

**Механика материалов:
прочность, ресурс, безопасность****Materials mechanics:
strength, durability, safety**DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-9-52-62>**ЭВОЛЮЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ
В ОКРЕСТНОСТИ ОТВЕРСТИЯ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
ПО ДАННЫМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕЩИНЫ УЗКИМИ НАДРЕЗАМИ****© Святослав Игоревич Елеонский¹, Юрий Григорьевич Матвиенко²,
Владимир Сергеевич Писарев^{1*}, Андрей Владимирович Чернов¹**¹ Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского, Россия, 140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1; *e-mail: VSP5335@mail.ru² Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Россия, 101990, Москва, Малый Харитоньевский пер., д. 4.

*Статья поступила 13 февраля 2020 г. Поступила после доработки 20 марта 2020 г.
Принята к публикации 30 апреля 2020 г.*

Предложен новый метод исследования влияния малоциклового усталости на эволюцию величин параметров механики разрушения при нагружении плоских образцов с концентраторами напряжений. Рассмотрены три программы нагружения с постоянным значением размаха напряжений и различными коэффициентами асимметрии цикла, а также две программы с постоянным коэффициентом асимметрии и различными величинами размаха напряжений цикла. Одна программа — общая для обоих случаев. Все программы включают одноосное растяжение-сжатие. Каждую программу реализовывали путем испытания партии одинаковых образцов — от семи до девяти в каждой. Один образец из партии был предназначен для оценки долговечности. В рамках каждой программы остальные образцы доводили до различных стадий малоциклового усталости. Экспериментальные данные получали для трещин различной длины, которые моделировали последовательностью из трех узких надрезов, начинающихся от сквозного отверстия в прямоугольном образце. Деформационный отклик на малое приращение длины надреза при постоянной внешней нагрузке измеряли с помощью метода электронной спекл-интерферометрии. Исходная экспериментальная информация — картины интерференционных полос, которые обеспечивали определение тангенциальных компонент перемещений непосредственно на берегах надреза. Таким образом, величины раскрытия надреза определяли по результатам прямых измерений. От измеренных перемещений к величинам коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и T -напряжений переходили с помощью соотношений модифицированной версии метода последовательного наращивания длины трещины, которые основаны на формулировке Уильямса. Получены распределения параметров механики разрушения по длине надрезов на различных этапах циклического нагружения. На этой основе построены зависимости величин раскрытия, КИН и T -напряжений для надрезов фиксированной длины от количества циклов нагружения. Установлено, что экспериментальные распределения величин КИН по периоду долговечности практически совпадают для всех четырех комбинаций параметров цикла нагружения.

Ключевые слова: малоцикловая усталость; метод последовательного наращивания длины трещины; параметры механики разрушения; электронная спекл-интерферометрия.

**EVOLUTION OF THE FRACTURE MECHANICS PARAMETERS IN THE VICINITY
OF THE HOLE IN CONDITIONS OF LOW-CYCLE FATIGUE ACCORDING
TO THE DATA OF MODELING A CRACK WITH NARROW NOTCHES****© Svyatoslav I. Eleonsky¹, Yury G. Matvienko²,
Vladimir S. Pisarev^{1*}, Andrey V. Chernov¹**¹ N. E. Zhukovsky Central AeroHydrodynamics Institute, 1 Zhukovskogo ul., Zhukovsky, Moscow obl., 140180, Russia; *e-mail: VSP5335@mail.ru² Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Science, 4, Malyj Khariton'evsky per., Moscow, 101990, Russia.

Received February 13, 2020. Revised March 20, 2020. Accepted April 30, 2020.

We propose a new method for studying the effect of low-cycle fatigue on the evolution of the fracture mechanics parameters in conditions of loading plane specimens with stress concentrators. Three programs of loading with a constant value of the stress range and different values of the stress ratio, as well as two programs with a constant value of the stress ratio but different stress ranges are considered. One program is common for both cases. All the programs include uniaxial tension-compression. Each program was implemented by testing a batch of the same specimens from seven to nine in each. One specimen from each batch was assigned to assess the durability. The other specimens were brought to various stages of low-cycle fatigue in each program. Experimental data were obtained for cracks of different length which were modeled by a sequence of three narrow notches launched from a through hole in a rectangular specimen. Each notch was exposed to constant external load of the same level. The deformation response to a small increment in the notch length at a constant external load was measured at different stages of low-cycle fatigue using electronic speckle pattern interferometry. The interference fringe patterns used as initial experimental data provided determination of the tangential components of in-plane displacements directly on the notch sides and the values of notch opening were thus determined from the results of direct measurements. The transition from measured displacement components to the values of the stress intensity factor and T -stress was performed using the relationships of a modified version of the crack compliance method based on Williams formulation. Distributions of the fracture mechanics parameters along the notches were obtained at various stages of cyclic loading. The dependences of the crack mouth opening displacement, the stress intensity factor and the T -stress on the number of loading cycles are constructed for the notches of a fixed length at different stages of low-cycle fatigue. It is shown that experimental distributions of the stress intensity factor values over the life time practically coincide for all four combinations of the loading cycle parameters.

Keywords: low-cycle fatigue; crack compliance method; fracture mechanics parameters; electronic speckle pattern interferometry.

Введение

Исследования процессов накопления повреждений, зарождения усталостной трещины и ее дальнейшего роста, которые происходят в нерегулярных зонах металлических конструкций в процессе малоциклового усталости, являются необходимым звеном при анализе и обосновании как статической, так и усталостной прочности [1 – 4]. Методы линейной механики разрушения широко используются для анализа накопления повреждений и оценки на его основе долговечности конструкций [5].

Необходимость разнообразных экспериментальных исследований процессов накопления усталостных повреждений, особенно при наличии локальных упругопластических деформаций, многократно обоснована в литературе (см., например, [1 – 3]). Методики, основанные на оптических и оптико-интерференционных измерениях, наиболее эффективны для количественного описания эволюции упругопластических деформаций [6 – 8]. Многочисленные методы измерения полей перемещений и деформаций используют для экспериментального определения параметров механики разрушения и оценки накопления повреждений [9 – 29]. Большинство из этих подходов включают измерения тангенциальных компонент перемещений в окрестности трещины постоянной длины при пошаговом увеличении внешней нагрузки.

Существует, можно сказать, альтернативный подход к экспериментальному определению параметров механики разрушения. Это метод последовательного наращивания длины трещины

(ПНДТ) для измерения остаточных напряжений, первоначально предложенный авторами работ [30, 31]. В отличие от подходов традиционных методов экспериментальной механики разрушения, в методе ПНДТ используют измерения деформационного отклика на малое приращение длины узкого надреза без изменения внешней нагрузки. Другими словами, данный подход базируется на релаксации исследуемого поля напряжений после последовательного нанесения надрезов и последующих измерениях соответствующих деформационных откликов. Начальная версия метода ПНДТ требовала сложного математического аппарата, большого объема вычислений и была направлена только на определение остаточных напряжений. В качестве следующего шага была предложена более простая версия анализа, которая использует соотношения линейной механики разрушения [32, 33]. Данный подход обеспечивает получение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) K_I как функции длины надреза непосредственно по результатам измерения деформационного отклика. Модифицированная версия метода ПНДТ дает возможность высокоточного определения раскрытия в вершине надреза (СМОД), КИН и T -напряжений [34]. Анализ изменения величин параметров механики разрушения, которые относятся к надрезам одинаковой длины на различных этапах малоциклового усталости, может служить основой для количественного описания степени поврежденности материала. Естественно, что подобная информация необходима для нескольких программ нагружения, которые отличаются величи-

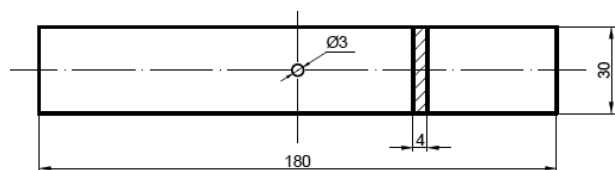


Рис. 1. Геометрические параметры исследуемых образцов

Fig. 1. Geometric parameters of the specimens under study

нами коэффициента асимметрии цикла и размаха напряжений. Первые попытки применения подобного подхода привели к весьма интересным результатам [35, 36].

Основная цель данной работы — получение новых экспериментальных данных, которые описывают влияние изменения коэффициента асимметрии и размаха напряжений цикла на эволюцию параметров механики разрушения для трещин различной длины, которые моделируются последовательностью узких надрезов, начинающихся от сквозного отверстия в прямоугольном образце, на различных этапах малоциклового нагружения.

Методы исследования

Исследовали плоские образцы размерами $180 \times 30 \times 4$ мм, изготовленные из алюминиевого сплава 2024 (рис. 1). Механические свойства материала, которые установлены стандартными испытаниями на растяжение, составляют: модуль упругости $E = 74\,000$ МПа; коэффициент Пуассона $\nu = 0,33$; предел текучести $\sigma_{0,2} = 330$ МПа.

Всего испытано 32 образца. Все они изготовлены из одной цельной заготовки по одинаковой технологии. Отсутствие остаточных напряжений установлено на основе совместного применения метода сверления отверстия и электронной спекл-интерферометрии [37]. Во всех исследуемых купонах выполнены центральные сквозные отверстия диаметром $2r_0 = 3$ мм. Образцы, разделенные на четыре группы, подвергали одноосному растяжению-сжатию при помощи электромеханической испытательной машины Walter + Bai AG, Type LFM-Z 200 с диапазоном на-

гружения 0 – 200 кН согласно параметрам цикла нагружения, которые указаны в табл. 1. Величины максимального напряжения цикла $\sigma_{\max}$ составляли 76, 61, 51 и 53 % от предела текучести материала для групп T4_AA, T4_BB, T4_CC и T4_XX соответственно (см. табл. 1).

Программы нагружения выбирали исходя из следующих соображений. Цикл нагружения для группы T4_AA соответствует максимальному растягивающему напряжению $\sigma_{\max} = 250$ МПа и минимальному сжимающему $\sigma_{\min} = -83,3$ МПа. В этом случае согласно данным численного моделирования на контуре отверстия максимальная величина окружной деформации $\varepsilon_{\phi\max} = 0,01$. Для используемого алюминиевого сплава такой диапазон нагрузки приводит к значительным пластическим деформациям на контуре отверстия в течение нескольких первых циклов и последующему упрочнению материала в окрестности сквозного отверстия из-за влияния эффекта концентрации напряжений [8]. Для отверстия диаметром $2r_0 = 3,0$ мм в прямоугольной пластине шириной $w = 30$ мм теоретическая величина коэффициента концентрации напряжений $K_t = 3,04$. Отметим, что параметры цикла $\Delta\sigma = 333,3$ МПа и $R = -0,33$ соответствуют наиболее жесткой программе нагружения, которая может иметь место при эксплуатации болтовых или заклепочных соединений авиационных конструкций. Симметричный цикл ($R = -1,0$) представляет собой нижний предел реальной величины коэффициента асимметрии циклов. Цикл с параметрами $\Delta\sigma = 333,3$ МПа и $R = -0,66$ имеет промежуточный характер.

Данные для одного из образцов (T4_09), общего для всех групп, получены в исходном состоянии без приложения знакопеременного растяжения-сжатия. Циклическое нагружение образцов T4_A0, T4_B0, T4_C0 и T4_X0 (см. табл. 1) — следующий этап программы экспериментальных исследований. На этих образцах определяли долговечность как количество циклов N_F до полного разрушения. Остальные образцы типов T4_AA, T4_BB, T4_CC и T4_XX подвергали периодическому растяжению-сжатию с разным количеством циклов (табл. 2 – 5). После цик-

Таблица 1. Номенклатура образцов и характеристики циклов нагружения

Table 1. Nomenclature of specimens and parameters of the loading cycles

Тип образцов	Размах напряжений $\Delta\sigma$, МПа	Коэффициент асимметрии R	Максимальное напряжение $\sigma_{\max}$, МПа	Минимальное напряжение $\sigma_{\min}$, МПа
T4_AA	333,3	-0,33	250	-83,3
T4_BB	333,3	-0,66	200,8	-132,5
T4_CC	333,3	-1,00	166,65	-166,65
T4_XX	233,3	-0,33	175,4	-57,9

лического нагружения, которое обеспечивает накопление повреждений в окрестности отверстия, проводили оптические интерференционные измерения локального деформационного отклика на малое приращение длины надреза. Образцы с различной степенью поврежденности последовательно устанавливали в захватах испытательной машины Walter+Bai AG, Type LFM-L 25, с диапазоном нагружения 0 – 25 кН. Нагружающее устройство включено в оптическую схему интерферометра (рис. 2). В каждом образце выполняли три последовательных надреза при постоянной внешней нагрузке, которая соответствовала номинальным растягивающим напряжениям $\sigma = 53,1$ МПа. Схема нанесения надрезов и возникающие при этом картины интерференционных полос показаны на рис. 3 — интерферограммы получены для образца T4_23 из группы ВВ после приложения $N = 2571$ циклов.

Вначале экспериментальной процедуры измеряли раскрытие узкого надреза шириной $\Delta b = 0,17$ мм методом электронной спекл-интерфе-

рометрии [34]. Далее переходили от величин раскрытия к значениям КИН и T -напряжений для надрезов трех различных длин. Измеряемые величины показаны на рис. 4. Полученные данные позволяют построить распределения параметров механики разрушения по суммарной длине надреза на различных стадиях малоциклового нагружения, приведенных в табл. 2 – 5. Для достижения поставленных целей зачетные образцы (8, 6, 9 и 5 штук из табл. 2 – 5 соответственно) подвергали одноосному циклическому растяжению-сжатию с заданным для каждого образца количеством циклов нагружения. После этого проводили регистрацию и визуализацию картин интерференционных полос для трещин различной длины в окрестности отверстия на различных этапах малоциклового нагружения. Перед выполнением первого надреза все образцы находились под действием номинальных растягивающих напряжений $\sigma = 53,1$ МПа. Начальные точки центральных симметричных надрезов расположены в точках пересечения контура отверстия с централь-

Таблица 2. Этапы проведения измерений для образцов типа T4_AA

Table 2. Stages of the measurement procedure for the specimens of T4_AA group

	Номер образца								
	T4_09	T4_28	T4_29	T4_25	T4_26	T4_19	T4_20	T4_27	T4_A0
Количество циклов нагружения N	0	100	1000	1412	2477	2900	3500	4025	5228
Долговечность, %	0	1,9	19,1	27	47,4	55,4	67	77	100

Таблица 3. Этапы проведения измерений для образцов типа T4_BB

Table 3. Stages of the measurement procedure for the specimens of T4_BB group

	Номер образца							
	T4_09	T4_21	T4_30	T4_23	T4_24	T4_31	T4_22	T4_B0
Количество циклов нагружения N	0	780	1800	2571	3474	4600	5450	6948
Долговечность, %	0	11,2	26	37,0	50	67	78,4	100

Таблица 4. Этапы проведения измерений для образцов типа T4_CC

Table 4. Stages of the measurement procedure for the specimens of T4_CC group

	Номер образца										
	T4_09	T4_10	T4_11	T4_12	T4_13	T4_14	T4_15	T4_16	T4_17	T4_18	T4_C0
Количество циклов нагружения N	0	100	500	1000	1800	2500	3300	4500	6000	7000	8912
Долговечность, %	0	1,1	5,6	11,2	20,2	28,1	37,0	50,5	67,3	78,5	100

Таблица 5. Этапы проведения измерений для образцов типа T4_XX

Table 5. Stages of the measurement procedure for the specimens of T4_XX group

	Номер образца						
	T4_09	T4_X3	T4_X1	T4_X2	T4_X5	T4_X4	T4_X0
Количество циклов нагружения N	0	2378	5350	9314	13277	15060	19816
Долговечность, %	0	12	27	47	67	76	100

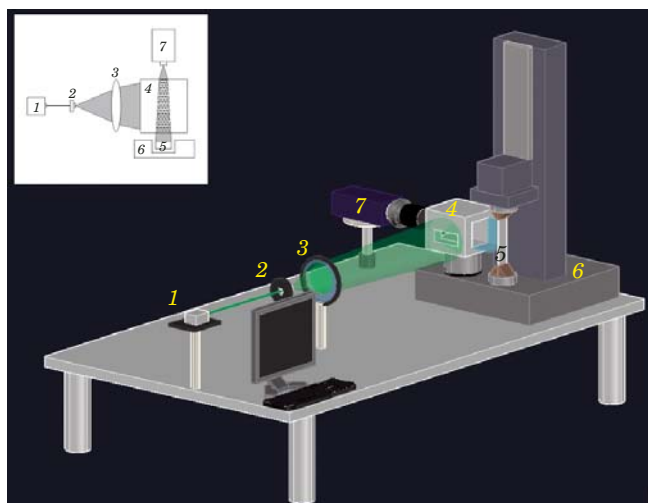


Рис. 2. Схема интерферометра: 1 — диодный лазер; 2 — микрообъектив; 3 — линза; 4 — мобильный модуль; 5 — образец в захватах испытательной машины; 6 — испытательная машина; 7 — видеокамера

Fig. 2. Scheme of the interferometer: 1 — diode laser, 2 — microlens, 3 — lens, 4 — mobile module; 5 — specimen, 6 — testing machine, 7 — video camera

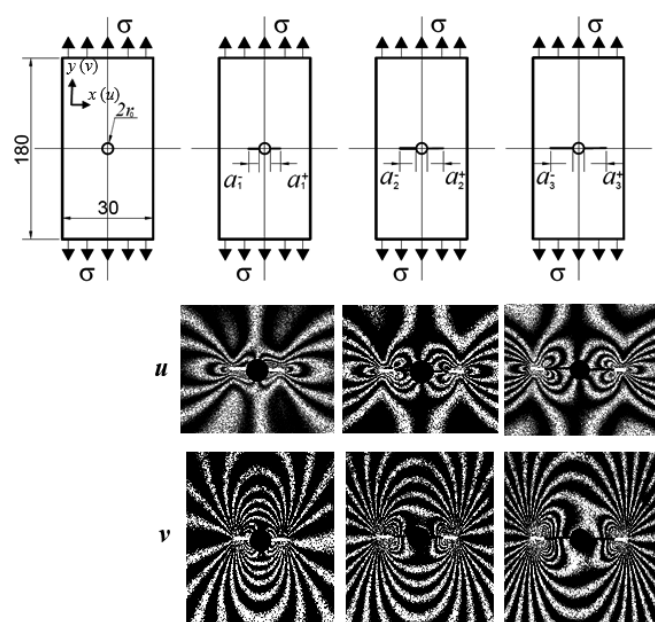


Рис. 3. Схема получения картин интерференционных полос при последовательном увеличении длины надреза

Fig. 3. Scheme of obtaining the interference fringes patterns corresponding to a sequential increase in the notch length

ным поперечным сечением, перпендикулярным линии приложения нагрузки, как это показано на рис. 2 и 4. На всех исследованных этапах циклического нагружения последовательно выполняли три надреза, моделирующие трещины различной длины. Полный набор данных — обязательное условие построения зависимостей параметров

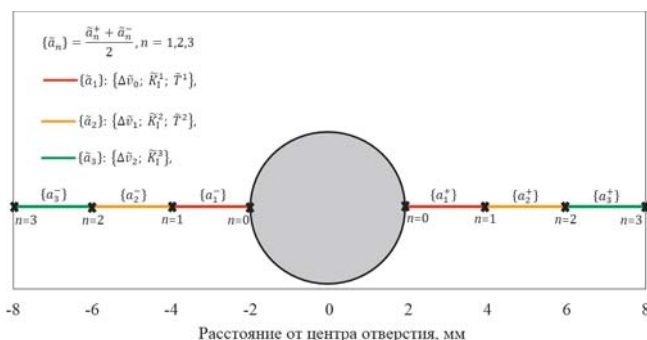


Рис. 4. Схема нанесения надрезов и обозначения соответствующих экспериментальных величин параметров механики разрушения

Fig. 4. Schematic drawing of the notches and corresponding notations of experimental values of the fracture mechanics parameters

механики разрушения от количества циклов нагружения для надрезов фиксированной длины, которые являются необходимым звеном для количественного описания влияния коэффициента асимметрии цикла и амплитуды на накопление повреждений.

Исходная экспериментальная информация

В рамках данной работы получено 87 наборов интерферограмм, каждый из которых состоит из шести картин интерференционных полос для 29 образцов (см. табл. 2 – 5). Все картины полос отличаются высоким качеством и пригодны для надежной количественной обработки и интерпретации в терминах тангенциальных компонент перемещений. Интерферограммы, которые соответствуют первому надрезу для образца T4_09 в исходном состоянии, приведены на рис. 5. Типичные картины полос, полученные для первого надреза на различных этапах малоциклового нагружения, показаны на рис. 6 – 9 для групп T4_AA, T4_BB, T4_CC и T4_XX соответственно.

Результаты обработки картин интерференционных полос в терминах тангенциальных компонент перемещений u и v для всех исследованных образцов представлены в наборе соответствующих таблиц для каждого исследованного образца. В эти таблицы включены также соответствующие величины КИН и T -напряжений.

Распределения параметров механики разрушения по длине надреза на различных этапах малоциклового нагружения

Полный набор экспериментальных данных дает возможность получить зависимости пара-

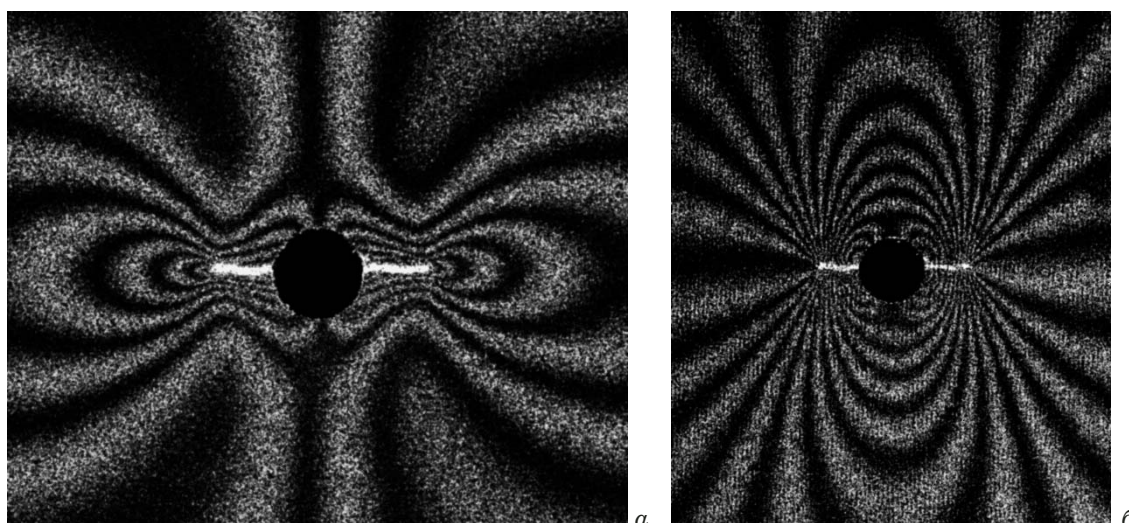


Рис. 5. Образец T4_09: картины интерференционных полос, полученные в терминах плоских компонент u (а) и v (б); исходная длина трещины $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2,0$ мм (слева) и $\Delta a_1^+ = 2,14$ мм (справа)

Fig. 5. Specimen T4_09: interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component u (a) and v (b); initial crack length $a_0 = 0$ with an increment of $\Delta a_1^- = 2.0$ mm (left) and $\Delta a_1^+ = 2.14$ mm (right)

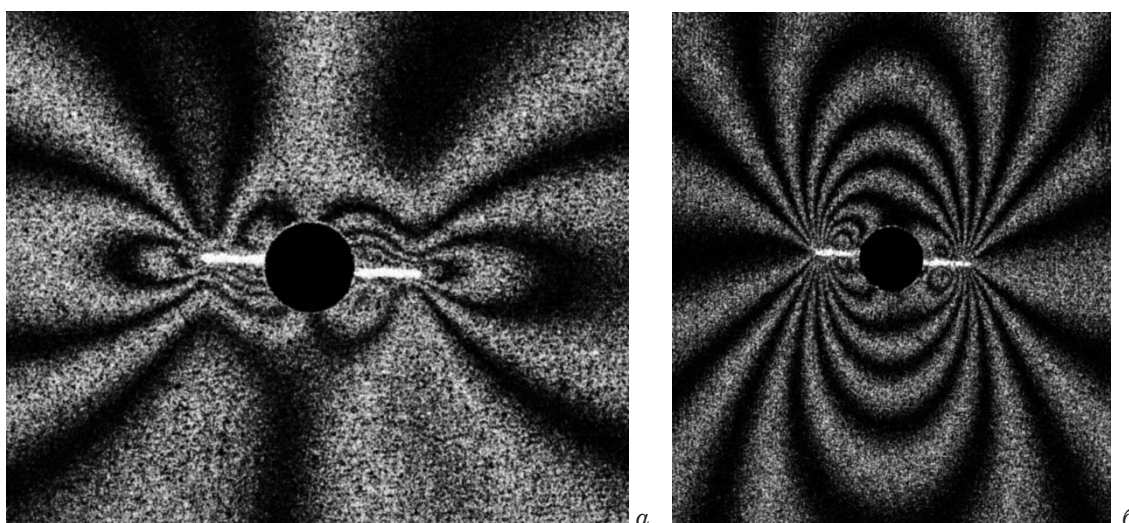


Рис. 6. Образец T4_19: картины интерференционных полос, полученные в терминах плоских компонент u (а) и v (б); исходная длина трещины $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2,14$ мм (слева) и $\Delta a_1^+ = 2,28$ мм (справа)

Fig. 6. Specimen T4_19: interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component u (a) and v (b); initial crack length $a_0 = 0$ with an increment of $\Delta a_1^- = 2.14$ mm (left) and $\Delta a_1^+ = 2.28$ mm (right)

метров механики разрушения от длины надреза (трещины) $\tilde{a}_n$ ($n = 1, 2, 3$) на различных этапах циклического нагружения. Типичные графики распределения величин раскрытия в вершине трещины (СМОД) $\tilde{v}_{n-1}$, коэффициентов интенсивности напряжений $\tilde{K}_I^n$ и T -напряжений $\tilde{T}_n$ представлены на рис. 10 для образцов группы T4_BB.

Такие распределения, полученные на различных этапах малоциклового нагружения, дают возможность построить зависимости величин параметров механики разрушения от количества циклов нагружения. Покажем, что зависимости

величин КИН можно использовать для количественного описания процесса накопления повреждений. Отметим, что скрытая стадия накопления повреждений в случае малоциклового усталости может быть очень близка к величине долговечности образцов. Именно такая ситуация наблюдалась для образцов всех четырех групп. Короткие, но реально видимые трещины (длиной менее 0,5 мм) появлялись при N , равном 4900, 6100, 7200 и 14 300 циклов, что соответствует 94, 88, 81, 72 % долговечности для образцов типов T4_AA, T4_BB, T4_CC и T4_XX соответственно.

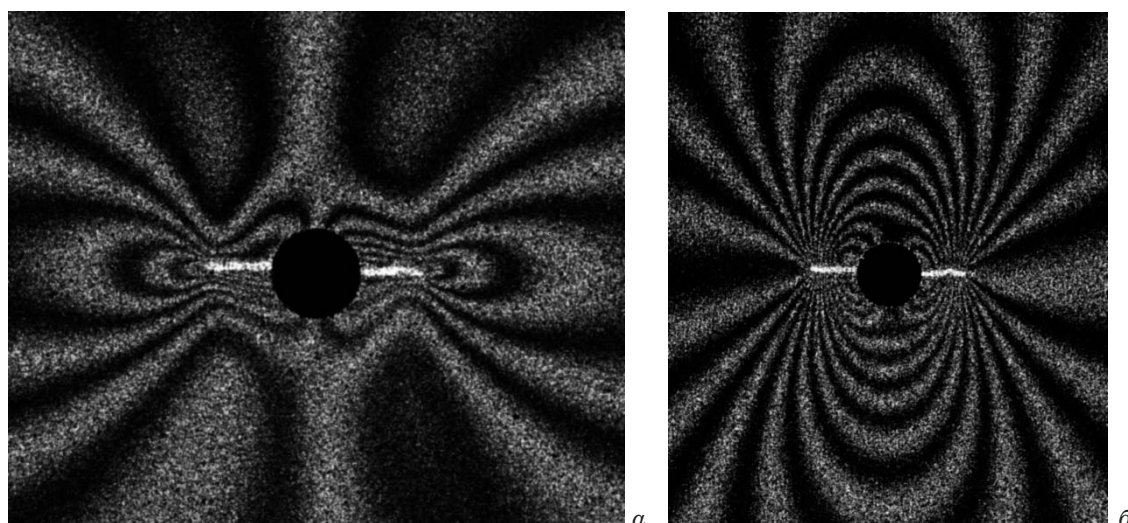


Рис. 7. Образец T4_23: картины интерференционных полос, полученные в терминах плоских компонент u (а) и v (б); исходная длина трещины $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2,24$ мм (слева) и $\Delta a_1^+ = 2,10$ мм (справа)

Fig. 7. Specimen T4_23: interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component u (a) and v (b); initial crack length $a_0 = 0$ with an increment of $\Delta a_1^- = 2.24$ mm (left) and $\Delta a_1^+ = 2.10$ mm (right)

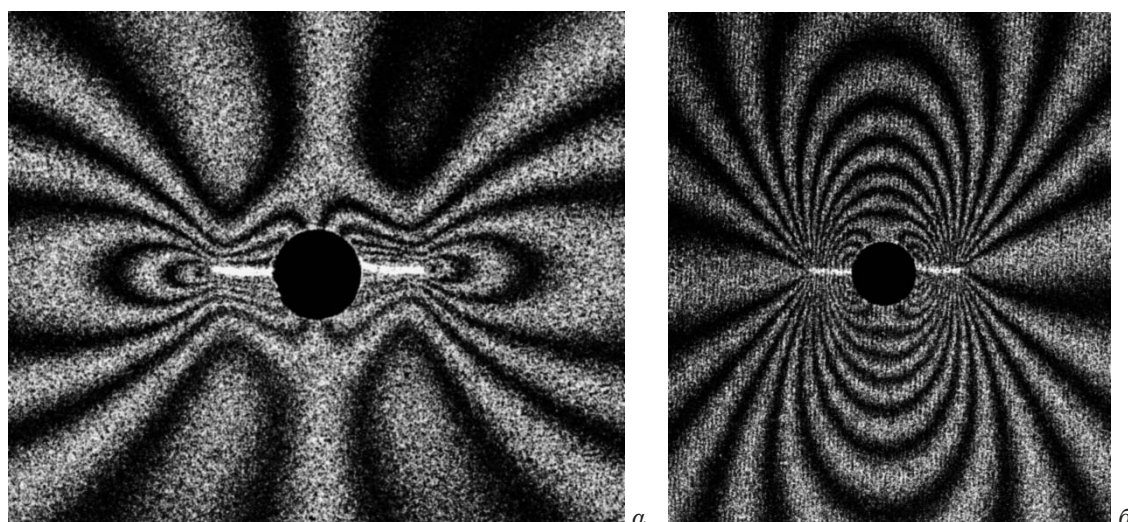


Рис. 8. Образец T4_15: картины интерференционных полос, полученные в терминах плоских компонент u (а) и v (б); исходная длина трещины $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2.07$ мм (слева) и $\Delta a_1^+ = 2,17$ мм (справа)

Fig. 8. Specimen T4_15: interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component u (a) and v (b); initial crack length $a_0 = 0$ with an increment of $\Delta a_1^- = 2.07$ mm (left) and $\Delta a_1^+ = 2.17$ mm (right)

Влияние коэффициента асимметрии цикла на эволюцию параметров механики разрушения в окрестности концентратора напряжений

Для количественной оценки влияния коэффициента асимметрии цикла R и размаха напряжений $\Delta\sigma$ на перераспределение параметров механики разрушения в окрестности отверстий необходимо представить полученную экспериментальную информацию в виде зависимостей определяемых величин от количества циклов нагружения для фиксированных длин надрезов. Наибольший интерес в этом смысле представля-

ет первый надрез длиной $\tilde{a}_1$, который распространяется от контура отверстия: во-первых, он затрагивает участок, наиболее подверженный упругопластическому деформированию, во-вторых, этот надрез выполняется в сплошном материале, где на накопление повреждений не влияют предыдущие нарушения сплошности материала. Данные, необходимые для построения таких зависимостей, получены в полном объеме для образцов всех групп.

Зависимости экспериментальных величин раскрытия в вершине первого надреза (СМОД) $\Delta\tilde{v}_{n-1}$, КИН $\tilde{K}_I^n$ и T -напряжений $\tilde{T}_n$ от процента

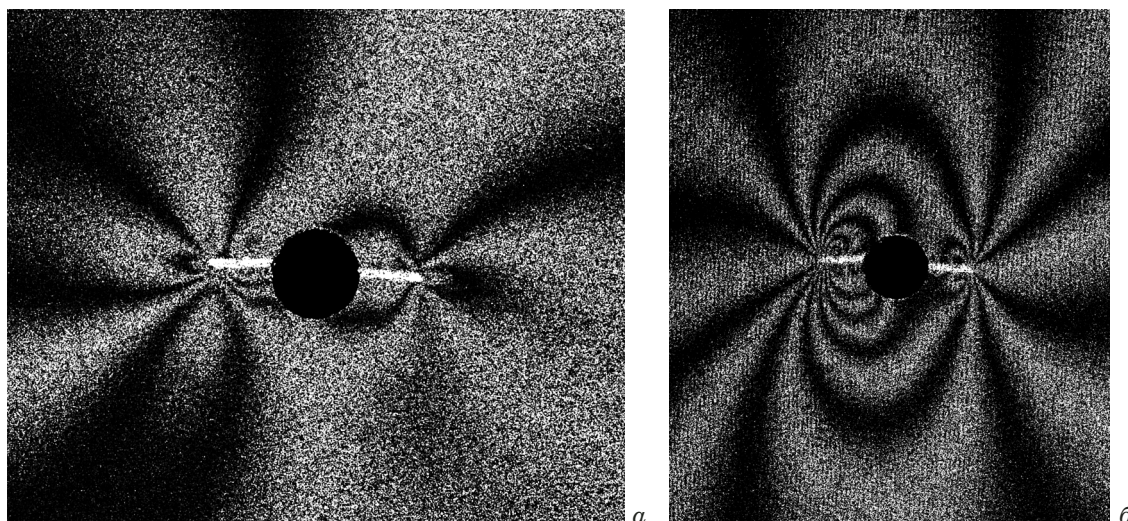


Рис. 9. Образец Т4_17: картины интерференционных полос, полученные в терминах плоских компонент u (а) и v (б); исходная длина трещины $a_0 = 0$ с приращениями $\Delta a_1^- = 2.10$ мм (слева) и $\Delta a_1^+ = 2.17$ мм (справа)

Fig. 9. Specimen T4_17: interference fringe patterns obtained in terms of in-plane displacement component u (a) and v (b); initial crack length $a_0 = 0$ with an increment of $\Delta a_1^- = 2.10$ mm (left) and $\Delta a_1^+ = 2.17$ mm (right)

долговечности для различных коэффициентов асимметрии R и постоянного размаха напряжений $\Delta\sigma = 350$ МПа представлены на рис. 11. Эти графики отражают процесс планирования экспериментов. Другими словами, измерения величин параметров механики разрушения в ключевых точках проводят при одинаковом проценте долговечности для всех трёх типов образцов.

Распределения, приведенные на рис. 11, количественным образом отражают влияние коэффициента асимметрии цикла нагружения на эволюцию параметров механики разрушения, которые относятся к первому надrezу. Несомненно, что все эти зависимости связаны со степенью поврежденности материала. Теперь выясним, какая из этих зависимостей наиболее пригодна для количественного описания процесса накопления повреждений.

Распределения величин $\Delta\tilde{v}_0$ по процентам долговечности (рис. 11, а), которые соответствуют начальным этапам малоциклового нагружения ($N \leq 0,15N_F$), выявляют значительное влияние упрочнения алюминиевого сплава вследствие высокого уровня пластических деформаций в окрестности отверстия для $R = -0,33$, тогда как этот эффект менее заметен для $R = -0,66$ и полностью отсутствует для $R = -1,0$. Эта тенденция вполне очевидна — чем выше уровень максимального напряжения цикла $\sigma_{\max}$, тем меньше величина раскрытия $\Delta\tilde{v}_0$, которая соответствует одинаковым номинальным напряжениям σ . Все экспериментальные результаты получены при постоянной растягивающей нагрузке $\sigma = 53,1$ МПа, что соответствует 15 % от предела текучести материала $\sigma_{0,2} = 330$ МПа. Макси-

мальные напряжения цикла $\sigma_{\max}$ равны 250, 200,8 и 166,7 МПа, что соответствует 76, 61 и 51 % от предела текучести для групп образцов Т4_АА, Т4_ВВ и Т4_СС соответственно. Вследствие этого максимальные окружные деформации в окрестности отверстия, вызванные концентрацией напряжений при действии внешней растягивающей нагрузки, в образцах, относящихся к группе Т4_АА, значительно больше, чем аналогичные деформации в образцах групп Т4_ВВ и Т4_СС. Эффект концентрации деформаций и его влияние на упрочнение материала особенно заметен на начальных стадиях малоциклового усталости. Данный факт для алюминиевого сплава хорошо согласуется с данными работы [8]. Экспериментальные результаты, полученные для размаха напряжений $\Delta\sigma = 350$ МПа и коэффициента асимметрии $R = -0,52$, свидетельствуют, что петля гистерезиса в координатах максимальная окружная деформация на контуре отверстия $\varepsilon_{\phi\max}$ — номинальные напряжения σ превращается в прямую линию после приложения 100 циклов к прямоугольному образцу с центральным отверстием. Отличия в экспериментальных зависимостях раскрытия $\Delta\tilde{v}_0$ от количества циклов нагружения, полученных для разных значений R , вызывают затруднения при количественном анализе процесса накопления повреждений. Экспериментальные зависимости величин T -напряжений $\tilde{T}_1$ от процента долговечности (рис. 11, в), полученные для различных значений коэффициента асимметрии цикла R , имеют более высокую степень совпадения. Однако необходимо учитывать, что погрешность определения T -напряжений составляет 15 % от абсолютной величины [34], а погрешность определе-

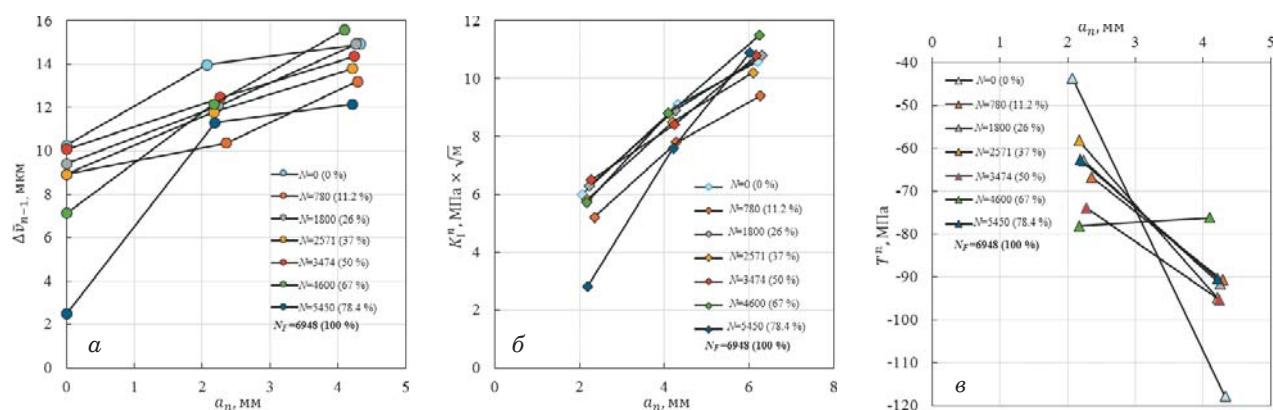


Рис. 10. Распределения величин раскрытия в вершине трещины Δv_{n-1} (а), K_I^n (б) и T -напряжений $\tilde{T}_n$ (в) по длине надреза на различных этапах циклического нагружения для образцов группы T4_BB

Fig. 10. Experimental values of CMOD $\Delta \tilde{v}_{n-1}$ (a), SIF K_I^n (b) $\tilde{T}_n$ (c) as a function of total notch length for the specimens of T4_BB group

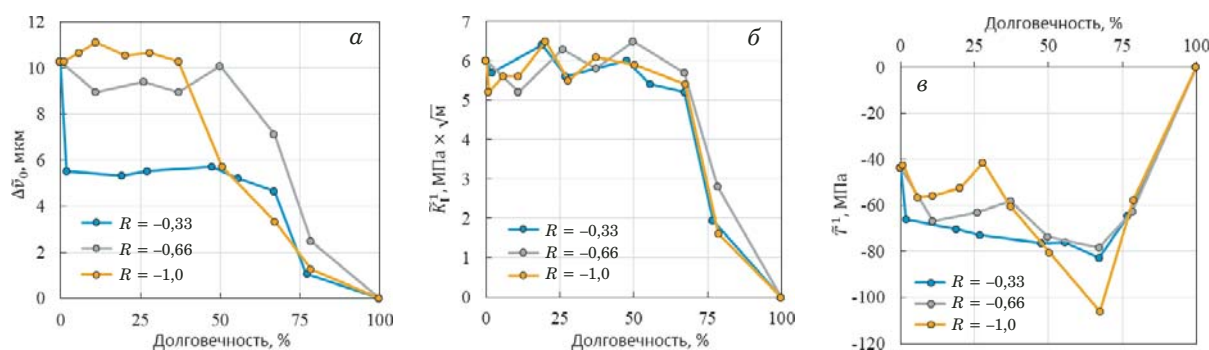


Рис. 11. Зависимости величин раскрытия вершины надреза $\Delta \tilde{v}_0$ (а), КИН K_I^1 (б) и T -напряжений $\tilde{T}_1$ (в) для различных значений параметра R от процента долговечности

Fig. 11. Dependences of $\Delta \tilde{v}_0$ (a), SIF K_I^1 (b), and $\tilde{T}_1$ (c) on the lifetime for different values of the stress ratio R

ния величин K_I^1 в большинстве случаев не превосходит трех процентов. Таким образом, использование вариаций КИН по количеству циклов нагружения выглядит более перспективным для оценки степени поврежденности материала.

В отличие от зависимостей $\Delta \tilde{v}_0$ (см. рис. 11, а) и $\tilde{T}_1$ (см. рис. 11, в), экспериментальные графики K_I^1 (см. рис. 11, б) имеют очень близкую форму для различных величин R . Данный факт представляется весьма значительным с точки зрения количественного описания влияния R на процесс накопления повреждений. Достаточно очевидно, что должно существовать различие в скорости накопления повреждений для образцов трех различных групп.

Влияние размаха напряжений на эволюцию параметров механики разрушения в окрестности концентратора напряжений

Зависимости экспериментальных величин $\Delta \tilde{v}_{n-1}$, K_I^n и $\tilde{T}_n$ от процента долговечности, кото-

рые получены при испытаниях образцов с одинаковым коэффициентом асимметрии цикла $R = -0,33$, но различными размахами напряжений $\Delta \sigma$, равными 333,3 и 233,3 МПа, представлены на рис. 12.

Распределения КИН (см. рис. 12, б), как и в случае вариации коэффициента асимметрии R (см. рис. 11, б), представляют особый интерес, так как они имеют практически одинаковую форму. Такое близкое совпадение позволяет количественно описать влияние размаха напряжений $\Delta \sigma$ на процесс накопления повреждений.

Заключение

Получены новые экспериментальные данные, которые описывают влияние изменения коэффициента асимметрии R и размаха напряжений цикла $\Delta \sigma$ на эволюцию параметров механики разрушения для трещин различной длины. Трещины моделировали последовательностью узких надрезов, начинающихся от сквозного отверстия в прямоугольном образце, после достижения различных стадий малоциклового устало-

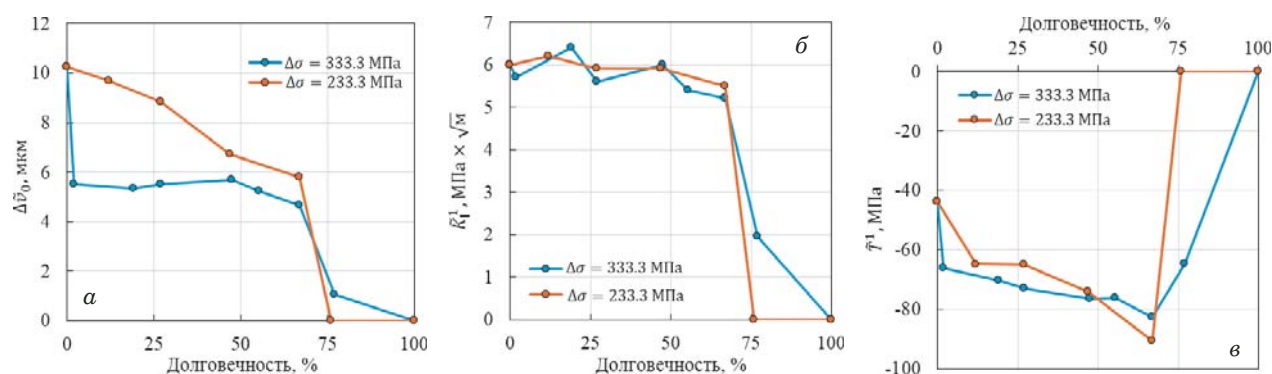


Рис. 12. Зависимости величин раскрытия вершины надреза $\Delta\tilde{v}_0$ (а), КИН K_I^1 (б) и T -напряжений $\tilde{T}_1$ (в) для различных значений параметра $\Delta\sigma$ от процента долговечности

Fig. 12. Dependences of CMOD $\Delta\tilde{v}_0$ (a), SIF K_I^1 (b), and $\tilde{T}_1$ (c) on the lifetime for different stress range $\Delta\sigma$

сти. Надрезы выполняли при постоянной внешней нагрузке, одинаковой для всех образцов. Исследования проведены для трех программ нагружения с одинаковыми величинами размаха напряжений $\Delta\sigma$, но различными значениями коэффициента асимметрии цикла R , а также для двух программ нагружения с одинаковым R , но различными $\Delta\sigma$. Измерение деформационного отклика на локальное удаление материала в форме узкого надреза проводили методом электронной спекл-интерферометрии. Исходные экспериментальные данные, представляющие собой абсолютные величины плоских компонент перемещений на берегах надреза, преобразовывали в величины КИН и T -напряжений. Получены распределения величин раскрытия вершины надреза (CMOD), КИН и T -напряжений по длине трещины, которая распространяется от контура сквозного отверстия, на различных этапах малоциклового нагружения с различными величинами R и $\Delta\sigma$. Эти данные обеспечили построение зависимостей параметров механики разрушения для надрезов фиксированной длины от процента долговечности образцов, которые отражают процесс накопления усталостных повреждений. В следующей статье будет показано, как полученные распределения величин КИН по периоду долговечности можно использовать для получения явного вида функции накопления повреждений.

Финансирование

Работа выполнена в рамках Программы совместных фундаментальных исследований по авиационно-космическим технологиям ФГУП «ЦАГИ» и институтов РАН на 2019 – 2020 гг., а также при поддержке Российского научного фонда (проект № 18-19-00351).

ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. **Makhutov N. A.** Deformation criteria of fracture and structures elements strength analysis. — Moscow: Mashinostroenie, 1981. — 271 p. [in Russian].
2. **Osgood C. C.** Fatigue Design, 2nd edition. — Oxford, UK: Pergamon Press, 1982. — 606 p.
3. **Collins J. A.** Failure of Materials in Mechanical Design: Analysis, Prediction, Prevention, 2nd edition. — NY, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 1993. — 672 p.
4. **Makhutov N., Matvienko Yu., Chernyakov S.** A unified methodological approach to calculation analysis of the stages of nucleation and growth of low-cycle fatigue cracks / Mater. Sci. 1993. Vol. 29. N 2. P. 109 – 114.
5. **Zerbst U., Klingner C., Clegg R.** Fracture mechanics as a tool in failure analysis — prospects and limitations / Engineering Failure Analysis. 2015. Vol. 55. P. 376 – 410. DOI: 10.1016/j.eng-failanal.2015.07.001.
6. **Chiang F.-P.** Moiré and speckle methods applied to elastic-plastic fracture studies / Experimental Techniques in Fracture mechanics. 3rd edition // J. S. Epstein, Ed. — NY: VCH, 1993. P. 291 – 325.
7. **Post D., Han B., Ifju P.** High Sensitivity Moiré. Exp. Analysis for Mech. and Mat. — Berlin: Springer Verlag, 1994. — 444 p.
8. **Shchepinov V. P., Pisarev V. S., Novikov S. A., Balalov V. V., Odintsev I. N., Bondarenko M. M.** Strain and Stress Analysis by Holographic and Speckle Interferometry. — Chichester: John Wiley, 1996. — 483 p.
9. **Lee C. et al.** Determination of plastic strains at notches by image-processing methods / Exp. Mech. 1989. Vol. 29. N 2. P. 214 – 220.
10. **Steckenrider J., Wagner J.** Computed speckle decorrelation (CSD) for the study of fatigue damage / Optics & Lasers in Engineering. 1995. Vol. 22. N 1. P. 3 – 15.
11. **Diaz E. V., Kaufmann G. H., Armas A. E., Galizzi G. E.** Optical measurement of the plastic zone size in a notched metal specimen subjected to low-cycle fatigue / Optics & Lasers in Engineering. 2001. Vol. 35. N 6. P. 325 – 333.
12. **Diaz E. V., Armas A. E., Kaufmann G. H., Galizzi G. E.** Fatigue damage accumulation around a notch using a digital image measurement system / Experimental Mechanics. 2004. Vol. 44. N 3. P. 241 – 246.
13. **Hamam R., Hild F., Roux S.** Stress intensity factor gauging by digital image correlation: Application in cyclic fatigue / Strain. 2007. Vol. 43. P. 81 – 192.
14. **Backman D. et al.** The use of digital image correlation in a parametric study on the effect of edge distance and thickness on residual strains after hole cold expansion / J. Strain Analysis. 2008. Vol. 43. P. 781 – 789.
15. **López-Crespo P. et al.** The stress intensity of mixed mode cracks determined by digital image correlation / J. Strain Anal. for Eng. Design. Vol. 43. P. 769 – 780.

16. **Razumovskii I. A.** Interference optical methods of deformable solid mechanics. — Moscow: Izd. MGTU im. N. É. Bauman, 2007. — 240 p. [in Russian].
17. **De-Matos P. F. P., Nowell D.** Experimental and numerical investigation of thickness effects in plasticity-induced fatigue crack closure / *International Journal of Fatigue*. 2009. Vol. 31. P. 1795 – 1804.
18. **López-Crespo P. et al.** Some experimental observations on crack closure and crack-tip plasticity / *Fat. Fract. Eng. Mater. Struct.* 2009. Vol. 32. P. 418 – 429.
19. **Backman D., Cowal C., Patterson E.** Analysis of the effects of cold expansion of holes using thermoelasticity and image correlation / *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2010. Vol. 33. P. 859 – 870.
20. **Mathieu F., Hild F., Roux S.** Identification of a crack propagation law by digital image correlation / *International Journal of Fatigue*. 2012. Vol. 36. P. 146 – 154.
21. **Mathieu F., Hild F., Roux S.** Image-based identification procedure of a crack propagation law / *Engineering Fracture Mechanics*. 2013. Vol. 103. P. 48 – 59.
22. **Zanganeh M., López-Crespo P., Tai Y. H., Yates J. R.** Locating the crack tip using displacement field data: a comparative study / *Strain*. 2013. Vol. 49. P. 102 – 115.
23. **Yusof F., López-Crespo P., Withers P. J.** Effect of overload on crack closure in thick and thin specimens via digital image correlation / *International Journal of Fatigue*. 2013. Vol. 56. P. 17 – 24.
24. **López-Crespo P. et al.** Overload effects on fatigue crack-tip fields under plane stress conditions: surface and bulk analysis / *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*. 2013. Vol. 36. P. 75 – 84.
25. **Withers P. J. et al.** 2D mapping of plane stress crack-tip fields following an overload / *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2015. Vol. 33. P. 151 – 158. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.33.19.
26. **López-Crespo P., Moreno B., Lopez-Moreno A., Zapate-ro J.** Characterisation of crack-tip fields in biaxial fatigue based on high-magnification image correlation and electro-spray technique / *International Journal of Fatigue*. 2015. Vol. 71. P. 17 – 25.
27. **Vasco-Olmo J. M., Díaz F. A., Patterson E. A.** Experimental evaluation of shielding effect on growing fatigue cracks under overloads using ESPI / *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 83. P. 117 – 126.
28. **Mokhtarishirazabad M. et al.** Optical and analytical investigation of overloads in biaxial fatigue cracks / *International Journal of Fatigue*. 2017. Vol. 100. P. 583 – 590. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2016.12.035.
29. **Mokhtarishirazabad M. et al.** Evaluation of crack-tip fields from DIC data: a parametric study / *International Journal of Fatigue*. 2016. Vol. 89. P. 11 – 19.
30. **Vaidyanathan S., Finnie I.** Determination of residual stresses from stress intensity factor measurement / *Journal of Basic Engineering*. 1971. Vol. 93. P. 242 – 246.
31. **Cheng W., Finnie I.** Measurement of residual hoop stresses in cylinders using the compliance method / *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*. 1986. Vol. 108. P. 87 – 92.
32. **Schindler H. J.** Determination of residual stress distributions from measured stress intensity factors / *International Journal of Fracture*. 1995. Vol. 74. P. R23 – R30.
33. **Schindler H. J., Cheng W., Finnie I.** Experimental determination of stress intensity factors due to residual stresses / *Experimental Mechanics*. 1997. Vol. 37. P. 272 – 277.
34. **Pisarev V. S., Matvienko Y. G., Eleonsky S. I., Odintsev I. N.** Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T -stresses / *Engineering Fracture Mechanics*. 2017. Vol. 179. P. 348 – 374.
35. **Pisarev V. S., Matvienko Y. G., Eleonsky S. I., Odintsev I. N.** Effect of Low-Cycle Fatigue on Fracture Mechanics Parameters According to Speckle Interferometry / *Zavod. Lab. Diagn. Mater.* 2016. Vol. 82. N 6. P. 44 – 56 [in Russian].
36. **Matvienko Yu. G., Pisarev V. S., Eleonsky S. I.** The effect of low-cycle fatigue on evolution of fracture mechanics parameters in residual stress field caused by cold hole expansion / *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019. Vol. 47. P. 303 – 320. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.47.23.
37. **Pisarev V. S., Odintsev I. N., Eleonsky S. I., Apalkov A. A.** Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments / *Optics & Lasers in Engineering*. 2018. Vol. 110. P. 437 – 456.