

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет: 24.2.327.07

Соискатель: Плотников Александр Сергеевич

Тема диссертации: Определение неоднородных полей остаточных напряжений

Специальность: 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации: на заседании 14 февраля 2024 года, протокол 21, диссертационный совет пришел к заключению о том, что диссертационное исследование Плотникова Александра Сергеевича является законченной научно-квалификационной работой, имеет важное прикладное значение и содержит элементы фундаментального исследования. Достоверность полученных результатов обоснована и сомнений не вызывает.

Диссертация Плотникова Александра Сергеевича отвечает требованиям п.п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842. На заседании 14 февраля 2024 года, протокол 21, диссертационный совет принял решение присудить Плотникову Александру Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

Присутствовали: Заместители председателя диссертационного совета Земсков А.В. и Фирсанов В.В., ученый секретарь диссертационного совета Сердюк Д.О.

Члены диссертационного совета: Булычев Н.А., Вестяк В.А., Дмитриев В.Г., Кузнецова Е.Л., Медведский А.Л., Миронова Л.И., Рабинский Л.Н., Федотенков Г.В.

Заместитель председателя
диссертационного совета 24.2.327.07,
д.ф.-м.н., доцент



Земсков А.В.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.327.07,
к.т.н., доцент



Сердюк Д.О.

Начальник отдела УДС МАИ
Т.А. Аникина

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.07,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от «14» февраля 2024 г. № 21

О присуждении Плотникову Александру Сергеевичу ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Определение неоднородных полей остаточных напряжений» по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела принята к защите «22» ноября 2023 г., протокол № 20, диссертационным советом 24.2.327.07 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, приказ о создании диссертационного совета 24.2.327.07 – № 1184/нк от «12» октября 2022 г.

Соискатель Плотников Александр Сергеевич, 8 ноября 1985 года рождения, в 2009 г. окончил государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский инженерно-физический институт (государственный университет)» по направлению подготовки 150702 «Физика металлов». В 2012 году Плотников Александр Сергеевич окончил аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по специальности 05.15.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации». С 05.06.2023 прикреплен для подготовки диссертации к кафедре теории упругости механико-математического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация выполнена на кафедре теории упругости механико-математического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (ведомственная принадлежность – Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова).

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент **Завойчинская Элеонора Борисовна**, профессор кафедры теории упругости механико-математического факультета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова».

Официальные оппоненты:

Разумовский Игорь Александрович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории механики разрушения и живучести федерального бюджетного учреждения науки «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук», г. Москва,

Келлер Илья Эрнстович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией нелинейной механики деформируемого твердого тела «Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук» – филиала Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, г. Пермь, дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала», г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном кандидатом технических наук, научным руководителем направления целостности конструкций **Европиным Сергеем Владимировичем** и ведущим инженером отдела механических испытаний, исследований НДС и вибраций **Усовым Станиславом Михайловичем**, утвержденном доктором технических наук, директором акционерного общества «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала» **Каплиенко Андреем Владимировичем**, указала, что диссертация Плотникова Александра Сергеевича является самостоятельно выполненным научно-квалификационным исследованием, в котором содержится решение задачи расчетного определения полей остаточных напряжений в элементах конструкций, научного обоснования математического моделирования напряженно-деформированного состояния при использовании метода зондирующих отверстий, а также предложен усовершенствованный подход к расчетному сопровождению экспериментов. Работа отличается научной новизной, выполнена на хорошем теоретическом уровне с использованием современных методов расчетного математического моделирования. Диссертация соответствует требованиям п.п. 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Плотников Александр Сергеевич, достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Соискатель имеет 18 опубликованных работ по теме диссертации, 4 из которых – в журналах из перечня ВАК РФ, 3 статей – в журналах, индексируемых в Scopus.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. Плотников А.С., Осинцев А.В., Щепинов В.П. Измерение перемещений точек поверхности тела с помощью голографического интерферометра «КОНУС» // Измерительная техника. 2011, № 2, С. 25–28

2. Смирнов М.И., Спиридонов Ю.А., Плотников А.С., Карапертян А.Р. Расчётные методы определения влияния напряжений на качество резки // Стекло и керамика. 2013. № 1. С. 1–5.

3. Апальков А.А., Одинцеев И.Н., Плотников А.С. Оценка диапазона достоверных измерений остаточных напряжений методом сверления отверстий // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016, Т. 82, № 2, С. 47–52.

4. Plugatar T.P., Odintsev I.N., Plotnikov A.S. A study of residual stress distributions in case-hardened material layers // AIP Conference Proceedings. 14th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2020. Ekaterinburg. 2020. Vol. 2315. pp. 040028. DOI: 10.1063/5.0037301.

5. Karakozov E., Odintsev I., Plotnikov A., Plugatar T. Determination of high-gradient components of residual stress by data of test hole drilling method // IOP Conference Series: Materials and Engineering. International Conference of Young Scientists and Students "Topical Problems of Mechanical Engineering", ToPME 2019. Moscow. 2020, Т. 747, С. 012019. DOI: 10.1088/1757-899x/747/1/012019.

6. Плотников А.С., Завойчинская Э.Б. О методе определения неоднородного поля остаточных напряжений с использованием цифровой спекл-интерферометрии и метода сверления отверстий // Композиты и наноструктуры. Т. 14, № 1 (53). 2022. С. 16–30. DOI: 10.36236/1999-7590-2022-14-1-16-30.

7. Zavoychinskaya E.B., Plotnikov A.S. On the method for identifying inhomogeneous fields of residual stresses. Moscow University Mechanics Bulletin. Vol. 78. No. 3. 2023. pp. 63–70. DOI: 10.3103/S0027133023030044

В этих и остальных работах разработаны методы определения неоднородных полей остаточных напряжений по результатам измерения тангенциальных перемещений в окрестностях зондирующих отверстий, исследована область применимости упругой модели в задачах определения напряжений, рассмотрен подход к повышению точности за счёт применения переопределённых систем уравнений. В материалах совместных публикаций личный вклад автора является определяющим.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

от ведущей организации и официальных оппонентов, отзывы положительные;

от доктора физико-математических наук, профессора, ведущего научного сотрудника Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН Попова Александра Леонидовича, отзыв положительный;

от доктора технических наук, директора Научного центра неразрушающего контроля ГНЦ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии имени И.П. Бардина» Смотровой Светланы Александровны, отзыв положительный;

от доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника Физико-технического института НАН Беларуси Хины Бориса Борисовича, отзыв положительный;

от доктора технических наук, начальника отдела проблем эксплуатации перспективных конструкций и систем ЛА проектного комплекса «Авиатранспортная система» ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского» Нестеренко Бориса Григорьевича, отзыв положительный;

от начальника отделения – заместителя главного конструктора по прочности ПАО «Яковлев» Гусева Павла Николаевича;

от доктора технических наук, заведующего кафедрой «Техники и технологии» ФГБОУ ВО «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова» Мороза Александра Петровича, отзыв положительный;

от кандидата технических наук, начальника бригады проектно-конструкторского центра «Прочность» АО «Туполев» Абдуллина Марата Равильевича, отзыв положительный;

от доктора физико-математических наук, доцента, профессора кафедры «Вычислительная механика и математика» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» Христича Дмитрия Викторовича, отзыв положительный;

от доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, научного руководителя, главного научного сотрудника Красноярского филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий» Москвичёва Владимира Викторовича, отзыв положительный.

В поступивших отзывах отмечена актуальность темы диссертационного исследования, дан краткий обзор работы по главам, отмечены актуальность, новизна, достоверность полученных автором результатов и их практическая значимость.

В поступивших отзывах имеются замечания.

В отзыве ведущей организации акционерного общества «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала»:

1. Отсутствие прямой апробации предложенного метода на практическом эксперименте с использованием в качестве исходных данных результатов действительных оптических измерений.

2. Отсутствие сравнения точности предложенных методик с существующими экспериментальными методами, например с описанными в стандарте ASTM E837.

Замечания в отзыве официального оппонента Разумовского И.А. к главе 1:

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 по результатам измерения компонент тензора деформаций имеет существенные недостатки, которые могут привести к недопустимым величинам погрешностей результатов.

К главе 2:

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

4. 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.

К главе 3:

5. 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 будут переменными.

6. 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).

К главе 4 замечания отсутствуют.

Замечания в отзыве официального оппонента Келлера И.Э.:

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 вытекало бы записанное граничное условие на контуре отверстия, которая в работе отсутствует, но применяется.

В отзывах на автореферат следует отметить следующие замечания:

1. В качестве критерия приемлемой точности автором выбрана величина 10 МПа, которая является завышенной при определении остаточных напряжений в стальных образцах.

2. При оценке общей погрешности метода восстановления напряжений по перемещениям поверхности образца автор задаёт уровень экспериментальных погрешностей измерения перемещений в 0,01 мкм, что является существенно заниженным значением при измерениях перемещений методом спекл-интерферометрии.

3. В обзоре существующих подходов к исследованию остаточных напряжений не приведены ссылки на публикации о методе инструментального индентирования – МИИ (вдавливание индентора в

исследуемый материал с заданным усилием и построение кривой зависимости положения индентора от нагрузки). МИИ позволяет безобразцовым способом определять механические характеристики материалов, в том числе остаточные напряжения. Возможно, в самой диссертации Плотникова А.С. имеющиеся на сегодня приемы определения остаточных напряжений освещены более полно.

4. Соискателем используется термин «точность» применительно как к результатам измерений (испытаний), так и к результатам автоматизированных вычислений (численного эксперимента). Желательно было бы разделить эти два понятия. В отечественной метрологии точность и погрешность результатов измерений (испытаний) определяются сравнением результата измерений с истинным или действительным (условно истинным) значением измеряемой физической величины (ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002). Для характеристики соответствия программного обеспечения компьютерного моделирования (компьютерной модели, программы) реальному миру, т.е. правильного моделирования реальных процессов, в нормативно-технической документации используется термин «валидация» (ГОСТ Р 57700.2-2017).

5. Автор применяет гармоническое разложение задачи с целью перевода её в двумерную постановку для снижения вычислительной сложности. Однако в тексте упомянуто, что в этом случае число задач удваивается. Вызывает сомнение целесообразность такого хода в условиях современных вычислительных мощностей.

6. В автореферате не приведены постановки конечноэлементных задач, что мешает оценить корректность проведённых вычислений. И хотя нет оснований сомневаться в полученных автором результатах, представляется, что их включение незначительно увеличило бы объём автореферата.

7. Переусложнён график на рисунке 11. Непонятен смысл построения данной диаграммы в полярных координатах по параметру показателя двухосности.

8. На стр. 14 сказано, что тесты проведены при значениях стандартного отклонения для перемещений $s = 0,001$ мкм, $0,005$ мкм, $0,01$ мкм и $0,05$ мкм, т.е. $s = 1$ нм, 5 нм, 10 нм и 50 нм. В табл.1 (стр. 17) указаны ещё меньшие значения: $s = 0,0001$ мкм и $0,0005$ мкм, т.е. $0,1$ и $0,5$ нм. В работе не указано, на каком материале проводились эксперименты. Если это малоуглеродистая сталь, которая состоит в основном из феррита (ОЦК-Fe), то его период кристаллической решетки $a=0,286$ нм. Вопрос: каков физический смысл таких значений s , если экспериментальные методы не позволяют определять перемещения с точностью сопоставимой с периодом кристаллической решетки и даже порядка $10a$.

9. В списке публикаций соискателя номера 1 и 2, 3 и 4, 6 и 7 – это одна и та же статья (русский оригинал и его английское переиздание). В присылаемых нам на отзыв авторефератах из России обычно под одним номером указывают русскоязычный оригинал и в скобках – английское переиздание (или наоборот). Так что у соискателя не 6 статей, входящих в Web of Science и Scopus, как сказано на стр. 6, а только 3. Хотя и этого количества вполне достаточно по критериям ВАК России.

10. Название сформулировано излишне общо. Предложенный автором подход полностью опирается на экспериментальный метод сверления отверстий, что следовало бы отразить в названии работы.

11. В автореферате представлены результаты численного эксперимента только для метода определения неоднородных по глубине остаточных напряжений (глава 3). Отсутствует аналогичная проверка метода определения неоднородных в плоскости остаточных напряжений (глава 2).

12. Из автореферата не вполне ясно – в чем заключается отличие полученных результатов от известных.

13. Не ясно, выполнялась ли оценка экономического эффекта.

14. Приведённые автором методы, предназначенные для обработки экспериментальной информации, проверены только в численном эксперименте. Больше доверие вызвала бы валидация в физическом опыте.

15. На с. 16 в качестве критерия приемлемой точности метода используется условие $\Delta\sigma_{ii} \leq 10$ МПа, где $\Delta\sigma_{ii}$ – стандартное отклонение разности интенсивности напряжений, определяемой по результатам измерений на каждом шаге по глубине отверстия. Следовало бы пояснить, чем обусловлен выбор значения 10 МПа.

16. На рисунках 8, 9, 10 (с. 16) не указаны единицы измерения напряжений.

17. На с. 18 не объяснено, какая величина в формуле, задающей значения интенсивности напряжений, обозначена σ_T .

18. Отмеченная автором недостаточность отечественной нормативной базы в области измерений остаточных напряжений приводит к необходимости разработки на основе полученных результатов соответствующего нормативного документа.

19. Следовало бы указать перспективы и возможности анализа остаточных напряжений в условиях номинального упруго-пластического деформирования.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что официальные оппоненты являются высококвалифицированными специалистами в данной области, а ведущая организация проводит исследования в области механики деформируемого твердого тела. Официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации имеют значительное количество публикаций по теме диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны методы определения неоднородных по глубине отверстия и в плоскости остаточных механических напряжений в упругих изотропных твёрдых телах при помощи отверстий-индикаторов;

предложен подход к вычислению базовых функций в методе определения неоднородных по глубине остаточных напряжений, основанный

на применении метода конечных элементов с автоматизацией процесса перестроения модели и понижения размерности за счёт гармонического разложения решения;

доказана работоспособность предложенных методов для задач определения неоднородных полей остаточных механических напряжений в упругих изотропных твёрдых телах;

новые понятия не вводились.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано, что ошибка определения остаточных напряжений на основании упругих соотношений по результатам измерения перемещений вокруг отверстия-индикатора, возникающая из-за неучёта пластической компоненты, несущественна до величины интенсивности напряжений 60% от предела текучести, а при более высоких значениях зависит от соотношения главных напряжений (вида плоского напряжённого состояния);

применительно к проблематике диссертации результативно (эффективно, то есть с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс методов, в том числе методы механики деформируемого твёрдого тела, разложение решения в ряды Фурье, метод конечных элементов;

изложены принципы расчёта базовых функций, используемых в методе определения неоднородных по глубине остаточных механических напряжений в упругих изотропных твёрдых телах, позволяющие значительно сократить вычислительную сложность задачи их отыскания;

раскрыты возможности предложенных методов, позволяющие после однократного вычисления базовых функций определять остаточные механические напряжения в упругих изотропных твёрдых при произвольных размерах зондирующего отверстия и инкрементах глубины;

изучено влияние количества и погрешности измерений перемещений вокруг отверстия-индикатора на точность и предельную глубину

определения остаточных механических напряжений в упругих изотропных твёрдых телах;

проведена модернизация методов определения остаточных механических напряжений в упругих изотропных твёрдых телах по результатам измерения перемещений вокруг отверстия-индикатора.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны программы, реализующие предложенные автором методы определения остаточных механических напряжений в упругих изотропных твёрдых телах;

определены требования к точности и объёму входных данных для практического применения разработанных методов, а также границы их достоверного применения;

созданы новые эффективные алгоритмы вычисления базовых функций, применяемых в методах определения неоднородных остаточных механических напряжений в упругих изотропных твёрдых телах;

представлены результаты исследования ошибок определения остаточных механических напряжений в упругопластических изотропных твёрдых телах при регистрации перемещений вблизи отверстия-индикатора при использовании упругих соотношений.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теория построена на известных уравнениях механики упругих деформируемых тел, вывод основных соотношений предложенных методов математически строг и непротиворечив, реализованные алгоритмы протестированы;

идея базируется на прямом вычислении гармоник базовых функций, позволяющих определять коэффициенты для системы линейных алгебраических уравнений, при решении обратной задачи;

использованы численные эксперименты для проверки работоспособности и точности разработанных методов;

установлено качественное и количественное совпадение результатов автора с результатами, представленными в независимых источниках в частных случаях;

использованы современные методы математического моделирования, численные алгоритмы решения задач, информационные и компьютерные методы визуализации полученных результатов.

Личный вклад соискателя состоит в следующем:

1. Проведён анализ экспериментально-теоретических исследований по определению однородного и неоднородного остаточного напряжённо-деформированного состояния.

2. Разработан математический аппарат метода определения трёхмерного неоднородного остаточного напряжённого состояния.

3. Созданы необходимые для реализации метода алгоритмы и проведены требуемые вычисления.

4. Определены требования к объёму и точности входных данных для обеспечения приемлемой точности определения напряжений.

5. Исследована область применимости определяющих соотношений теории упругости для нахождения остаточных напряжений.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было. Диссертация соответствует требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

На заседании «14» февраля 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Плотникову Александру Сергеевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 11 человек, из них 6 докторов физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 11, против 0, недействительных бюллетеней 0.

Заместитель председателя
Диссертационного совета 24.2.327.07
д.ф.-м.н., доцент



Земсков А.В.

Ученый секретарь
Диссертационного совета 24.2.327.07
к.т.н., доцент



Сердюк Д.О.

«14» 02 2024 года

Начальник отдела
Т.А. Аникина

