

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Плотникова Александра Сергеевича на тему «Определение неоднородных
полей остаточных напряжений», представленную на соискание ученой
степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 –
«Механика деформируемого твердого тела»

1. Структура и оформление диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 166 наименований и содержит 178 страниц текста, включая 50 рисунков и 11 таблиц. По структуре и оформлению диссертация и автореферат диссертации соответствуют установленным требованиям.

Во *введении* раскрыты все основные составляющие диссертации (актуальность, цель, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, апробация работы, публикации, личный вклад).

В *главе 1* содержится обзор экспериментальных методов исследования остаточных напряжений в упругих телах: истории развития, применяемых способов, средств измерения и методов реконструкции. Отдельно рассмотрен класс разрушающих способов, связанных с последовательным удалением материала образца и измерением вызванной им деформации. Выделен подкласс условно-разрушающих способов «высвобождения», предназначенных для определения остаточных напряжений вблизи поверхности упругого тела, к которому относится способ сверления отверстий. Описаны методы измерения поверхностных деформаций в рамках этого способа. Отмечено, что методы реконструкции остаточных напряжений по данным измерений сводятся к некорректно поставленным задачам. При использовании тензодатчиков-розеток применяется стандарт ASTM E837, но для более перспективных по точности и объему информации методов голографической интерферометрии, электронной корреляционной спекл-интерферометрии и корреляции цифровых изображений методы реконструкции распределения по глубине компонент остаточных напряжений, лежащих в тангенциальной плоскости, (математический аппарат и его численная реализация) не опубликованы.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«23» 01 2024г.

В *главе 2* рассмотрены прямая и обратная задачи о возмущениях поля перемещений в плоскости упругой пластины, вызванных отверстием, в условиях существования градиентов нормальных напряжений в пластине без отверстия. Записывается линейное соотношение между полем возмущения перемещений в плоскости пластины и градиентами нормальных напряжений в пластине вблизи отверстия. Для определения четырех независимых функций влияния в этих соотношениях поставлены и численно решены две плоские модельные задачи с продольным и поперечным градиентами нормальных напряжений в пластине с отверстием. Оставшиеся функции влияния, связывающие поле перемещений в плоскости пластины с отверстием с нормальными напряжениями, определены задачей Кирша и уже используются в ряде известных способов неразрушающего контроля остаточных напряжений.

В *главе 3* рассмотрены прямая и обратная задачи о возмущениях поля перемещений в плоскости границы упругого полупространства, вызванных отверстием произвольной глубины в условиях существования растягивающих напряжений, параллельных границе, с неоднородным распределением по глубине. Записывается линейное соотношение между полем возмущения перемещений в плоскости границы полупространства и указанными напряжениями в слое между двумя значениями глубины отверстия. Для определения двух независимых функций влияния для каждого значения глубины отверстия в этих соотношениях поставлены и численно решены трехмерные модельные задачи для упругого полупространства с отверстием. При этом эффективно использованы специализированные осегармонические конечные элементы, сводящие задачу с осесимметричной геометрией и неосесимметричной нагрузкой к двумерной постановке. Найденные функции влияния интерполированы сплайнами. Реализована эффективная методика инкрементального расчета компонент напряжений и жесткого перемещения отверстия по данным поверхностного распределения компонент перемещений в плоскости границы на дискретном ряде глубин отверстия, использующая для решения обратной задачи регуляризацию методом наименьших квадратов. Работоспособность алгоритма протестирована численно на задаче с неоднородным распределением осевых остаточных напряжений, вызванных чистым изгибом упруго-идеально-пластической полосы, в которой инкрементально формируется отверстие и определяется изменение возмущения поля перемещений. Реконструированное по этому возмущению распределение остаточных

напряжений отличается от сформированных изгибом не более чем на 1%. Выполнена оценка чувствительности метода к снижению числа измерений поля перемещений и ошибкам измерения (шуму). Определены значения порога чувствительности метода (максимальной глубины отверстия), соответствующего точности оптических методов, при применении фильтрации данных.

В главе 4 исследуются границы применимости линейно-упругого поведения тела в рамках метода. Необходимость данного исследования для применения метода сверления отверстий обусловлена концентрацией напряжений, возможностью неупругого поведения материала и возникновением связанной с ним погрешности метода. Для этого выполнен натурный эксперимент на нагруженном алюминиевом образце при одноосном растяжении в широком диапазоне величин нагрузки. Установлено, что до напряжений, составляющих около 80% от предела текучести, величина ошибки метода не превышает 5%, но далее быстро растет. Для исследования зависимости от вида напряженного состояния выполнен численный эксперимент на двухосное нагружение тела нормальными компонентами напряжений с отношением от -1 до 1 в рамках плоского деформированного состояния с последующим формированием отверстия. Установлено, что до значений интенсивности напряжений, составляющих около 60-70% от предела текучести, зависимость от вида напряженного состояния практически отсутствует и упругое приближение гарантирует приемлемую точность метода. По мере повышения нагрузки над этим уровнем ошибка начинает существенно зависеть от вида напряженного состояния.

В заключении сформулированы выводы по работе.

2. Актуальность темы диссертации.

Условно-неразрушающий контроль остаточных напряжений способом сверления отверстий востребован в машиностроении для определения остаточного ресурса машин и конструкций, у которых завершается срок эксплуатации. Использование оптических методов измерения возмущений поверхностного поля перемещений при высверливании отверстия в теле с остаточными напряжениями приобрело особенную актуальность в последние десятилетия в связи с развитием быстродействия и памяти компьютеров, позволяющих анализировать большой объем данных. Для этого необходимы специальные алгоритмы решения обратных задач, их численная реализация, верификация, подтверждение независимым экспериментом и определение

границ применимости. В работе разрабатывается общий подход, основанный на применении функций влияния («базисных функций»), для реконструкции неравномерного распределения компонент остаточных напряжений, параллельных плоской свободной поверхности тела, вблизи нее. Рассматривается задача определения градиентов напряжений в плоскости пластины, востребованная, например, для исследования состояния сварных швов. Также рассматривается задача определения неравномерного распределения тангенциальных остаточных напряжений по глубине в приповерхностном слое, которая востребована повсеместно в машиностроении для контроля остаточных напряжений после технологических операций поверхностной обработки ответственных деталей с целью увеличения их усталостного ресурса.

3. Теоретические результаты диссертации и их научная новизна.

В качестве главных теоретических результатов работы представляются следующие. 1. Новый метод определения неоднородных по глубине остаточных напряжений, основанный на прямом нахождении функций влияния с использованием для повышения точности переопределенной системы уравнений. 2. Алгоритм/пакет программ протестирован на численной задаче упругопластического изгиба полосы, исследована точность метода в зависимости от точности измерения перемещений и объема экспериментальных данных. 3. Впервые исследован диапазон применимости упругой модели в рассматриваемом методе в виде контуров равной погрешности в плоскости главных напряжений в зависимости от отношения интенсивности остаточных напряжений к пределу текучести, что представляется важным в методе, создающем концентратор напряжений.

4. Практическая значимость результатов диссертации.

Полученные результаты являются основой создания программного обеспечения для реконструкции распределений остаточных напряжений в рамках метода условно-неразрушающего контроля сверлением отверстий в сочетании с оптическими методами измерения возмущений поля деформации на поверхности тела, дающими данные для детальной реконструкции неоднородного распределения остаточных напряжений вблизи высверливаемого отверстия.

5. Достоверность результатов диссертации. Разработанный алгоритм/пакет программ верифицировался на простейшем объекте с неоднородным по глубине распределением остаточных напряжений. На нем же выполнено исследование чувствительности точности решения обратной

задачи в зависимости от степени дискретизации данных измерений поверхностного поля перемещений и шага по глубине отверстия, а также зашумленности данных, что представляется важным для проверки качества методов, связанных с решением обратных задач. Также исследованы границы применимости упругой модели в качестве основы метода, для чего была выполнена серия натуральных и численных экспериментов, причем в последних определена ошибка в зависимости от отношения интенсивности остаточных напряжений к пределу текучести и вида напряженного состояния. Данное исследование также представляется полезным для метода, создающего концентратор напряжений.

6. Апробация работы. Диссертационная работа А.С. Плотникова в достаточной мере опубликована и апробирована. Основные положения работы опубликованы в восьми рецензируемых научных журналах, реферируемых международными базами цитирования, в том числе рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций по механике деформируемого твердого тела. Работа докладывалась на двенадцати международных и всероссийских конференциях и семинарах по профилю механики деформируемого твердого тела.

7. Вопросы и замечания по содержанию работы.

1. В обзоре главы 1 отсутствует ссылка на близкую по теме работу Nicoletto G. Moire Interferometry Determination of Residual Stresses in the Presence of Gradients. *Experimental Mechanics*. 1991. Vol. 31. P. 252-256.

2. В главе 2 не хватает утверждения об эквивалентности поставленных модельных задач о пластине с отверстием задачам о возмущении поля перемещений в пластине с градиентами напряжений в ее плоскости, вызванного отверстием. Из этого утверждения вытекала бы запись граничного условия на контуре отверстия, которая в работе отсутствует, но применяется.

Высказанные замечания не ставят под сомнение результаты диссертации, выносимые на защиту.

8. Заключение по диссертации.

Оценивая работу в целом, считаю, что диссертационная работа Плотникова Александра Сергеевича на тему «Определение неоднородных полей остаточных напряжений», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, является завершенным научным исследованием, выполненным на высоком научно-методическом уровне, соответствует специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого

твердого тела» и имеет важное научное и практическое значение для реконструкции неоднородных полей остаточных напряжений вблизи поверхности методом сверления отверстий по избыточным оптическим данным. Рецензируемая диссертационная работа отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.03.2013 года (в редакции от 28.08.2017 года), а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» («ИМСС УрО РАН») — филиала ФГБУН Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук (01.02.04), доцент

Келлер Илья Эрнстович

Служебный телефон: +7(342)2378307. E-mail: kie@icmm.ru

Служебный адрес: 614013, г.Пермь, ул. Акад. Королева, д.1, ИМСС УрО РАН

18 января 2024 года

Подпись И.Э. Келлера заверяю
Ученый секретарь ИМСС УрО РАН



Юрлова Н.А.

*С отзывом ознакомлен
23.01.2024*