

ОТЗЫВ

официального оппонента Хроматова Василия Ефимовича
на диссертационную работу Бухалова Владислава Игоревича
**«Разработка метода определения остаточных напряжений
по спекл-интерферометрическим измерениям в окрестности
зондирующего отверстия с учетом эффекта пластичности»**,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Бухалова Владислава Игоревича посвящена изучению остаточных напряжений, возникающих в сварных конструкциях газо- и нефтепроводного транспорта, в изделиях металлургии, авиационной и космической техники, приводящих к образованию трещин и к серьёзным техногенным авариям. К настоящему времени разработано несколько методик измерений микроперемещений и деформаций, по которым определяются остаточные напряжения. Наиболее распространённым среди них является метод зондирующего отверстия в сочетании с тензометрической или лазерно-интерферометрической регистрацией перемещений, либо деформаций в его окрестности. Для создания методики определения остаточных напряжений по этим измерениям потребовалось решение целого ряда прямых и обратных задач двумерной и трехмерной теории упругости. Однако, полученные зависимости имеют существенные погрешности в наиболее опасном диапазоне остаточных напряжений вблизи предела текучести материала исследуемого тела, в котором сочетание остаточных напряжений с концентрацией напряжений от самого зондирующего отверстия выводит напряженно-деформированное состояние за пределы линейной упругости, вследствие чего в окрестности зондирующего отверстия возникают зоны пластичности.

Актуальность данной работы состоит в разработке методики определения остаточных напряжений по спекл-интерферометрическим измерениям в окрестности зондирующего отверстия с учётом эффекта пластичности.

Содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 143 наименований. Работа содержит 150 страниц, 47 рисунков.

Введение содержит обоснование актуальности, цель и задачи работы, объект и предмет исследования, характеристику диссертационной работы.

В первой главе даётся общее представление о методе зондирующего отверстия, которое используется при исследовании остаточных напряжений с помощью измерения нормальных перемещений тела в окрестности отверстия. Первоначально это представление основывалось на решении задачи Кирша о пластине с отверстием. Аналитическое решение задачи Кирша было использовано для отработки и верификации численного моделирования, которое выполнялось в ANSYS Workbench с использованием расчетного модуля Static Structural. Результаты численных решений показали хорошую сходимость к результатам аналитических решений с отличиями менее 5% для плоской задачи и менее 10% - для трехмерной задачи. Полученные результаты позволили перейти к численной упругопластической модели растяжения пластины с несквозным отверстием, для которой отсутствует точное аналитическое решение.

Во второй главе рассмотрено численное моделирование проявления остаточных напряжений при несквозном отверстии. Решение задачи проводилось в упругой и упругопластической постановках при характерных значениях нагрузки в 40% и 90% от предела текучести материала пластины. По результатам расчетов построены зависимости перемещений точек поверхности пластины от величины расстояния до отверстия при разных нагрузках и глубинах отверстия. Установлено, что при использовании упругопластической модели уровень перемещений на краю отверстия при нагрузке в 40% от предела текучести

почти не отличается от уровня упругих перемещений, тогда как при нагрузке, близкой к пределу текучести, обнаружены существенные отличия в перемещениях по упругой и упругопластической моделям, правда, только в направлении, перпендикулярном действию нагрузки. На основании этих и аналогичных результатов, полученных при разных глубинах зондирующего отверстия, сделаны выводы о связях нормального перемещения с напряжениями при учете эффекта пластичности. Важным результатом здесь является то, что, несмотря на наличие зон пластичности, обнаружена возможность использования известной аппроксимационной формулы, выведенной для упругого состояния, обеспечивающей расчёт одного из главных остаточных напряжений по числу полос спекл-интерферограммы нормальных перемещений по направлению действия этого напряжения.

В третьей главе рассмотрено аналитическое исследование осесимметричных упругопластических напряженно-деформированных состояний в кольцевых образцах, подверженных заданным напряжениям в своей плоскости (задача Ламэ), либо полученных посадкой с натягом упругого кольца на диск (задача Гадолина). Получены выражения для радиального и окружного напряжений в пластической зоне, определяется радиус пластической зоны. Рассмотрена задача о растяжении пластины с отверстием при условии полного охвата отверстия пластической зоной. Представлены результаты расчетов по определению границ зон пластичности по точному и численному решениям.

В четвертой главе предложен метод решения упругопластических задач, состоящий в аналитическом представлении для решения в пластической зоне, нахождении её границы в первом приближении из упругого решения и уточнении положения этой границы из последующих приближений итерационной процедуры решения упругих задач для областей с границами, частично проходящими по уточняемой границе пластической зоны. Форма и положение упругопластической границы определяется при этом по условиям непрерывности напряжений в упругой и пластической областях. Для модельных осесим-

метричных задач представлены графики сходимости итерационных значений радиусов пластической зоны при различных значениях нагрузки. Также была рассмотрена упругопластическая задача об одноосном растяжении пластины с отверстием. Получены результаты по сближению приближенной границы пластической зоны к положению, найденному из численного решения этой задачи, показывающие, что уже на четвертой итерации наблюдается совпадение приближенной и численной границ.

В пятой главе рассмотрены проведение и результаты экспериментов по проверке и использованию упругопластической модели в методе отверстия. В качестве экспериментальных были сконструированы и изготовлены с помощью температурной посадки дисковые образцы с заданными уровнями и распределением остаточных напряжений. Проведено сопоставление результатов экспериментов с результатами численного решения соответствующих упругопластических задач. Выполнена оценка погрешности упругой модели для конкретной серии образцов. Также рассмотрены примеры залечивания внутренних дефектов в упругопластическом поле сжимающих напряжений.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

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.

Научная новизна диссертации

Разработана методика диагностики остаточных напряжений с применением метода несквозного отверстия, учитывающая пластическое состояние материала. 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 уточняемыми положениями упругопластической границы. В предложенном подходе отсутствуют ограничения по соотношению внешних нагрузок и возможности применения к модели идеального упругопластического тела.

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

Практическая значимость

Полученные в диссертации результаты направлены на совершенствование широко используемого в технической диагностике остаточных напряжений метода зондирующего отверстия. Полученные решения упругопластических задач позволяют оценить и устранить имеющиеся погрешности метода отверстия, вызванные влиянием пластичности в окрестности зондирующего отверстия. Определенное практическое значение имеют также результаты по возможности залечивания внутренних дефектов в поле сжимающих напряжений с использованием пластических свойств материалов.

Личный вклад автора

Автором диссертации проведено построение численных и аналитических решений упругопластических задач, реализация итерационной процедуры решения плоских упругопластических задач с уточняемым положением упругопластической границы, исследование её сходимости, верификация процедуры на модельных задачах, численное моделирование решений задач о залечивании внутренних дефектов в поле сжимающих напряжений с использованием пластических свойств материалов.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в 13-ти научных работах. Из них 5 статей в журналах из Перечня ВАК РФ; в журналах, цитируемых МБД SCOPUS, на 7 международных научных конференциях, включая в том числе и на XII всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики –Уфа 2019 г.

Замечания по диссертации

1. В работе приводится ссылка на разработанный ранее алгоритм решения задачи об исследовании напряжённо-деформированного состояния пластин, но нигде нет описания этого алгоритма, блок схемы решения задачи, какие математические пакеты и программные комплексы были использованы.

2. В работе приведены решения модельных задач для пластин с отверстиями, но не указано в каких объектах машиностроения и энергетического оборудования могут быть рекомендованы полученные в ходе исследований результаты.

3. При построении итерационной процедуры решения упругопластических задач с уточняемым положением границы между упругой и пластической областями и в других разделах работы используется единственный критерий текучести Губера-Мизеса. В диссертации отсутствует обоснование выбора данного критерия текучести для рассмотренных в ней задач.

4. В изложении расчётных результатов по залечиванию пустотного дефекта в упругопластическом поле сжимающих напряжений сообщается не только о почти полном заполнении полости, но и о возникновении значительных сжимающих напряжений в области нового контакта. При этом утверждается, что, «ввиду необратимости пластической деформации, при исчезновении причины соединения сторон полости, т.е. остаточного или наведенного напряженного состояния, размыкания соединения в залеченной полости не произойдет». Данные сильные утверждения требуют экспериментального подтверждения, о которых в диссертации не сообщается.

Отметим, что сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Бухалова Владислава Игоревича.

Заключение

В целом, считаю, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, посвященной актуальной проблеме. Работа отвечает 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.

Профессор ФГБОУ ВО Национальный
исследовательский университет
"Московский Энергетический институт",
профессор кафедры "Робототехника,
мехатроника, динамика и прочность
машин", канд. техн. наук

Специальность 01.02.06 – Динамика,
прочность машин, приборов и аппаратуры.

Адрес места работы: 111250, г. Москва, улица Красноказарменная, д. 4
тел. 8 (495) 362-77-00; e-mail: KhromatovVY@mpei.ru

Подпись профессора Хроматова Василии Ефимовича заверяю

Хроматов Василий Ефимович
Подпись
удостоверяю
начальник управления по
работе с персоналом

Н.Г. Савин



(Фамилия И.О.)

(должность)

(подпись)