

На правах рукописи



Елеонский Святослав Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И  
ЭВОЛЮЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ  
ИЗМЕРЕНИЙ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО ОТКЛИКА  
МЕТОДОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Жуковский – 2021 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный  
Аэрогидродинамический Институт им. проф. Н.Е. Жуковского»  
(ФГУП «ЦАГИ» г. Жуковский)

**Научный руководитель:** кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник  
отделения статической и тепловой прочности, комплекса  
прочности ЛА, ФГУП «ЦАГИ»  
**Писарев Владимир Сергеевич**

**Официальные оппоненты:** **Покровский Алексей Михайлович**  
профессор, доктор технических наук, профессор кафедры  
"Прикладная механика" ФГБОУ ВО Московский  
государственный технический университет имени  
Н.Э. Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

**Разумовский Игорь Александрович**  
профессор, доктор технических наук, главный научный  
сотрудник лаборатории «Механики разрушения и  
живучести» Институт машиноведения имени  
А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН).

**Ведущая организация:** **ФГБУН «Институт проблем механики им.  
А.Ю. Ишлинского Российской академии наук»**  
(ИПМех РАН), 119526, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101,  
корп. 1

Защита диссертации состоится «16» июня 2021 г. в 16<sup>00</sup> на заседании диссертационного  
совета Д 212.125.05 в Московском авиационном институте (национальном  
исследовательском университете)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный  
институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте  
[https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=121680](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=121680)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
Д.212.125.05



Федотенков Г. В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Исследования процессов накопления повреждений, зарождения усталостной трещины и ее дальнейшего роста, которые происходят в нерегулярных зонах металлических конструкций, представляют значительный научный и прикладной интерес. Особого внимания заслуживают распространённые ситуации, когда высокая скорость процесса зарождения и развития трещины связана со значительным уровнем упругопластических деформаций в зоне концентрации напряжений, в частности, в окрестности сквозного отверстия. Случайные перегрузки с отрицательным коэффициентом асимметрии цикла и/или высокий уровень максимальных напряжений могут также вносить дополнительный вклад в ускорение процесса накопления повреждений. Концентрация напряжений, которая всегда имеет место в окрестности болтовых/заклепочных, а также сварных соединений авиационных конструкций, представляет собой основную причину возникновения локальных упругопластических деформаций в условиях эксплуатации летательных аппаратов (ЛА). В конечном счете, это может приводить к существенному сокращению долговечности элементов соединений вследствие влияния малоциклового усталости.

### **Актуальность данной работы**

Создание современных ЛА, характеризующихся высокой эксплуатационной надёжностью, является приоритетной задачей авиационной промышленности. Использование высокотехнологичных соединений металлических элементов конструкций представляет собой важное звено, необходимое для повышения прочностных характеристик ЛА. В настоящее время широкое распространение получили две технологии, а именно, использование упрочнённых отверстий в болтовых и заклепочных соединениях, а также создание сварных элементов авиационных конструкций. Первая из них, в основном, направлена на значительное увеличение усталостной долговечности планера самолета. Это увеличение может достигать 3 – 5 раз в зависимости от степени натяга и диаметра крепёжного отверстия. Применение сварных конструкций по современным оценкам способно обеспечить снижение веса планера пассажирского самолета в пределах 10-12 %. Вышеупомянутые подходы характеризуются тем, что при создании подобных соединений элементов конструкций возникают значительные по величине технологические остаточные напряжения, влияние которых на статическую и усталостную прочность необходимо учитывать при оптимальном проектировании ЛА. Таким образом, возникает необходимость получения новых экспериментальных данных, которые описывают процесс накопления усталостных повреждений в нерегулярных зонах конструкций, в том числе и с учётом эволюции полей остаточных напряжений при циклическом нагружении. С этой целью разработаны новые экспериментальные методы исследования накопления повреждений, которые используют измерения деформационного отклика на локальное удаление материала в виде узкого надреза методом электронной спекл-интерферометрии и последующем определении параметров механики разрушения. Переход от измеренных компонент перемещений к величинам коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и **T**-напряжений осуществляется на основе методов линейной механики разрушения.

### **Степень разработанности темы**

Методы, основанные на линейной механике разрушения, широко применяются, как для анализа напряженно-деформированного состояния НДС элементов конструкций с трещиной, так и в процессе исследований накопления повреждений и зарождения усталостных трещин. Фундаментальные результаты в этой области представлены в работах известных отечественных и зарубежных учёных: Е.М. Морозова, В.З. Партона, Г.П. Никишкова, В.В. Панасюка, Г.П. Черепанова, Г.И. Нестеренко, В.И. Гришина, M.L. Williams, H. M. Westergaard, J.F. Knott, J.R. Rice и многих других.

Экспериментальные и расчётно-экспериментальные методы определения параметров механики разрушения, которые часто применяются, как для решения актуальных практиче-

ских задач, так и для обоснования и верификации результатов численного моделирования, получили широкое распространение. Среди учёных, которые внесли значительный вклад в эту область, нужно отметить: Ю.Г. Матвиенко, И.А. Разумовского, A.S. Kobayashi, J.S. Epstein, J.W. Dally, R.J. Sanford, I. Finnie, H.J. Schindler и других.

Исследования накопления усталостных повреждений занимает важное место при описании процессов зарождения и развития трещин в различных элементах конструкций. Основные достижения в этой области базируются на фундаментальных работах М.А. Miner, С.С. Osgood, J.A. Collins, U. Zerbst, Ю.Н. Работнова, В.В. Москвитина, Н.А. Махутова, А.А. Мовчана, А.А. Шанявского и других.

Значительное развитие получили методы исследования остаточных напряжений с помощью сверления отверстия и последующего измерения деформационного отклика оптическими методами. Большой вклад в этой области внесли: А.А. Антонов, Л.М. Лобанов, В.П. Щепинов, А.Л. Попов, Г.Н. Чернышев, В.М. Козинцев, А.А. Рассоха, И.Н. Одинцев, В.С. Писарев, D.L. Nelson, G.S. Schajer, J.H. Kauffman, M. Steinzik.

**Целью диссертационной работы** является разработка нового метода определения параметров механики разрушения на основе удаления локального объёма материала в виде узкого надреза и его применении к исследованию процесса накопления усталостных повреждений и эволюции остаточных напряжений.

**Решены следующие задачи:**

- Предложена и верифицирована модель перехода от измеряемых компонент перемещений на берегах надреза к величинам КИН и Т-напряжений;
- На основе разработанного экспериментального подхода проведено исследование следующих процессов:

1. Накопления усталостных повреждений в окрестности концентратора напряжений при малоцикловом нагружении прямоугольных образцов с отверстием для различных значений коэффициентов асимметрии и размаха напряжений цикла.
2. Эволюции остаточных напряжений в окрестности упрочнённых отверстий в плоских прямоугольных образцах при малоцикловом нагружении.
3. Эволюции остаточных напряжений в окрестности сварных соединений плоских прямоугольных образцов при малоцикловом нагружении.

**Научная новизна работы заключается в:**

- Разработке и верификации метода определения параметров механики разрушения при моделировании трещины последовательностью узких надрезов и измерении деформационного отклика в виде тангенциальных компонент перемещений методом электронной спекл-интерферометрии;
- Экспериментально установленных закономерностях влияния коэффициента асимметрии и размаха напряжений цикла на эволюцию параметров механики разрушения при малоцикловом нагружении прямоугольных образцов с центральным отверстием;
- Получении явного вида функции накопления повреждений в окрестности отверстия при малоцикловом нагружении;
- Разработке метода сверления вторичного отверстия для определения остаточных деформаций/напряжений в окрестности упрочнённых отверстий;
- Экспериментально установленных закономерностях, описывающих сложный характер эволюции остаточных напряжений в окрестности упрочнённых отверстий и сварных швов.

Основным **методом исследования** являются оптические интерференционные измерения тангенциальных компонент перемещений на берегах трещины, которая моделируется последовательностью узких надрезов, с помощью метода электронной спекл-интерферометрии.

**Достоверность результатов** обеспечивается верификацией модифицированной версии метода последовательного наращивания длины трещины (ПНДТ) при решении ряда те-

стовых задач. В качестве таких задач используются внецентренное растяжение прямоугольных образцов типа двух-консольной балки (ДКБ) с краевой трещиной, а также одноосное растяжение прямоугольных образцов с центральной симметричной трещиной. Погрешность результатов эксперимента для краевых и центральных трещин оценивается путём сравнения величин КИН с известными результатами теоретических и численных решений соответствующих задач линейной механики разрушения. Расхождение между экспериментальными и теоретическими/расчётными величинами КИН для краевой трещины различной длины в ДКБ образцах не превышает 5%. Второй способ заключается в построении образцовых картин интерференционных полос, которые визуализируются с помощью расчётов методом конечного элемента и их сравнении с реальными интерферограммами. На этой основе показано, что погрешность определения величин раскрытия и КИН для центральной симметричной трещины не превышает 1 и 3%, соответственно.

**Практическая значимость** заключается в создании экспериментального оборудования, которое обеспечивает высокую точность получения исходной экспериментальной информации. Предложенный метод оценки накопления повреждений и эволюции остаточных напряжений основан на проведении измерений после циклического нагружения образцов, что исключает необходимость определения скорости роста усталостной трещины в реальном времени. Разработанный подход даёт возможность количественного описания процесса накопления усталостных повреждений в образцах, моделирующих элементы болтовых/заклёпочных и сварных соединений. Полученные данные необходимы для верификации численных моделей зарождения и развития усталостных трещин в нерегулярных зонах авиационных конструкций, в том числе при наличии полей остаточных напряжений.

**Теоретическая значимость** состоит в том, что разработанный метод исследования позволяет определять величины раскрытия, КИН и  $T$ -напряжений для трещин различной длины в поле действующих и остаточных напряжений на различных этапах циклического нагружения. Предложенный подход даёт возможность прогнозирования скорости накопления усталостных повреждений для произвольных параметров цикла нагружения.

**Личный вклад автора.** Основные положения диссертации получены лично автором, либо при непосредственном его участии, что подтверждено публикациями.

**На защиту выносятся:**

- Экспериментальный метод определения величин КИН и  $T$ -напряжений по результатам оптических интерференционных измерений тангенциальных компонент перемещений берегов надреза, моделирующего трещину.

- Установленные закономерности влияния коэффициента асимметрии и размаха напряжений цикла на эволюцию параметров механики разрушения при малоцикловом нагружении прямоугольных образцов с центральным отверстием.

- Способ получения функции накопления повреждений на основе анализа эволюции величин КИН для узкого надреза при малоцикловом нагружении.

- Метод сверления вторичного отверстия для оценки остаточных напряжений в окрестности упрочнённого отверстия и определения кинетики накопления усталостных повреждений.

- Установленные закономерности эволюции остаточных напряжений в окрестности упрочнённых отверстий и сварных швов.

**Апробация работы.** Результаты работы представлены на следующих российских и международных конференциях:

19th European Conference on Fracture, Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety, Россия, Казань, 26-31 августа, 2012 г;

The 13th International Conference New Trends in Fatigue and Fracture (NTF13), Россия, Москва, 13-16 мая 2013 г;

Всероссийская конференция, посвященной 70-летию Победы 2015 г, Россия, Миасс, 16-18 июня 2015 г;

XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Россия, Казань, 20-24 августа 2015 г;  
 11th International Conference on Damage Assessment of Structures, DAMAS 2015, Belgium, Ghent University, 24-26 August 2015;  
 58 научная конференции МФТИ, Россия, Жуковский, 23-28 ноября 2015 г;  
 Международная научная конференции «XLIII Гагаринские чтения», Россия, Москва, 10-11 апреля 2017 года;  
 XXI научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, Россия, Королёв, 30 октября – 3 ноября 2017 года;  
 Научно-техническая конференция Прочность Конструкций Летательных Аппаратов, Россия, Жуковский, 31 мая – 1 июня 2018 года;  
 IGF Workshop - Fracture and structural integrity: ten years of 'Frattura ed Integrità Strutturale', Cassino, Italy, June 4-6, 2018.  
 International Symposium on: Advances in Fatigue and Fracture Celebrating the 40th Anniversary of FFEMS, Sheffield, UK, 18-20 September 2019.  
 Международная молодёжная научная конференции «XLVI Гагаринские чтения», Россия, Москва, 14-17 апреля 2020 года.

**Публикации.** Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 24 работах, из них 7 публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 8 работ в изданиях, входящих в базу данных Scopus и Web of Science, а также 9 работ в других изданиях, получен патент на изобретение.

#### **Структура и объём диссертации**

Диссертация состоит из 5 глав, введения, заключения и списка использованной литературы из 188 наименований. Общий объём работы 215 страниц основного машинописного текста, включая 37 таблиц и 97 рисунков.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обосновывается актуальность диссертационной работы, проводится анализ состояния рассматриваемых задач механики деформируемого твёрдого тела, определяются цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна, практическая и теоретическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** описано современное состояние проблемы. Представлен литературный обзор экспериментальных методов определения параметров механики разрушения, исследования процессов накопления повреждений и проблем, связанных с исследованием остаточных напряжений в окрестности упрочнённых отверстий и сварных швов.

**Во второй главе** представлено подробное рассмотрение теоретических принципов модифицированной версии метода ПНДТ и вывод математических соотношений, необходимых для преобразования исходной экспериментальной информации в искомые величины параметров механики разрушения. Описывается методика эксперимента по определению тангенциальных компонент перемещений, оценена погрешность определения величин раскрытия, которые необходимы для вычисления КИН. Представлена принципиальная схема модифицированной версии метода ПНДТ и соответствующая ей типичная картина интерференционных полос. Приведены основные соотношения метода ПНДТ, которые выявляют систему особых точек в окрестности вершины трещины. Показано, что в этих точках можно получать абсолютные величины компонент перемещений, необходимые для определения параметров механики разрушения.

**Параграф 2.1** содержит описание методики эксперимента по определению тангенциальных компонент перемещений.

**В пункте 2.1.1** представлена принципиальная схема интерферометра и методика измерений. Для экспериментального определения тангенциальных компонент перемещений используется метод электронной спекл-интерферометрии. Во всех представленных в данной

работе интерферометрах применяется широко известная оптическая схема с нормальным по отношению к плоской поверхности объекта направлением наблюдения и двумя симметричными направлениями освещения, которая показана на рис. 1.

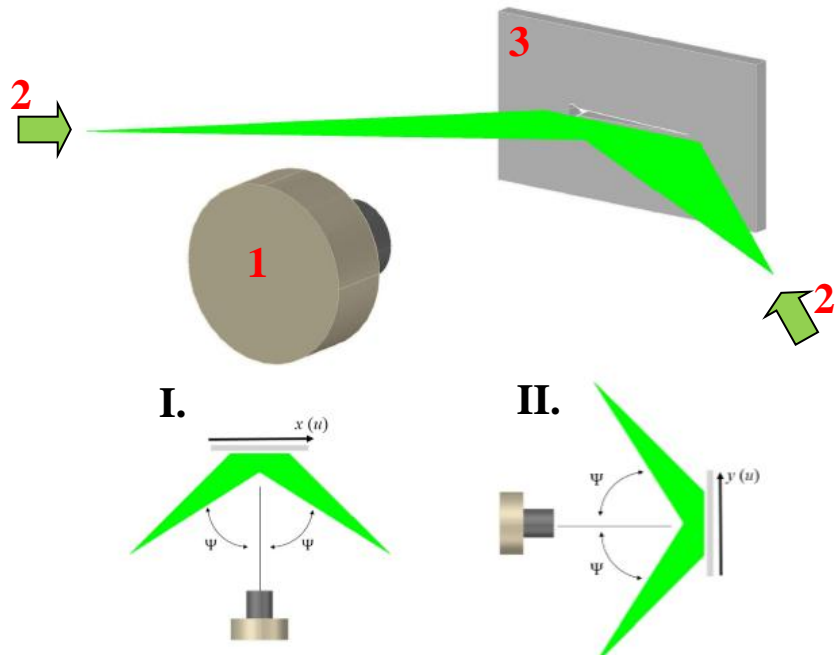


Рисунок 1 – Принципиальная схема регистрации картин интерференционных полос в методе электронной спекл-интерферометрии: 1 – видеокамера, 2 – направление лазерного освещения, 3 – исследуемая область объекта; I – направление освещения вдоль оси  $x$ , II – направление освещения вдоль оси  $y$

Направления освещения плоской поверхности исследуемого объекта совпадают с направлением оси  $x$  или  $y$ , что достигается включением двух оптических схем в единую установку. Когда направления освещения совпадают с направлением оси  $x$ , измеряется тангенциальная компонента перемещений  $u$ , а при совпадении с осью  $y$  измеряется тангенциальная компонента перемещений  $v$ . В этих случаях распределения компонент  $v$  и  $u$  связано с картиной интерференционных полос следующим образом:

$$v = N^v \frac{\lambda}{2 \sin \Psi}, \quad u = N^u \frac{\lambda}{2 \sin \Psi}, \quad (1)$$

где  $N = \pm 1; \pm 2; \pm 3, \dots$  – абсолютные порядки полос в исследуемой точке поверхности;  $\lambda$  – длина волны лазерного излучения;  $\Psi = \pi/4$  – угол между наклонным направлением освещения и нормальным к поверхности плоского объекта направлением наблюдения.

Величины компоненты  $v$  измеряемые в нескольких точках на берегах трещины используются для определения величин раскрытия в начальной точке приращения длины трещины и дальнейшем определении значений КИН. Компонента  $u$ , направленная вдоль линии трещины, служит для определения Т-напряжений.

Алгоритм определения раскрытия трещины по разности абсолютных порядков полос показан на рис. 2.

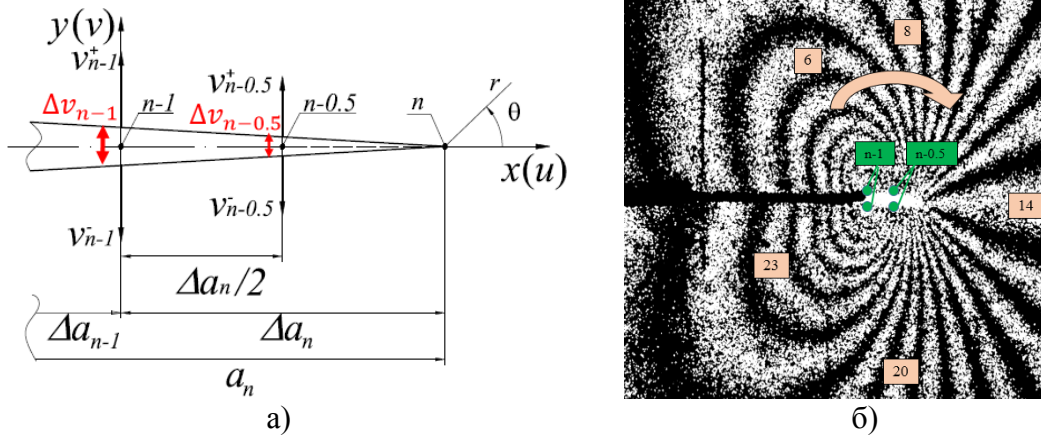


Рисунок 2 – Схема трещины конечной длины  $a_n$  (а) и соответствующая ей реальная интерферограмма (б)

Величины раскрытия трещины измеряются в двух точках  $n-1$  и  $n-0.5$  с координатами  $(r = \Delta a_n, \theta = \pi)$  и  $(r = \Delta a_n/2, \theta = \pi)$ , соответственно (рис. 1 (а)). Точка  $n-1$  надёжно идентифицируется на интерференционных картинах типа, показанного на рис. 1 (б), как граница между темным и ярким участками линии разреза. Точка  $n-0.5$  расположена в центре яркого участка линии разреза, который соответствует приращению длины трещины  $\Delta a_n$ . Величина раскрытия трещины в точке  $n-1$ , обозначенная как  $\Delta v_{n-1} = v_{n-1}^+ - v_{n-1}^-$ , определяется следующим образом:

$$v_{n-1}^+ = N_{n-1}^{v^+} \frac{\lambda}{2 \sin \Psi}, \quad v_{n-1}^- = N_{n-1}^{v^-} \frac{\lambda}{2 \sin \Psi}, \quad (2)$$

где  $N_{n-1}^{v^+}$  и  $N_{n-1}^{v^-}$  – абсолютные порядки полос на верхнем и нижнем берегах трещины, которые прямым подсчетом от нулевой полосы (рис. 1б) При этом следует учитывать, что величины  $N_{n-1}^{v^+}$  и  $N_{n-1}^{v^-}$  имеют противоположные физические знаки. Раскрытие трещины в точке начала ее приращения  $n-1$  (СМОД) определяется согласно соотношению (2):

$$\Delta v_{n-1} = v_{n-1}^+ - v_{n-1}^- = (N_{n-1}^{v^+} - N_{n-1}^{v^-}) \frac{\lambda}{2 \sin \Psi} = \Delta N_{n-1}^v \frac{\lambda}{2 \sin \Psi}, \quad (3)$$

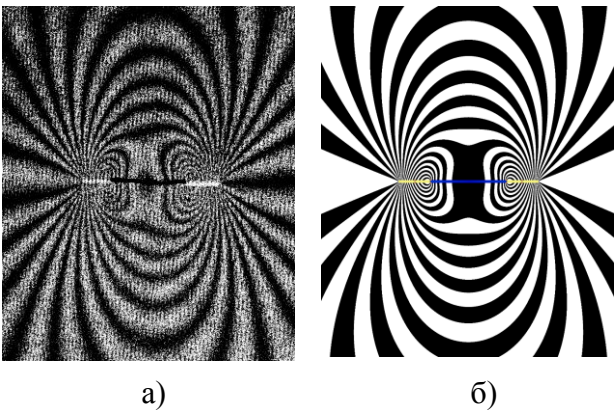


Рисунок 3 – Образец ТМ\_08. Реальная (а) и образцовая картина полос (б)

где  $\Delta N_{n-1}^v$  – разница абсолютных порядков полос в точке  $n-1$ . Эта величина подсчитывается по одной интерферограмме типа, показанного на рис. 2 (б), между двумя точками, которые расположены на противоположных берегах разреза. Величина раскрытия трещины в точке  $n-0.5$  (рис. 2 (б)), обозначенная как  $\Delta v_{n-0.5} = v_{n-0.5}^+ - v_{n-0.5}^-$ , определяется тем же способом.

В пункте 2.1.2 анализируются погрешности определения величин раскрытия  $\Delta v_{n-1}$  и  $\Delta v_{n-0.5}$ , на основе сравнения реальных интерферограмм и образцовых картин полос, визуализированных с помощью численного моделирования. Объектом исследования служил прямоугольный образец (ТМ\_08) с размерами  $180 \times 30 \times 4$  мм, изготовленный из алюминиевого сплава Д16Т (модуль упругости  $E=72000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu=0,33$ ). Исходная



точка симметричной трещины, которая представляет собой малое отверстие диаметром  $2R_0=0.5$  мм, располагалась в центре пластины. Трещина моделировалась последовательностью узких разрезов шириной  $\Delta b=0,2$  мм. Образец подвергался равномерному одноосному растяжению. Реальная интерферограмма, полученная при действии растягивающей нагрузки  $P=7,2$  кН в терминах компоненты перемещений  $v$  для трещины длиной  $\tilde{a}_2=4,59$  мм, показана на рис. 3 (а). Соответствующая образцовая картина интерференционных полос показана на рис. 3 (б).

Сравнение величин раскрытия, полученных двумя способами, показало, что они отличаются на величину менее 3%. Данный факт является основой применения модифицированной версии метода ПНДТ для определения величин КИН и Т-напряжений.

В **параграфе 2.2** рассматривается формулировка задачи и основные соотношения, необходимые для перехода от измеряемых компонент перемещений к искомым величинам КИН и Т-напряжений.

В **пункте 2.2.1** представлена модель перехода от исходной экспериментальной информации к искомым величинам КИН и Т-напряжений, для которой используются соотношения Уильямса. В соответствии с этим подходом, компоненты перемещений в окрестности вершины трещины выражаются в виде бесконечного ряда. Когда направление оси  $x$  совпадает с линией трещины, разложение для трещины типа I (трещины нормального отрыва) принимают следующий вид:

$$u = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{m}{2}} (1 + \mu)}{E} A_m \left\{ \left[ k + \frac{m}{2} + (-1)^m \right] \cos \frac{m\theta}{2} - \frac{m}{2} \cos \frac{(m-4)\theta}{2} \right\},$$

$$v = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{r^{\frac{m}{2}} (1 + \mu)}{E} A_m \left\{ \left[ k - \frac{m}{2} - (-1)^m \right] \sin \frac{m\theta}{2} + \frac{m}{2} \sin \frac{(m-4)\theta}{2} \right\},$$
(4)

где  $u$  и  $v$  – плоские компоненты перемещений в направлении оси  $x$  и  $y$ , соответственно;  $E$  – модуль упругости материала;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $k = (3 - \mu)/(1 + \mu)$  – для условий плоской деформации;  $k = (3 - 4\mu)$  – для плоского напряжённого состояния;  $A_m$  – постоянные коэффициенты, подлежащие определению;  $r$  и  $\theta$  – радиальное и угловое расстояние от вершины трещины. Поле упругих напряжений в полярной системе координат с центром в вершине трещины имеет вид:

$$\sigma_{ij} = \frac{A_1}{\sqrt{r}} f_{1ij}(\theta) + \sum_{m=1}^{\infty} A_m^{\frac{m-1}{2}} f_{mij}(\theta),$$
(5)

где  $A_m$  – постоянные коэффициенты, подлежащие определению по экспериментальным данным;  $f_{ij}(\theta)$  – угловая функция, определяемая формулой (4). Величины КИН  $K_I$  и Т-напряжений для трещины нормального отрыва определяются из соотношений (4) и (5) следующим способом:

$$K_I = A_1 \sqrt{2\pi}, T = 4A_2.$$
(6)

**Пункт 2.2.2** содержит вывод формулы для определения величин КИН с использованием коэффициентов  $A_1$  и  $A_3$  рядов (4):

$$K_I^n = \frac{E\sqrt{2\pi}}{8\sqrt{\Delta a_n}} \left\{ 2\sqrt{2}\Delta v_{n-0.5} - \Delta v_{n-1} \right\},$$
(7)

В **пункте 2.2.3** представлена процедура определения Т-напряжений при нанесении двух последовательных надразов и приведена соответствующая формула.

В *параграфе 2.3* представлены различные варианты оптических схем спекл-интерферометров, которые использовались при исследовании параметров механики разрушения для краевых и центрально расположенных трещин в случае воздействия внешней нагрузки, а также трещин в поле остаточных напряжений.

В *пункте 2.3.1* показана разработанная и реализованная комбинированная система электронного спекл-интерферометра (рис. 4), которая используется для обоснования погрешностей определения величин КИН и Т-напряжений. Главной особенностью этой системы является наличие двух цифровых камер. Камера Videoscan USB-285 имеет разрешение  $1400 \times 1000$  пикселей. Объектив для макросъёмки AF-S VR Micro-Nikkor (105 mm f/2.8G) обеспечивает регистрацию изображений в поле зрения с максимальными размерами  $28 \times 20$  мм (1 пиксель = 0,0183 мм). Такое поле зрения достаточно для регистрации картин интерференционных полос высокого качества, характеризующих раскрытие краевой трещины. Для увеличения поля зрения во второй ветви интерферометра служит высокоразрешающая видеокамера pco-4000 ( $4000 \times 2800$  пикселей). Оснащение камеры pco-4000 объективом AF-S VR Micro-Nikkor (105 mm f/2.8G) обеспечивает поле зрения с максимальными размерами  $68 \times 47,6$  мм (1 пиксель = 0,0157 мм). Такой размер позволяет надёжно идентифицировать полосу нулевого порядка, что повышает точность определения величин КИН и, особенно, Т-напряжений. Данная схема интерферометра использовалась для верификации метода ПНДТ при исследовании образца с краевой трещиной. Система нагружения и исследуемый образец представляют собой единую конструкцию, изготовленную из алюминиевого сплава 2024 ( $E=74000$  МПа,  $\mu=0,33$ ) (рис. 5). Рабочая часть представляет собой ДКБ образец с размерами  $120 \times 48 \times 5$  мм. Краевая трещина располагается вдоль длинной оси симметрии. Внешняя поперечная нагрузка  $P_{n1}$  прикладывается с помощью винтового механизма и измеряется пьезоэлектрическим датчиком. Данный факт обеспечивает, во-первых, закрепление на образце двух верхних частей кинематического устройства и противовеса, что позволяет удалять образец из оптической схемы интерферометра для выполнения разреза.

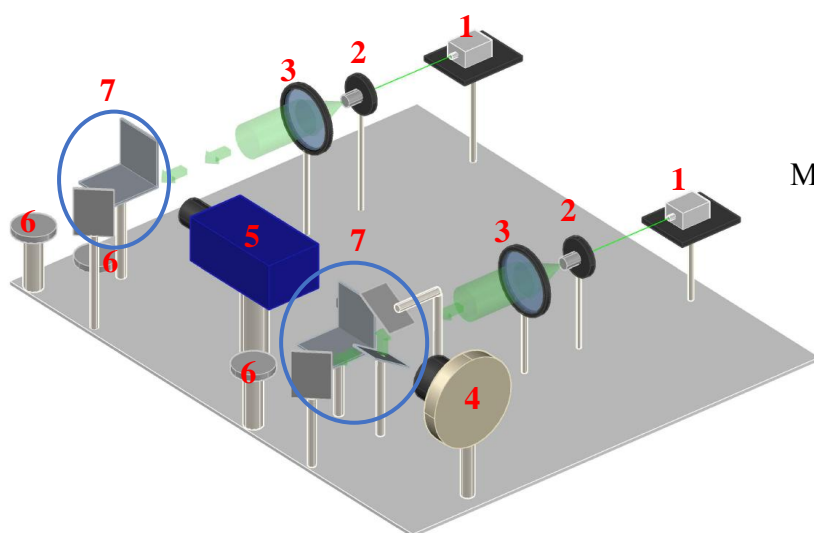


Рисунок 4 – Комбинированная система электронного спекл-интерферометра: 1 – лазер, 2 – микро-объектив, 3 – линза, 4 – камера Videoscan USB-285, 5 – камера pco 4000, 6 – нижняя часть кинематического устройства, 7 – система зеркал

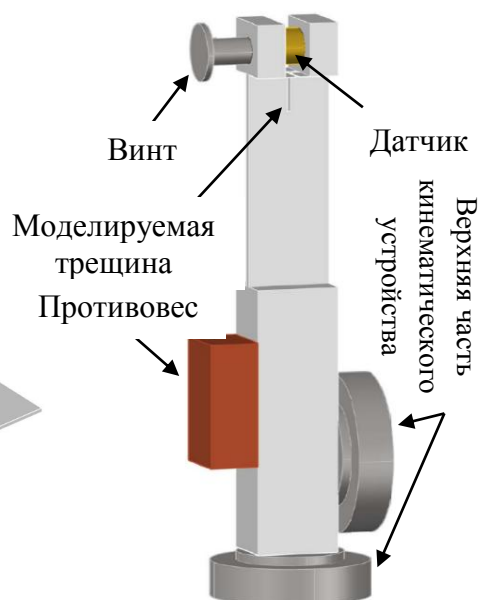


Рисунок 5 – Схематичное представление образца ДКБ

Верхние части кинематического устройства закреплены на торцевой и боковой поверхности образца, что даёт возможность получения исходных данных на обеих сторонах

образца. Во всех оптических схемах образец устанавливается на нижнюю часть кинематического устройства (см. рис. 4).

В **пункте 2.3.2** представлен спекл-интерферометр с мобильным модулем, предназначенным для исследования центральных трещин (рис. 6). Конструкция мобильного модуля разработана на основе анализа методики эксперимента и результатов, полученных для ДКБ образцов. Главной особенностью этого устройства является то, что нагружение образцов растягивающими усилиями осуществляется электромеханической испытательной машиной *walter + bai ag LFM-L 22* с диапазоном прикладываемой нагрузки 0-25 кН, которая является частью схемы интерферометра. Мобильный модуль, установленный на кинематическом устройстве, обеспечивает доступ для выполнения разрезов между экспозициями. Мобильный модуль интерферометра устанавливается в рабочее положение на станине испытательной машины, как это показано на рис. 6.

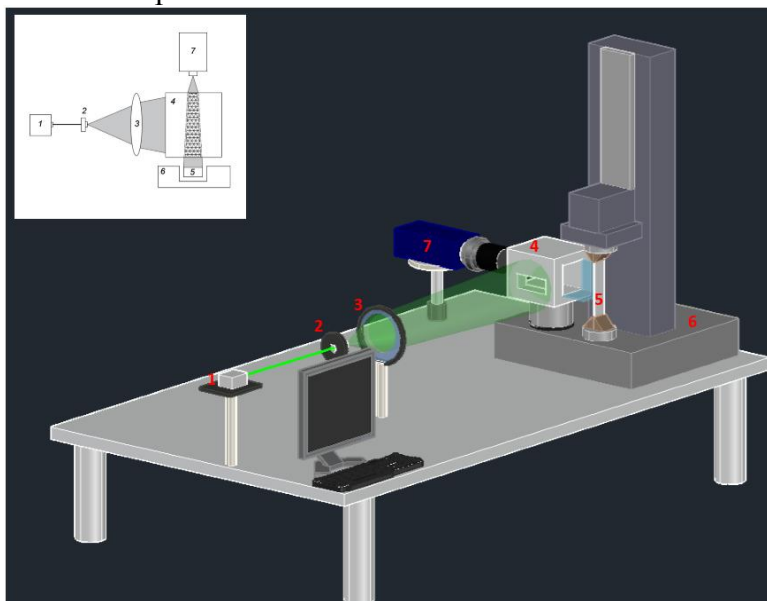


Рисунок 6 – Общий вид спекл-интерферометра с мобильным модулем; 1 – диодный лазер; 2 – микро-объектив; 3 – линза; 4 – мобильный модуль; 5 – образец в захватах испытательной машины; 6 – испытательная машина; 7 – видеокамера pco 4000

В **параграфе 2.4** представлены результаты определения параметров механики разрушения для образца ДКБ с краевой трещиной и образцов с центральной трещиной.

**Пункт 2.4.1** описывает методику эксперимента по определению КИН для образца ДКБ с краевой трещиной. Показано, что расчетные величины КИН отличаются от аналогичных экспериментальных значений не более, чем на 5%. Данный факт свидетельствует о высокой точности и надежности разработанного экспериментального метода в случае краевой трещины.

**Пункт 2.4.2** содержит подробное описание определение величин  $T$ -напряжений для образца ДКБ с краевой трещиной. Представлены описание процедуры определения величин  $T$ -напряжений и полученные результаты.

**Пункт 2.4.3** описывает методику эксперимента по определению КИН для центральной симметричной и несимметричной трещины в прямоугольной пластине при одноосном растяжении. Для этого используется схема интерферометра с мобильным модулем (см. рис. 6). Исходная точка каждой трещины расположена в центре прямоугольной пластины с размерами  $180 \times 30 \times 4$  мм изготовленной из алюминиевого сплава Д16Т ( $E = 72000$  МПа,  $\mu = 0,33$ ). Исходная точка каждой трещины представляет собой отверстие диаметром  $2R_0 = 0,5$  мм.. В течение процесса увеличения длины трещины, действующая нагрузка  $P$  с гарантией находится в интервале  $P - 0,01P$ . Анализ точности экспериментально полученных

величин КИН основан на их сравнении с аналитическими результатами, представленными в справочнике Мураками. Сравнение экспериментальных и теоретических данных наглядно демонстрирует, что использование первых двух нечётных коэффициентов рядов Уильямса, которые определяются с использованием двух точек измерения на берегах трещины, обеспечивают погрешности определения КИН, не превышающие 5%. Такая точность достаточно высока для решения поставленных в диссертационной работе задач.

**Пункт 2.4.4** содержит сравнение экспериментальной полученных величин  $T$ -напряжений и соответствующих результатов конечно-элементного моделирования. Относительная погрешность определения величин  $T$ -напряжений лежит в интервале от 10% до 20%. Это очень хороший результат для экспериментального подхода к определению  $T$ -напряжений.

**Параграф 2.5** посвящён оценке влияния пластической зоны в вершине трещины на точность измерения компонент перемещений. Показано, что для исследуемых алюминиевых сплавов и трещин длиной от 2 до 6,5 мм погрешность измерений величин раскрытия трещины в двух особых точках, которые используются для вычисления КИН в рамках линейной механики разрушения, не превышает 5%. Этот факт означает, что наличие пластической зоны в вершине трещины не оказывает существенного влияния на результаты определения параметров механики разрушения для трещин в алюминиевых сплавах.

В **параграфе 2.6** представлено заключение по **второй главе**.

В **третьей главе** представлены новые экспериментальные данные, которые количественным образом описывают влияние изменения коэффициента асимметрии и размаха напряжений цикла на процесс накопления повреждений в окрестности сквозного отверстия при малоцикловом нагружении.

В **параграфе 3.1** описан экспериментальный подход и исследуемые плоские образцы с размерами  $180 \times 30 \times 4$  мм из алюминиевого сплава 2024 ( $E = 74000$  МПа,  $\mu = 0,33$ , предел текучести  $\sigma_{0,2} = 330$  МПа). Общее количество образцов, которые изготовлены из одной заготовки по одинаковой технологии, составляет 32 единицы. В центре каждой пластины расположено центральное сквозное отверстие диаметром  $2r_0 = 3$  мм. Все образцы, которые разделены на 4 группы, подвергаются одноосному растяжению-сжатию с помощью электромеханической испытательной машины walter + bai ag, Type LFM-Z 200, с диапазоном нагружения 0-200 кН, согласно параметрам цикла нагружения, которые указаны в табл. 1. Данные для одного из образцов (T4\_09), который является общим для всех групп, получены в исходном состоянии без приложения периодического растяжения-сжатия.

Четыре образца (T4\_A0, T4\_B0, T4\_C0 и T4\_X0) служат для оценки долговечности  $N_F$ . Остальные образцы подвергаются нагружению до достижения, определённого количества циклов, предусмотренного программой исследования.

Таблица 1 – Номенклатура образцов и характеристики циклов нагружения

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

На третьем этапе проводятся оптические интерференционные измерения локального деформационного отклика на малое приращение длины надреза. Для этого каждый предварительно нагруженный образец закрепляется в захватах испытательной машины walter+bai ag, Type LFM-L 25, с диапазоном нагружения 0–25 кН. Это нагружающее устройство вклю-

чено в оптическую схему интерферометра, как это показано на рис. 6. Три последовательных надреза выполняются при постоянной внешней нагрузке, которая для всех образцов соответствует номинальным растягивающим напряжениям  $\sigma = 53,1$  МПа. Схема нанесения надрезов и возникающие при этом картины интерференционных полос показаны на рис. 7. Интерферограммы на рис. 7 получены для образца T4\_23 из группы ВВ после приложения  $N=2571$  циклов.

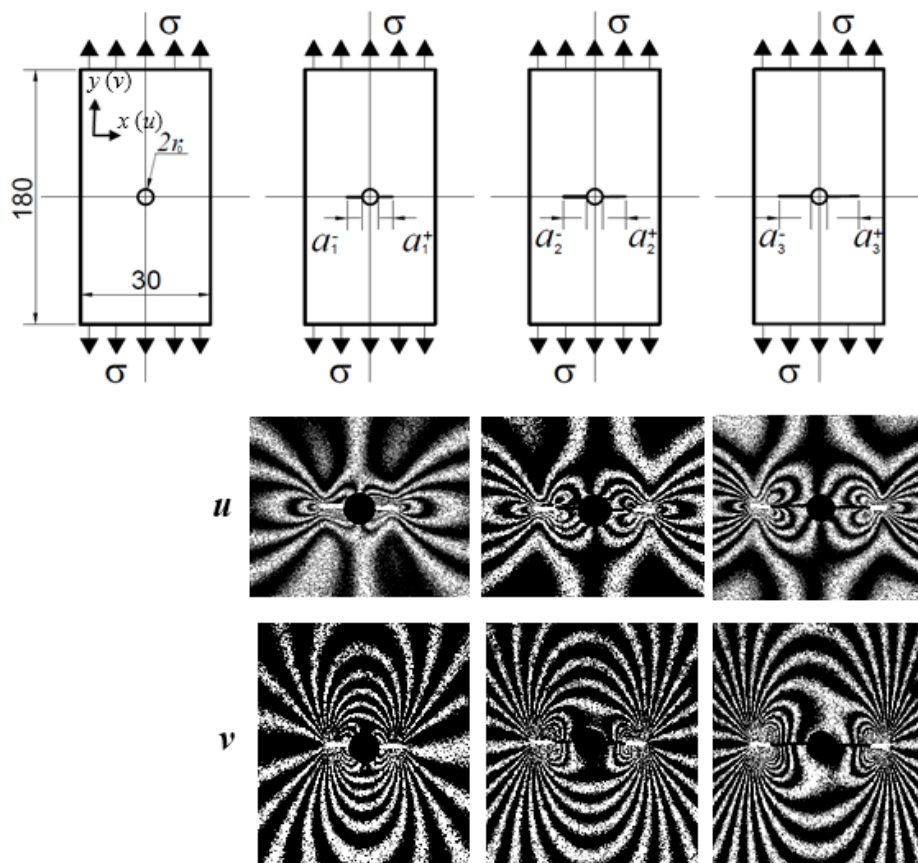


Рисунок 7 – Схема получения картин интерференционных полос

В *параграфе 3.2* представлена исходная экспериментальная информация в виде картин интерференционных полос, а также их интерпретация в величинах раскрытия, КИН и Т-напряжений. На основе полученных данных построены распределения величин раскрытия, КИН и Т-напряжений по длине надреза, соответствующие различным этапам малоциклового нагружения. Эти данные дают возможность построить зависимости величин параметров механики разрушения от количества циклов нагружения.

В *параграфе 3.3* формулируется критерий выбора количественного индикатора процесса накопления повреждений.

В *пункте 3.3.1* и *3.3.2* показано, что для количественной оценки влияния коэффициента асимметрии цикла  $R$  и размаха напряжений  $\Delta\sigma$  на перераспределение параметров механики разрушения в окрестности отверстий, экспериментальную информацию нужно представить в виде зависимостей параметров механики разрушения от долговечности ( $N_m/N_F \times 100\%$ ) для фиксированных длин надреза. Наибольший интерес в этом смысле представляет первый надрез  $\tilde{a}_1$ , который распространяется от контура отверстия. Дело в том, что, во-первых, первый надрез затрагивает участок наиболее подверженный упругопластическому деформированию, во-вторых, первый надрез выполняется в сплошном материале, где на накопление повреждений не влияют предыдущие надрезы.

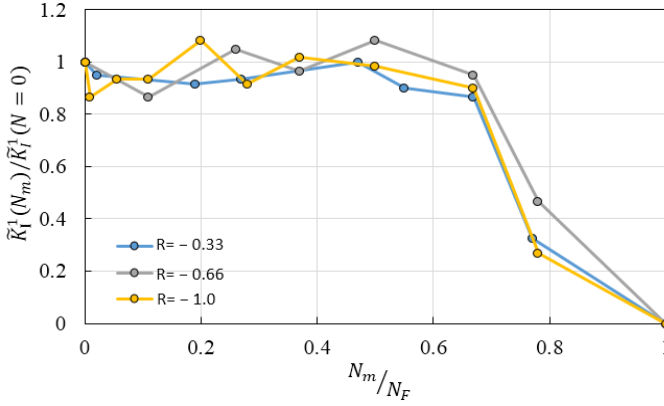


Рисунок 8 – Зависимость нормализованных величин КИН от процента долговечности при вариации коэффициента асимметрии  $R$

разцов. Корректность отображения процесса накопления повреждений вытекает из равенства площадей под нормированными зависимостями КИН от процента долговечности образцов, которые приведены на рис. 8 для различных значений коэффициента асимметрии  $R$ . Аналогичный график построен для переменных значений размаха напряжений  $\Delta\sigma$ .

Описание процесса накопления повреждений основано на использовании монотонно меняющегося параметра, в качестве которого служит номер цикла нагружения  $N_m$ . Параметр поврежденности  $D$  зависит от количества циклов нагружения  $N_m$ , коэффициента асимметрии  $R$  и размаха напряжений цикла  $\Delta\sigma$ . Таким образом, целесообразно ввести в рассмотрение функцию накопления повреждений  $D_m(N_m, R, \Delta\sigma)$ , которая характеризует степень поврежденности материала на основе анализа эволюции напряженно-деформированного состояния. Изменение этой функции в процессе малоциклового нагружения подчиняется кинетическому уравнению:

$$\frac{dD_m(N_m, R, \Delta\sigma)}{dN_m} = \Psi(N_m, K_I^1(R_i, \Delta\sigma_i, N_m)). \quad (8)$$

В аргументе функции  $\Psi$  влияние характеристик упругопластического деформирования на процесс накопления повреждений выражается через величины коэффициентов интенсивности напряжений  $K_I^1(R_i, \Delta\sigma_i, N_m)$ , которые получены на различных этапах малоциклового нагружения с различными дискретными значениями коэффициента асимметрии  $R_i$  и размаха напряжений цикла  $\Delta\sigma_i$ .

В *пункте 3.4.1* и *3.4.2* явный вид функции  $\Psi$  в случае вариации коэффициента асимметрии и размаха напряжений цикла можно выразить как:

$$\Psi = \frac{S_D \times K_I^1(R_i, N_m)}{K_I^1(N=0) \times N_F(R_i)}, \quad \Psi = \frac{S_D \times K_I^1(\Delta\sigma_i, N_m)}{K_I^1(N=0) \times N_F(\Delta\sigma_i)} \quad (9)$$

Подстановка функции  $\Psi$  (9) в соотношение (8) с заменой интегрирования суммированием по отрезкам  $\Delta N_m = N_{m+1} - N_m$ , в граничных точках которых проводятся измерения величин КИН  $K_I^1(R_i, N_m)$ , дает возможность получить явный вид функции накопления повреждений:

$$D_m(R, N) = \sum_{N_m=0}^{N_m=N_F} \frac{S_D \times K_I^1(R_i, N_m) \times \Delta N_m}{K_I^1(N=0) \times N_F(R_i)},$$

$$D_m(\Delta\sigma, N) = \sum_{N_m=0}^{N_m=N_F} \frac{S_D \times K_I^1(\Delta\sigma_i, N_m) \times \Delta N_m}{K_I^1(N=0) \times N_F(\Delta\sigma_i)}, \quad (10)$$

В *параграфе 3.4* показано, что зависимости величин КИН от количества циклов нагружения представляют собой наиболее надёжный индикатор количественного описания процесса накопления повреждений. В качестве параметра поврежденности предлагается использовать эволюцию относительных величин КИН  $\tilde{K}_I^1(N_m) / \tilde{K}_I^1(N_m = 0)$ . Предлагаемый подход дает возможность получения яв-

ного вида функции накопления повреждений, которая построена на основе анализа зависимостей нормированных величин КИН от процента долговечности об-



где  $S_D = 1,36$  – постоянная величина, определяемая на основе экспериментальных данных, полученных для наборов образцов с заданными геометрическими параметрами, которые испытывались при различных значениях коэффициентов асимметрии цикла  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) для заданного значения размаха напряжений  $\Delta\sigma = 333,3$  МПа ( $R_1 = -0,33$ ,  $R_2 = -0,66$ , и  $R_3 = -1,0$ );  $K_I^1(R_i, N_m)$  – экспериментальные величины КИН, определенные по достижении  $N_m$  циклов для различных значений  $R_i$ ;  $K_I^1(N=0)$  – экспериментальная величина КИН для первого приращения длины надреза в образце, который не подвергался циклическому нагружению;  $N_F(R_i)$  – количество циклов до полного разрушения образцов (разделения на две части), которые испытывались с различными значениями коэффициента асимметрии цикла  $R_i$ . Графическое представление выражений (10) показано на рис.9.

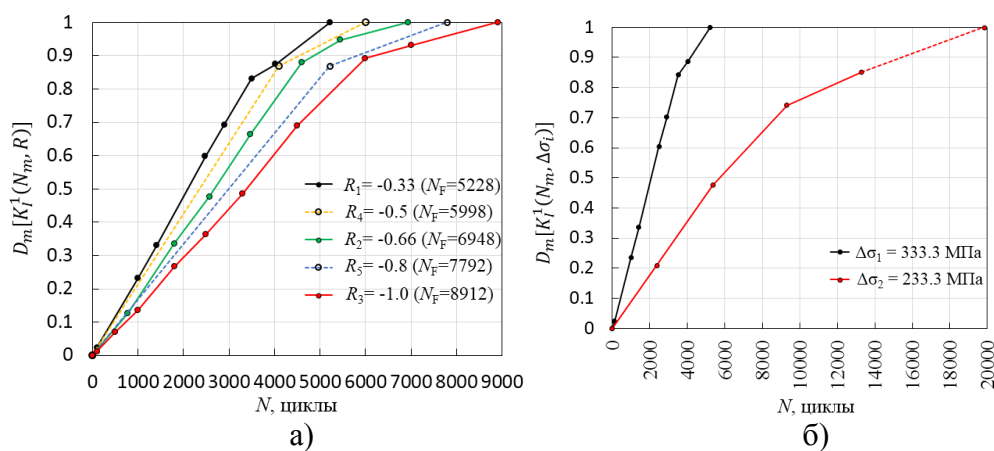


Рисунок 9 – Функция накопления повреждений для различных значений коэффициента асимметрии цикла (а) и размаха напряжений (б)

Формула (10) дает возможность прогнозирования процесса накопления повреждений для произвольных значений  $R$  в случае постоянной заданной величины размаха напряжений  $\Delta\sigma$ . Основанием для этого служит линейная зависимость между количеством циклов, соответствующим 67% долговечности, и значениями коэффициента асимметрии. Кривые, соответствующие прогнозам (10), показаны на рис. 9 (а) желтым и синим цветом для  $R_4 = -0,5$  и  $R_5 = -0,8$ , соответственно.

В пункте 3.4.3 анализируется область применения разработанного подхода в области процессов накопления повреждений.

В параграфе 3.5 представлены выводы по главе.

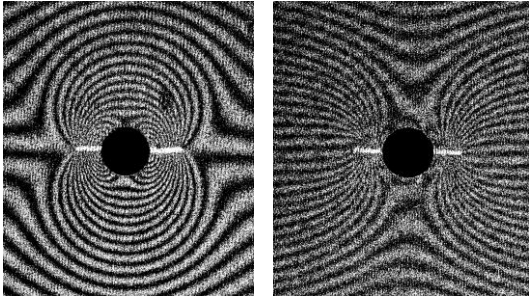
В четвёртой главе представлены новые подходы к исследованию эволюции остаточных напряжений при малоцикловом нагружении в окрестности упрочнённых отверстий.

Параграф 4.1 посвящён анализу эволюции остаточных напряжений в образцах с упрочнёнными отверстиями на основе метода последовательного наращивания длины трещины.

Пункт 4.1.1 содержит описание последовательности экспериментальных исследований. Объектами исследования служат плоские образцы, изготовленные из одной и той же заготовки алюминиевого сплава 2024 по одинаковой технологии. Общее количество образцов с размерами  $180 \times 30 \times 5$  мм составляет 8 единиц. В центре каждого образца выполнено сквозное отверстие с исходным диаметром  $2r_0 = 4,0$  мм. Величина натяга составляет 5%. Программа циклического нагружения образцов имеет параметры:  $\Delta\sigma = 350$  МПа,  $R = -0,4$ ,  $\sigma_{\max} = 250$  МПа,  $\sigma_{\min} = -100$  МПа. Все экспериментально полученные величины соответ-

ствуют номинальным растягивающим напряжениям  $\sigma = 80$  МПа. Алгоритм исследования соответствует хронологическому порядку, представленному в главе 3.

В пункте 4.1.2 представлена исходная экспериментальная информация в виде картин интерференционных полос, а также результаты их обработки.



а)

б)

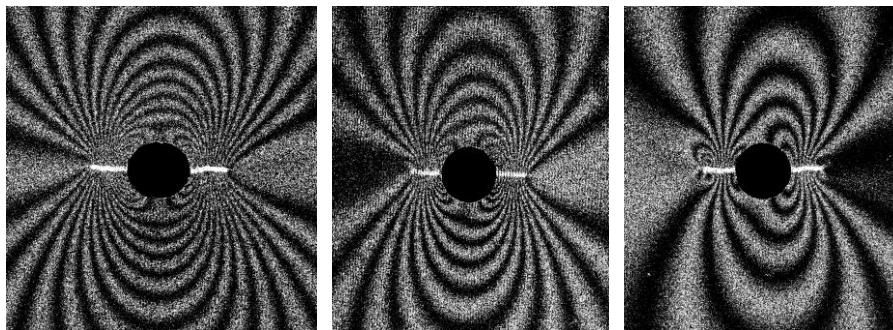
Рисунок 10 – Картины интерференционных полос, полученные в терминах плоской компоненты  $v$  с фазовым сдвигом; (а) положительный знак (б) – отрицательный знак

Пункт 4.1.3 содержит результаты определения величин КИН и Т-напряжений. Рассматривается вопрос, как пластическая деформация материала, которая происходит в ближайшей окрестности упрочнённого отверстия, влияет на справедливость формул (7), используемых для определения параметров механики разрушения. Упрочнение приводит к возникновению сжимающих остаточных напряжений в окрестности отверстия. Для ответа на поставленный вопрос используется сравнение экспериментальных данных, которые получены для исходного и упрочнённого отверстий.

Основное отличие заключается в знаке компоненты перемещения  $v$ . Этот факт можно установить с помощью интерферограмм, зарегистрированных при наличии дополнительного фазового сдвига, которые показаны на рис. 10.

Картина интерференционных полос, показанная на рис. 10 (а), выявляет положительный знак локального раскрытия трещины для образца с исходным отверстием. Конфигурация аналогичной интерферограммы на рисунке 10 (б) выявляет отрицательный знак компоненты перемещений  $v$ . Второй шаг заключается в сравнении данных, которые получены для различных уровней внешней нагрузки. С той целью были проведены эксперименты по определению величин раскрытия и КИН для первой трещины при различных значениях номинальных растягивающих напряжений  $\sigma$ . Картины интерференционных полос, полученные для первого надреза длиной  $\tilde{a}_1 = 2,3$  мм при действии напряжений  $\sigma = 60, 80$  и  $100$  МПа, показаны на рис. 11.

Зависимость величин раскрытия в исходной точке приращения длины надреза от уровня внешней нагрузки, полученные при испытаниях трех различных образцов, показаны на рис. 12 (а). Зависимость величин КИН для первого надреза  $\tilde{K}_I^1$  от уровня внешней нагрузки представлена на рис. 12 (б).



а)

б)

в)

Рисунок 11 – Картины интерференционных полос, полученные в терминах плоской компоненты  $v$ . Исходная длина трещины  $a_0 = 0$  с приращениями  $\Delta \tilde{a}_1$ .

(а) – образец Т5\_29Н ( $\sigma = 60$  МПа); (б) – образец Т5\_20Н ( $\sigma = 80$  МПа); (в) – образец Т5\_28Н ( $\sigma = 100$  МПа)



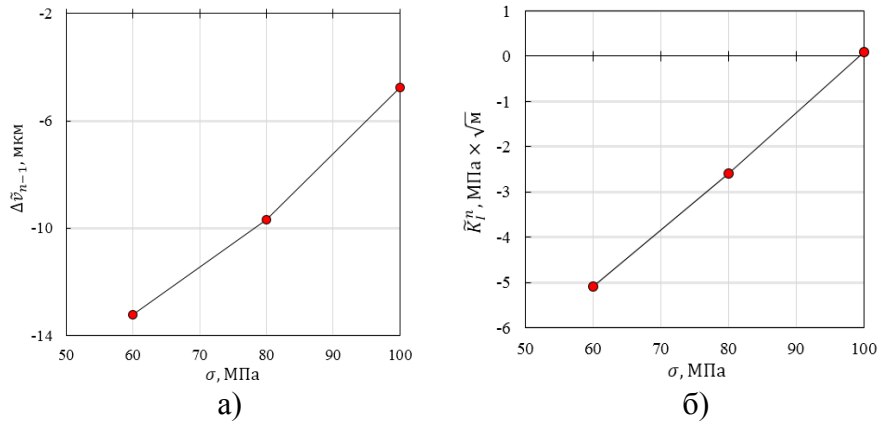


Рисунок 12 – Зависимости средних величин раскрытия в вершине трещины  $\Delta\tilde{v}_0$  (а) и экспериментальных величин КИН  $\tilde{K}_I^1$  (б), как функция номинальных растягивающих напряжений  $\sigma$

Линейный характер графика на рис. 12 (б) с высокой степенью надежности подтверждает применимость соотношений линейной механики разрушения для получения величин КИН и Т-напряжений при нанесении надреза в области, которая подвергалась упругопластическому деформированию.

В *пункте 4.1.4* представлен анализ эволюции остаточных напряжений по экспериментальным значениям КИН. Показано, что экспериментальные данные, дают возможность определения величин КИН  $\tilde{K}_I^{\text{OH}}$ , которые относятся только к воздействию остаточных напряжений.

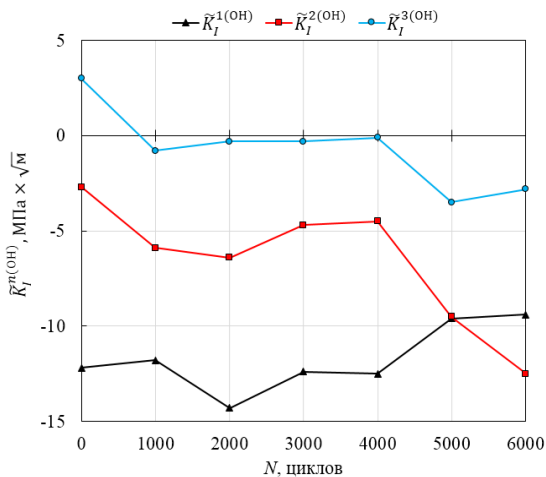


Рисунок 13 – Зависимости величин КИН  $\tilde{K}_I^{\text{OH}}$ , связанных с воздействием остаточных напряжений, от количества циклов нагружения  $N$  для надрезов длиной  $\tilde{a}_n$  ( $n=1, 2, 3$ )

Линейный характер зависимости экспериментальных величин КИН от внешней нагрузки, приведенный на рис. 12 (б), дает надежное подтверждение эффективности предлагаемой процедуры. Зависимости, которые отражают исходный уровень значений КИН  $\tilde{K}_I^{\text{OH}}$  на различных расстояниях от контура упрочненного отверстия и их эволюцию в результате малоциклового нагружения, представлены на рис. 13.

В *параграфе 4.2* предложен новый метод определения главных компонент остаточных напряжений в случае увеличения диаметра исходного отверстия путем сверления вторичного сверления.

В *пункте 4.2.1* описана принципиальная схема применения метода сверления вторичного отверстия для определения остаточных напряжений (рис. 14) и получены формулы для вычисления компонент остаточных напряжений в упругой постановке (11).

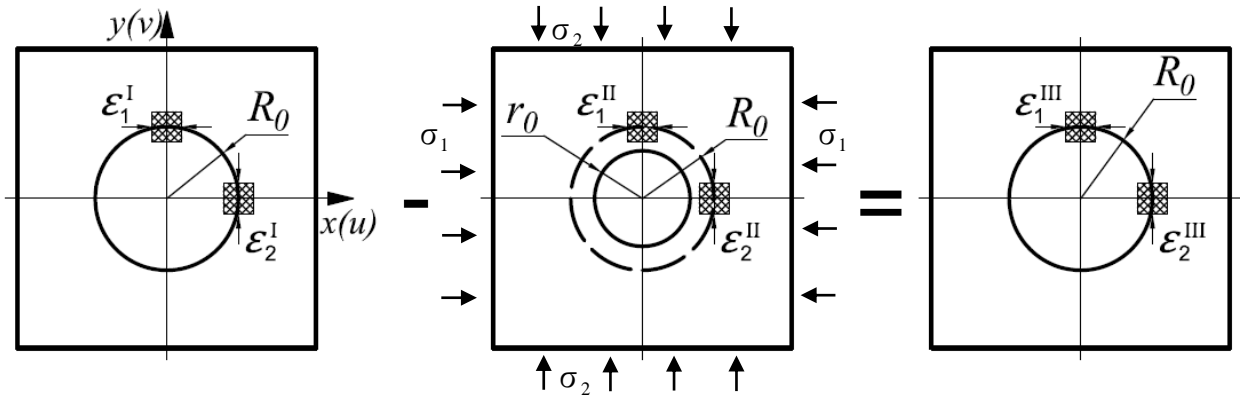


Рисунок 14 – Схема определения остаточных деформаций методом сверления вторичного отверстия

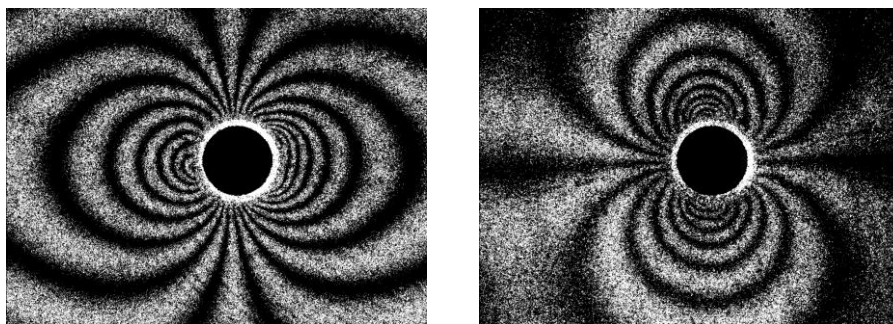
$$\sigma_1 = \frac{E}{2R_0} \left\{ \frac{A\Delta u(R_0) + B\Delta v(R_0)}{A^2 - B^2} \right\}, \sigma_2 = \frac{E}{2R_0} \left\{ \frac{A\Delta v(R_0) + B\Delta u(R_0)}{A^2 - B^2} \right\}, \quad (11)$$

где  $\Delta u(R_0)$ ,  $\Delta v(R_0)$  – величины приращений диаметров вторичного отверстия в направлении главных тангенциальных деформаций  $\varepsilon_1^{III}$  и  $\varepsilon_2^{III}$ , соответственно, на контуре вторичного отверстия;  $A = \alpha_1(R_0) - \alpha_1(r_0)$ ,  $B = \alpha_2(R_0) - \alpha_2(r_0)$ , где согласно решению задачи Кирша:

$$\alpha_1(r_0) = \frac{1}{2} \left[ 2 + \frac{r_0^2}{R_0^2} + \frac{3r_0^4}{R_0^4} - 3\mu \frac{r_0^2}{R_0^2} \left( 1 - \frac{r_0^2}{R_0^2} \right) \right],$$

$$\alpha_2(r_0) = -\frac{1}{2} \left[ \frac{r_0^2}{R_0^2} - \frac{3r_0^4}{R_0^4} - \mu \left( 2 - \frac{5r_0^2}{R_0^2} + \frac{3r_0^4}{R_0^4} \right) \right].$$

В **пункте 4.2.2** представлены оценки исходного уровня остаточных деформаций и напряжений, полученные согласно соотношениям (11), на обеих сторонах образца с упрочнённым отверстием. Объектами исследования являются образцы из сплава 2024 ( $E = 74000$  МПа,  $\mu = 0,33$ ), аналогичные описанным в пункте 4.1.1.



а) ( $\Delta N_A^u = -17.5$ )

б) ( $\Delta N_A^v = -17.5$ )

Рисунок 15 – Картины интерференционных полос в терминах компоненты  $u$  (а) и  $v$  (б), полученные на стороне  $A$  образца  $T5\_33HRS$  после приложения  $N = 0$  циклов

Картины интерференционных полос, полученные для образца  $T5\_33HRS$  на стороне  $A$ , который не подвергался циклическому нагружению приведены на рис. 15. Соответствующие величины главных компонент остаточных напряжений равны  $\sigma_1 = -251$  МПа и  $\sigma_2 = -251$  МПа. Данные значения можно использовать только для оценки минимального уровня остаточных напряжений на контуре упрочнённого отверстия. Дело в том, что на расстоянии  $r \geq 4r_0$  от контура упрочнённого отверстия величины остаточных напряжений

должны стремиться к нулю. Для более точного анализа эволюции напряжённо-деформируемого состояния в окрестности упрочнённого отверстия, рассматривается изменение экспериментальных величин главных деформаций на контуре вторичного отверстия  $\varepsilon_1^{III}$  и  $\varepsilon_2^{III}$ . Конфигурация реальных интерферограмм на рис. 15 и соответствующих образцовых картин интерференционных полос свидетельствуют, что деформации на контуре вторичного отверстия можно определить следующим образом:

$$\varepsilon_1^{III} = \Delta u(R_0)/2R_0, \quad \varepsilon_2^{III} = \Delta v(R_0)/2R_0, \quad (12)$$

где  $R_0$  – радиус вторичного отверстия.

В **пункте 4.2.3** описывается эволюция остаточных деформаций при малоцикловом нагружении с параметрами  $\Delta\sigma = 350$  МПа и  $R = -0,4$ . Тангенциальную компоненту остаточных деформаций  $\varepsilon_\varphi^{III}$  на контуре вторичного отверстия можно представить в виде:

$$\varepsilon_\varphi^{III} = \varepsilon_1^{III} \cos^2 \varphi + \varepsilon_2^{III} \sin^2 \varphi. \quad (13)$$

Величины остаточных деформаций (13) для различных этапов циклического нагружения показаны на рис. 16.

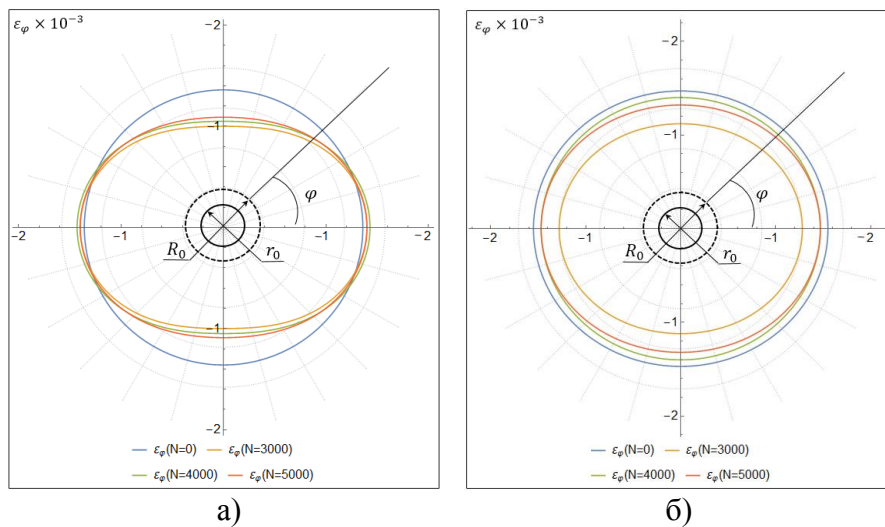


Рисунок 16 – Распределения тангенциальных компонент остаточных деформаций  $\varepsilon_\varphi^{III}$  по окружности диаметром  $2R_0 = 4,9$  мм в окрестности упрочненного отверстия на стороне А (а) и стороне В (б) исследуемого образца

Диаграммы на рис. 16 свидетельствуют, что величины деформаций  $\varepsilon_\varphi^{III}$  на стороне В превышают аналогичные значения на стороне А. Это превышение составляет 8,8 и 9,2 % для компоненты  $\varepsilon_1^{III}$  и  $\varepsilon_2^{III}$ , соответственно. Эти результаты подтверждают тот факт, что величины остаточных напряжений на стороне выхода (В) упрочняющего инструмента превышают аналогичные значения на противоположной стороне образца (А). Представленные данные показывают, что эволюцию остаточных деформаций на контуре вторичного отверстия нельзя характеризовать, как монотонную релаксацию. Максимальное снижение величины остаточных деформаций равно 20% и достигается при  $N = 3000$  циклов.

Полученные данные, так же дают возможность построения функции накопления повреждений согласно подходу представленному в **третьей главе**. Значимость этого факта заключается в том, что функции накопления повреждений получены двумя разными способами, а именно, методом ПНДТ и методом сверления вторичного отверстия.

В пятой главе представлено определение исходных величин остаточных напряжений в окрестности сварного соединения алюминиевых пластин и анализ их эволюции при малоцикловом нагружении. Для этого используется совместное применение методов сверления отверстий и электронной спекл-интерферометрии, а также метод ПНДТ.

В параграфе 5.1 представлены основные соотношения метода сверления исходного отверстия.

В параграфе 5.2 приведены результаты определения уровня остаточных напряжений в исходном сварном образце с размерами  $800 \times 120 \times 5$  мм, изготовленным из алюминиевого сплава 1201 ( $E=72000$  МПа,  $\mu=0,33$ ,  $\sigma_{0,2} = 320$  МПа). Установлено наличие значительных по величине изгибных компонент остаточных напряжений. Можно с уверенностью сказать, что при разрезании большого исходного образца на малые купоны уровень изгибных напряжений будет еще выше. Таким образом, для надежного количественного описания эволюции остаточных напряжений вследствие малоциклового усталости необходимо проводить двухсторонние измерения тангенциальных компонент перемещений.

Измерение тангенциальных компонент перемещений проводится на обеих поверхностях образца, А и Б, как это показано на рис. 17. Здесь и при дальнейших исследованиях тангенциальная компонента перемещений  $v$  направлена вдоль сварного шва, а компонента  $u$  перпендикулярна ему.

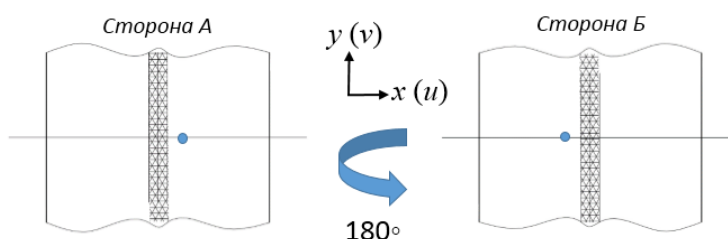


Рисунок 17 – Схема проведения эксперимента и направление измеряемых компонент перемещений относительно линии сварного шва

В параграфе 5.3 представлены результаты исследования эволюции остаточных напряжений при малоцикловом нагружении. Для этого исходный образец был разрезан на 4 фрагмента перпендикулярно сварному шву. Из этих фрагментов было получено 4 образца размерами  $180 \times 100 \times 4$  мм. Первый образец (W3\_01) не подвергался циклическому нагружению. Остальные образцы (W3\_02, W3\_03, W3\_04) перед определением остаточных напряжений подвергались одноосному растяжению-сжатию с параметрами цикла  $\Delta\sigma = 300$  МПа и  $R = -1,0$ . Для предварительного нагружения использовалась многоцелевая универсальная испытательная машина walter + bai ag типа LFV 500-кН с диапазоном нагружения 0-500 кН. Одноосная периодическая нагрузка действует вдоль направления сварного шва. После приложения циклической нагрузки, в образцах выполняется зондирующее отверстие диаметром  $2r_0 = 1,9$  мм. Характер зависимостей, представленных на рис. 18, свидетельствует, что эволюция остаточных напряжений не может быть однозначно квалифицирована, как монотонная релаксация.

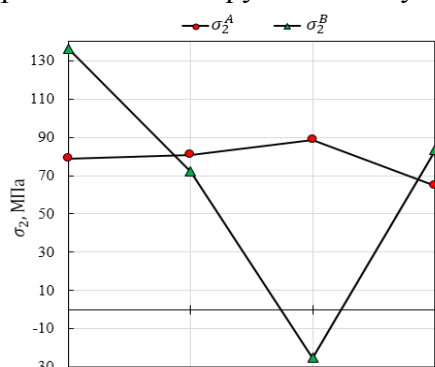


Рисунок 18 – Распределения главных компонент остаточных напряжений  $\sigma_2^A$  и

$\sigma_2^B$  как функция циклов нагружения  $N$

действительно, релаксация имеет место только на стороне Б в интервале от 0 до 5000 циклов. Затем величина компоненты  $\sigma_2^B$  демонстрирует значительное и неожиданное увеличение вплоть до 83,3 МПа для  $N = 7500$  циклов. При этом, величина главной компоненты  $\sigma_2^A$  сохраняется практически постоянной для всех исследованных циклов. Можно предположить, что суще-

ственно, релаксация имеет место только на стороне Б в интервале от 0 до 5000 циклов. Затем величина компоненты  $\sigma_2^B$  демонстрирует значительное и неожиданное увеличение вплоть до 83,3 МПа для  $N = 7500$  циклов. При этом, величина главной компоненты  $\sigma_2^A$  сохраняется практически постоянной для всех исследованных циклов. Можно предположить, что суще-

ствует некоторая пороговая величина остаточных напряжений, ниже которой релаксации не проявляется. Этот факт показывает необходимость дальнейших исследований, результаты которых могут иметь значительный научный и прикладной интерес. Более того, этот факт необходимо учитывать для надёжного предсказания долговечности сварных соединений.

В параграфе 5.4 рассматривается анализ эволюции остаточных напряжений основанный на методе ПНДТ. Данный подход даёт результаты для точек расположенных на различных расстояниях от сварного шва. Моделирование распространения трещины в поле остаточных напряжений на различных этапах малоциклового нагружения осуществляется путём нанесения двух последовательных надрезов шириной  $\Delta b = 0,17$  мм. Исходная точка первого надреза находится на границе зондирующего отверстия. Картины полос высокого качества зарегистрированы на противоположных сторонах для всех четырех пар надрезов, выполненных во всех четырех малых образцах.

Длина первого надреза  $a_1$  для всех малых образцов лежит в интервале от 2,2 до 2,4 мм. Суммарная длина двух надрезов  $a_2$  находится в диапазоне от 4,5 до 4,65 мм. Первый надрез проходит через сварной шов. Второй надрез находится в зоне максимального уровня растягивающей компоненты  $\sigma_2^A$  и  $\sigma_2^B$ . Эта область расположена в зоне исходного материала в ближайшей окрестности сварного шва.

Минимальная величина раскрытия  $\Delta v_1$  для длины надреза  $a_2$  относится к  $N=5000$  циклов. Также самая тенденция имеет место для распределений ОН на стороне *Б*. Нужно отметить, что величина раскрытия  $\Delta v_1$  для надреза  $a_2$  и величины КИН для надреза  $a_1$  определяются в точках принадлежащих границе шва. Полученные зависимости КИН (рис. 19) от количества циклов нагружения вновь выявляют минимальные значения КИН при  $N=5000$  циклов. Зависимости величин *T*-напряжений для надрезов длиной  $a_1$  показывают максимальный уровень  $T = 33$  МПа для  $N=5000$  циклов.

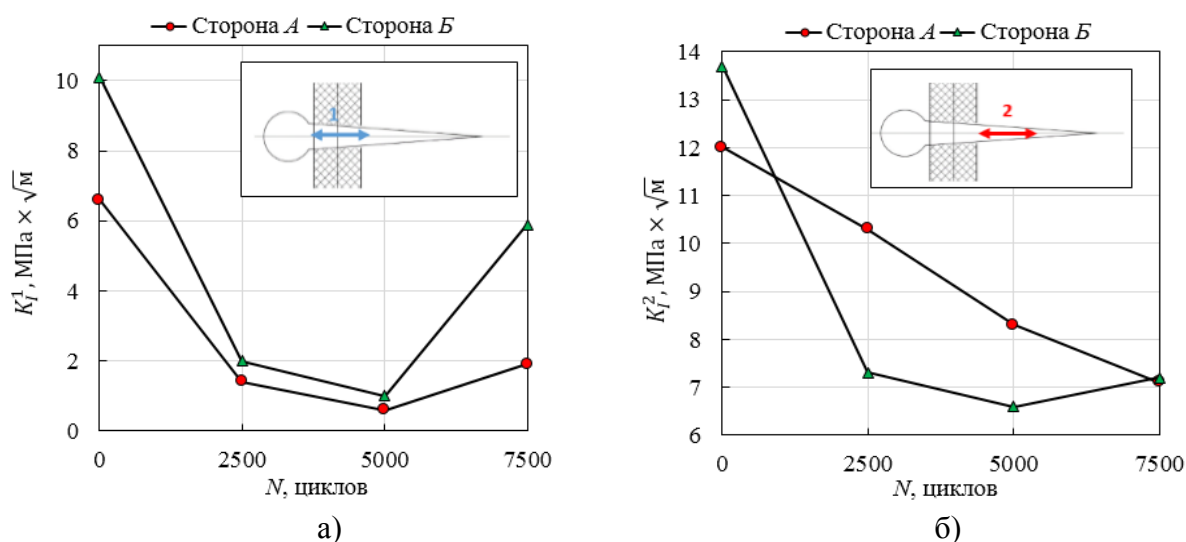


Рисунок 19 – Распределения величин КИН  $K_I^1$  для надреза длиной  $a_1$  (а) и  $K_I^2$  для надреза длиной  $a_2$  (б), как функция количества циклов нагружения  $N$

Представленные зависимости отражают эволюцию остаточных напряжений в более широком пространственном диапазоне, чем данные метода сверления отверстия. Дело в том, что величины остаточных напряжений условно приписываются точке в центре малого зондирующего отверстия. В нашем случае эта точка расположена на расстоянии 0,85 мм, в то время как общая длина двух надрезов 4,57 мм. Это расстояние перекрывает всю ширину шва и затем проходит через область максимальных компонент остаточных напряжений  $\sigma_2^A$  и  $\sigma_2^B$ .

Таким образом можно сделать вывод, что все зависимости содержат особую точку при достижении  $N=5000$  циклов. Эта особая точка является индикатором реверса в процессе релаксации остаточных напряжений. При достижении этого этапа малоциклового нагружения происходит заметное увеличение компонент ОН. Можно ожидать, что обнаруженная особенность может иметь место для каждой отдельной технологии сварки при малоцикловом нагружении с различными параметрами нагружения. Этот интересный факт несомненно нуждается в экспериментальном исследовании.

В *параграфе 5.5* представлены выводы по главе.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Основные результаты диссертационной работы формулируются следующим образом:

1. Создан измерительный комплекс, представляющий собой электронный спекл-интерферометр с мобильным модулем, установленным на станине испытательной машины. Данная установка обеспечивает получение высококачественных картин интерференционных полос и измерение на этой основе деформационного отклика на локальное удаление материала в виде узкого надреза при одноосном растяжении прямоугольных пластин.
2. Представлено теоретическое обоснование нового экспериментального подхода к определению КИН и Т-напряжений с помощью модифицированной версии метода ПНДТ. Исходная информация имеет вид тангенциальных компонент перемещений, абсолютные величины которых измеряются в нескольких точках, расположенных в ближайшей окрестности вершины надреза, который наносится при постоянной внешней нагрузке. Получены математические формулы, необходимые для преобразования экспериментальных данных в искомые величины параметров механики разрушения для трещин нормального отрыва. На этой основе определяются четыре первых коэффициента рядов Уильямса и по этим данным вычисляются величины КИН и Т-напряжений. Наличие высококачественных картин интерференционных полос, которые свободны от влияния смещений тела, как целого, служит надежным индикатором реального вида напряженного состояния в окрестности вершины трещины.
3. Проведена оценка погрешностей разработанного подхода путем сравнения экспериментальных величин КИН для краевой и центральной трещины в пластинах с результатами численного моделирования и теоретическими данными, соответственно. Установлено, что в обоих случаях различия не превышают пяти процентов. Таким образом, обоснована высокая точность и надежность модифицированной версии метода ПНДТ по отношению к определению коэффициентов интенсивности напряжений.
4. На основе разработанного экспериментального подхода проведено исследование процессов:
  - I. Накопления усталостных повреждений при малоцикловом нагружении прямоугольных образцов с отверстием для различных значений коэффициентов асимметрии и размаха напряжений цикла в окрестности концентратора напряжений при малоцикловом нагружении;
  - II. Эволюции остаточных напряжений в окрестности упрочненных отверстий в плоских прямоугольных образцах при малоцикловом нагружении;
  - III. Кинетики накопления повреждений в окрестности упрочнённого отверстия;
  - IV. Эволюции остаточных напряжений в окрестности сварных соединений плоских прямоугольных образцов при малоцикловом нагружении.
5. Предложен и реализован новый метод определения главных компонент остаточных напряжений и деформаций в окрестности упрочненного отверстия с помощью сверления вторичного отверстия. Исходные экспериментальные данные представляют собой приращенные диаметры вторичного отверстия в направлении главных остаточных напряжений, которые измеряются методом электронной спекл-интерферометрии.



## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Елеонский С.И., Одинцев И.Н., Писарев В.С., Чернов А.В. Исследование процесса распространения трещины по данным измерений локального деформационного отклика: I. Поле действующих напряжений // Учёные записки ЦАГИ. 2015. № 7. С. 55-76.
2. Апальков А.А., Елеонский С.И., Одинцев И.Н., Писарев В.С. Исследование процесса распространения трещины по данным измерений локального деформационного отклика: II. Поле остаточных напряжений // Учёные записки ЦАГИ. 2015. № 8. С. 71-89.
3. Писарев В.С., Матвиенко Ю.Г., Елеонский С.И., Одинцев И.Н. Влияние малоциклового усталости на параметры механики разрушения по данным метода спекл-интерферометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. № 6. С. 44-56.
4. Елеонский С.И., Одинцев И.Н., Писарев В.С., Усов С.М. Определение остаточных напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений на основе локального удаления материала // Учёные записки ЦАГИ. 2017. № 4. С. 57-76.
5. Боровская Я.С., Елеонский С.И., Писарев В.С. Влияние циклического нагружения на величины остаточных напряжений и коэффициентов интенсивности напряжений // Учёные записки ЦАГИ. 2018. № 6. С. 64-82.
6. Елеонский С.И., Матвиенко Ю.Г., Писарев В.С., Чернов А.В. Эволюция параметров механики разрушения в окрестности отверстия при малоциклового усталости по данным моделирования трещины узкими надрезами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. № 9. С. 52-62.
7. Елеонский С.И., Матвиенко Ю.Г., Писарев В.С., Чернов А.В. Накопление повреждений в окрестности отверстия при малоциклового усталости по данным измерений локального деформационного отклика // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2020. № 10. С. 46-55.

### Публикации в изданиях, входящих в базу данных Scopus и WoS:

8. Eleonsky S.I., Matvienko Yu.G, Pisarev V.S., Odintsev I.N. Fracture mechanics parameters of narrow notches by experimental local displacement measurements // 19th European Conference on Fracture. Fracture Mechanics for Durability, Reliability and Safety. Kazan, Russia, 26-31 august, 2012 г. Book of Abstract, P. 116
9. Matvienko Yu.G, Pisarev V.S., Eleonsky S.I. Determination of fracture mechanics parameters on a base of local displacement measurements // Frattura ed Integrità Strutturale. 2013. N 25. P. 20-26. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.25.04.
10. Matvienko Yu.G, Pisarev V.S., Eleonsky S.I., Chernov A.V. Determination of fracture mechanics parameters by measurements of local displacements due to crack length increment // Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2014. V. 37. N. 12. P. 1306-1318. DOI: 10.1111/ffe.12195.
11. Pisarev V.S., Matvienko Yu.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. V. 179. P. 348-374. [dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.029](https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.04.029)
12. Pisarev V.S., Eleonsky S.I., Odintsev I.N., Apalkov A.A. Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments // Optics and Lasers in Engineering. 2018. V. 110. P. 437-456. doi.org /10.1016/j.optlaseng.2018.06.022.
13. 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. V. 47. P. 303-320. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.47.23.

14. Matvienko Yu.G, Pisarev V.S., Eleonsky S.I., Chernov A.V. Residual stress/strain evolution due to low-cycle fatigue by removing local material volume and optical interferometric data // *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2019. V. 42. P. 2061–2078. DOI: 10.1111/ffe.13083
15. Matvienko Yu.G, Pisarev V.S., Eleonsky S.I. The effect of low-cycle fatigue parameters on damage accumulation near a hole // *Engineering Failure Analysis*. 2019. V. 106. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104175.

**В других изданиях:**

16. Елеонский С.И., Писарев В.С. Влияние циклического нагружения на величины параметров механики разрушения по данным спекл-интерферометрии // *Материалы XXXV Всероссийской конференции, посвященной 70-летию Победы*. Россия, Миасс, 16-18 июня 2015. Т. 3. С. 47-56.
17. Елеонский С.И., Писарев В.С., Чернов А.В. Исследование процесса распространения трещины в условиях упругопластического деформирования и упрочнения // *XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики*. Казань, 20 – 24 августа 2015 г. Сборник трудов конференции. С. 1285-1287.
18. Елеонский С.И., Писарев В.С. Исследование распространения трещины в поле остаточных напряжений // *58 научная конференции МФТИ, Жуковский, 23-28 ноября 2015 г.* [http://conf58.mipt.ru/static/reports\\_pdf/307.pdf](http://conf58.mipt.ru/static/reports_pdf/307.pdf)
19. Елеонский С.И., Матвиенко Ю.Г., Писарев В.С., Одинцев И.Н. Влияние ширины разреза на измеряемые сингулярные и несингулярные компоненты поля напряжений / *Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения*. Сборник статей. – М.: Российская академия наук («Наука» РАН), 2016. С. 395-406.
20. Елеонский С.И. Исследования параметров механики разрушения для трещин в поле остаточных напряжений на различных этапах циклического нагружения // *Тезисы Международной научной конференции «XLIII Гагаринские чтения»*, Москва 10-11 апреля 2017 года. Сборник тезисов конференции, С. 327.
21. Елеонский С.И. Определение параметров механики разрушения для трещины в окрестности сварных соединений пластин методом электронной спекл-интерферометрии // *XXI Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, Королёв, ПАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" имени С.П. Королёва"*, 30 октября-3 ноября 2017 года. Сборник тезисов том 2, С.110.
22. Дзюба А.С., Елеонский С.И., Матвиенко Ю.Г., Писарев В.С. Эволюция параметров механики разрушения для трещин распространяющихся от исходного и упрочнённого отверстий // *Труды ЦАГИ. Сборник статей научно технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов»*. 31 мая – 1 июня 2018 г. № 2782. С. 7-9.
23. Matvienko Yu.G, Pisarev V.S., Eleonsky S.I. Evolution of fracture mechanics parameters for cracks in residual stress fields // *IGF Workshop "Fracture and Structural Integrity" Structural Integrity Procedia*. 2018. N 9. P. 16-21. DOI: 0.1016/j.prostr.2018.06.005.
24. Елеонский С.И. Исследование процесса накопления повреждений при малоцикловой усталости по данным измерений локального деформационного отклика методом спекл-интерферометрии // *Международная молодёжная научная конференция «XLVI Гагаринские чтения»*, Москва 14-17 апреля 2020 года. Сборник трудов секции «Механика и моделирование материалов и технологий», С. 39-42.

**Патент на изобретение:**

Патент на изобретение № 2667316, РФ / Писарев В.С., Елеонский С.И., Чернов А.В. «Способ определения коэффициентов интенсивности напряжений для трещин». – 2018.