

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. проректора по научной работе  
ФГБОУ ВО «Московский авиационный  
институт (национальный  
исследовательский университет)»

д.т.н., профессор



Ю.А. Равикович

09 2022 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию  
Бухалова Владислава Игоревича

**«Разработка метода определения остаточных напряжений  
по спекл-интерферометрическим измерениям в окрестности  
зондирующего отверстия с учётом эффекта пластичности»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 01.02.04 «Механика деформируемого твердого тела»**

### 1. Актуальность темы диссертационного исследования

Наличие остаточных напряжений, возникающих при сварке и других технологических операциях в ответственных элементах конструкций, способствует хрупкому разрушению, растрескиванию при ползучести, коррозионному растрескиванию под напряжением и усталости, снижению механических свойств конструктивных элементов. В связи с этим разработано несколько методов, диагностики остаточных напряжений. Среди них наиболее распространённым является слабopовреждающий метод зондирующего отверстия в сочетании с тензометрической или лазерно-интерферометрической регистрацией перемещений, либо деформаций в его окрестности. Лежащие в основе этого метода соотношения между измеряемыми перемещениями поверхности тела и внутренними напряжениями, полученные на основе решений

уравнений теории упругости, закреплены в отечественном и зарубежных стандартах. Однако, вследствие того, что само отверстие является концентратором напряжений, сочетание его воздействия с остаточными напряжениями зачастую приводит к суммарным напряжениям на уровне предела упругости, связанного с этим нарушения линейной зависимости между измеряемыми перемещениями и напряжениями и появления, так называемой, "ошибки пластичности", растущей с увеличением остаточных напряжений. Учёту этой ошибки при измерениях по тангенциальным перемещениям в последнее время посвящен ряд работ. Однако по диагностике остаточных напряжений, использующей в качестве информационного параметра перемещения по нормали к поверхности образца в окрестности зондирующего отверстия и учитывающей эффект пластичности, такие исследования ранее не проводились. Именно на таком способе диагностики остаточных напряжений (правда, только по упругим перемещениям), имеющем ряд преимуществ перед измерениями по тангенциальным перемещениям, основана широко используемая в научных исследованиях и промышленности стандартизированная спекл-интерферометрическая измерительная система ЛИМОН, разработанная в ИПМех РАН. Отсюда следует актуальность темы диссертации В.И. Бухалова, направленной на совершенствование данного измерительного метода для диагностики высоких остаточных напряжений с учётом эффекта пластичности.

## **2. Краткий анализ содержания работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 150 страниц. Список литературы содержит 143 наименования.

Во **введении** приведён развёрнутый обзор литературных источников по методу отверстия как одного из наиболее широко применяемых методов диагностики остаточных напряжений, выделена роль советских и российских учёных в его развитии, отмечена цель работы и её актуальность, сформулированы основные задачи исследования, научная новизна и практическое значение работы,

применённые в ней методы исследования, приведены ссылки на основные публикации соискателя, указан личный вклад соискателя.

**Первая глава** носит методический характер. В ней рассмотрены, лежащие в основе диагностики остаточных напряжений с помощью зондирующего отверстия, решения двумерной и трехмерной задач Кирша в упругой и упругопластической постановках. В качестве одного из интересных результатов, отмеченных автором, здесь следует отметить совпадение выражений для нормальных перемещений в решениях задач Кирша в двумерной и трехмерной постановках, в то время как по тангенциальным перемещениям отличия весьма заметны. Результаты аналитических решений упругих задач Кирша использованы для верификации численного моделирования решения аналогичных задач в упругопластической постановке.

Во **второй главе** представлены результаты по численному моделированию проявлений остаточных напряжений в нормальных перемещениях поверхности тела, равномерно нагруженного по толщине, при несквозном отверстии различной глубины. Выполнены постановки задач и проведены многовариантные расчёты по численным решениям соответствующих трехмерных задач теории упругости и упругопластичности с выделением значений нормальных перемещений поверхности на краю отверстия при характерных значениях действующего напряжения и глубины зондирующего отверстия, проведено сравнение их результатов. В случае упругой модели собственные результаты численных решений сравниваются также с аналогичными результатами других авторов. Сделаны выводы о связях нормальных перемещений с внутренними напряжениями при учете эффекта пластичности. Важным результатом здесь является обнаружение возможности использования известной аппроксимационной формулы для экспресс-оценки остаточных напряжений по числу интерференционных полос вдоль одного из главных направлений напряжённо-деформированного состояния образца, выведенной для упругой связи между регистрируемыми нормальными перемещениями в окрестности отверстия и одним из главных остаточных

напряжений, путём некоторой коррекции значений аппроксимирующих констант.

В **третьей главе** рассмотрено аналитическое решение осесимметричных задач для образцов цилиндрической формы, подверженных заданным напряжениям в своей плоскости, либо полученных посадкой с натягом упругого кольца на диск. При определенных геометрических и механических параметрах образца и параметрах нагружения в таких образцах возникают круговые и кольцевые пластические области. Рассмотрено образование таких областей на примерах задач Ламе и Гадолина в упругопластических постановках и влияние на них параметров внутреннего напряженного состояния. Определены зависимости между внутренними напряжениями и нормальными перемещениями поверхности составных дисковых образцов. С использованием решений этих задач спроектированы образцы для экспериментальных исследований с заданным уровнем и распределением напряжений.

В **четвертой главе** рассмотрена формулировка и реализация нового итерационного численно-аналитического метода решения упругопластических задач, названного методом уточняемого положения упругопластической границы. Метод основан на аналитическом представлении для напряжений в пластической области и итерационной процедуре численного решения в упругой области с уточнением на каждом шаге положения границы между упругой и пластическими областями, на которой ставятся граничные условия для следующего шага решения упругой задачи. Форма и текущее положение упругопластической границы определяются по условиям непрерывности напряжений на границе между упругой и пластической областями. Верификация итерационной процедуры выполнена на аналитических решениях модельных упругопластических задач Ламе и Галина. Приведена также численно-аналитическая процедура решения задачи Кирша в упругопластической постановке.

В **пятой главе** рассмотрена подготовка и проведение экспериментов по применению упругопластической модели в методе отверстия. В качестве

экспериментальных образцов с заданными уровнями и распределением остаточных напряжений использовались составные образцы, полученные с помощью температурной посадки стальных колец на диски. Были изготовлены две группы образцов. В первой группе уровень контактного давления обеспечивал упругое состояние вкладыша. Во второй группе создаваемое контактное давление достигало предела текучести материала вкладыша. Изложены результаты экспериментальных исследований для образцов обоих типов. Проведено их сопоставление с результатами численного решения соответствующих упругопластических задач. Выполнена оценка погрешности упругой модели. Рассмотрены также возможности залечивания внутренних дефектов в упругопластическом поле сжимающих напряжений на моделях цилиндров с внутренней кольцевой полостью и со сквозной кольцевой вырезкой, находящихся под действием внешнего давления.

В **заключении** сформулированы основные научные результаты диссертации.

### **3. Оценка научной значимости результатов**

В диссертации впервые разработана методика диагностики остаточных напряжений по нормальным перемещениям с применением метода несквозного отверстия, учитывающая пластическое состояние материала. Полученные решения упругопластических задач позволяют оценить и устранить имеющиеся погрешности метода отверстия, вызванные влиянием пластичности в окрестности зондирующего отверстия. Тем самым, метод диагностики остаточных напряжений с помощью зондирующего отверстия обобщен на диапазон остаточных напряжений вплоть до уровней, приближающихся к пределу текучести материала исследуемого тела.

Разработана быстросходящаяся итерационная процедура решения упругопластических задач с уточняемым положением границы между упругой и пластической зонами. В предложенном подходе отсутствуют ограничения по соотношению внешних нагрузок и по возможности применения к модели идеального упругопластического тела.

Проведены численные эксперименты, показывающие возможность залечивания внутренних дефектов в поле сжимающих напряжений с использованием пластических свойств материалов.

#### **4. Оценка практической значимости результатов**

Полученные в диссертации результаты обеспечивают совершенствование широко используемого в технической диагностике остаточных напряжений метода зондирующего отверстия, состоящее в распространении диапазона корректно определяемых остаточных напряжений вплоть до предела текучести материала образца, что имеет важное значение, так как именно высокие остаточные напряжения являются, как правило, наиболее опасными для конструкций. Определенное практическое значение имеют также результаты по возможности залечивания внутренних дефектов в поле сжимающих напряжений с использованием пластических свойств материалов.

#### **5. Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов обеспечивается сравнением разработанных численных подходов и полученных с их помощью результатов с известными аналитическими решениями упругопластических задач и результатами экспериментальных исследований, корректным использованием уравнений теории упругости и пластичности в постановках краевых задач и их решениях.

По работе имеются следующие замечания:

1. При численном моделировании задачи определения остаточных напряжений с применением метода несквозного отверстия и других задач используются области с фиксированным отношением радиуса отверстия к наружным размерам выделенной области тела. Не приводится анализ влияния размеров области численного интегрирования на получаемые результаты.

2. Представляется не совсем корректным сравнение результатов упругопластического решения задачи о растяжении пластины с несквозным отверстием и результатов решения аналогичной задачи в упругой постановке, но для полупространства.

3. Все рассмотрения проводятся для идеального упругопластического тела. Отсутствуют оценки влияния на результаты деформационного упрочнения.

4. При сравнении упругопластического решения задачи о растяжении пластины с несквозным отверстием с известными результатами, полученными в рамках упругой модели, остался неохваченным случай с минимальным отношением глубины к радиусу отверстия.

5. Схематичное представление на рис. 4.8.1,б расположения границ между упругой и пластической зонами в первом и во втором приближениях итерационной процедуры решения задачи Кирша в упругопластической постановке не соответствует результатом численного решения, приведённым на рис.4.8.2. Сам рис.4.8.2 в подрисуночной подписи повторно обозначен как на рис. 4.8.1.

6. Рис. 1.2.3,в показывает неравномерное распределение касательных напряжений в окрестности отверстия, соответствующее решению задачи Кирша. В то же время, в комментариях к Табл. 1.2.1-1.2.2, в которых приведены некоторые сравнения нормальных напряжений, получающихся из численного и аналитического решений этой задачи, говорится, что сравнение по касательным напряжениям не приводится, так как для касательных напряжений были получены нулевые значения.

7. В §1.4 речь идёт о численном решении трехмерной задачи о растяжении пластины со сквозным отверстием. Однако в подписи к Рис. 1.4.2 этого параграфа значится: "Расчетная сеточная модель в окрестности несквозного отверстия...".

8. По тексту встречаются несогласованные окончания в словах, например, на с.52 во фразе: «дно отверстия считается свободной от нормальной и тангенциальной компонент напряжений», на с.83 во фразе: «рассмотрен ряд решения упругопластических задач» и в некоторых других местах.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку работы в целом. Диссертационная работа В.И. Бухалова представляет собой законченное научное исследование, выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты имеют важное научное и прикладное значение.

Результаты диссертационного исследования докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в нескольких изданиях из списка ВАК. Автореферат правильно и в достаточной полноте отражает содержание диссертации. Работа соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а ее автор - Бухалов Владислав Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв подготовлен доктором физико-математических наук (01.02.04), доцентом кафедры 902 «Соппротивление материалов, динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО "Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)" Григорием Валерьевичем Федотенковым.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры 902 «Соппротивление материалов, динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО «НИУ «МАИ» 31 августа 2022 г. (голосование единогласное), протокол №1.

Профессор кафедры 902 «Соппротивление материалов,  
динамика и прочность машин» ФГБОУ ВО  
"Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)",  
доцент, доктор физико-математических наук

Г.В. Федотенков

Адрес: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, МАИ, каф. 902.

Email: greghome@mail.ru

Телефон: +7-916-459-83-63