

For citation: Murugova, O. V., Nagimov, M. I., Khalikova, G. R. & Dmitriev, S. V. (2024). Method for estimating the length of fatigue cracks during their healing by pulsed electric current. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 21(3), 294–303. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2024.03.003.

Введение

Известно несколько важных для практики эффектов взаимодействия электрического тока с металлами, самый элементарный из них – выделение тепла, связанного с рассеянием потока электронов на тепловых колебаниях и на дефектах кристаллической структуры. Существует и так называемый электропластический эффект, заключающийся в повышении пластичности металлов без заметного нагрева при пропускании импульсного тока высокой плотности через металл, подвергаемый пластической деформации. Этот эффект был впервые описан для металлов О.А. Троицким [1, 2]. Электроимпульсная обработка металлов и сплавов находит различные применения для повышения их пластичности [3], в частности, при вытяжке [4–6], прокатке, штамповке, компактировании

стружки и других технологических процессов [7]. Поскольку повышение пластичности происходит без сильного нагрева, электропластическая деформация позволяет экономить энергию, затрачиваемую на формоизменение металла, а также избежать нежелательных фазовых переходов и других структурных изменений, протекающих при повышенных температурах. В этой связи, изучению технологических процессов, основанных на электропластическом эффекте, уделяется большое внимание во всем мире [8–13].

Технология электроимпульсной обработки током высокой плотности применяется для повышения эксплуатационных характеристик металлических материалов с 1990-х годов и по многим параметрам показала значительные преимущества перед традиционной термообработкой [14]. Однако изменения микроструктуры

ры металлов и сплавов, подвергнутых электроимпульсной обработке, изучены не полностью, и их влияние на различные материалы существенно различается. Электрические импульсы высокой плотности обычно приводят к структурным перестройкам, таким как динамическая рекристаллизация, перемещение дислокаций и измельчение зерен. Улучшение механических свойств металлов и сплавов после такой обработки может выражаться в значительном увеличении удлинения до разрыва. В результате данная технология открывает большие перспективы для повышения предела деформации и устранения трещин и дефектов при пластической обработке металлов.

Следующим важным применением импульсного тока большой плотности является залечивание усталостных трещин путём оплавления материала в вершине трещины за счёт выделения джоулева тепла [15-16]. Помимо импульсного тока для этих целей могут применяться токи Фуко, наводимые в проводнике в переменном во времени электромагнитном поле. Процесс заваривания трещин током моделировался в ряде работ [18-26]. Импульсный ток с успехом применяются для повышения пластичности металлов при их обработке давлением [12, 13, 27].

Микротрещины могут быть заварены однократным импульсом, однако макротрещины обычно завариваются поэтапно несколькими последовательными импульсами. В лабораторных экспериментах нередко применяют образцы с надрезом, который является концентратором напряжений, от которого растёт трещина. При поэтапном заваривании трещины импульсами тока возникает задача оценки изменения длины трещины после каждого импульса. Однако не всегда можно с лёгкостью определить положение вершины трещины в образце. В настоящей работе предлагается подход к оценке длины трещины в образце на основе решения соответствующей задачи теории упругости о раскрытии трещины при изгибе образца заданной нагрузкой. Величину раскрытия трещины изгибающим усилием предлагается измерять оптическим микроскопом и сопоставлять измерения с результатами конечно-элементного расчёта для трещин разной длины.

Экспериментальная часть

Образцы для усталостных испытаний из микроструктурного титанового сплава VT6 имели форму полос с размерами $170 \times 18,2 \times 1,92$ мм. В середине образца при помощи электро-

искровой установки был сделан концентратор напряжений в виде надреза, выполненного путём захода проволоки диаметром 0,35 мм на глубину 2 мм. Таким образом, радиус кривизны концентратора составлял 0,175 мм. Образец в захватах испытательной машины представлен на рис.1, где также виден оптический микроскоп, позволяющий визуально контролировать рост усталостной трещины.

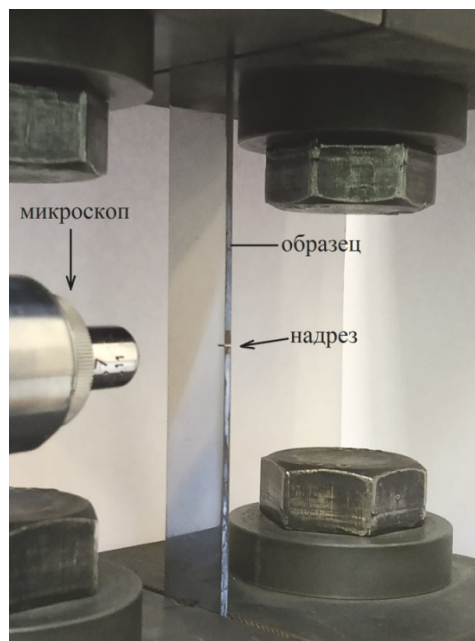


Рис.1. Образец с надрезом из микроструктурного титанового сплава VT6, установленный в захватах испытательной машины. Оптический микроскоп использовался для визуального наблюдения за ростом усталостной трещины

Fig.1. A notched sample made of microstructured titanium alloy VT6, installed in the grips of a testing machine. An optical microscope was used to visually observe fatigue crack growth

Константы упругости исследуемого сплава следующие: модуль Юнга 117 ГПа, коэффициент Пуассона 0,32, предел текучести 1100 МПа.

Усталостные трещины выращивались при переменном растяжении на сервогидравлической испытательной машине SchenckHydropulsPSA10 с коэффициентом асимметрии цикла $R = (0,1-0,2)$ при комнатной температуре. Частота при синусоидальной форме нагружения составляла $f=7$ Гц. Режимы нагружения при усталостных испытаниях: для образца №1 – максимальное усилие цикла $P_{\max}=17,07$ кН, среднее усилие цикла $P_{st}=10,24$ кН, минимальное усилие цикла $P_{\min}=3,41$ кН; для образцов №2 и №3 – макси-

мальное усилие цикла $P_{\max}=8,53$ кН, среднее усилие цикла $P_{st}=6,83$ кН, минимальное усилие цикла $P_{\min}=1,71$ кН.

На трёх образцах были выращены усталостные трещины различной длины l . Для образца №1 $l=5,34$ мм, для образца №2 $l=7,44$ мм и для образца №3 $l=10,37$ мм. Исследования микроструктуры исследуемого сплава проводили на оптическом микроскопе Bresser Science ADL-601P. Фотографии трещин на полированных поверхностях образца представлены на рис.2.

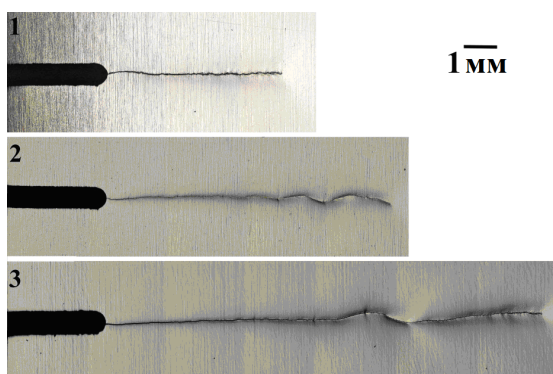


Рис.2. Фотографии усталостных трещин, выросших из вершины надреза. Надрез виден слева. Длины трещин сверху вниз: 5,34, 7,77 и 10,37 мм

Fig.2. Photographs of fatigue cracks growing from the tip of a notch. The incision is visible on the left. Crack lengths from top to bottom: 5.34, 7.77 and 10.37 mm

Конечно-элементное моделирование

Геометрия

Задача решается в двумерной постановке, рассматривается плоское напряжённое состояние. Геометрия образца построена в программе Fidesys с помощью примитивов на основе вводных данных. Все координаты вводятся в программу в метрах, поскольку расчёты проводятся в международной системе измерения СИ.

На рис.3а представлен общий вид пластины, разделённой на четыре области, и на рис.3б показан укрупненный план надреза. Области 1 и 3 разделены надрезом и трещиной, в то время как между областями 2 и 4 нет никакой физической границы, как нет её и между областями 1 и 2, а также 3 и 4. Трещина не видна на рисунке, поскольку принимается, что расстояние между её берегами равно нулю. Размеры исследуемой пластины следующие: длина 170 мм, ширина 18,2 мм и толщина 1,92 мм. Надрез имеет ширину 0,35 мм и глубину 2,0 мм. Длина трещины варьировалась.

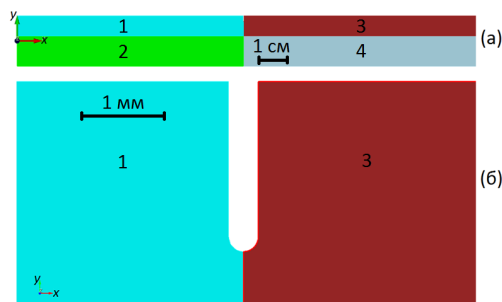


Рис.3. а) общий вид образца с надрезом и трещиной, разделяющими области 1 и 3. Между областями 2 и 4 нет физической границы, так же как и между областями 1 и 2 и областями 3 и 4; б) крупный план надреза и трещины, разделяющей области 1 и 3

Fig.3. а) general view of the sample with a notch and a crack separating regions 1 and 3. There is no physical boundary between regions 2 and 4, as well as between regions 1 and 2 and regions 3 and 4; б) close-up of the cut and crack separating areas 1 and 3

Использовалась неоднородная по густоте конечно-элементная сетка со сгущением вблизи надреза и трещины с тем, чтобы точнее воспроизвести быстро меняющиеся с координатами параметры напряжённо-деформированного состояния вблизи вершины трещины (см. рис.4). Средний характерный размер конечного элемента в области сгущения составил 0,2 мм. Количество элементов 80574 шт.

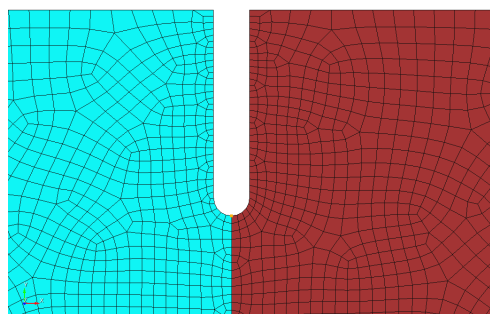


Рис.4. Вид конечно-элементной сетки в окрестности надреза и трещины

Fig.4. View of a finite element mesh in the vicinity of a notch and crack

Используемые граничные условия и условия нагружения показаны на рис.5. На левом конце образца задавалась жесткая заделка, а на правом прикладывалась распределенная по торцу образца сила, создающая изгибающий момент, раскрывающий трещину. Поскольку решается задача линейной теории упругости, все параметры напряженно-деформированного состояния пропорциональны величине нагрузки и достаточно решить задачу для силы равной 1 Н.



Рис.5. Условия закрепления и нагружения образца с надрезом и трещиной. Левый конец образца жестко закреплен, на правый действует изгибающая сила, распределенная по торцу образца

Fig.5. Conditions for fastening and loading a specimen with a notch and a crack. The left end of the sample is rigidly fixed, the right end is subject to a bending force distributed along the end of the sample

Были заданы следующие настройки решателя: вид анализа: статический; модель поведения: упругая; размерность: 2D.

Результаты моделирования

Основными задачами проведения расчётов были: (1) определение зависимости раскрытия трещины от её длины и (2) определение максимальной интенсивности напряжений в деформированном образце как функции длины трещины. Из решения первой задачи можно экспериментально оценить длину трещины путём измерения её раскрытия. Решение второй задачи важно для того, чтобы в эксперименте при нагружении образца не выходить из области упругости, чтобы не вносить структурные изменения в материале.

Консольно закреплённый образец с надрезом и трещиной, нагруженный изгибающей силой 1 Н, изображён на рис.6 в деформированном состоянии. Перемещения узлов умножены на большой коэффициент для того, чтобы выявить особенности формоизменения под нагрузкой. Суммарное перемещение (в метрах) также показано цветом в соответствии с приведённой шкалой. Максимальное перемещение $2,9 \times 10^{-5}$ мм достигается на правом конце образца.

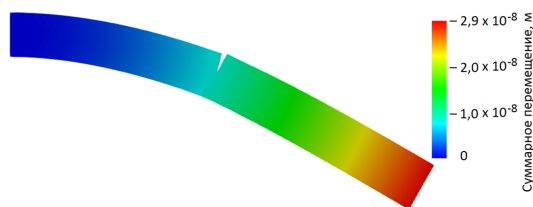


Рис.6. Вид деформированного консольно закреплённого образца при изгибающей силе 1 Н. Длина трещины 5 мм. Перемещения узлов умножены на большой коэффициент для выявления особенностей формоизменения под нагрузкой

Fig.6. View of a deformed cantilevered sample under a bending force of 1 N. Crack length 5 mm. The displacements of the nodes are multiplied by a large factor to identify the features of shape change under load

Величина раскрытия трещины определялась расстоянием Δ между точками А и В, как показано на рис.7.

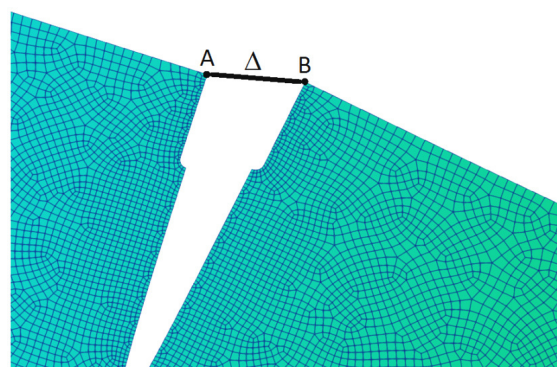


Рис.7. Изменение расстояния Δ между узлами А и В служит мерой раскрытия трещины при нагружении образца. В данном примере длина трещины 5 мм

Fig.7. The change in the distance Δ between nodes A and B serves as a measure of crack opening when the sample is loaded. In this example, the crack length is 5 mm

В ходе ряда однотипных расчётов с варьированием длины трещины ($L = 5, 6.5, 8, 9.5$ и 11 мм) были получены значения Δ для распределенной изгибающей силы 1 Н. Данные приведены в таблице 1 и представлены на рис.8.

Таблица 1. Величина Δ , характеризующая раскрытие трещины при действии изгибающей силы 1 Н, для различных значений глубины трещины L при $\Delta_0 = 0,35$ мм

Table 1. Value Δ characterizing crack opening under the action of a bending force of 1 N, for various values of crack depth L at $\Delta_0 = 0.35$ mm

| L (мм) | $\Delta - \Delta_0$ (мм) |
|----------|--------------------------|
| 5 | 0,0000742303 |
| 6,5 | 0,0001138480 |
| 8 | 0,0001790524 |
| 9,5 | 0,0002964355 |
| 11 | 0,0005367516 |

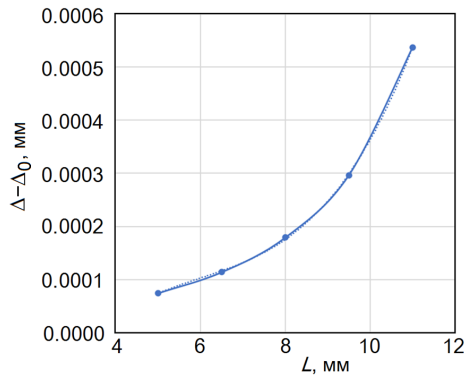


Рис.8. График зависимости расстояния Δ от длины трещины L при распределенной изгибающей силе 1 Н. Данные аппроксимированы кубическим полиномом (1)

Fig.8. Graph of distance Δ versus crack length L for a distributed bending force of 1 N. Data approximated by cubic polynomial (1)

Зависимость расстояния $\Delta - \Delta_0$ от длины трещины L (обе величины измеряются в мм) может быть аппроксимирована следующим кубическим полиномом

$$\Delta - \Delta_0 = 2 \cdot 10^{-6} L^3 - 4 \cdot 10^{-5} L^2 + 3 \cdot 10^{-4} L. \quad (1)$$

В предложенном методе оценки длины трещины по измерению её раскрытия при приложении к образцу изгибающей силы важно оценить максимальные напряжения, возникающие в образце при нагружении единичной силой. Это позволит при приложении силы не выходить за пределы упругости материала в образце и избежать появления новых дефектов в пластически деформируемых участках образца.

С этой целью проводились расчёты с варьированием длины трещины ($L = 5, 6.5, 8, 9.5$ и 11 мм) и были получены значения максимальных напряжений Мизеса для распределенной изгибающей силы 1 Н. Пример визуализации распределения напряжений Мизеса по образцу для трещины длиной 5 мм приведен на рис.9. Видно, что максимальные напряжения наблюдаются в вершине трещины. Повышенные напряжения также видны ближе к заделанному концу образца (поскольку этот конец подвержен наибольшему изгибающему моменту), и на краях образца, на удалении от нейтральной линии изгиба консоли. Максимальное напряжение Мизеса в данном примере составило 13328 Па. Поскольку, как отмечалось выше, предел текучести сплава ВТ6 составляет 1100 МПа, максимальное значение изгибающей

силы, которое не выводит материал в область пластического течения, составляет 82,5 кН.

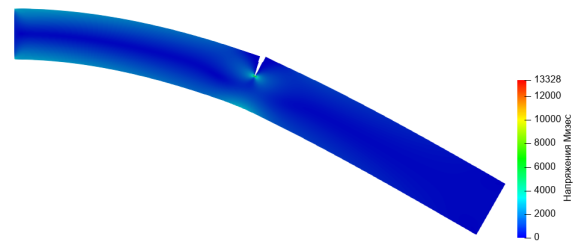


Рис.9. Вид распределения напряжений Мизеса по консольно закреплённому образцу при изгибающей силе 1 Н. Длина трещины 5 мм. Перемещения узлов умножены на большой коэффициент для выявления особенностей формоизменения под нагрузкой. Максимальное напряжение Мизеса в вершине трещины составило 13328 Па

Fig.9. Type of von Mises stress distribution over a cantilevered specimen under a bending force of 1 N. Crack length 5 mm. The displacements of the nodes are multiplied by a large factor to identify the features of shape change under load. The maximum von Mises stress at the crack tip was 13328 Pa

В таблице 2 представлены максимальные значения напряжений Мизеса в образце, нагруженном изгибающей силой 1 Н для разных значений длины трещины. Эти данные представлены графически на рис.10. Аппроксимирующий кубический полином представлен выражением (2).

Таблица 2. Величина максимального напряжения Мизеса (Па), возникающего в консольном образце при действии изгибающей силы 1 Н, для различных значений длины трещины L

Table 2. The value of the maximum Mises stress (Pa) arising in a cantilever sample under the action of a bending force of 1 N, for different values of crack length L

| L (мм) | Напряжения (Па) |
|----------|-----------------|
| 5 | 13 327 |
| 6,5 | 16 798 |
| 8 | 21 686 |
| 9,5 | 29 286 |
| 11 | 42 460 |

Данные расчётов, приведённые на рис.10, аппроксимируются по методу наименьших квадратов следующим кубическим полиномом

$$\sigma_M^{max} = 102,64L^3 - 1761,2L^2 + 12404L - 17517, \quad (2)$$

где максимальные напряжения Мизеса измеряются в Па, а длина трещины L в мм.

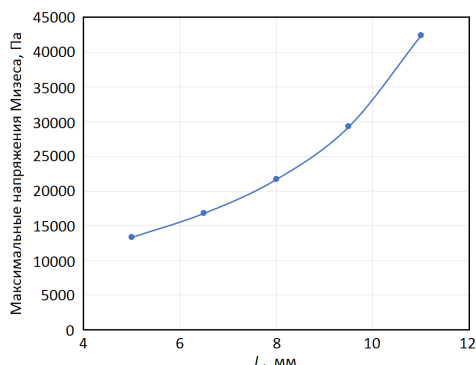


Рис.10. График зависимости максимальных напряжений Мизеса от длины трещины L при распределенной изгибающей силе 1 Н. Данные аппроксимированы кубическим полиномом (2)

Fig.10. Graph of maximum von Mises stress versus crack length L for a distributed bending force of 1 N. Data approximated by cubic polynomial (2)

Результаты эксперимента

Для консольно закрепленного образца с усталостной трещиной было экспериментально измерено раскрытие трещины под действием изгибающего момента по схеме нагружения, соответствующей рис.7. Геометрические размеры и упругие характеристики материала образца соответствовали тем, что использовались в конечно-элементном моделировании. Длина усталостной трещины $L=7,77$ мм. Нагружение проводилось в упругой области, максимальная приложенная сила составила 150 Н. Отметим, что согласно аппроксимации (2) для рассмотренной трещины максимальное напряжение Мизеса при нагрузке 1 Н равно 20,7 кПа, что при нагрузке 150 Н дает 3,1 МПа при пределе текучести 1100 МПа.

Согласно аппроксимации (1), для усталостной трещины $L=7,77$ мм при нагрузке 1 Н, $\Delta-\Delta_0=1,7 \cdot 10^{-4}$ мм. При нагрузке 150 Н получаем $2,55 \cdot 10^{-2}$ мм. Экспериментально измеренное значение раскрытия трещины при действии такой нагрузки оказалось равным $2,67 \cdot 10^{-2}$ мм, что отличается от расчетного на 4,5 %.

Заключение

Предложен метод оценки длины трещины в образце на усталостные испытания, который основан на измерении с помощью оптического микроскопа величины раскрытия трещины при

нагружении консольно закрепленного образца заданной изгибающей силой. Результат измерения сопоставляется с результатом решения соответствующей задачи теории упругости методом конечных элементов по полученной зависимости раскрытия трещины от её длины при заданной нагрузке. Проведён проверочный эксперимент, который показал результат, отличающийся от теоретического расчета на 4,5 %. Получена зависимость максимального напряжения Мизеса от приложенной нагрузки, что позволяет установить значения силы, изгибающей образец, не выводящей материал за пределы упругости.

Предложенный метод предполагается использовать в экспериментах по залечиванию усталостных трещин импульсным током высокой плотности.

Список литературы

1. Troitsky O.A. Electromechanical effect in metals // JETP Lett. 1969. V. 10, N 1. P. 18–22.
2. Troitskiy O.A. Rate and temperature dependence of the electroplastic effect // Physics of Metals and Metallography. 1971. V. 32, N 2. P. 178–183.
3. Dimitrov N.K., Liu Y., Horstemeyer M.F. Electroplasticity: A review of mechanisms in electro-mechanical coupling of ductile metals // Mechanics of Advanced Materials and Structures. 2022. V. 29. P. 705–716.
4. Bazaykin V.I., Gromov V.E., Kuznetsov V.A., Peretyatko V.N. Mechanics of electrostimulated wire drawing // International Journal of Solids and Structures. 1991. V. 27, Is. 13. P. 1639–1643.
5. Tsellermaer, V.Ya., Gromov V.E., Kornienko L.A., Chubenko T.Yu., Aponasenkova O.V. Mechanisms of electrostimulated plasticity during wire-drawing of stainless steel Kh18N10T // Soviet Physics Journal. 1991. V. 34, N 11. P. 1004–1007.
6. Gromov V.E., Petrunin V.A. Localization of plastic deformation under conditions of electrostimulated drawing // Physica Status Solidi (a). 1993. V. 139, N 1. P. 77–81.
7. Skvortsov O.B., Stashenko V.I., Troitsky O.A. Electroplastic effect and interaction of an electrical impulse with a conductor // Letters on Materials. 2021. V. 11, N 4. P. 473–478.
8. Li M., Guo D., Li J., Zhu S., Xu C. et al. Achieving heterogeneous structure in hcp Zr via

- electroplastic rolling // Mater. Sci. Eng. A. 2018. V. 722. P. 93–98.
9. Liu Y.Y., Zhu W.C., Deng W.K., Song P., Liu X.M. et al. Tailoring phase composition of a multielement TiZrAlV alloy via electroplastic rolling // Materials Letters. 2022. V. 326, N 1. 132982.
10. Jeong H.-J., Park J.-W., Shin E., Woo W., Kim M.-J. et al. Electric current-induced precipitation hardening in advanced high-strength steel // Scripta Mater. 2022. V. 220. 114933.
11. Yang D., Conrad H. Exploratory study into the effects of an electric field and of high current density electropulsing on the plastic deformation of TiAl // Intermetallics. 2001. V. 9. P. 943–947.
12. Stolyarov V., Calliari I., Gennari C. Features of the interaction of plastic deformation and pulse current in various materials // Mater. Lett. 2021. V. 299. 130049.
13. Stolyarov V., Misochenko A. A pulsed current application to the deformation processing of materials // Materials. 2023. 16(18). 6270.
14. Sheng Y., Hua Y., Wang X., Zhao X., Chen L. et al. Application of high-density electropulsing to improve the performance of metallic materials: Mechanisms, microstructure and properties // Materials. 2018. 11(2). P. 185.
15. Zhou Y., Guo J., Gao M., He G. Crack healing in a steel by using electropulsing technique // Materials Letters. 2004. 58(11). P. 1732–1736.
16. Hosoi A., Nagahama T., Ju Y. Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field // Materials Science and Engineering: A. 2012. V. 533. P. 38–42.
17. Kukudzhанov V.N., Kolomiets-Romanenko A.V. Study of the influence of electric current dynamical action on mechanical properties of materials with ordered structure of defects // Mech. Solids. 2010. V. 45. P. 465–475.
18. Qin R.S., Su S.X. Thermodynamics of crack healing under electropulsing // J. Mater. Res. 2002. V. 17. P. 2048–2052.
19. Conrad H. A study into the mechanism(s) for the electroplastic effect in metals and its application to metalworking, processing and fatigue // Final Report ARO Proposal. 1989. 23090-MS.
20. Yu J., Zhang H., Deng D., Hao S. Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing // Chinese J. Mech. Eng. 2014. V. 27, N 4. P. 745–753.
21. Klyushnikov V.D., Ovchinnikov I.V. Plane problem of effect of an instantaneous point heat source // Mech. Solids. 1988. V. 23, N 4. P. 113–117.
22. Klyushnikov V.D. Modeling the treatment of high-energy pulsed electromagnetic field of the micro-cracks in a polycrystalline metal // PNRPU Mechanics Bulletin. 2015. V. 58. P. 138–158.
23. Kukudzhанov K.V., Levitin A.L. Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. Part II // Nanomech. Sci. Technol. 2016. V. 7, N 2. P. 123–148.
24. Kukudzhанov K.V., Levitin A.L. Healing of damaged metal by a pulsed high-energy electromagnetic field // J. Phys.: Conf. Ser. 2018. V. 991. 012049.
25. Kukudzhанov K.V., Levitin A.L. Phase transformations in metals stimulated by a pulsed high energy electromagnetic field // Procedia IU-TAM. 2017. V. 23. P. 84–100.
26. Kukudzhанov K.V., Levitin A.L. Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. Part I // Nanomech. Sci. Technol. 2015. V. 6, N 3. P. 233–249.
27. Абдуллина Д.У., Бебихов Ю.В., Татаринов П.С., Дмитриев С.В. Обзор последних достижений в области электропластической обработки металлов давлением // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20, № 4. С. 469–483.

Информация об авторах

О. В. Муругова – кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования и технологии сварки и контроля Уфимского государственного нефтяного технического университета.

М. И. Нагимов – младший научный сотрудник группы механических испытаний Института проблем сверхпластичности металлов РАН.

Г. Р. Халикова – кандидат технических наук, старший научный сотрудник группы рентгеноструктурного анализа Института проблем сверхпластичности металлов РАН; доцент кафедры «Технологические машины и оборудование» Уфимского государственного нефтяного технического университета.

С. В. Дмитриев – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией «Нелинейная динамика молекул и кристаллов» Института физики молекул и кристаллов, Уфимского федерального исследовательского центра.

References

1. Troitsky, O. A. (1969). Electromechanical effect in metals. *JETP Lett.*, 10(1), 18–22.
2. Troitskiy, O. A. (1971). Rate and temperature dependence of the electroplastic effect. *Physics of Metals and Metallography*, 32(2), 178–183.
3. Dimitrov, N. K., Liu, Y. & Horstemeyer, M. F. (2022). Electroplasticity: A review of mechanisms in electro-mechanical coupling of ductile metals. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 29, 705–716.
4. Bazaykin, V. I., Gromov, V. E., Kuznetsov, V. A. & Peretyatko, V. N. (1991). Mechanics of electrostimulated wire drawing. *International Journal of Solids and Structures*, 27(13), 1639–1643.
5. Tsellermaer, V. Ya., Gromov, V. E., Kornienko, L. A., Chubenko, T. Yu. & Aponasenkova, O. V. (1991). Mechanisms of electrostimulated plasticity during wire-drawing of stainless steel Kh18N10T. *Soviet Physics Journal*, 34(11), 1004–1007.
6. Gromov, V. E. & Petrunin, V. A. (1993). Localization of plastic deformation under conditions of electro-stimulated drawing. *Physica Status Solidi (a)*, 139(1), 77–81.
7. Skvortsov, O. B., Stashenko, V. I. & Troitsky, O. A. (2021). Electroplastic effect and interaction of an electrical impulse with a conductor. *Letters on Materials*, 11(4), 473–478.
8. Li, M., Guo, D., Li, J., Zhu, S., Xu, C. et al. (2018). Achieving heterogeneous structure in hcp Zr via electroplastic rolling. *Mater. Sci. Eng. A.*, 722, 93–98.
9. Liu, Y. Y., Zhu, W. C., Deng, W. K., Song, P. & Liu, X. M. et al. (2022). Tailoring phase composition of a multielement TiZrAlV alloy via electroplastic rolling. *Materials Letters*, 326(1), 132982.
10. Jeong, H.-J., Park, J.-W., Shin, E., Woo, W. & Kim, M.-J. et al. (2022). Electric current-induced precipitation hardening in advanced high-strength steel. *Scripta Mater.*, 220, 114933.
11. Yang, D. & Conrad, H. (2001). Exploratory study into the effects of an electric field and of high current density electropulsing on the plastic deformation of TiAl. *Intermetallics*, 9, 943–947.
12. Stolyarov, V., Calliari, I. & Gennari, C. (2021). Features of the interaction of plastic deformation and pulse current in various materials. *Mater. Lett.*, 299, 130049.
13. Stolyarov, V. & Misochenko, A. (2023). A pulsed current application to the deformation processing of materials. *Materials*, 16(18), 6270.
14. Sheng, Y., Hua, Y., Wang, X., Zhao, X. & Chen, L. et al. (2018). Application of high-density electropulsing to improve the performance of metallic materials: Mechanisms, microstructure and properties. *Materials*, 11(2), 185.
15. Zhou, Y., Guo, J., Gao, M. & He, G. (2004). Crack healing in a steel by using electropulsing technique. *Materials Letters*, 58(11), 1732–1736.
16. Hosoi, A., Nagahama, T. & Ju, Y. (2012). Fatigue crack healing by a controlled high density electric current field. *Materials Science and Engineering: A.*, 533, 38–42.
17. Kukudzhанov, V. N. & Kolomiets-Romanenko, A. V. (2010). Study of the influence of electric current dynamical action on mechanical properties of materials with ordered structure of defects. *Mech. Solids*, 45, 465–475.
18. Qin, R. S. & Su, S. X. (2002). Thermodynamics of crack healing under electropulsing. *J. Mater. Res.*, 17, 2048–2052.
19. Conrad, H. (1989). A study into the mechanism(s) for the electroplastic effect in metals and its application to metalworking, processing and fatigue. *Final Report ARO Proposal*, 23090-MS.
20. Yu, J., Zhang, H., Deng, D. & Hao, S. (2014). Numerical calculation and experimental research on crack arrest by detour effect and joule heating of high pulsed current in remanufacturing. *Chinese J. Mech. Eng.*, 27(4), 745–753.
21. Klyushnikov, V. D. & Ovchinnikov, I. V. (1988). Plane problem of effect of an instantaneous point heat source. *Mech. Solids*, 23(4), 113–117.
22. Klyushnikov, V. D. (2015). Modeling the treatment of high-energy pulsed electromagnetic field of the micro-cracks in a polycrystalline metal. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 58, 138–158.
23. Kukudzhанov, K. V. & Levitin, A. L. (2016). Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. Part II. *Nanomech. Sci. Technol.*, 7(2), 123–148.
24. Kukudzhанov, K. V. & Levitin, A. L. (2018). Healing of damaged metal by a pulsed high-energy electromagnetic field. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 991, 012049.
25. Kukudzhанov, K. V. & Levitin, A. L. (2017). Phase transformations in metals stimulated by a pulsed high energy electromagnetic field. *Procedia IUTAM*, 23, 84–100.

26. Kukudzhanov, K. V. & Levitin, A. L. (2015). Modeling the healing of microcracks in metal stimulated by a pulsed high-energy electromagnetic field. Part I. *Nanomech. Sci. Technol.*, 6(3), 233–249.

27. Abdullina, D. U., Bebikhov, Yu. V., Tatarinov, P. S. & Dmitriyev, S. V. (2023). Obzor poslednikh dostizheniy v oblasti elektroplasticheskoy obrabotki metallov davleniyem. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 20(4), 469–483. (In Russ.).

Information about the authors

O. V. Murugova – Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor of the Department of Equipment and Technology of Welding and

Control, Ufa State Petroleum Technological University.

M. I. Nagimov – Junior Researcher, Mechanical Testing Group, Institute for Metals Superplasticity Problems of RAS.

G. R. Khalikova – PhD, Scientific Associate of X-Ray group of the Institute for Metals Superplasticity Problems, Russian Academy of Sciences, Associate Professor of «Technological Machines and Equipmen» Department of the Ufa State Petroleum Technological University.

S. V. Dmitriev – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Laboratory «Computer Simulations» of the Institute of Molecule and Crystal Physics, Ufa Federal Research Center.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 13.04.2024; одобрена после рецензирования 03.06.2024; принята к публикации 03.07.2024.

The article was received by the editorial board on 13 Apr. 24; approved after reviewing 03 June 24; accepted for publication 03 July 24.