

ОТЗЫВ

официального оппонента Разумовского Игоря Александровича 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 учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

Диссертационная работа Елеонского С.И. посвящена разработке методических подходов и специализированного экспериментального оборудования для углублённого анализа процессов накопления повреждений, а также исследованиям на их основе малоциклового усталости материалов в зонах существенной неоднородности НДС (напряжённо-деформируемого состояния) для различных значений коэффициентов асимметрии и размаха напряжений цикла. Её тема полностью соответствует как современным тенденциям развития механики усталостного разрушения, так и экспериментальной механики, методы которой (в данном случае – метод ЭСИ (электронной спекл-интерферометрии)) открывают возможность получения значительных объёмов информации о существенно-неоднородных полях деформаций и перемещений поверхностей (включая зоны трещинообразования). Указанные обстоятельства позволяют сделать вывод о несомненной **актуальности** рассматриваемой диссертации.

Диссертация состоит из введения, 5-ти глав и заключения.

В первой главе представлен аналитический обзор публикаций, связанных с тематикой работы. Он включает 4 подраздела: 1- экспериментальные методы определения параметров механики разрушения для трещин в поле действующих и остаточных напряжений; 2 - исследование остаточных напряжений в окрестности упрочнённого отверстия; 3 - исследование процессов накопления повреждений; 4 - исследование остаточных напряжений в окрестности сварных швов.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

« 14 05 2021 г.

Здесь, в первую очередь, следует отметить глубокое изучение автором основных направлений экспериментальной механики, связанных с методами исследования параметров механики разрушения на основе обработки полей деформационного отклика в зоне трещины, получаемыми с использованием различных экспериментальных методов.

Вместе с тем, следует указать на определённые упущения, имеющиеся в тексте.

1. *Автором не указывается на то, что в ряде публикаций с целью уменьшения погрешности результатов в качестве параметров, определяемых на основе математической обработки интерференционных картин в зоне трещины, наряду с асимптотическими разложениями функций, описывающих НДС, вводятся также поправки, позволяющие уточнить положение вершины трещины, соответствующее используемой интерференционной картине.*

2. *В обзоре следовало бы отметить, что изначально МНДТ был предложен в качестве способа исследования неоднородных полей остаточных напряжений, так как на основе экспериментально полученной зависимости $K_{I,II}(x)$ в последовательно наращиваемой трещине можно получить устойчивое решение интегрального уравнения типа Вольтерра, используемое для расчёта остаточных напряжений $\sigma_{y,xy}(x)$.*

Вторая глава, на наш взгляд, названа автором не вполне удачно, более адекватным было бы название «*Экспериментально-аналитический метод определения параметров механики разрушения в пошагово-наращиваемых трещинах с применением ЭСИ*» или что-то в этом роде. В этой главе представлены следующие научно-методические разработки автора 1 - специализированные спекл-интерферометры для регистрации полей тангенциальных перемещений методом ЭСИ; 2 - методика определения K_I и T-напряжений на основе обработки картин тангенциальных перемещений; 3 - оценка точности методики на основе численного моделирования и экспериментального решения тестовых задач.

Отметим, что разделы главы, связанные с разработкой используемых методических подходов и специализированного оборудования, свидетельствуют о высокой квалификации автора в области проведения экспериментов с применением ЭСИ.

Предложенную методику определения параметров механики разрушения K_I и T-напряжений не следует рассматривать как существенное развитие известных подходов, основанных на решении задачи определения одного (K_I) или нескольких параметров механики разрушения на основе математической обработки интерференционных картин. С другой стороны, так как целью автора является создание способа определения K_I и T-напряжений применительно к анализу процесса накопления повреждений, связанного с необходимостью исследования значительных массивов образцов, предложенный автором подход можно считать близким к оптимальному.

В третьей главе ставится задача разработки методики количественного описания процесса накопления повреждений при малоцикловом нагружении. Рассматриваемый автором подход базируется на получении экспериментальных данных, позволяющих количественным образом описать влияние изменения коэффициента асимметрии и размаха напряжений цикла на процесс накопления повреждений в окрестности сквозного отверстия при малоцикловом нагружении при отсутствии и наличии поля остаточных напряжений.

Эта задача решается на основе предлагаемой автором концепции, заключающейся в следующем: повреждения зоны концентрации напряжений (отверстия), накопленные в процессе усталостного нагружения, можно оценить путём анализа эволюции параметров механики разрушения (K_I и T), которые получены для надрезов-трещин, исходящих от границы сквозного отверстия в образце на различных этапах циклического нагружения. Как при наличии ОН (остаточного напряжения), возникшего вследствие дорнирования отверстия, так при отсутствии исходного поля ОН, параметры K_I и T рассматриваются как индикаторы, позволяющие оценить степень

повреждённости материала, обусловленной накоплением усталостных повреждений. На основе результатов серии экспериментальных исследований установлено, что на основе нормализованных зависимостей величин K_I для первой трещины от количества циклов нагружения можно оценить скорости процесса накопления повреждений. Предложена эмпирическая зависимость, позволяющая на основе результатов испытаний образцов оценить повреждённость для различных величин коэффициента асимметрии цикла и амплитуды напряжений.

В качестве замечания по главе следует отметить, что сделанные автором на основе численного моделирования и экспериментального исследования тестовых задач выводы автора о том, что погрешность результатов определения K_I и T не превышает 5%, можно отнести только к конкретным рассмотренным диссертантом примерам, не нельзя распространить на методику в целом. Очевидно, что в зависимости от геометрических параметров исследуемых объектов и особенностей распределения остаточных (начальных) напряжений-деформаций следует предусмотреть дополнительную оценку точности результатов.

В четвёртой главе рассмотрены подходы к исследованию эволюции остаточных напряжений окрестности упрочнённых отверстий, обусловленной малоцикловым нагружением.

Автором используются 2 подхода: метод выходящей из упрочнённого отверстия трещины – индикатора ОН и метод, названный в работе «метод сверления вторичного отверстия».

При использовании 1-го из указанных методов автором получены зависимости, которые отражают исходный уровень значений КИН \tilde{K}_I^{OH} на 3-х различных расстояниях от контура отверстия при различных уровнях малоциклового нагружения. По полученным зависимостям $\tilde{K}_I^{OH}(N)$ на основе

соотношения (4.2) - $\sigma_2^{OH} = \frac{K_I^{OHn}}{\sqrt{2\pi r}}$ выполняется расчёт распределений главной компоненты остаточных напряжений σ_2^{OH} от длины трещины – индикатора.

Второй подход представляет собой развитие классического метода сверления отверстия, заключающееся в расчёте остаточных напряжений в окрестности упрочненного отверстия на основе результатов экспериментальной регистрации деформационного отклика, получаемого при рассверливании исходного отверстия («сверлении вторичного отверстия»). Так как необходимым условием высокой точности получаемых результатов может быть относительно малое приращение диаметра отверстия, очевидно, что такой подход требует высокой чувствительности способа измерений деформационного отклика. Именно метод ЭСИ в сочетании с разработанной диссертантом аппаратурой идеально соответствует указанным требованиям.

С использованием рассмотренных в диссертации методик получены функции накопления повреждений в окрестности упрочненного отверстия. При этом автором указывается, что использованные подходы дают близкие результаты.

Отметим, что использование для расчёта распределения остаточных напряжений в зоне упрочнённого отверстия $\sigma_2^{\text{ОН}}$ на основе величин $\tilde{K}_1^{\text{ОН}}$ с использованием асимптотического соотношения (4.2) не вполне корректно. Строго говоря, расчёт ОН на основе экспериментально полученной зависимости $\tilde{K}_1^{\text{ОН}}(l)$ требует решения уравнения типа Вольтерра 1-го рода. Таким образом, полученные таким результаты следует рассматривать лишь только как приближённые оценки.

В этом смысле предпочтение следует отдать результатов, полученным методом сверления вторичного отверстия.

Пятая глава посвящена разработке методик и исследованиям эволюции остаточных напряжений в окрестности сварного соединения алюминиевых пластин и анализу их эволюции при малоцикловом нагружении. Методические подходы, применяемые в рамках решения поставленной задачи близки к используемым в предыдущей главе. При этом принципиально важным обстоятельством является установленная автором неоднородность распределения ОН по толщине образца, в связи с чем при проведении исследований принимается, что НДС можно интерпретировать

как сумму мембранных, так и изгибных компонент. Это потребовало разработки специального оборудования, обеспечивающего возможность регистрации деформационного отклика с двух противоположных поверхностей образцов. Для проведения исследований используются два различных подхода: 1-ый - метод сверления единственного отверстия в зоне сварного шва и последующих одновременных измерений деформационного отклика на противоположных сторонах пластины, 2 - ой – метод ПНДТ, при применении которого реализуются 2 шага наращивания трещины, причём на первом шаге трещина полностью разрезает сварной шов. По результатам проведенных экспериментов получено качественное описание эволюции главных компонент остаточных напряжений в окрестности сварных соединений алюминиевых пластин при малоцикловом нагружении.

В качестве замечания следует отметить, что принятые для оценки ОН основаны на решениях задач о круговых отверстиях в пластинах, полученных при однородных распределениях мембранных и изгибных напряжений в зоне отверстия. В рассмотренном случае отверстие – индикатор ОН расположено у границы шва, вследствие чего указанное условие является не может строго выполняться. С другой стороны, по получаемым методом ЭСИ картинам деформационного отклика можно оценить порядок указанного несоответствия используемой для определения напряжений модели.

Анализ материалов диссертации С.И. Елеонского позволяет сделать вывод, что в ней содержится ряд научно-методических разработок, имеющих несомненную **научную новизну**, среди которых, в первую очередь следует отметить:

- методику определения величин КИН K_I и T -напряжений на основе полей тангенциальных перемещений берегов надреза-трещины;
- действующие макеты специализированных спекл-интерферометров для регистрации полей тангенциальных перемещений методом ЭСИ;
- установленные автором закономерности зависимостей связи между параметрами механики разрушения (K_I и T) специально созданных трещин,

исходящих от контура отверстия, и коэффициентами асимметрии и размаха напряжений цикла при малоцикловом нагружении прямоугольных образцов с упрочнённым центральным отверстием;

– методику оценки функции накопления повреждений на основе анализа эволюции параметров механики разрушения (K_I и T) для узкого надреза при малоцикловом нагружении;

– установленные закономерности эволюции остаточных напряжений в окрестности упрочнённых отверстий при малоцикловом нагружении.

Содержание диссертационной работы, ее структура, использование при разработке основных положений диссертации значительного количества литературных источников в соответствующей области науки, наряду с выполненным предложенными автором подходами к анализу процессов накопления повреждения и эволюции ОН при малоцикловом нагружении и целенаправленными экспериментальными исследованиями с применением современного и наиболее перспективного метода экспериментального анализа НДС свидетельствуют о высокой научной квалификации автора, как в области теоретических основ механики деформированного твердого тела и механики разрушения, так и в области методов испытаний материалов. Это позволяет сделать вывод о **достоверности основных положений и выводов** работы.

Все выполненные в рамках диссертации научно-методические разработки, наряду с выполненным совершенствованием экспериментального оборудования проводились с целью решения **важной практической задачи** – получения уточнённой оценки функции накопления повреждений в зонах упрочнённых отверстий.

Указанные выше замечания по материалам диссертации носят частный характер и не могут повлиять на **общую положительную оценку** рассматриваемой работы. Их следует учесть при дальнейшем развитии разрабатываемой тематики.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в публикациях автора. **Автореферат** соответствует содержанию диссертации.

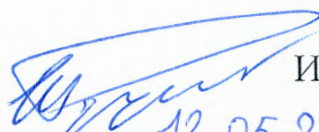
ОБЩЕЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

Оценивая диссертационную работу С.И. Елеонского в целом, можно сделать вывод, что в ней разработаны серия методик и специализированное экспериментальное оборудование, с использованием которых получены новые научные результаты, позволяющие проводить оценку функции накопления повреждений в упрочнённых отверстиях при малоцикловом нагружении в зависимости от коэффициентов асимметрии и размаха напряжений.

Считаю, что работа «Исследование процесса накопления повреждений и эволюции остаточных напряжений по данным измерений локального деформационного отклика методом спекл-интерферометрии» представляет собой законченное научное исследование, которое по актуальности, научному уровню и практической значимости полученных результатов соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, установленными п.9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842. Автор диссертации, **Елеонский Святослав Игоревич**, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Официальный оппонент:

Главный научный сотрудник Лаборатории
«Механики разрушения и живучести»
ИМАШ РАН, доктор технических наук



И.А. Разумовский
12.05.21 г.

Адрес места работы:

101000, г. Москва, М. Харитоньевский пер. д. 4, ФБГУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), тел. 8 (495)135-6298, e-mail: murza45@gmail.com

Подпись И.А. Разумовского заверяю:



 И.А. Разумовского заверяю