

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Елеонского Святослава Игоревича
**«ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ И
ЭВОЛЮЦИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ
ИЗМЕРЕНИЙ ЛОКАЛЬНОГО ДЕФОРМАЦИОННОГО ОТКЛИКА
МЕТОДОМ СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Актуальность темы диссертации. Использование инновационных технологий соединения металлических элементов конструкций представляет собой важное звено, необходимое для создания современных летательных аппаратов (ЛА). С этой целью в настоящее время широко применяются холодное упрочнение отверстий под болты и заклепки, а также сварка отдельных элементов авиационных конструкций. Обе технологии приводят к возникновению значительных по величине локальных остаточных напряжений. В первом случае положительное влияние сжимающих остаточных напряжений в окрестности отверстия обеспечивает значительное (в 3–5 раз) увеличение усталостной долговечности. Применение сварных конструкций обеспечивает снижение веса планера пассажирского самолета в пределах 10-12 %, однако, наличие растягивающих остаточных сварочных напряжений, действующих вдоль сварных швов, оказывает негативное влияние на усталостную прочность конструкции. Таким образом, возникает необходимость получения новых экспериментальных данных, которые описывают процесс накопления усталостных повреждений в окрестности указанных соединений при циклическом нагружении, в том числе с учётом эволюции полей остаточных напряжений

В связи с этим, представленная диссертационная работа, в которой разработан новый разрушающий метод количественного описания накопления усталостных повреждений в нерегулярных зонах конструкции при малоциклового усталости, несомненно, актуальна. Полученные результаты вносят заметный вклад в создание подходов, позволяющих

Отдел документационного
обеспечения МАИ

20 05 2021 г.

проводить анализ усталостной прочности с учетом эволюции полей остаточных напряжений.

Достоверность и новизна основных выводов диссертации.

Диссертационная работа изложена на 215 страницах и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Структура диссертации логично отражает последовательность решения поставленных соискателем задач. Она включает обзор и анализ отечественных и зарубежных публикаций; постановку научной проблемы: обоснование необходимости создания нового экспериментального метода для определения параметров механики разрушения в окрестности узкого надреза, который выполняется при постоянной внешней нагрузке; разработку, верификацию и практическую реализацию данного метода для краевых и центральных трещин; применение разработанного подхода для количественного описания процесса накопления повреждений в окрестности отверстий. В завершение работы приведен пример анализа эволюции остаточных напряжений в окрестности сварных соединений алюминиевых листов.

Показано, как с помощью метода последовательного наращивания длины трещины можно измерять абсолютные величины тангенциальных компонент перемещений на берегах узкого надреза. С помощью оригинальных оптических схем спекл-интерферометров проведен анализ точности определения компонент перемещений в окрестности узкого надреза при постоянной внешней нагрузке. Необходимо отметить высокое качество картин интерференционных полос, которое является необходимым условием получения надежных исходных данных. Оптимальный выбор уровня внешней нагрузки обеспечивает повышение точности измерений. В результате предложен и верифицирован новый подход к определению коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) и Т-напряжений с использованием первых двух коэффициентов рядов Уильямса для каждого параметра (**Глава 2**).

Применение разработанной методологии на различных стадиях малоциклового усталости дает возможность получить зависимости величин раскрытия, КИН и Т-напряжений для симметричных надрезов одинаковой длины от количества циклов нагружения. С экспериментальной точки зрения ключевым моментом разработанного подхода является тот факт, что образцы с отверстиями испытываются в реальных условиях эксплуатации без нанесения исходного надреза, который является источником развития усталостной трещины. Впервые предлагается использовать относительные величины КИН, которые получены на различных стадиях малоциклового усталости, в качестве текущего параметра повреждаемости (**Глава 3**).

На этой основе получено математическое обоснование нового разрушающего метода для количественного описания процесса накопления повреждений в зоне концентратора напряжений при малоциклового усталости. Показано, что численное интегрирование зависимости нормированных величин КИН от процента долговечности дает функцию накопления повреждений с точностью до коэффициента нормировки. Искомый коэффициент вычисляется как величина обратная площади под нормированной КИН кривой. Разработанная процедура определяет явный вид функции накопления повреждений. Впервые получены количественные данные, которые характеризуют влияние коэффициента асимметрии цикла и размаха напряжений на скорость накопления повреждений в окрестности отверстий при малоциклового усталости (**Глава 3**).

На основе методологии, используемой для отверстия в исходном состоянии, предложены и реализован новый метод оценки эволюции остаточных напряжений в окрестности упрочненного отверстия в условиях малоциклового нагружения. Корректность применения формул линейной механики разрушения к определению значений КИН для надрезов, моделирующих трещину в поле остаточных напряжений, доказана путем сравнения данных, которые получены для различных значений внешней нагрузки. Установлено, что зависимости величин раскрытия в начальной

точке первого надреза и КИН от уровня номинальных напряжений имеют линейный характер. Данный факт дает возможность определения величин КИН, которые относятся только к воздействию остаточных напряжений, на основе принципа суперпозиции. Показано, что значения остаточных КИН, которые соответствуют различным уровням номинальных напряжений для образца, который не подвергался циклическому нагружению, отличаются не более, чем на 2,4 %. На этой основе построены зависимости, которые отражают исходный уровень значений остаточных КИН на различных расстояниях от контура упрочненного отверстия и их эволюцию в результате малоциклового нагружения. Полученные данные свидетельствуют, что эволюция остаточных напряжений в окрестности упрочненного отверстия имеет сложную структуру, которая характеризуется наличием точки реверса при достижении 32% долговечности. Величина остаточных напряжений для 95% долговечности снижается всего на 27 % по сравнению с исходным значением. Эти результаты количественным образом описывают механизм увеличения долговечности за счет упрочнения отверстия (**Глава 4**).

Предложен оригинальный подход к исследованию эволюции остаточных напряжений, который основан на новом методе определения главных компонент остаточных деформаций в окрестности упрочненного отверстия с помощью сверления вторичного отверстия. Исходные экспериментальные данные представляют собой приращения диаметров вторичного отверстия в направлении главных остаточных напряжений, которые измеряются методом электронной спекл-интерферометрии. Получены соотношения для преобразования измеренных компонент перемещений в величины остаточных деформаций на контуре вторичного отверстия. Показано, что оценка нижней границы величин главных остаточных напряжений может быть получена с помощью модели перехода, основанной на соотношениях теории упругости. Разработанный формализм используется для количественного описания эволюции окружных остаточных деформаций, которые относятся к диаметру вторичного

отверстия, и остаточных напряжений в окрестности упрочненного отверстия при малоцикловом нагружении. Исходная экспериментальная информация представлена в виде набора картин интерференционных полос высокого качества. По результатам обработки интерферограмм, относящихся к различному количеству циклов нагружения установлено, что эволюция остаточных деформаций и напряжений характеризуется точкой реверса релаксации. Полученные данные хорошо согласуются с результатами применения модифицированной версии метода ПНДТ. Получен явный вид функции накопления повреждений в окрестности упрочненного отверстия на основе использования в качестве параметра повреждаемости нормированных зависимостей величин остаточных деформаций на контуре вторичного отверстия, остаточных напряжений в окрестности упрочненного отверстия и КИН, связанных с воздействием только остаточных напряжений. Установлено, что все три подхода дают близкие результаты (**Глава 4**).

Проведено исследование эволюции главных компонент остаточных напряжений в окрестности сварных соединений алюминиевых пластин при малоцикловом нагружении. Для этого используются два различных экспериментальных метода. Первый из них основан на сверлении единственного отверстия и последующих одновременных измерениях деформационного отклика на противоположных сторонах пластины. В результате установлено, что поле остаточных напряжений состоит из мембранных и изгибных компонент. Этот факт приводит к различным зависимостям величин остаточных напряжений от количества циклов нагружения на противоположных поверхностях образцов. Эволюция остаточных напряжений не может быть характеризована, как монотонная релаксация. Существует точка реверса, которая связана с увеличением максимальной компоненты остаточных напряжений. Полученные данные относятся к одной точке на поверхности, совпадающей с центром малого отверстия. Применение метода ПНДТ дает возможность увеличить пространственное разрешение экспериментальных данных, включая точки,

которые расположены на различных расстояниях от сварного шва. Полученная информация представлена в виде эволюции величин КИН для двух последовательных надрезов. Данные, полученные двумя способами, находятся в хорошем соответствии. (**Глава 5**).

Достоверность и обоснованность основных положений и выводов диссертационной работы подтверждается корректной постановкой задач, анализом погрешностей измерения компонент перемещений методом электронной спекл-интерферометрии, математическим построением моделей, необходимых для перехода от измеряемых величин к значениям КИН и T -напряжений, а также хорошим совпадением экспериментальных данных, полученных при решении тестовых задач, с результатами теоретических и численных решений на основе линейной механики разрушения.

Значимость результатов для науки и практики. Результаты диссертационной работы имеют широкий потенциал для применения в отечественной науке и практике.

Прежде всего, необходимо отметить создание нового экспериментального подхода к определению КИН и T -напряжений с помощью модифицированной версии метода ПНДТ при моделировании трещины последовательностью узких надрезов при постоянной внешней нагрузке.

Уникальные возможности предложенного подхода обеспечивают создание нового разрушающего метода для количественного описания процесса накопления повреждений в зоне концентрации напряжений при малоцикловогой усталости. Основной научной идеей является тот факт, что узкие надрезы, моделирующие трещину, служат для оценки уровня накопления усталостных повреждений таким же образом, как зондирующее отверстие используется для освобождения энергии остаточных напряжений в методе сверления отверстия. Экспериментальный подход включает предварительное циклическое нагружение образцов с отверстиями и последующее нанесение серии надрезов при постоянной внешней нагрузке.

Определение величин КИН выполняется на различных стадиях малоциклового усталости.

Представлено математическое обоснование, необходимое для количественного описания процесса накопления повреждений в зоне концентратора напряжений. Показано, что нормированные величины КИН, которые получены для узкого разреза на различных стадиях малоциклового усталости, можно надежно использовать в качестве текущего параметра повреждаемости. Таким образом, численное интегрирование зависимости относительных величин КИН от процента долговечности дает функцию накопления повреждений с точностью до коэффициента нормировки. Искомый коэффициент вычисляется как величина обратная площади под нормированной КИН кривой. Разработанная процедура определяет явный вид функции накопления повреждений. На этой основе проведено исследование влияния коэффициента асимметрии цикла и размаха напряжений на процесс накопления повреждений.

Разработаны и реализованы новые методы исследования эволюции остаточных напряжений в окрестности упрочненного отверстия и сварных швов при малоциклового усталости, которые представляют собой эффективный инструмент для оценки исходного уровня остаточных напряжений в окрестности соединений перспективных авиационных конструкций и их эволюции в процессе эксплуатации.

Предложенная научная концепция и полученные результаты являются необходимым этапом для создания новых методов предсказания усталостной долговечности авиационных конструкций на основе количественного описания процесса накопления повреждений.

Оценка диссертации. Диссертация написана весьма подробно и в большом объеме иллюстрирована картинками интерференционных полос, фотографиями, схемами и графическими зависимостями. По содержанию диссертации можно поставить некоторые вопросы и сделать следующие замечания:

1. В работе представлен широкий набор экспериментов, посвященных определению величин раскрытия, КИН и Т-напряжений для краевых трещин в ДКБ образцах, которые проведены с использованием сложных оптических схем. Однако, краевые надрезы не используются в дальнейшем при описании накопления повреждений. С какой целью проводились данные исследования?
2. Незначительное влияние пластической зоны в вершине надреза на результаты определения КИН установлено для относительно коротких центральных трещин. Интересно было бы оценить, как возрастает размер пластической зоны и его влияние на результаты определения КИН с увеличением длины разреза. Для этого можно использовать краевые разрезы в ДКБ образцах. Проведены ли такие оценки?
3. В работе, кроме величин КИН для симметричных надрезов в плоских образцах, определялись также значения раскрытия в вершине надреза и Т-напряжений. Можно ли использовать эволюцию этих несингулярных параметров для описания процесса накопления повреждений?
4. Из текста диссертации не ясно, проводилось ли сравнение долговечности и эволюции величин КИН для образцов с обычным и упрочненным отверстиями при одинаковых параметрах малоциклового нагружения.
5. В работе широко представлены данные об эволюции остаточных напряжений, которые вытекают из анализа эволюции остаточных КИН. При этом абсолютные значения остаточных напряжений оцениваются с помощью приближенных соотношений. Можно ли повысить достоверность полученных результатов, и каким способом?

Сделанные замечания не отражаются, однако, на положительной оценке диссертации.

Заключение. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, посвященную разработке и применению новых методов исследования накопления повреждений и эволюции остаточных напряжений в зонах концентрации напряжений при малоциклового усталости.

Основное содержание диссертации широко отражено в российской и зарубежной периодической печати и доложено на конференциях и семинарах.

Автореферат диссертации в целом правильно и полно отражает ее содержание.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, С.И. Елеонский, заслуживает искомой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 - «механика деформируемого твердого тела» за разработку новых методов количественного описания накопления повреждений и эволюции остаточных напряжений при малоциклового усталости.

Официальный оппонент:

Доктор технических наук по специальностям: 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры» и 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов», профессор кафедры «Прикладная механика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (МГТУ им. Н.Э. Баумана)»

Покровский Алексей Михайлович

« 14 » 05 2021 г.

Тел.: +7(499)263-69-88, e-mail: pokrovsky@bmstu.ru

Адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Тел: +7(499)263-63-91, факс: +7(499)267-48-44, e-mail: bauman@bmstu.ru

Подпись Покровского Алексея Михайловича заверяю:

