

ОТЗЫВ

официального оппонента – И. А. Разумовского на диссертацию А. С. Плотникова «Определение неоднородных полей остаточных напряжений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. – механика деформируемого твердого тела

Неотъемлемой составляющей комплексного исследования, связанного с оценкой прочности и остаточного ресурса высоконагруженных конструкций современной техники, работающих в экстремальных условиях, является анализ остаточных технологических напряжений (ОН). При этом расчётное моделирование ОН является одной из наиболее сложных задач, так как всегда связана с необходимостью учёта многофакторных процессов, происходящих в материале при разнообразных механических и тепловых воздействиях. Здесь следует отметить, что проблемы численного моделирования ОН в настоящее время, в первую очередь, обусловлены отсутствием надёжной информации о параметрах физико-механических процессов и структурных преобразований материала, определяющих особенности образования ОН. Поэтому, несмотря на значительные достижения последних десятилетий в области разработки расчётных методов исследования ОН на основе МКЭ, верификация расчётных программ, с необходимостью требует экспериментального подтверждения адекватности используемых при расчёте моделей рассматриваемых процессов образования ОН.

Разнообразие типов исследуемых объектов (стержни, пластины, оболочки, пространственные детали) и видов распределения ОН (одномерные, двумерные, трёхмерные) обусловило необходимость разработки ряда различных методов их экспериментального (экспериментально-расчётного) анализа. Однако, среди значительного количества научно-методических публикаций в рассматриваемой области (их количество исчисляется сотнями и тысячами) лишь буквально единицы связаны с исследованиями неоднородных распределения ОН по глубине пространственных деталей.

Указанные обстоятельства подтверждают актуальность темы диссертационной работы А.С.Плотникова, в рамках которой автором

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«24» 01 2024

разработана методика исследования неоднородных по глубине пространственных объектов распределений ОН на основе математической обработки экспериментальной информации, получаемой способом пошагового сверления отверстия. Кроме этого, основного направления исследований, в диссертации рассмотрена также методический подход к анализу ОН в плоских деталях, линейно изменяющихся вдоль одного или двух направлений.

Диссертационная работа А.С.Плотникова состоит из введения, 4-х глав и заключения, списка литературы и 2-х приложений, включающих листинги программ, разработанных автором для практической реализации разработанных методик.

Во введении автором обоснована актуальность темы диссертации и сформулированы основные задачи исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит аналитический обзор публикаций в области методов экспериментального (экспериментально-расчётного) исследования ОН. В обзоре изложены основы принципиально различных подходов к анализу ОН: 1 - так называемых разрушающих методов, связанных с механическим освобождением ОН на поверхности деталей (методы Каллакуцкого, Закса, Давиденкова, последовательного стачивания, сверления отверстия и др.); 2 - неразрушающих методов, связанных с оценкой измерения физических характеристик материала, обусловленных наличием ОН (методы рентгеновской дифракции и дифракции нейтронов, магнитно-электрические методы, акустические методы). Определённое внимание уделено анализу возможностей методов экспериментальной регистрации деформационных откликов, возникающих вследствие резки деталей и являющихся исходной информацией для последующего расчёта ОН (методы электротензометрии, голографической интерферометрии, электронной цифровой спекл-интерферометрии – ЭСИ, фазовых сдвигов, корреляции цифровых изображений – КЦИ).

В завершающем разделе 1-й главы автор делает, вполне обоснованный вывод о том, что для определения неоднородных по глубине детали полей ОН

«наиболее целесообразным является совместная реализация пошагового сверления отверстий...и оптических методов измерения компонент вектора перемещений: метода ЭСИ и корреляции цифровых изображений» (КЦИ). При этом автор справедливо указывает на то, что метод вычисления неоднородных ОН, предлагаемый стандартом ASTM E837 по результатам измерения компонент тензора деформаций имеет существенные недостатки.

Замечания по 1-ой главе.

1. В обзоре не упомянуты результаты разработок, связанных исследованием неоднородных полей ОН в плоских деталях с применением метода трещины-индикатора ОН и метода сверления «большого» отверстия (хотя в списке литературы упоминания о соответствующих публикациях имеются).

2. Автору следовало бы на численном примере показать, что предлагаемый стандартом ASTM E837 E837 по результатам измерения компонент тензора деформаций имеет существенные недостатки, которые могут привести к недопустимым величинам погрешностей результатов.

Во второй главе изложены теоретические основы экспериментально-расчётного метода определения неоднородных полей ОН в плоских деталях, линейно изменяющихся вдоль одного или двух направлений. Методика является определённым развитием классического метода сверления отверстия, используемого для анализа однородных полей ОН. Автором предложены аналитические соотношения, включающие дополнительные базовые функции, соответствующие производным от компонент тензора напряжений. Для определения и визуализации указанных функций используется численное моделирование с использованием метода конечных элементов. На основе анализа сгенерированных интерферограмм тангенциальных перемещений в зоне отверстия-индикатора ОН с заданным градиентом ОН делаются общие выводы о влиянии градиентов напряжений на качественное изменение интерференционных картин.

Замечания по 2-ой главе.

1. Следовало бы рассмотренные результаты расчётов рассмотренной модельной задачи оформить в безразмерном виде.

2. Работа бы существенно выиграла, если бы автор привёл пример практического применения разработанной методики для уточнённого анализа ОН, например, на основе обработки интерференционных картин, приведенных на рис. 2.1.

Третья глава диссертации посвящена разработке методики экспериментально-расчётного определения неоднородных по глубине детали (полупространства) распределений ОН. Автором предложен оригинальный подход к решению рассматриваемой задачи, относящийся к классу обратных задач теории упругости, включающий: выбор базовых функций для представления ядер интегральных уравнений Вольтерры 1-го рода, алгоритм их вычисления, его программную реализацию, позволяющую проводить расчёты распределений ОН на основе математической обработки результатов измерений полей тангенциальных перемещений поверхности, возникающих при последовательно увеличивающейся глубине отверстия. На примере исследования тестовой модели, в которой реализуется кусочно-линейное распределение ОН, автором проведено тестирование разработанной методики, на основе анализа результатов которого делаются выводы о погрешностях получаемых решений и практические рекомендации. Выбор в качестве способа тестирования методики и программы «численного эксперимента» следует признать весьма обоснованным, так как именно такой подход позволяет корректно оценить точность собственно методики, алгоритма и их программной реализации.

Выполненную в рамках 3-ей главы диссертации разработку следует признать наиболее значимым научным достижением автора, которое может найти эффективное применение на практике.

Замечания по 3-ей главе.

1. В указанной в работе процедуре предлагается в качестве индикатора ОН использовать отверстие радиусом 1 мм «формировать шагами по глубине 0,2 мм». *Правильнее было при выборе шага углубления отверстия*

руководствоваться величиной получаемого при этом приращения деформационного отклика, в связи с чем, величины шагов буду переменными.

2. На основе выполненного анализа точности результатов исследования тестовой задачи делается вполне обоснованный вывод о том, что наибольшая компонента тензора ОН «достаточно точно восстанавливается вплоть до глубины пять радиусов отверстия», что связано с быстрым затуханием функций, определяющих деформационный отклик на поверхности детали. *Заметим, что для повышения точности результатов и, соответственно, возможность проведения исследований ОН на любой глубине детали достаточно на при углублении отверстия увеличивать его диаметр (как это сделано в одной из публикаций).*

Четвёртая глава диссертации посвящена оценке области применимости соотношений теории упругости для расчёта ОН по данным деформационных откликов, получаемых при использовании метода сверления последовательно углубляемого отверстия. На основе результатов расчётов модельной задачи упругопластическом полупространстве было показано, что диапазон применимости линейных соотношений для определения интенсивности ОН лежит в пределах 0,6-0,7 от предела текучести материала, а при определении главных напряжений относительная погрешность не превышает 11%

Анализ материалов диссертации А.С.Плотникова в целом позволяет сделать вывод, что в ней содержится ряд научно-методических разработок, имеющих несомненные признаки **научной новизны**. Из них, в первую очередь следует отметить:

- методический подход, алгоритм и программу решения обратной задачи механики деформируемого твёрдого тела - определения неоднородных по глубине полупространства распределений ОН;
- тестирование разработанной методики и программы, общие выводы о погрешностях получаемых результатов и обоснованные рекомендации по их практическому применению;
- результаты расчётных оценок применимости соотношений теории упругости для расчёта ОН по данным деформационных откликов, получаемых

при использовании метода сверления последовательно углубляемого отверстия, и диапазонов погрешностей получаемых результатов.

Содержание диссертационной работы А.С.Плотникова, её структура, а также стиль изложения характеризуют высокую научную квалификацию автора. При выполнении диссертации автор продемонстрировал хорошую подготовку в области математической теории упругости, экспериментальных и численных методов решения задач механики деформируемого твёрдого тела, активное владение современными компьютерными технологиями. Это позволяет вывод **о достоверности основных положений и выводов работы.**

Разработанная и оттестированная методика и соответствующая расчётная программы, должна найти **эффективное практическое применение** как надёжный метод исследования неоднородных полей ОН в пространственных деталях.

Дальнейшее развитие методики должно быть направлено на реализацию изложенного подхода в виде программного комплекса, реализующего полную цепочку исследования: от получения первичных данных со средств измерений (в первую очередь, оптико-цифровым методом ЭСИ) до математической обработки результатов экспериментов в терминах ОН на основе разработанной автором методики.

Указанные выше замечания носят частный характер и не могут повлиять на **общую безусловно положительную оценку работы.**

Считаю, что диссертационная работа «Определение неоднородных полей остаточных напряжений» полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор - Александр Сергеевич Плотников заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности по специальности 1.1.8. – механика деформируемого твердого тела.

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

Рецензент согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент -

главный научный сотрудник лаборатории
механики разрушения и живучести ИМАШ РАН,
профессор каф. «Прикладная механика»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н



И. А. Разумовский
17.01.2024

e-mail: murza45@gmail.com

ФГБУН Институт машиноведения

им. А.А.Благонравова РАН

101000, Москва, М.Харитоньевский пер, 4

Подпись И. А. Разумовского заверяю

Иван Александрович Разумовский
И. А. Разумовский



С отзывом ознакомлен.
24.01.2024
[Signature]