Матвиенко, Ю.Г. Накопление повреждений в зоне концентрации напряжений по данным неразрушающего и разрушающего метода / Ю.Г Матвиенко, С.И. Елеонский, В.С. Писарев. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.05 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 5. – С. 52–68.

Perm Polytech Style: Matvienko Yu.G., Eleonsky S.I., Pisarev V.S. Damage Accumulation in Stress Concentration Zone by Data of Non-Destructive and Destructive Methods. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 5, pp. 52-68. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.05

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 5, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.5.05
УДК 539.4

НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЗОНЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО И РАЗРУШАЮЩЕГО МЕТОДА

Ю.Г Матвиенко[1], С.И. Елеонский[2], В.С. Писарев[2]

[1]Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва Российская Федерация
[2]Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского, Жуковский, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 28 августа 2024 г.
Одобрена: 23 сентября 2024 г.
Принята к публикации: 05 ноября 2024 г.

Ключевые слова:

малоцикловая усталость, накопление повреждений, индикаторы повреждаемости; контактная вмятина; искусственны надрез; метод спекл-интерферометрии.

АННОТАЦИЯ

Разработан и верифицирован новый неразрушающий метод количественного описания накопления повреждений в зоне концентрации напряжений при малоцикловой усталости. Созданный подход основан на эволюции диаметра пластической вмятины, вызванной контактным взаимодействием сферического индентора и плоской поверхности алюминиевого образца на различных этапах малоцикловой усталости. Вдавливание закаленного стального шарика выполняется в непосредственной близости от контура сквозного отверстия в плоском прямоугольном образце. Научная новизна предлагаемого подхода заключается в том, что в качестве текущих индикаторов повреждаемости используются величины трех параметров, связанных с контактной вмятиной, которые получены на основе прямых физических измерений методом спекл-интерферометрии. Для регистрации картин интерференционных полос используется самый простой вариант оптической схемы. На первом этапе показана высокая степень корреляции функций накопления повреждений, построенных с использованием параметров, которые связаны с перемещениями контура отпечатка. Сравнение аналогичных данных, полученных с помощью известного разрушающего подхода и предложенного метода, дает уникальную возможность количественного сравнения результатов двух типов. Это вытекает из того факта, что сопоставляемые данные получены на противоположных поверхностях одного и того же образца с одинаковым уровнем поврежденности. После регистрации картин интерференционных полос, вызванных вдавливанием стальной сферы на одной из внешних сторон образца, на противоположной поверхности того же образца визуализируются интерферограммы, которые генерируются нанесением искусственного надреза при постоянной внешней нагрузке. Величины параметров механики разрушения, которые служат в качестве текущих параметров повреждаемости, определяются для набора образцов на различных этапах малоцикловой усталости. Зависимости этих параметров от количества циклов нагружения позволяют получить явный вид функции накопления повреждений. Такие же функции получены ранее на основе эволюции параметров пластического отпечатка. Сравнение данных двух типов выявляет их высокую корреляцию. Данный факт доказывает надежность неразрушающего метода анализа накопления повреждений на основе вдавливания сферического индентора.

© **Матвиенко Юрий Григорьевич** – д. т. н., проф., заведующий отделом прочности, живучести и безопасности машин ИМАШ РАН, e-mail: ygmatvienko@gmail.com.
Елеонский Святослав Игоревич – к. т. н., с. н. с. отделения статической и тепловой прочности центра прочности летательных аппаратов ФАУ «ЦАГИ», e-mail: juzzepka@mail.ru.
Писарев Владимир Сергеевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отделения статической и тепловой прочности центра прочности летательных аппаратов ФАУ «ЦАГИ», e-mail: VSP5335@mail.ru.

Yury G. Matvienko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Strength, Survivability and Safety of Machines, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, e-mail: ygmatvienko@gmail.com.
Sviatoslav I. Eleonsky – PhD, Senior Researcher at the Department of Static and Thermal Strength of the TSAGI FAA Aircraft Strength Center, e-mail: juzzepka@mail.ru.
Vladimir S. Pisarev – PhD, Leading Researcher at the Department of Static and Thermal Strength of the TSAGI FAA Aircraft Strength Center, e-mail: VSP5335@mail.ru.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

DAMAGE ACCUMULATION IN STRESS CONCENTRATION ZONE BY DATA OF NON-DESTRUCTIVE AND DESTRUCTIVE METHODS

Yu.G Matvienko[1], S.I. Eleonsky[2], V.S. Pisarev[2]

[1]Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation
[2]Central Aero-Hydrodynamics Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 28 August 2024
Approved: 23 September 2024
Accepted for publication:
05 November 2024

Keywords:

low-cycle fatigue, damage accumulation, damage indicators, contact indentation, narrow notch inserting, speckle-pattern interferometry.

ABSTRACT

The study decribes the novel developed and verified non-destructive method for damage accumulation quantifying in stress concentration area under low-cycle fatigue conditions. The created approach employs the evolution of plastic print diameter caused by a spherical ball indentation over lifetime. The ball indentation is performed near the hole in plane rectangular specimens with different levels of damage accumulation. The main scientific novelty of the approach resides in involving current damage indicators, which can be reliably derived on a base of the simplest measurements of two in-plane displacement components by speckle-pattern interferometry. Comparison of the results following from the proposed method with analogous data obtained by known destructive approach provides a way to estimate the reliability of non-destructive technique. There is a unique way for comparing two approaches by using the same specimens because plastic prints are applied to the single external face of each specimen. The opposite face is successively used for registration of fringe patterns, which are attributed by narrow notch inserting. Fracture mechanics parameters, which are related to artificial notche and obtained on different stages of low-cycle fatigue, provide damage accumulation function in an explicit form. Experimental dependencies of the notch mouth opening displacement and stress intensity factor from the loading cycle number are constructed by data of fringe patterns interpretation for seven specimens. Damage accumulation functions constructed proceeding from the ball indentation technique and artificial notch inserting method are in good agreement. Thus, high efficiency of the ball indentation approach with respect to quantitative analysis of damage accumulation is clearly substantiated.

Введение

В настоящее время анализ накопления повреждений, предсказания момента зарождения и последующего роста трещины базируются в основном на деформационных, феноменологических, энергетических и микромеханических моделях, которые включают различные переменные, ответственные за появление повреждений на различных этапах циклического нагружения [1; 2]. Главный недостаток подобных подходов вытекает из того факта, что каждый отдельный шаг накопления повреждений использует параметры, которые невозможно определить по результатам прямых физических измерений [3–5]. Одним из наиболее перспективных путей в направлении количественного анализа накопления повреждений может служить использование эволюции микрорельефа поверхности для идентификации момента зарождения трещины [6]. Однако применение данной методологии сдерживается трудностями, связанными с надежным количественным определением параметров микрорельефа поверхности, которые можно использовать в качестве индикаторов повреждаемости.

Одним из распространенных подходов является применение различных аналитических или численных моделей накопления повреждений [7–21]. Главное ограничение состоит в том, что количественные параметры, необходимые для надежного использования таких моделей, определяются путем испытания регулярных купонов при одноосном и, иногда, двухосном приложении внешней нагрузки [22–31].

Применение разрушающих методов для количественного описания процесса накопления повреждений в металлических элементах конструкций представляет собой один из способов решения данной проблемы [32; 33]. Эффективность предложенной методологии была продемонстрирована как для исходного [32], так и упрочненного отверстия [33]. Ключевым моментом разработанного подхода является тот факт, что нормализованные величины как сингулярных, так и несингулярных параметров механики разрушения, полученные для узкого искусственного надреза, который начинается от контура сквозного отверстия в плоском образце, на различных этапах малоцикловой усталости служат в качестве меры степени поврежденности. В данном случае необходим набор плоских образцов с концентраторами напряжений. Каждый отдельный купон предварительно нагружается до заданного количества циклов, чтобы достигнуть различного уровня поврежденности. Искусственно нанесенный надрез выявляет степень поврежденности материала подобно тому, как зондирующее отверстие вызывает освобождение энергии остаточных напряжений в методе сверления отверстия. Экспериментальный подход основан на оптико-интерференционных измерениях локального деформационного отклика на малое приращение длины надреза. Исходные данные представляют собой тангенциальные компоненты перемещений, которые измеряются методом спекл-интерферометрии непосредственно на берегах надреза. Таким образом, раскрытие в вершине надреза определяется на основе прямых измерений. Переход от измерен-

ных компонент перемещений к величинам коэффициента интенсивности напряжений (КИН) осуществляется с помощью соотношений, основанных на определении коэффициентов Уильямса, которые приведены в работе [34]. Следует, однако, отметить, что реализация подобного подхода требует наличия уникального оборудования, которое дает возможность локального удаления материала в нагруженном образце для обеспечения регистрации картин полос высокого качества. Одним из вариантов решения данной задачи может служить использование интерферометра с мобильным модулем [34]. Кроме того, для получения достаточно подробной функции накопления повреждений необходим набор из 8–10 идентичных образцов.

В первую очередь, возникает желание сократить количество необходимых образцов. С этой целью был разработан и верифицирован новый неразрушающий метод количественного анализа процесса накопления повреждений при малоцикловой усталости в зоне концентрации напряжений, в том числе и при наличии контактного взаимодействия [35; 36]. Основной научной новизной разработанного подхода является тот факт, что в качестве текущих индикаторов повреждаемости используются деформационные параметры, а именно размах максимальных окружных деформаций $\Delta\varepsilon_x^A$, максимальные окружные деформации $\Delta\varepsilon_x^{A-MAX}$ и размах нормальных к поверхности деформаций $\Delta\varepsilon_z^A$ в точке максимальной концентрации напряжений на контуре отверстия. Вторым важным обстоятельством является тот факт, что в качестве второго предельного состояния служит момент появления короткой поверхностной трещины. В-третьих, данные, необходимые для построения функции накопления повреждений, могут быть получены при исследовании одного образца

Описанный выше подход имеет один недостаток, а именно его применение требует привлечения метода отражательной голографической интерферометрии. Реализация такой процедуры связана со значительными техническими трудностями и требует специализированной лаборатории. Поэтому возникает вопрос о создании более простого неразрушающего метода количественного описания процесса накопления повреждений. С этой целью предлагается использовать вдавливание сферического индентора и измерение деформационного отклика в области контактного отпечатка методом электронной спекл-интерферометрии. Реализация разработанного подхода позволяет идентифицировать три измеряемые величины, которые можно использовать как текущие параметры повреждаемости. В работе представлена верификация предложенных индикаторов повреждаемости двумя способами. Первый из них включает сравнение трех функций накопления повреждений, полученных на основе вдавливания сферического индентора. Второй подход использует сравнение функций накопления повреждений, которые построены с помощью неразрушающего подхода и разрушающего метода, основанного на нанесении искусственного надреза.

1. Объекты исследования

Объектами исследования служат плоские образцы размерами 180×24,2×5 мм, изготовленные из алюминиевого сплава 1163Т (модуль упругости E = 74 000 МПа, коэффициент Пуассона μ = 0,33). Чертеж образцов приведен на рис. 1. Все образцы изготовлены из одной заготовки по одинаковой технологии. Отсутствие остаточных напряжений установлено на основе совместного применения метода сверления отверстия и электронной спекл-интерферометрии [34]. Во всех образцах выполнены центральные сквозные отверстия диаметром $2r_0$ = 3 мм.

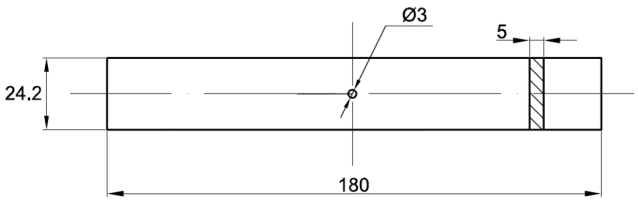


Рис. 1. Чертёж исследуемых образцов типа IDF

Fig. 1. Drawing of the investigated specimen of the IDF type

С целью достижения различного уровня накопленных повреждений все образцы подвергаются одноосному растяжению-сжатию с заранее заданным количеством циклов нагружения. Для этого служит электромеханическая испытательная машина walter + bai ag, Type LFM-Z 200 с диапазоном нагружения 0–200 кН. Выбор количества промежуточных циклов осуществляется после испытания одного из образцов (IDF_0) до разрушения. Параметры малоциклового нагружения составляют: размах напряжений Δσ = 350 МПа; коэффициент асимметрии R = −0,4, величина максимального растягивающего напряжения σ_{MAX} = 250 МПа; величина максимального по модулю сжимающего напряжения σ_{MIN} = –100 МПа. Разрушение контрольного образца IDF_0 произошло после достижения N_F = 3687 циклов. Номенклатура исследованных образцов и соответствующее количество циклов нагружения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Этапы проведения измерений для образцов типа IDF

Table 1

Stages of measurements for IDF type specimens

Номер образца	IDF_1	IDF_2	IDF_3	IDF_4	IDF_5	IDF_6	IDF_6	IDF_0
Количество циклов нагружения, N	0	295	885	1550	2212	2875	3400	3687
Уровень от долговечности, %	0	8	24	42	60	78	92	100

2. Построение функции накопления повреждений по экспериментальным данным

Предлагаемый подход дает возможность получения функции накопления повреждений в явном виде на основе анализа эволюционных зависимостей нормированных значений индикаторов повреждаемости. Для описания накопления повреждений необходимо выбрать монотонно меняющийся параметр исследуемого процесса [37–41]. В нашем случае таким параметром является номер цикла нагружения N_m. В рассмотрение также вводится функция накопления повреждений $D_m(N_m, Z(N_m))$, которая характеризует степень поврежденности материала на основе анализа эволюции индикатора повреждаемости $Z(N_m)$.

Изменение этой функции при возрастании количества циклов нагружения, которое характеризует скорость накопления повреждений, подчиняется кинетическому уравнению [37–41]:

$$\frac{dD_m(N_m, Z(N_m))}{dN_m} = \Psi\left(N_m, Z(N_m)\right). \quad (1)$$

Функция накопления повреждений может быть получена путем интегрирования уравнения (1):

$$D_m\left(N_m, Z(N_m)\right) = \int_0^{N_L} \Psi\left(N_m, Z(N_m)\right) dN_m. \quad (2)$$

Граничные значения функции накопления повреждений $D_m(N_m, Z(N_m))$ (2) обычно удовлетворяют условиям:

$$D_m\left(N_m = 0, Z(N_m)\right) = 0, D_m\left(N_m = N_L, Z(N_m)\right) = 1. \quad (3)$$

Для металлических материалов предельное состояние $D_m = 1$ в соотношениях (3) при малоцикловой усталости относится к количеству циклов, соответствующих полному разделению образца на две части [32; 33]. Также в качестве предельного состояния можно принять количество циклов, соответствующее моменту зарождения макротрещины, если используемый метод измерения обеспечивает надежную идентификацию такого момента [35; 36].

Явный вид функции $\Psi(N_m, Z(N_m))$ из уравнений (1) и (2) можно представить в следующем виде [32, 33]:

$$\Psi\left(N_m, Z(N_m)\right) = \frac{S_D \cdot Z(N_m)}{Z(N_m = 0) \cdot N_L}, \quad (4)$$

где S_D – постоянная величина, определяемая на основе экспериментальных данных; $Z(N_m)$ – экспериментальные величины индикатора повреждаемости, определенные по достижении (N_m); $Z(N_m = 0)$ – экспериментальная величина индикатора повреждаемости для исходного состояния исследуемого объекта; N_L – количество циклов, соответствующее достижению второго предельного состояния из соотношений (3).

Подстановка функции Ψ (4) в соотношение (2) дает следующий вид функции накопления повреждений:

$$D_m\left(N_m, Z(N_m)\right) = \int_{N_m=0}^{N_m=N_L} \frac{S_D \cdot Z(N_m)}{Z(N_m = 0) \cdot N_L} dN_m. \quad (5)$$

Замена интегрирования в формуле (5) на суммирование по отрезкам $\Delta N_m = N_{m+1} - N_m$, в граничных точках которых проводятся измерения индикатора повреждаемости $Z(N_m)$, проводится на основе кусочно-линейной аппроксимации экспериментальной зависимости индикатора повреждаемости $Z(N_m)$ от количества циклов нагружения N_m. В данном случае формулу (5) можно представить в следующем виде:

$$D_m\left(N_m, Z(N_m)\right) = \sum_{N_m=0}^{N_m=N_L} \frac{S_D \cdot \left(Z(N_{m+1}) - Z(N_m)\right) \cdot \Delta N_m}{2Z(N_m = 0) \cdot N_L}, \quad (6)$$

где $\Delta N_m = N_{m+1} - N_m$ – количество циклов нагружения между двумя соседними точками измерения величин параметров повреждаемости $Z(N_m)$ и $Z(N_{m+1})$.

Структура формулы (6) показывает, что экспериментальные зависимости параметра повреждаемости от количества циклов нагружения, характерный вид которых будет приведен в следующем разделе, удобнее всего представлять в нормированном виде. Иллюстрация применения таких зависимостей для получения функции накопления повреждений (6) показана на рис. 2.

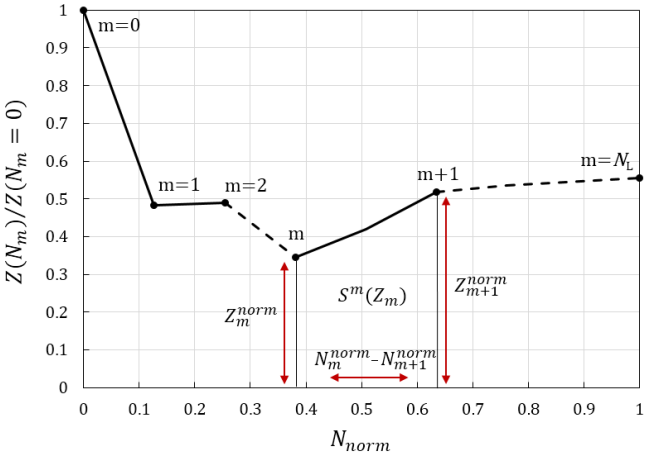


Рис. 2. Численное интегрирование нормированной кривой эволюции параметра повреждаемости

Fig. 2. Numerical integration of the normalized curve of the evolution of the damage parameter

Площадь каждой отдельной трапеции на рис. 2 $S^m(Z_m)$ равна:

$$S^m(Z_m) = \frac{\left(Z_{m+1}^{norm} - Z_m^{norm}\right)}{2}\left(N_{m+1}^{norm} - N_m^{norm}\right), \quad (7)$$

где $Z_m^{norm} = \frac{Z(N_m)}{Z(N_m = 0)}, N_m^{norm} = \frac{N_m}{N_L}$.

Таким образом, функцию накопления повреждений (6) можно представить в виде:

$$D_m\left(N_m, Z\left(N_m\right)\right) = \sum_{m=0}^{m=N_L} S_D S^m\left(Z_m\right). \qquad (8)$$

Коэффициент S_D зависит геометрического размера образцов, механических свойств материала и, естественно, от параметров цикла нагружения. В общем случае величина этого коэффициента определяется путем нормализации соотношения (6) с учетом того правая часть уравнения должна быть равна единице. Это условие вытекает из определения предельных значений функции накопления повреждений (3). Данный факт означает, что величина коэффициента S_D определяется следующим образом:

$$S_D = 1/\Sigma\left(Z_m\right), \qquad (9)$$

где $\Sigma\left(Z_m\right) = \sum_{m=0}^{m=N_L} S^m\left(Z_m\right)$ обозначает суммарную площадь под нормализованной кривой, представленной в виде кусочно-линейной аппроксимации экспериментальных данных. Комбинация соотношений (8) и (9) дает явный вид функции накопления повреждений, выраженный через величины параметров повреждаемости, которые экспериментально определены на различных уровнях поврежденности образцов:

$$D_m\left(N_m, Z\left(N_m\right)\right) = \sum_{m=0}^{m=N_L} S^m\left(Z_m\right)/\Sigma\left(Z_m\right). \qquad (10)$$

3. Метод вдавливания сферического индентора

На первом этапе в качестве текущих индикаторов повреждаемости используются геометрические параметры, которые относятся к вмятине, которая образуется при контактном взаимодействии стального шарика и плоской поверхности алюминиевого образца.

3.1. Исходная экспериментальная информация

Отпечатки наносились вдоль поперечного сечения образцов вдоль оси симметрии x в непосредственной близости от контура отверстия, как это показано на рис. 3. Величина нагрузки при нанесении отпечатков вдавливанием стального шарика диаметром $2R_0$=7,2 мм на всех образцах составляет P=1,75 кН. Диаметр всех контактных отпечатков во всех образцах составляет $2R$=1,50 мм. Расстояния между контуром отверстия и контуром вмятины для различных образцов приведены в табл. 2.

Сравнение усредненных расстояний от контура отпечатков до контура отверстия в образце $\Delta\tilde{x}$, представленного в последнем столбце табл. 2, выявляют их хорошее совпадение.

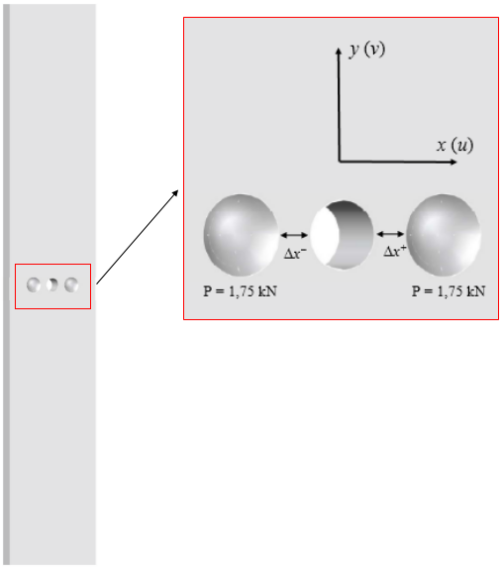


Рис. 3. Схема нанесения контактных отпечатков на образцах типа IDF

Fig. 3. The scheme of applying contact imprints on specimens of the IDF type

Таблица 2

Расположение отпечатков для образцов типа IDF

Table 2

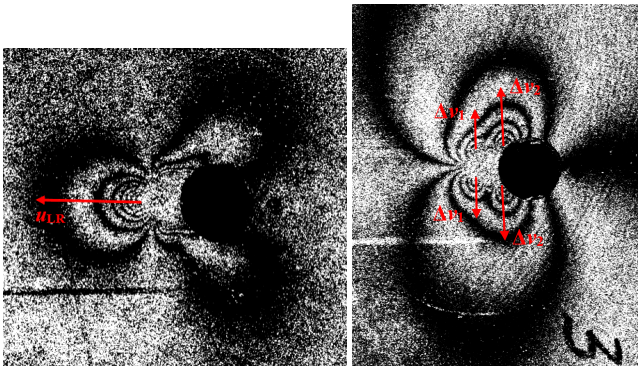
The location of the imprints for the IDF type specimens

Номер образца	Количество циклов нагружения	Δx^-, мм	Δx^+, мм	$\Delta\tilde{x}$, мм
IDF_1	0	0,60	0,50	0,55
IDF_2	295	0,60	0,60	0,60
IDF_3	885	0,50	0,50	0,50
IDF_4	1550	0,70	0,36	0,53
IDF_5	2212	0,12	0,78	0,45
IDF_6	2875	0,34	0,78	0,56
IDF_8	3400	0,50	0,70	0,60

Исходная экспериментальная информация имеет вид картин интерференционных полос, вызванных перемещениями точек поверхности образца, вследствие пластического деформирования микроструктуры поверхности образца Типичная конфигурация визуализированных интерферограмм показана на рис. 4.

Анализ картин интерференционных полос, которые получены впервые, позволяет установить три типа текущих индикаторов повреждаемости, которые условно показаны на рис. 4. Первым из них является величина взаимного перемещения точек, расположенных в ближайшей окрестности вертикального диаметра отпечатка. Этот параметр обозначен как $\Delta\tilde{v}_1$. Второй параметр представляет собой величину взаимного перемещения точек, расположенных в ближайшей окрестности пересечения горизонтальной оси x и контура отверстия, обозначенную как $\Delta\tilde{v}_2$. Величина горизонтального перемещения точки пересечения оси x и дальнего от грани-

цы отверстия контура отпечатка, обозначенная как u_{LR}, представляет собой третий индикатор повреждаемости. Наличие трех индикаторов повреждаемости, которые можно определить по двум картинам полос, полученных для одного и того же пластического отпечатка, открывает уникальную возможность. Эта возможность заключается в получении функции накопления повреждений тремя разными способами и сравнение полученных результатов.

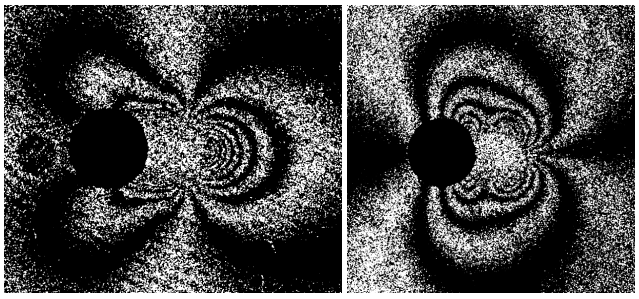


a *b*

Рис. 4. Картины интерференционных полос, полученные при вдавливании сферического индентора в терминах тангенциальной компоненты u (*a*) и v (*b*) и схема определения индикаторов повреждаемости

Fig. 4. Interference fringe patterns obtained by the indentation of a spherical indenter in terms of the tangential component u (*a*) and v (*b*) and a scheme for determining damage indicators

Картины интерференционных полос, полученные после вдавливания стального шарика в образцы с различным уровнем накопленных повреждений, показаны на рис. 5, 6.

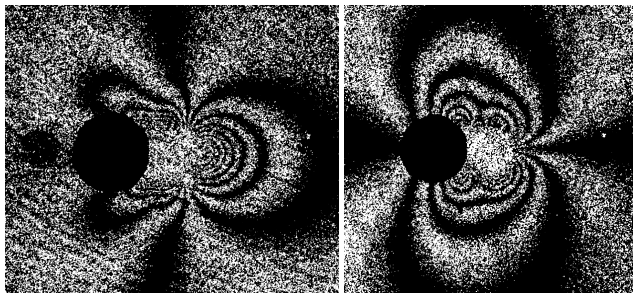


a *b*

Рис. 5. Картины интерференционных полос, полученные в точке 2 образца IDF_2 после вдавливания сферического индентора в терминах тангенциальных компонент перемещений u (*a*) и v (*b*); *a* ($\Delta N^u = +13{,}5$); *b* ($\Delta N_1^v = +13{,}5$; $\Delta N_2^v = +11{,}5$)

Fig. 5. Interference fringe patterns obtained at point 2 of the IDF_2 Specimen after indentation of the spherical indenter in terms of tangential displacement components u (*a*) and v (*b*); *a* ($\Delta N^u = +13.5$) ; *b* ($\Delta N_1^v = +13.5$; $\Delta N_2^v = +11.5$)

Картины полос, аналогичные интерферограммам на рис. 5 и 6, получены для всех образцов, которые указаны в табл. 1. Результаты обработки картин интерференционных полос представлены в табл. 3 и 4. Величины (ΔN_1^v) и (ΔN_2^v) относятся к индикаторам повреждаемости $\Delta\tilde{v}_1$ и $\Delta\tilde{v}_2$ соответственно.



a *b*

Рис. 6. Картины интерференционных полос, полученные в точке 2 образца IDF_4. после вдавливания сферического индентора в терминах тангенциальных компонент перемещений u (*a*) и v (*b*); *a* ($\Delta N^u = +7{,}5$); *b* ($\Delta N_1^v = +12{,}0$; $\Delta N_2^v = +13{,}5$)

Fig. 6. Interference fringe patterns obtained at point 2 of the IDF_4 Specimen after indentation of the spherical indenter in terms of tangential displacement components u (*a*) and v (*b*); *a* ($\Delta N^u = +7.5$); *b* ($\Delta N_1^v = +12.0$; $\Delta N_2^v = +13.5$)

Таблица 3

Результаты обработки интерференционных картин в терминах разностей абсолютных порядков полос

Table 3

Results of processing interference patterns in terms of differences in absolute orders of bands

Номер образца	Левый отпечаток (точка 1)		Правый отпечаток (точка 2)		Левый отпечаток	Правый отпечаток
	ΔN_1^{v-}	ΔN_2^{v-}	ΔN_1^{v-}	ΔN_2^{v-}	ΔN^{u-}	ΔN^{u+}
IDF_1	13,5	13,5	12,5	13,0	8,0	8,0
IDF_2	13,0	12,0	13,5	11,5	7,0	8,5
IDF_3	14,0	12,0	12,0	13,5	8,0	7,5
IDF_4	13,5	11,5	11,5	12,5	7,5	7,0
IDF_5	5,5	9,5	14,5	10,5	4,5	9,5
IDF_6	8,0	9,0	13,0	8,5	7,5	8,5
IDF_8	9,5	13,0	8,0	12,0	8,0	7,5

Таблица 4

Результаты обработки интерференционных картин в терминах усредненных компонент перемещений

Table 4

Results of processing interference patterns in terms of averaged displacement components

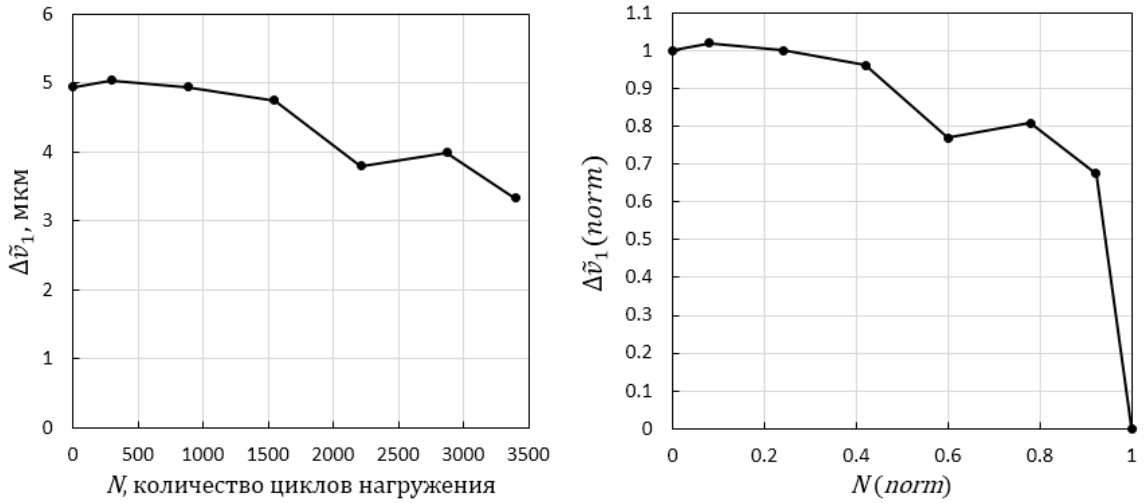
N, циклов	$\Delta\tilde{N}_1^v$, полос	$\Delta\tilde{v}_1$, мкм	$\Delta\tilde{N}_2^v$, полос	$\Delta\tilde{v}_2$, мкм	$\tilde{N}_u$, полос	u_{LR}, мкм
0	13,0	4,94	13,25	5,04	8,0	3,04
295	13,25	5,04	11,75	4,47	7,75	2,95
885	13,0	4,94	12,75	4,85	7,75	2,95
1550	12,5	4,75	12,0	4,56	7,25	2,76
2212	10,0	3,80	10,0	3,80	7,0	2,66
2875	10,5	3,99	8,75	3,33	8,0	3,04
3400	8,75	3,33	12,5	4,75	7,75	3,00

Величина (ΔN^u) определяет индикатор повреждаемости u_{LR}. Компоненты перемещений вычисляются по абсолютным порядкам полос согласно основному уравнению метода спекл-интерферометрии [42].

3.3. Функции накопления повреждений

На основе экспериментальных данных, приведенных в табл. 3 и 4, построены зависимости трех индикаторов повреждаемости от количества циклов нагружения, которые приведены на рис. 7, *a*, и на рис. 9, *a*. Нормированные варианты этих зависимостей представлены на рис. 7, *b*, и на рис. 9, *b*.

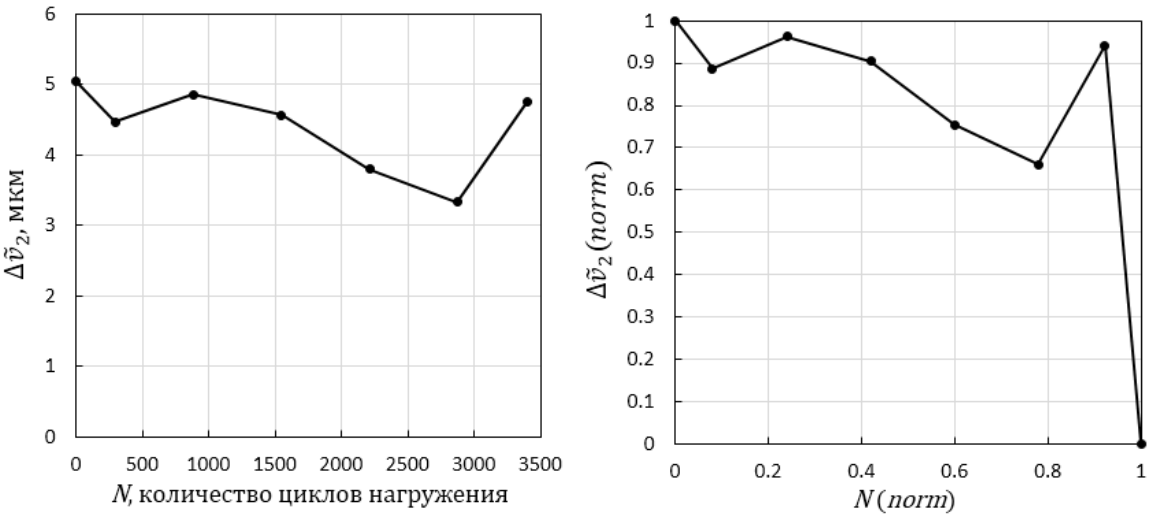
В качестве примера в табл. 5 представлены параметры, необходимые для вычисления функции накопления повреждений на различных уровнях поврежденности, а также результаты этих вычислений для индикатора повреждаемости $\Delta\tilde{v}_1$.



a *b*

Рис. 7. Экспериментальное (*a*) и нормированное (*b*) распределение индикатора повреждаемости $\Delta\tilde{v}_1$ по периоду долговечности

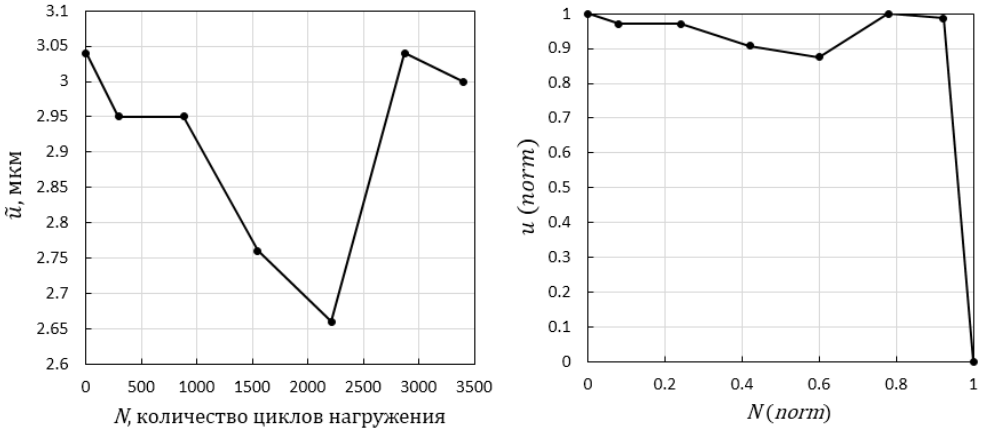
Fig. 7. Experimental (*a*) and normalized (*b*) distribution of the damage indicator $\Delta\tilde{v}_1$ over the life-time



a *b*

Рис. 8. Экспериментальное (*a*) и нормированное (*b*) распределение индикатора повреждаемости $\Delta\tilde{v}_2$ по периоду долговечности

Fig. 8. Experimental (*a*) and normalized (*b*) distribution of the damage indicator $\Delta\tilde{v}_2$ over the life-time



a *b*

Рис. 9. Экспериментальное (*a*) и нормированное (*b*) распределение индикатора повреждаемости u_{LR} по периоду долговечности

Fig. 9. Experimental (*a*) and normalized (*b*) distribution of the damage indicator u_{LR} over the life-time

Таблица 5

Текущие параметры и значения функции накопления повреждений для индикатора $\Delta\tilde{v}_1$

Table 5

Current parameters and values of the damage accumulation function for the indicator $\Delta\tilde{v}_1$

m	0	1	2	3	4	5	6	7
N_m^{norm} **(7)**	0	0.08	0,24	0,42	0,6	0,78	0,92	1
$Z_m^{norm} \equiv \Delta\tilde{v}_1^{norm}$ **(7)**	1	1,02	1	0,96	0,77	0,81	0,67	0
$S^m(Z_m)$ **(7)**	0,08	0,16	0,18	0,16	0,14	0,11	0,03	–
$\Sigma(Z_m)$ **(9)**	0,85							
$S_D = 1/\Sigma(Z_m)$ **(9)**	1,18							
$S^m(Z_m)/\Sigma(Z_m)$ **(9)**	0	0,01	0,19	0,2	0,16	0,17	0,11	–
$D_m(N_m, Z(N_m))$ **(10)**	0	0,1	0,29	0,49	0,65	0,82	0,93	1

Функции накопления повреждений, которые соответствуют распределениям на рис. 7–9, приведены на рис. 10.

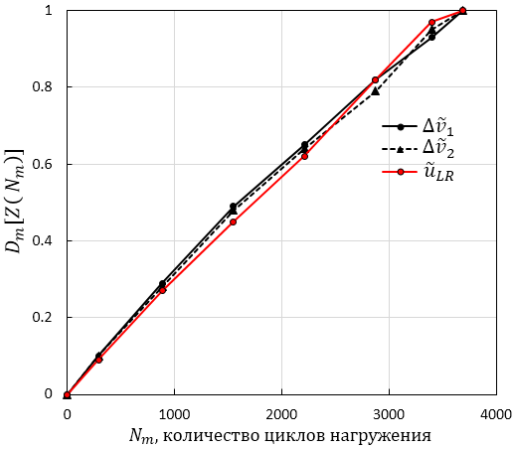


Рис. 10. Функции накопления повреждений, полученные на основе эволюции трех индикаторов повреждаемости

Fig. 10. Damage accumulation functions derived from the evolution of three damage indicators

Анализ зависимостей на рис. 10 показывает, что функции накопления повреждений, построенные на основании индикаторов повреждаемости $\Delta\tilde{v}_1$, $\Delta\tilde{v}_2$ и u_{LR}, практически совпадают. Данный факт является первым подтверждением надежности предложенного неразрушающего подхода. Второй этап верификации требует сравнения аналогичных результатов, полученных с помощью неразрушающего и разрушающего методов для одних и тех же объектов исследования. Этот вопрос рассматривается в следующем разделе.

4. Метод нанесения узкого надреза

Применение метода вдавливания сферического индентора для количественного анализа накопления повреждений показало весьма обнадёживающие результаты. Дальнейшее использование предложенного подхода выглядит очень перспективным, особенно при исследовании накопления повреждений в окрестности сварных соединений. Наиболее эффективным способом оценки

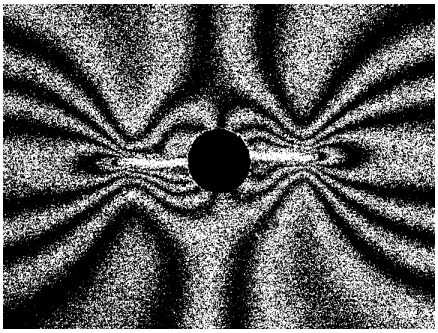
погрешностей нового неразрушающего метода является сравнение полученных результатов с аналогичными данными разрушающего подхода. Это тем более интересно, так как используемая экспериментальная методика дает уникальную возможность провести сравнение двух методов с использованием одних и тех же образцов.

Дело в том, что пластические отпечатки нанесены только на одной из двух внешних поверхностей образцов. Противоположную поверхность, естественно, можно использовать для регистрации картин интерференционных полос, которые возникают при нанесении узкого искусственного надреза при постоянной внешней нагрузке. Параметры механики разрушения, относящиеся к этому надрезу, позволяют получить явный вид функции накопления повреждений, согласно методике, детально описанной в разделе **2** данной работы.

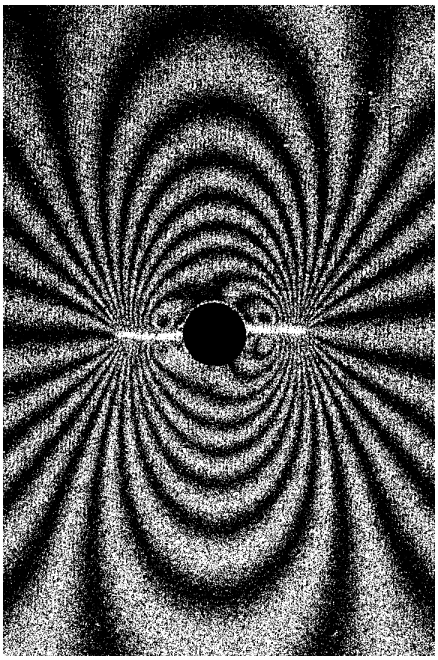
В настоящее время признано, что наиболее надежным и эффективным способом получения параметров механики разрушения для трещин, которые распространяются, как в стандартных образцах, так и в более сложных конструктивных элементах, является определение коэффициентов разложения многокомпонентного ряда Уильямса [43–45]. Для экспериментального определения полей перемещений, деформаций и напряжений, возникающих в окрестности вершины надреза или трещины, широко используются интерференционно-оптические методы, которые по своей природе наилучшим образом предназначены для достижения этой цели [46–50]. Используемый в представленной работе подход основан на измерении деформационного отклика на нанесение искусственного надреза в терминах тангенциальных компонент перемещений [34].

4.1. Исходная экспериментальная информация

Перед нанесением надреза каждый образец устанавливался в захваты испытательной машины walter + bai ag LFM-L 22 с диапазоном прикладываемой нагрузки 0–25 кН. Ключевой момент используемой методологии заключается в том, что испытательная машина встроена в оптическую схему интерферометра. Данный факт обеспечивает регистрацию картин интерференционных полос после приложения к образцу растягивающей нагрузки и нанесения узкого искусственного надреза [34]. Все интерферограммы получены для величины номинальных напряжений $\sigma = 55$ МПа. Ширина надреза составляет $\Delta b = 0{,}2$ мм. Особое внимание уделяется обеспечению одинаковой длины симметричного надреза $\tilde{a}_1 \approx 3$ мм для всех образцов. Начало симметричного надреза расположено в двух точках пересечения оси симметрии образца (оси x) с контуром отверстия. С этой целью для каждого образца регистрируются три набора картин интерференционных полос. Первая из них соответствует специально заниженной величине $\tilde{a}_{1-1} \approx$ 2,5 мм. Затем длина надреза последовательно увеличивается только для одной из ветвей двустороннего надреза, достигая суммарной длины $\tilde{a}_{1-2}$ и $\tilde{a}_{1-3}$. Исходное состояние поверхности, естественно, регистрируется только один раз и используется при визуализации всех трех наборов интерферограмм. Для получения количественной информации служат картины полос, наиболее близко соответствующие длине надреза $\tilde{a}_1 \approx 3$ мм. Все полученные таким образом наборы интерферограмм отличаются практически идеальным качеством и структурой (рис. 11–13), что наглядно свидетельствует о высоком техническом уровне проведения эксперимента.



a



b

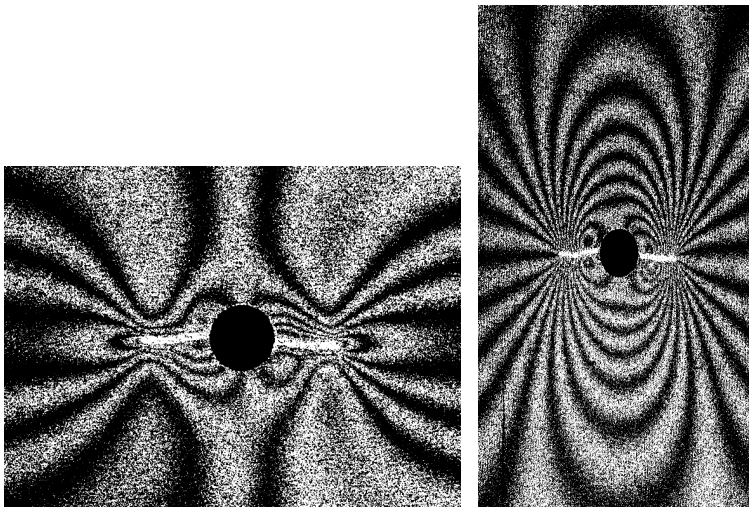
Рис. 11. Картины интерференционных полос, полученные для образца IDF_2 в терминах плоской компоненты u (a) и v (b). Исходная длина трещины $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_{1-3}^{-} =$ $= 3{,}22$ мм (левая) и $\Delta a_{1-3}^{+} = 2{,}91$ мм (правая). Средняя длина трещины $\tilde{a}_{1-3} = 3{,}06$ мм

Fig. 11. Interference fringe patterns obtained of the IDF_2 Specimen after indentation of the spherical indenter in terms of tangential displacement components u (a) and v (b). Initial crack length $a_0 = 0$ with increment $\Delta a_{1-3}^{-} = 3.22$ mm (left) and $\Delta a_{1-3}^{+} = 2.91$ mm (right). Average crack length $\tilde{a}_{1-3} = 3.06$ mm

Порядок регистрации картин интерференционных полос с целью получения одинаковой средней величины искусственного надреза иллюстрируется для образца IDF_4 и образца IDF_6.

Соответствующие данные приведены в табл. 6 и 7.

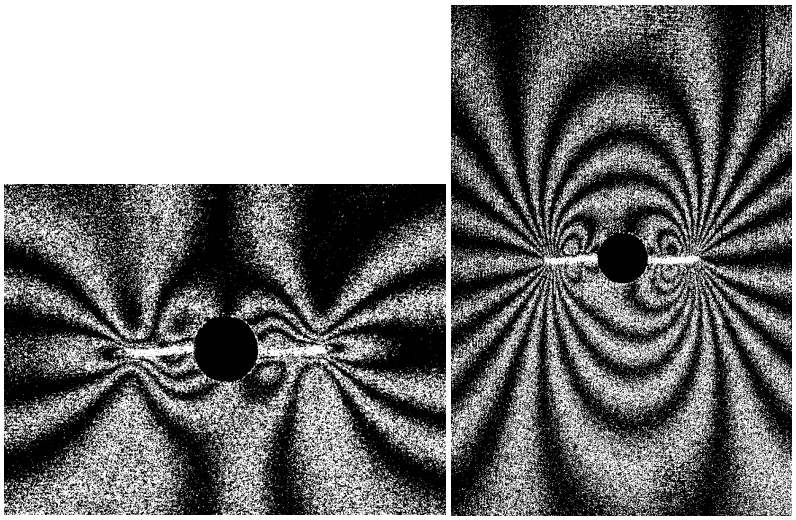
Аналогичная процедура проведена для всех исследованных образцов. Соответствующие данные приведены в табл. 8.



a *b*

Рис. 12. Картины интерференционных полос, полученные для образца IDF_4 в терминах плоской компоненты *u* (*a*) и *v* (*b*). Исходная длина трещины a_0 = 0 с приращениями Δa_{1-2}^{-} = 3,15 мм (левая) и Δa_{1-2}^{+} = 2,89 мм (правая). Средняя длина трещины $\tilde{a}_{1-2}$ = 3,02 мм

Fig. 12. Interference fringe patterns obtained of the IDF_4 Specimen after indentation of the spherical indenter in terms of tangential displacement components *u* (*a*) and *v* (*b*). Initial crack length a_0 = 0 with increment Δa_{1-2}^{-} = 3.15 mm (left) and Δa_{1-2}^{+} = 2.91 mm (right). Average crack length $\tilde{a}_{1-3}$ = 3.06 mm



a *b*

Рис. 13. Картины интерференционных полос, полученные для образца IDF_6 в терминах плоской компоненты *u* (*a*) и *v* (*b*). Исходная длина трещины a_0 = 0 с приращениями Δa_{1-2}^{-} = 3,12 мм (левая) и Δa_{1-2}^{+} = 3,1 мм (правая). Средняя длина трещины $\tilde{a}_{1-2}$ = 3,11 мм

Fig. 13. Interference fringe patterns obtained of the IDF_6 Specimen after indentation of the spherical indenter in terms of tangential displacement components *u* (*a*) and *v* (*b*). Initial crack length a_0 = 0 with increment Δa_{1-2}^{-} = 3.12 mm (left) and Δa_{1-2}^{+} = 3.1 mm (right). Average crack length $\tilde{a}_{1-3}$ = 3.11 mm

Таблица 6

Последовательность нанесения надрезов и результаты интерпретации картин интерференционных полос для образца IDF_4

Table 6

The sequence of notch application and the results of interpretation of interference fringe patterns for the IDF_4 Specimen

Надрез	a^{-}_{1-1}	a^{+}_{1-1}				
a_{1-1}, мм	2,47	2,89	a^{-}_{1-2}	a^{+}_{1-2}		
a_{1-2}, мм	–	–	**3,15**	**2,89**	a^{-}_{1-3}	a^{+}_{1-3}
a_{1-3}, мм	–	–	–	–	3,15	3,15
$\tilde{a}_1$, мм	2,68		**3,02**		3,15	
ΔN^{v}_{n-1}, полос	–	–	**22,5**	**24,5**	–	–
Δv_{n-1}, мкм	–	–	**8,55**	**9,31**	–	–
$\Delta\tilde{v}_{n-1}$, мкм	–		**8,93**		–	
$\Delta N^{v}_{n-0,5}$, полос	–	–	**23,0**	**25,0**	–	–
$\Delta v_{n-0,5}$, мкм	–	–	**8,74**	**9,5**	–	–
$\Delta\tilde{v}_{n-0,5}$, мкм	–		**9,12**			
K^{n}_{I},МПа$\sqrt{\text{м}}$	–	–	**6,7**	**7,6**	–	–
$\tilde{K}^{n}_{\mathrm{I}}$,МПа$\sqrt{\text{м}}$	–		**7,2**		–	

Таблица 7

Последовательность нанесения надрезов и результаты интерпретации картин интерференционных полос для образца IDF_6

Table 7

The sequence of notch application and the results of interpretation of interference fringe patterns for the IDF_6 Specimen

Надрез	a^{-}_{1-1}	a^{+}_{1-1}				
a_{1-1}, мм	2,77	2,66	a^{-}_{1-2}	a^{+}_{1-2}		
a_{1-2}, мм	–	–	2,77	3,12	a^{-}_{1-3}	a^{+}_{1-3}
a_{1-3}, мм	–	–	–	–	**3,12**	**3,10**
$\tilde{a}_1$, мм	2,72		2,94		**3,11**	
ΔN^{v}_{n-1}, полос	–	–	–	–	**16,0**	**17,5**
Δv_{n-1}, мкм	–	–	–	–	**6,08**	**6,65**
$\Delta\tilde{v}_{n-1}$, мкм	–		–		**6,37**	
$\Delta N^{v}_{n-0,5}$, полос	–	–	–	–	**16,5**	**21,0**
$\Delta v_{n-0,5}$, мкм	–	–	–	–	**6,27**	**7,98**
$\Delta\tilde{v}_{n-0,5}$, мкм	–		–		**7,13**	
K^{n}_{I},МПа$\sqrt{\text{м}}$	–	–			**4,8**	**6,5**
$\tilde{K}^{n}_{\mathrm{I}}$,МПа$\sqrt{\text{м}}$	–		–		**5,7**	

Таблица 8

Параметры механики разрушения на различных этапах малоцикловой усталости

Table 8

Fracture mechanics parameters at various stages of low-cycle fatigue

N, количество циклов нагружения	0	295	885	1550	2212	2875	3400
$\tilde{K}^{n}_{\mathrm{I}}$,МПа$\sqrt{\text{м}}$	6	6,6	6,4	7,2	6,5	5,7	4,9
$\Delta\tilde{v}_{n-1}$, мкм	8,27	8,84	8,27	8,93	8,84	6,37	5,13

4.2. Сравнение функций накопления повреждений, полученных двумя способами

Нормированные зависимости величин раскрытия в вершине трещины $\Delta\tilde{v}_{n-1}(norm)$ и КИН $\tilde{K}_I^n(norm)$ от количества циклов нагружения показаны на рис. 14 и 15 соответственно. Далее эти параметры используются в качестве текущих индикаторов повреждаемости.

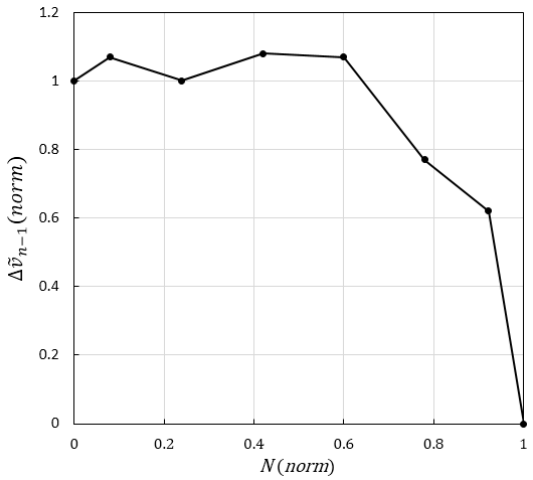


Рис. 14. Распределение индикатора повреждаемости $\Delta\tilde{v}_{n-1}(norm)$ по периоду долговечности

Fig. 14. Distribution of the damage indicator $\Delta\tilde{v}_{n-1}(norm)$ over the period of life-time

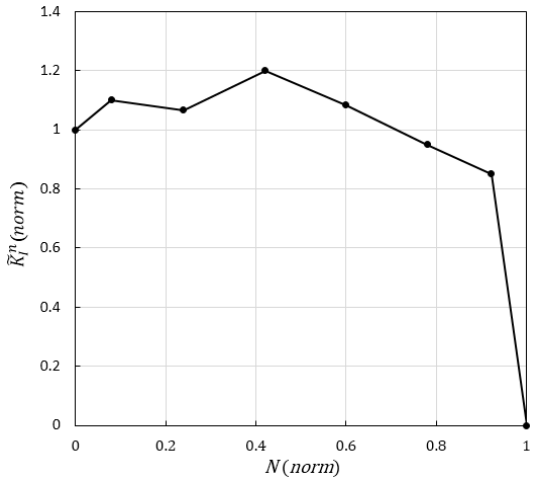


Рис. 15. Распределение индикатора повреждаемости $\tilde{K}_I^n(norm)$ по периоду долговечности

Fig. 15. Distribution of the damage indicator $\tilde{K}_I^n(norm)$ over the period of life-time

Функции накопления повреждений, которые соответствуют распределениям на рис. 14 и 15, приведены на рис. 16. При построении функций накопления повреждений в качестве предельного состояния принимаются нулевые значения обоих параметров повреждаемости, которые относятся к моменту разрушения образца.

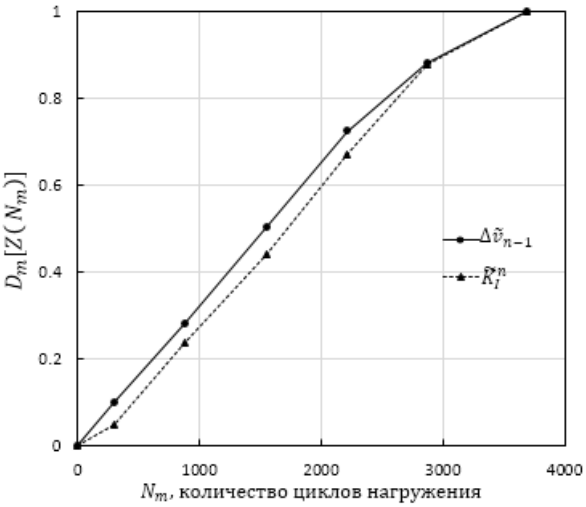


Рис. 16. Функции накопления повреждений, полученные на основе эволюции двух индикаторов повреждаемости, относящихся к искусственному надрезу

Fig. 16. Damage accumulation functions derived from the evolution of two damage indicators related to an artificial notch

Сравнение зависимостей, приведенных на рис. 16, выявляет их практически полное совпадение, что свидетельствует о высоком качестве проведения экспериментальных исследований.

Функции накопления повреждений, построенные на основе метода вдавливания сферического индентора (индикатор $\Delta\tilde{v}_1(norm)$) и метода нанесения искусственного надреза (индикатор $\Delta\tilde{v}_{n-1}(norm)$), показаны на рис. 17. Представленные кривые демонстрируют высокую степень совпадения.

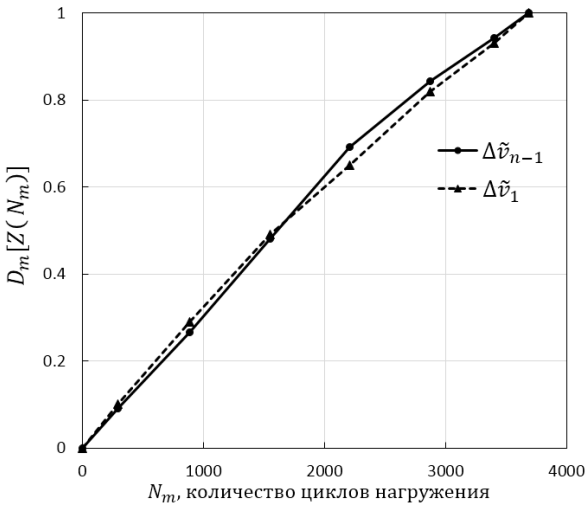


Рис. 17. Функции накопления повреждений, полученные на основе метода вдавливания индентора $\Delta\tilde{v}_1(norm)$ и методом нанесения искусственного надреза $\Delta\tilde{v}_{n-1}(norm)$

Fig. 17. Damage accumulation functions obtained on the basis of the indenter indentation method $\Delta\tilde{v}_1(norm)$ and the artificial incision method $\Delta\tilde{v}_{n-1}(norm)$

Заключение

Разработан и верифицирован новый неразрушающий метод количественного описания накопления повреждений при малоцикловой усталости в зоне концентрации напряжений. Предлагаемый подход дает возможность получения функции накопления повреждений в явном виде на основе анализа эволюционных зависимостей нормированных значений индикаторов повреждаемости. Экспериментальной основой метода является возможность получения картин интерференционных полос высокого качества, характеризующих текущие значения геометрических размеров контактного отпечатка, на различных этапах малоцикловой усталости. Таким образом, открывается возможность построения функции накопления повреждений на основе анализа эволюции размеров контактной вмятины, вызванной вдавливанием сферического индентора.

Установлено, что картины интерференционных полос в области контактного взаимодействия, которая расположена в ближайшей окрестности сквозного отверстия, дают возможность использовать три текущих индикатора повреждаемости. Первым из них является величина вертикального взаимного перемещения точек, расположенных в ближайшей окрестности вертикального диаметра отпечатка. Второй параметр представляет собой величину вертикального взаимного перемещения точек, расположенных в ближайшей окрестности пересечения горизонтальной оси и контура отверстия. Величина горизонтального перемещения точки, которая расположена на пересечении короткой оси симметрии образца и дальнего от границы отверстия контура отпечатка, представляет собой третий индикатор повреждаемости. Наличие трех индикаторов повреждаемости, которые можно определить по двум картинам полос, полученным для одного и того же пластического отпечатка в ходе одного эксперимента, открывает уникальную возможность. Эта возможность заключается в построении функции накопления повреждений тремя разными способами и сравнение полученных результатов. Представлена методология, необходимая для получения явного вида функции накопления повреждений путем численного интегрирования нормированных зависимостей текущих индикаторов повреждаемости от количества циклов нагружения. Показано хорошее совпадение функций накопления повреждений, построенных на основе трех разных параметров, которые определяются результатами одного эксперимента.

Одним из наиболее эффективных способов окончательной верификации нового неразрушающего метода, который дает возможность количественного описания процесса накопления повреждений, является сравнение полученных результатов с аналогичными данными разрушающего подхода. Надежность подобного подхода многократно возрастает, так как используемая экспериментальная методика дает уникальную возможность провести сравнение двух экспериментальных методов с использованием одних и тех же купонов. Дело в том, что пластические отпечатки нанесены только на одной из двух внешних поверхностей образцов. Противоположную поверхность естественно использовать для регистрации картин интерференционных полос, которые возникают при нанесении узкого искусственного надреза при постоянной внешней нагрузке. Параметры механики разрушения, которые относятся к такому надрезу и получены на различных стадиях малоцикловой усталости, позволяют построить явный вид функции накопления повреждений согласно разработанной методике. Экспериментальной базой разрушающего подхода служит набор картин интерференционных полос высокого качества, полученных для различного количества циклов нагружения. На этой основе построены нормированные зависимости раскрытия в точке начала надреза и коэффициентов интенсивности напряжений от количества циклов нагружения. Функции накопления повреждений, которые построены с помощью этих двух индикаторов, выявляют высокую степень корреляции.

Сравнение функций накопления повреждений, полученных на основе неразрушающего подхода и разрушающего метода, выявляет высокую степень совпадения конечных результатов дух типов. Данный факт свидетельствует о высокой надежности разработанного неразрушающего подхода, основанного на измерении геометрических размеров контактного отпечатка. Нужно отметить, что представленное в работе исследование выполнено в наиболее сложном варианте, а именно точка контактного взаимодействия расположена в ближайшей окрестности контура сквозного отверстия. Возможность нанесения контактного отпечатка в геометрически регулярной области значительно упрощает проведения экспериментов. Данный факт, в частности, выявляет высокую эффективность разработанного неразрушающего метода для исследования накопления повреждений в окрестности сварных соединений.

Библиографический список

1. Murakami, S. Continuum Damage Mechanics / S. Murakami. – Springer Dordrecht Heidelberg, London New York, 2012. – 402 p. DOI: 10.1007/978-94-007-2666-6

2. Altenbach, H. Advanced Theories for Deformation, Damage and Failure in Materials / H. Altenbach, A. Gancazarski. – Cham, Springer, 2023. – 289 p.

3. Elias Ferreira, S. Using the strip-yield mechanics to model fatigue crack growth by damage accumulation ahead of the crack tip / S. Elias Ferreira, J. Tupiassú Pinho de Castro, M. Antonio Meggiolaro // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 103. – P. 557–575. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.06.039

4. Elias Ferreira, S. Fatigue crack growth predictions based on damage accumulation ahead of the crack tip calculated by strip-yield procedures / S. Elias Ferreira, J. Tupiassú Pinho de Castro, M. Antonio Meggiolaro // International Journal of Fatigue. – 2018. – Vol. 115. – P. 89–106. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.001

5. Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data / V. Mishakin, A. Gonchar, K. Kurashkin, M. Kachanov // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 141. – Article: 105846. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105846

6. Haghshenas, A. Damage Accumulation and Crack Initiation Detection Based on the Evolution of Surface Roughness Parameters / A. Haghshenas, M.M. Khonsari // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 107. – P. 130–144. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.10.009

7. A new energy-based method to evaluate low-cycle fatigue damage of AISI H11 at elevated temperature / W. Du, Y. Luo, Y. Wang, S. Chen, D. Yu // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. – 2017. – Vol. 40. – P. 994–1004.

8. Lykova, A.V. Studying of accumulation damages regularities under low cycle loading and cycle variable parameters conditions / A.V. Lykova, A.V. Ilinikh // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – No. 747. – 012122.

9. A strain energy density based life prediction model for notched components in low cycle fatigue regime / P. Zhao, T.-Y. Lu, J.-G. Gong, F.-Z. Xuan, F. Berto // International Journal of Pressure Vessels and Piping. – 2021. – Vol. 193. – 104458. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104458

10. Лыкова, А.В. Прогнозирование циклической долговечности при малоцикловой усталости с использованием нелинейной модели Марко – Старки / А.В. Лыкова, А.В. Ильиных, В.Э. Вильдеман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2022. – № 3. – С. 14–22. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.02S3

11. Десятникова, М.А. Численное исследование разрушения конструкционных материалов при совместных процессах малоцикловой и многоцикловой усталости [Электронный документ] / М.А. Десятникова // Научная электронная библиотека Российский федеральный ядерный центр-ВНИИЭФ. – URL: http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2022/11/19-molodej-2022-2.pdf (дата обращения: 07.02.2024).

12. Crack tip fields and fracture resistance parameters based on strain gradient plasticity / V. Shlyannikov, A. Tumanov, A. Tartygasheva, E. Martínez-Pañeda // International Journal of Solids and Structures, 2021, Vol. 208-209, pp. 63-82. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.10.015

13. Creep crack growth modelling of Grade 91 vessel weldments using a modified ductility based damage model / R. Ragab, J. Parker, M. Li, T. Liu, W. Sun // European Journal of Mechanics-A/Solids. – 2022. – Vol. 91. – 104424. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2021.104424

14. Kosov, D. Complex stress state analysis for aluminum alloy accounting for damage accumulation / D. Kosov, D. Fedorenkov, A. Tumanov // Procedia structural integrity. – 2022. – Vol. 42. – P. 545–552

15. Stepanova, L.V. Nonlinear eigenvalue problems arising from nonlinear fracture mechanics boundary value problems / L.V. Stepanova, E.M. Yakovleva // Procedia Structural Integrity. – 2022. – Vol. 37. – P. 908–919. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.02.025

16. Shlyannikov, V. Elastic and nonlinear crack tip solutions comparison with respect to failure probability / V. Shlyannikov, A. Tumanov, N. Boychenko // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2022. – Vol. 16, no. 62. – P. 1–13. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.62.01

17. Туманов, А.В. Модификация модели накопления повреждений Lemaitre дополнением функции учета локальной многоосности нагружения при нелинейном деформировании / А.В. Туманов // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 105–113. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_3_105

18. Бондарь, В.С. Упругопластическое поведение и разрушение конструкций с концентраторами напряжений при циклических нагружениях / В.С. Бондарь, Д.Р. Абашев, Д.Ю. Фомин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. – С. 23–33. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.03

19. Исследование асимптотики поля напряжений в окрестности вершины трещины в условиях ползучести с учетом поврежденности / Д.В. Чаплий, О.Н. Белова, Л.В. Степанова, Ю.С. Быкова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 3. – С. 17–38. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.02

20. Разрушение стали 30ХГСА в условиях смешанных мод нагружения / Л.Р. Ботвина, Е.Н. Белецкий, М.Р. Тютин, Ю.А. Демина, И.О. Синев, А.И. Болотников // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 2. – С. 30–42. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_2_30

21. О методе оценки распределения пластической деформации в области вершины усталостной трещины на основе решения задачи линейной теории упругости / А.Н. Вшивков, А.Ю. Изюмова, И.А. Пантелеев, О.А. Плехов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 6. – С. 41–49. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.04

22. Microstructure evolution of Al-12Si-CuNiMg alloy under high temperature low cycle fatigue / J. Liu, Q. Zhang, Z. Zuo, Y. Xiong, F. Ren, A.A. Volinsky // Mater Sci Eng A. – 2013. – Vol. 574. – P. 186–190.

23. Low cycle fatigue and Creep-Fatigue behavior on Ni-based alloy 230 at 850 °C / X. Chen, Z. Yang, M.A. Sokolov [et all]. // Mater. Sei. and Eng. A. – 2013. – Vol. 563. – P. 152–162. DOI: 10.1016/j.msea.2012.11.063

24. Mishnev, R. Effect of the strain rate on the low cycle fatigue behavior of a 10Cr-2W-Mo-3Co-NbV steel at 650 °C / R. Mishnev, N. Dudova, R. Kaibyshev // International Journal of Fatigue. – 2017. – Vol. 100. – Part 1. – P. 113–125. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.025

25. Han, Q. Low-cycle multiaxial fatigue behavior and life prediction of Q235B steel welded material / Q. Han, P. Wang, Y. Lu // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 127. – P. 417–430. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.027

26. Deformation mechanism and fatigue life of an Al-12Si alloy at different temperatures and strain rates / M. Wang, J.C. Pang, H.Q. Liu, C.L. Zou, Z.F. Zhang // International Journal of Fatigue. – 2019. – Vol. 127. – P. 268–274.

27. Benedetti, M. A novel Strain-Energy-Density based fatigue criterion accounting for mean stress and plasticity effects on the medium-to-high-cycle uniaxial fatigue strength of plain and notched components / M. Benedetti, F. Berto, C. Santus // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 133. – 105397. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105397

28. Influence of static mean stresses on the fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under multiaxial loading / A.S. Yankin, V.E. Wildemann, N.S. Belonogov, O.A. Staroverov // Frattura ed Integrita Strutturale. – 2020. – Vol. XIV, iss. 51. – P. 151–163.

29. Lykova, A.V. Studying of accumulation damages regularities under low cycle loading and cycle variable parameters conditions / A.V. Lykova, Ilinikh A.V. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – No. 747. – 012122.

30. Influence of additional static stresses on biaxial low-cycle fatigue of 2024 aluminum alloy / A.S. Yankin, A.V. Lykova, A.I. Mugatarov, V.E. Wildemann, A.V. Ilinykh // Fracture and Structural Integrity. – 2022. – Vol. 16, no. 62. – P. 180–193.

31. Косов, Д.А. Анализ напряженно-деформированного состояния алюминиевого сплава Д16Т при сложном напряжённом состоянии с учетом поврежденности / Д.А. Косов, Д.И. Федоренков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 4. – С. 45–53. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.05

32. Matvienko, Yu.G. Evolution of fracture mechanics parameters relevant to narrow notch increment as a measure of fatigue damage accumulation / Yu.G. Matvienko, V.S. Pisarev, S.I. Eleonsky // International Journal of Fatigue. – 2021. – Vol. 149. − Article: 106310. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106310

33. Matvienko, Yu.G. Low-cycle fatigue damage accumulation near the cold-expanded hole by crack compliance data / Yu.G. Matvienko, V.S. Pisarev, S.I. Eleonsky // International Journal of Fatigue. – 2022. – Vol. 155. − Article: 106590. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106590

34. Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses / V.S. Pisarev, Yu.G. Matvienko, I.N. Odintsev, S.I. Eleonsky // Engineering Fracture Mechanics. – 2017. – Vol. 179. – P. 348–374. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.029

35. Matvienko, Yu.G. Quantification of low-cycle fatigue damage accumulation in stress concentration area by local strain evolution / Yu.G. Matvienko, V.S. Pisarev, S.I. Eleonsky // Procedia Structural Integrity. – 2022. − Vol. 41. − P. 192–198. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.05.021

36. Matvienko, Yu.G. Quantitative description of low-cycle fatigue damage accumulation in contact interaction zone by local strain evolution / Yu.G. Matvienko, V.S. Pisarev, S.I. Eleonsky // Frattura ed Integrità Strutturale. – 2022. – Vol. 62. − P. 541–560. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.62.37

37. Работнов, Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. − М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979. − 743 с.

38. Москвитин, В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций / В.В. Москвитин. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 344 с.

39. Мовчан, А.А. Микромеханический подход к проблеме описания накопления анизотропных рассеянных повреждений / А.А. Мовчан // Известия АН СССР. Механика Твердого Тела. – 1990. – № 3. – С. 115–123.

40. Мовчан, А.А. Механика накопления рассеянных повреждений в элементах конструкций: учеб. пособие / А.А. Мовчан. – М.: Издательство МАИ, 1996. – 64 с.

41. Шанявский, А.А. Модели зарождения и развития усталостного разрушения под поверхностью металлов / А.А. Шанявский // Научный вестник МГТУ ГА. – 2012. – № 179. – С. 32–44.

42. Rastogi, P. Digital speckle pattern interferometry and related techniques / P. Rastogi. − Wiley, West Sussex, 2001. – 384 p.

43. On the experimental characterisation of the crack tip displacement fields on nonplanar elements: Numerical and experimental analysis / A. Camacho-Reyes, F.V. Antunes, J.M. Vasco-Olmo, F.A. Diaz, L.A. Felipe-Sese // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2023. – Vol. 124. – 103803. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.103803

44. Stepanova, L.V. Coefficients of the Williams power expansion of the near crack tip stress field in continuum linear elastic fracture mechanics at the nanoscale / L.V. Stepanova, O.N. Belova // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2022. – Vol. 119. – 103298. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103298

45. Stepanova, L.V. Stress intensity factors, T-stresses and higher order coefficients of the Williams series expansion and their evaluation through molecular dynamics simulation / L.V. Stepanova, O.N. Belova // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2022. DOI: 10.1080/ 15376494.2022.2084800

46. Ayatollahi, M.R. Digital image correlation methos for calculating coefficients of Williams expansion in compact tension specimen / M.R. Ayatollahi, M. Moazzami // Optics and Lasers in Engineering. – 2017. – Vol. 90. – P. 26–33. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.09.011

47. Развитие метода корреляции цифровых изображений для изучения процессов деформации и разрушения конструкционных материалов / П.С. Любутин, С.В. Панин, В.В. Титков, А.В. Еремин, Р. Сундер // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. – № 1. – С. 87–107. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.08

48. Исследование кинетики разрушения сплава Д16ч методами акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и изучения реальной поврежденности / Л.Р. Ботвина, А.И. Болотников, И.О. Синев, М.Р. Тютин, Е.Н. Белецкий // Металлы. – 2022. – № 4. – С. 15–23.

49. Shuai, J. Simple crack tip and stress intensity factor determination method for mode I crack using digital image correlation nanoscale / J. Shuai, J. Zhao, L. Lei // Theoretical and Applied Fracture Mechanics. – 2022. – Vol. 122. – 103621. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103621

50. Анисимов, Г.С. Экспериментальное определение полей у вершины трещины: метод голографической интерферометрии и метод корреляции цифровых изображений / Г.С. Анисимов, Л.В. Степанова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 3. – С. 39–56. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.03

References

1. Murakami S. Continuum Damage Mechanics. Springer Dordrecht Heidelberg, London New York, 2012, 402 p. DOI: 10.1007/978-94-007-2666-6

2. Altenbach H., Gancazarski A. Advanced Theories for Deformation, Damage and Failure in Materials. Cham, Springer, 2023, 289 p.

3. Elias Ferreira S., Tupiassú Pinho de Castro J., Antonio Meggiolaro M. Using the strip-yield mechanics to model fatigue crack growth by damage accumulation ahead of the crack tip. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 103, pp. 557-575. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.06.039

4. Elias Ferreira S., Tupiassú Pinho de Castro J., Antonio Meggiolaro M.Fatigue crack growth predictions based on damage accumulation ahead of the crack tip calculated by strip-yield procedures. *International Journal of Fatigue*, 2018, vol. 115, pp. 89-106. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2018.03.001

5. Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M. Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combi-

nation of acoustic and eddy current data. *International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 141, Article: 105846. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2020.105846

6. Haghshenas A., Khonsari M.M. Damage Accumulation and Crack Initiation Detection Based on the Evolution of Surface Roughness Parameters. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 107, pp. 130-144. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.10.009

7. Du W., Luo Y., Wang Y., Chen S., Yu D. A new energy-based method to evaluate low-cycle fatigue damage of AISI H11 at elevated temperature. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2017, vol. 40, pp. 994-1004.

8. Lykova A.V., Ilinikh A.V. Studying of accumulation damages regularities under low cycle loading and cycle variable parameters conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 747, 012122.

9. Zhao P., Lu T.-Y., Gong J.-G., Xuan F.-Z., Berto F. A strain energy density based life prediction model for notched components in low cycle fatigue regime. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2021, vol. 193, 104458. DOI: 10.1016/j.ijpvp.2021.104458

10. Lykova A.V., Il'inykh A.V., V.E. Prognozirovanie tsiklicheskoi dolgovechnosti pri malotsiklovoi ustalosti s ispol'zovaniem nelineinoi modeli Marko - Starki [Prediction of cyclic durability in low-cycle fatigue using the nonlinear Marco-Starkey model]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2022, no. 3, pp. 14-22. DOI: 10.15593/perm.mech/2022.3.02S3

11. Desiatnikova M.A. Chislennoe issledovanie razrusheniia konstruktsionnykh materialov pri sovmestnykh protsessakh malotsiklovoi i mnogotsiklovoi ustalosti [Numerical study of the destruction of structural materials during joint processes of low-cycle and multi-cycle fatigue]. *Nauchnaia elektronnaia biblioteka Rossiiskii federal'nyi iadernyi tsentr-VNIIEF*, available at: http://book.sarov.ru/wp-content/uploads/2022/11/19-molodej-2022-2.pdf (accessed 07 February 2024).

12. Shlyannikov V., Tumanov A., Tartygasheva A., Martínez-Pañeda E. Crack tip fields and fracture resistance parameters based on strain gradient plasticity. *International Journal of Solids and Structures*, 2021, vol. 208-209, pp. 63-82. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2020.10.015

13. Ragab R., Parker J., Li M., Liu T., Sun W. Creep crack growth modelling of Grade 91 vessel weldments using a modified ductility based damage model. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2022, vol. 91, 104424. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2021.104424

14. Kosov D., Fedorenkov D., Tumanov A. Complex stress state analysis for aluminum alloy accounting for damage accumulation. *Procedia structural integrity*, 2022, vol. 42, pp. 545-552

15. Stepanova L.V., Yakovleva E.M. Nonlinear eigenvalue problems arising from nonlinear fracture mechanics boundary value problems. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 37, pp. 908-919. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.02.025

16. Shlyannikov V., Tumanov A., Boychenko N. Elastic and nonlinear crack tip solutions comparison with respect to failure probability. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2022, vol. 16, no. 62, pp. 1-13. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.62.01

17. Tumanov A.V. Modifikatsiia modeli nakopleniia povrezhdenii Lemaitre dopolneniem funktsii ucheta lokal'noi mnogoosnosti nagruzheniia pri nelineinom deformirovanii [Modification of the Lemaitre damage accumulation model by adding the function of accounting for local multiaxis loading under nonlinear deformation]. *Fizicheskaia mezomekhanika*, 2023, vol. 26, no. 3, pp. 105-113. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_3_105

18. Bondar' V.S., Abashev D.R., Fomin D.Iu. Uprugoplasticheskoe povedenie i razrushenie konstruktsii s kontsentratorami napriazhenii pri tsiklicheskikh nagruzheniiakh [Elastic-plastic behavior and destruction of structures with stress concentrators under cyclic loads]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 4, pp. 23-33. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.03

19. Chaplii D.V., Belova O.N., Stepanova L.V., Bykova Iu.S. Issledovanie asimptotiki polia napriazhenii v okrestnosti vershiny treshchiny v usloviiakh polzuchesti s uchetom povrezhdennosti [Investigation of the asymptotics of the stress field in the vicinity of the crack tip under creep conditions, taking into account the damage]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2024, no. 3, pp. 17-38. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.02

20. Botvina L.R., Beletskii E.N., Tiutin M.R., Demina Iu.A., Sinev I.O., Bolotnikov A.I. Razrushenie stali 30KhGSA v usloviiakh smeshannykh mod nagruzheniia [Destruction of 30HGSA steel under conditions of mixed loading modes]. *Fizicheskaia mezomekhanika*, 2023, vol 26, no. 2, pp. 30-42. DOI: 10.55652/1683-805X_2023_26_2_30

21. Vshivkov A.N., Iziumova A.Iu., Panteleev I.A., Plekhov O.A. O metode otsenki raspredeleniia plasticheskoi deformatsii v oblasti vershiny ustalostnoi treshchiny na osnove resheniia zadachi lineinoi teorii uprugosti [On a method for estimating the distribution of plastic deformation in the area of the tip of a fatigue crack based on solving the problem of linear elasticity theory]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 6, pp. 41-49. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.04

22. Liu J., Zhang Q., Zuo Z., Xiong Y., Ren F., Volinsky A.A. Microstructure evolution of Al-12Si-CuNiMg alloy under high temperature low cycle fatigue. *Mater. Sci. Eng. A*, 2013, vol. 574, pp. 186-190.

23. Chen X., Yang Z., Sokolov M.A. et al. Low cycle fatigue and Creep-Fatigue behavior on Ni-based alloy 230 at 850 °C. *Mater. Sei. and Eng. A*, 2013, vol. 563, pp. 152-162. DOI: 10.1016/j.msea.2012.11.063

24. Mishnev R., Dudova N., Kaibyshev R. Effect of the strain rate on the low cycle fatigue behavior of a 10Cr-2W-Mo-3Co-NbV steel at 650 °C. *International Journal of Fatigue*, 2017, vol. 100, part 1, pp. 113-125. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.03.025

25. Han Q., Wang P., Lu Y. Low-cycle multiaxial fatigue behavior and life prediction of Q235B steel welded material. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 127, pp. 417-430. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.06.027

26. Wang M., Pang J.C., Liu H.Q., Zou C.L., Zhang Z.F. Deformation mechanism and fatigue life of an Al-12Si alloy at different temperatures and strain rates. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 127, pp. 268-274.

27. Benedetti M., Berto F., Santus C. A novel Strain-Energy-Density based fatigue criterion accounting for mean stress and plasticity effects on the medium-to-high-cycle uniaxial fatigue strength of plain and notched components. *International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 133, 105397. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2019.105397

28. Yankin A.S., Wildemann V.E., Belonogov N.S., Staroverov O.A. Influence of static mean stresses on the fatigue behavior of 2024 aluminum alloy under multiaxial loading. *Frattura ed Integrita Strutturale*, 2020, vol. XIV, iss. 51, pp. 151-163.

29. Lykova A.V., Ilinikh A.V. Studying of accumulation damages regularities under low cycle loading and cycle variable parameters conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, no. 747, 012122.

30. Yankin A.S., Lykova A.V., Mugatarov A.I., Wildemann V.E., Ilinykh A.V. Influence of additional static stresses on

biaxial low-cycle fatigue of 2024 aluminum alloy. *Fracture and Structural Integrity*, 2022, vol. 16, no. 62, pp. 180-193.

31. Kosov D.A., Fedorenkov D.I. Analiz napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia aliuminievogo splava D16T pri slozhnom napriazhennom sostoianii s uchetom povrezhdennosti [Analysis of the stress-strain state of D16T aluminum alloy under complex stress conditions, taking into account damage]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 4, pp. 45-53. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.4.05

32. Matvienko Yu.G., Pisarev V.S., Eleonsky S.I. Evolution of fracture mechanics parameters relevant to narrow notch increment as a measure of fatigue damage accumulation. *International Journal of Fatigue*, 2021, vol. 149, Article: 106310. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106310

33. Matvienko Yu.G., Pisarev V.S., Eleonsky S.I. Low-cycle fatigue damage accumulation near the cold-expanded hole by crack compliance data. *International Journal of Fatigue*, 2022, vol. 155, Article: 106590. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2021.106590

34. Pisarev V.S., Matvienko Yu.G., Odintsev I.N., Eleonsky S.I. Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 179, pp. 348-374. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.04.029

35. Matvienko Yu.G., Pisarev V.S., Eleonsky S.I. Quantification of low-cycle fatigue damage accumulation in stress concentration area by local strain evolution. *Procedia Structural Integrity*, 2022, vol. 41, pp. 192-198. DOI: 10.1016/j.prostr.2022.05.021

36. Matvienko Yu.G., Pisarev V.S., Eleonsky S.I. Quantitative description of low-cycle fatigue damage accumulation in contact interaction zone by local strain evolution. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2022, vol. 62, pp. 541-560. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.62.37

37. Rabotnov Iu.N. Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela [Mechanics of a deformable solid]. Moscow: Nauka. Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1979, 743 p.

38. Moskvitin V.V. Tsiklicheskoe nagruzhenie elementov konstruktsii [Cyclic loading of structural elements]. Moscow: Nauka. Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1981, 344 p.

39. Movchan A.A. Mikromekhanicheskii podkhod k probleme opisaniia nakopleniia anizotropnykh rasseiannykh povrezhdenii [A micromechanical approach to the problem of describing the accumulation of anisotropic scattered damages]. *Izvestiia AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*, 1990, no. 3, pp. 115-123.

40. Movchan A.A. Mekhanika nakopleniia rasseiannykh povrezhdenii v elementakh konstruktsii [Mechanics of accumulation of scattered damages in structural elements]. Moscow: Moskovskii aviatsionnyi institut, 1996, 64 p.

41. Shaniavskii A.A. Modeli zarozhdeniia i razvitiia ustalostnogo razrusheniia pod poverkhnost'iu metallov [Models of the origin and development of fatigue failure under the surface of metals]. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii*, 2012, no. 179, pp. 32-44.

42. Rastogi P. Digital speckle pattern interferometry and related techniques. Wiley, West Sussex, 2001, 384 p.

43. Camacho-Reyes A., Antunes F.V., Vasco-Olmo J.M., Diaz F.A., Felipe-Sese L.A. On the experimental characterisation of the crack tip displacement fields on nonplanar elements: Numerical and experimental analysis. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2023, vol. 124, 103803. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.103803

44. Stepanova L.V., Belova O.N. Coefficients of the Williams power expansion of the near crack tip stress field in continuum linear elastic fracture mechanics at the nanoscale. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, vol. 119, 103298. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103298

45. Stepanova L.V., Belova O.N. Stress intensity factors, T-stresses and higher order coefficients of the Williams series expansion and their evaluation through molecular dynamics simulation. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2022. DOI: 10.1080/ 15376494.2022.2084800

46. Ayatollahi M.R., Moazzami M. Digital image correlation methos for calculating coefficients of Williams expansion in compact tension specimen. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, vol. 90, pp. 26-33. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2016.09.011

47. Liubutin P.S., Panin S.V., Titkov V.V., Eremin A.V., Sunder R. Razvitie metoda korreliatsii tsifrovykh izobrazhenii dlia izucheniia protsessov deformatsii i razrusheniia konstruktsionnykh materialov [Development of the digital image correlation method for studying the processes of deformation and destruction of structural materials]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2019, no. 1, pp. 87-107. DOI: 10.15593/perm.mech/2019.1.08

48. Botvina L.R., Bolotnikov A.I., Sinev I.O., Tiutin M.R., Beletskii E.N. Issledovanie kinetiki razrusheniia splava D16ch metodami akusticheskoi emissii, korreliatsii tsifrovykh izobrazhenii i izucheniia real'noi povrezhdennosti [Investigation of the kinetics of fracture of the D16h alloy by acoustic emission methods, digital image correlation and study of real damage]. *Metally*, 2022, no. 4, pp. 15-23.

49. Shuai J., Zhao J., Lei L. Simple crack tip and stress intensity factor determination method for mode I crack using digital image correlation nanoscale. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, vol. 122, 103621. DOI: 10.1016/j.tafmec.2022.103621

50. Anisimov G.S., Stepanova L.V. Eksperimental'noe opredelenie polei u vershiny treshchiny: metod golograficheskoi interferometrii i metod korreliatsii tsifrovykh izobrazhenii [Experimental determination of fields at the crack tip: holographic interferometry method and digital image correlation method]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2024, no. 3, pp. 39-56. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.03

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 24-19-00117).
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was carried out with financial support from the Russian Science Foundation (project No. 24-19-00117).
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.