

На правах рукописи



Ян Наинг Мин

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ЗОНДИРУЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ И
КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СПЛАВАХ И КОМПОЗИЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛАХ**

Специальность: 01.02.06 – «Динамика, прочность машин, приборов и
аппаратуры»

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва, 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ)

Научный руководитель: **Рабинский Лев Наумович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры «Соппротивление материалов, динамика и прочность машин» Московского авиационного института (НИУ)

Официальные оппоненты: **Могилевич Лев Ильич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского Государственного Технического Университета имени Гагарина Ю.А.

Корнев Юрий Витальевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт прикладной механики Российской академии наук» (ИПРИМ РАН)

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева»**

Защита диссертации состоится 22 декабря 2021 г. в 17 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.05 при ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4. и на сайте:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=161120

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.125.05



Федотенков Г. В.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. В настоящее время композиты широко применяются во многих конструкциях, к которым предъявляются требования по массовой эффективности в авиастроении, в космической технике, в кораблестроении, в энергетике и т.д. Большинство существующих конструкций, в которых эффективно применяются композиционные материалы (КМ), все-таки являются тонкостенными или сетчатыми, или представляют собой сэндвич панели с композитными несущими слоями и облегченными заполнителями. Как правило, композиционные материалы формируются при повышенных температурах и давлениях, после чего происходит их охлаждение до нормальной температуры. В результате процессов теплового расширения, а также с учетом различия термоупругих свойств компонентов, входящих в состав композиционных материалов могут возникать остаточные напряжения.

В ряде случаев уровень остаточных напряжений в деталях оказывается настолько высоким, что уже в процессе хранения наблюдается растрескивание или разрушение материала. В результате постепенной релаксации остаточных напряжений происходит изменение размеров и искажение форм деталей. Наибольшему негативному действию остаточных напряжений подвержены однонаправленные слои в поперечном направлении. Рассматриваемая в настоящей диссертации задача относится к исследованию методов зондирующих отверстий и корреляции цифровых изображений для определения остаточных напряжений в сплавах и композиционных материалах. Остаточные температурные напряжения в этом направлении могут достигать предела прочности и приводить к появлению трещин в полимерной матрице. Важным становится знание типа, расположения и величины остаточного напряжения в изделиях композиционных материалов. Поэтому развиваемые в настоящей диссертации методы зондирующих отверстий и корреляции цифровых изображений для определения остаточных напряжений в сплавах и композиционных изделиях являются **актуальными**.

Целью работы является исследование возможности достоверного определения остаточного НДС(напряженно-деформированного состояния) в металлах и композитах с применением сочетания методов зондирующих отверстий и корреляции цифровых изображений. Экспериментальное исследование остаточных напряжений в металлах и КМ а также сопоставление экспериментальных и численных результатов обработки результатов анализа деформаций на поверхности исследуемых образцов, получаемых на основе метода корреляции цифровых изображений.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применяются аналитические и численные методы механики деформируемого твердого тела, теории упругости, методов нелинейного программирования. Для реализации аналитических методов применялась система компьютерной алгебры Wolfram Mathematica. Для численного решения используется метод конечных элементов, реализованный в системе COMSOL Multiphysics. На основе разработанного экспериментального метода проводилось исследование остаточных деформаций и напряжений в сплавах и композиционных материалах.

Научная новизна заключается в :

-реализации сочетания методов зондирующих отверстий, корреляции цифровых изображений и численного КЭ моделирования для решения обратных задачи и идентификации остаточного НДС исследуемых образцов;

-получении данных по остаточному НДС в исследованных образцах, включая образцы металлополимерных композитов и сплавов, полученных методами трехмерной печати;

-сопоставлении аналитических и численных методов решения обратных задач для оценки остаточного НДС материала.

Теоретическая и практическая значимость.

Представлен метод определения остаточных напряжений в конструкционных материалах, основанный на использовании метода зондирующих отверстий, корреляции цифровых изображений и математического моделирования. Практическая значимость определяется

возможностью получения полной картины деформированного состояния вблизи зондирующего отверстия с применением стандартных средств экспериментального контроля. Теоретическая значимость определяется проведенным исследованием точности и корректности получаемых оценок для остаточных напряжений и сопоставлением предложенных аналитических и численных методов решения обратных задач.

Обоснованность и достоверность результатов, полученных при разработке аналитических методов расчета, определяется примененными строгими методами механики деформируемого твердого тела, теории упругости, методов нелинейного программирования. Достоверностью полученных исследований является сопоставление численных и аналитических результатов моделирования а также путем варьирования размера конечно-элементной сетки и сопоставлением полученных решений в рамках упрощённых аналитических моделей. Экспериментальное исследование остаточных деформаций с последующим определением остаточных деформаций. Численное моделирование проведено в системах COMSOL Multiphysics с использованием детализированных моделей изделий, высокоплотной сетки.

Результаты, выносимые на защиту:

- экспериментальные исследования остаточных напряжений в металлах, включая образцы, полученные трехмерной печатью, и в КМ, в том числе в образцах металлополимерных композитов.

- исследования возможности достоверного определения остаточного НДС в металлах и композитах с применением сочетания методов зондирующих отверстий и корреляции цифровых изображений.

- детальная методика проведения всех этапов исследований, начиная с подготовки образцов, проведения процедуры нанесения зондирующих отверстий, фотографирования образцов и проведения цифровой корреляции изображений, обработки результатов на основе решения обратных задач теории упругости численными и аналитическими методами.

- метод для получения достоверных и высокоточных результатов измерений остаточного НДС в исследуемых материалах. Показана возможность применения, как более точных численных методов обработки данных метода ЦКИ (с использованием методов оптимизации и нелинейного программирования), так и более простых аналитических методов, основанных на решении задачи Кирша и статистической обработки экспериментальных данных.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе остаточного НДС изделий, применяемых в авиастроительной отрасли на этапе научных разработок и опытных работ. Предложенные методы представляют собой разрушающие методы контроля, которые позволяют оценивать качество изготавливаемых изделий, влияние их остаточного НДС на статическую прочность и ресурс. Предложенные новые методы обработки результатов ЦКИ позволяют получать полную картину напряженного состояния материала в исследуемых областях изделий, что может быть необходимым при валидации расчетных моделей остаточного НДС, уточнении критериев прочности и оценки качества выбранных технологических режимов изготовления изделий.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Бабайцев А.В., Ян Наин Мин, Шестеркин П. С. Применение метода корреляции цифровых изображений для определения остаточных напряжений в сплавах и композиционных материалах при изготовлении баков космических аппаратов. Международная конференция «Космические системы». Москва, 27 апреля 2021 года

2. Бабайцев А.В., Рипецкий А.В., Ян Н.М. Исследование влияние паттерна на фиксацию деформаций методом корреляционных цифровых изображений. В сборнике: Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXVII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Москва, 2021. С. 14-15.

3. Бабайцев А.В., Аунг Чжо Тху, Ян Наин Мин, Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Экспериментальные и теоретические исследования по определению механических характеристик алюминиевых пластин с односторонним порошковым покрытием. Динамическое деформирование и

контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы. Москва, 12–13 ноября 2018 года

4. Бабайцев А.В., Аунг Чжо Тху, Ян Наин Мин, Мартиросов М.И., Рабинский Л.Н. Механические испытания стальных прямоугольных пластин с односторонним полимерным покрытием. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Вятчи, 19–23 марта 2018 года

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 3 работы в рецензируемых научных изданиях, в том числе 1 научная работа в международном журнале, индексируемом Scopus и 2 научные работы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК РФ.

Работы в журналах, входящих в базы Scopus или WoS

1. Valeriy V. Bodryshev. Arseniy V. Babaytsev. Alexander A. Orekhov, Yan Naing Min. Digital method for analysing speckle-interferometric images of material deformation Periodicals of Engineering and Natural Sciences Vol. 9, No. 3, 2021, pp.886-900

Научные статьи в журналах, рекомендуемых ВАК

2. Бабайцев А. В., Рабинский Л. Н., Мин Я. Н. Методика оценки остаточных напряжений в образцах из сплава AlSi10Mg, полученных по технологии SLM. Труды МАИ, 2021. № 119. DOI: 10.34759/trd-2021-119-10

3. Бабайцев А.В., Насонов Ф.А., Рабинский Л.Н., Ян Наин Мин. Применение метода зондирующих отверстий и метода корреляции цифровых изображений для определения остаточных напряжений в полимерном композитном материале. Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Том 27, №3, с.427-440.

Объём и структура диссертации. Работа содержит 117 страниц основного текста, включая 62 рисунок, состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения и списка литературы в количестве 114 ссылок.

Основное содержание работы

Во введении представлена краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования и степень ее разработанности, сформулирована цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава носит обзорно-аналитический характер. В ней приведены результаты выполненного литературного обзора отечественных и зарубежных публикаций в области работы.

Во второй главе изложен выбор экспериментальных образцов, а также методы их получения и используемые материалы.

Для исследования уровня остаточных напряжений использовались тестовые образцы из сплавов, а также из металло-композитных и полимерных композиционных материалов. В алюминиевом сплаве исследовались остаточные напряжения, возникающие в сварном шве. Остаточные напряжения в нержавеющей стали исследовались на образцах, изготовленных методом 3Д печати по технологии SLM. В композитных образцах остаточные напряжения присутствовали вследствие несимметричной схемы армирования.

Образцы из сплава марки АМг-6 изготавливались с характерными габаритами 50*50*4 мм и сваривались между собой без присадка и с присадком из проволоки АМг-5 с использованием аргоновой сварки и сварочного кондуктора.

Сваренные образцы (рис. 1а) шлифовались до получения гладкой однородной поверхности, рис. 1 (б). Для сварки использовался сварочный аппарат ТИР 300Д, а для шлифования использовалась вибрационная шлифовальная машина Dexter PRS125CA с абразивной насадкой зернистостью 180.

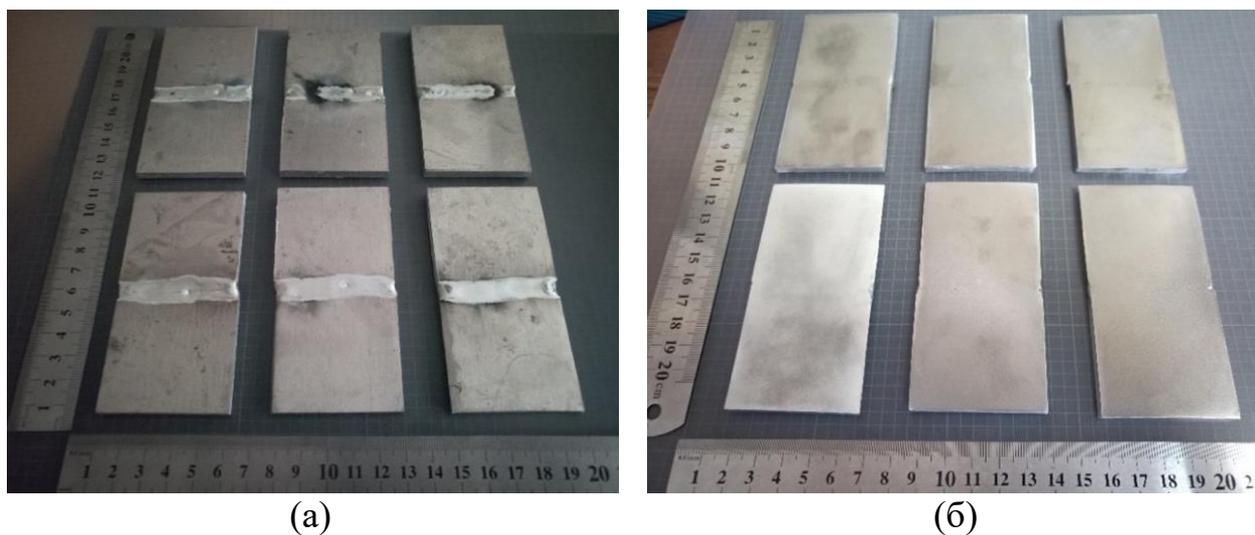


Рис. 1. Образцы из сплава АМг-6 (а)- образцы сразу после сварки, (б)- образцы после шкурения)

Изготавливались и исследовались два типа композитных материалов: метало-полимерные материалы и полимерные композиционные материалы. Метало - полимерные материалы производилось на образцах из алюмопластика марки СИАЛ-3/2 производства ФГУП ВИАМ. В качестве металлических слоев в образцах СИАЛа использованы листы алюминий-литиевого сплава марки 1441 толщиной 0,35мм, а композитные слои выполнены из стеклопластика марки КМКС-2.120.Т60. Схема армирования образцов СИАЛ была сбалансированной и несимметричной: $[Al, (0, 90, 0), Al, (90, 0, 90), Al]$, так что в изготовленных образцах возникал цилиндрический изгиб. Толщина каждого из композитных слоев в составе СИАЛа составляет 0,3 мм. Из панели с габаритными размерами 300х300 мм вырезались образцы с размером 150х150мм. Используемая пластина и вырезанный из нее образец представлен на рис. 2.

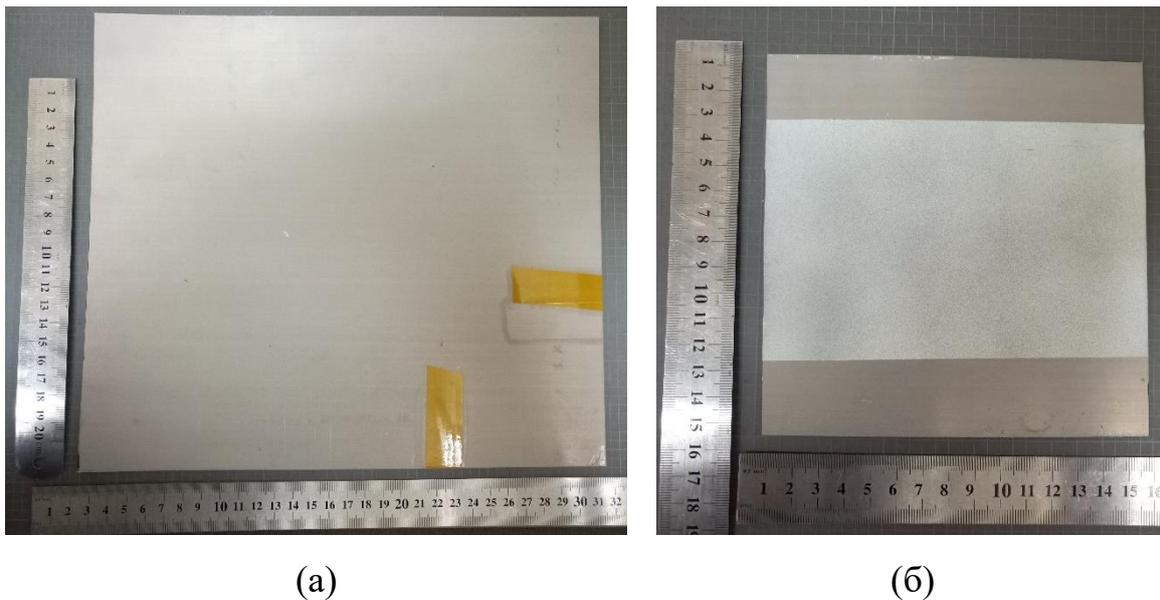


Рис. 2. Образцы СИАЛа а - плита из СИАЛа, б - вырезанный образец из плиты с нанесенным на нее паттерном

Исследование остаточных напряжений в композиционных материалах проводилось на образцах из углепластика ВКУ-30 разработки ФГУП «ВИАМ». Изготавливалась панель с размерами 500x500 мм и с несимметричной схемой армирования $[0_4, 90_4]$. Углепластик ВКУ-30 имеет в своем составе углеродное волокно UMT49S-12K-EP фирмы ООО Алабуга-Волокно в качестве армирующего наполнителя, а матрицей является отвержденная эпоксидная композиция ВСК-14-4. Полученная панель была раскроена на образцы с размерами 100x100 мм на фрезерном станке с использованием диска с алмазным напылением) Полученные образцы углепластика после раскройки представлены на рис. 3.

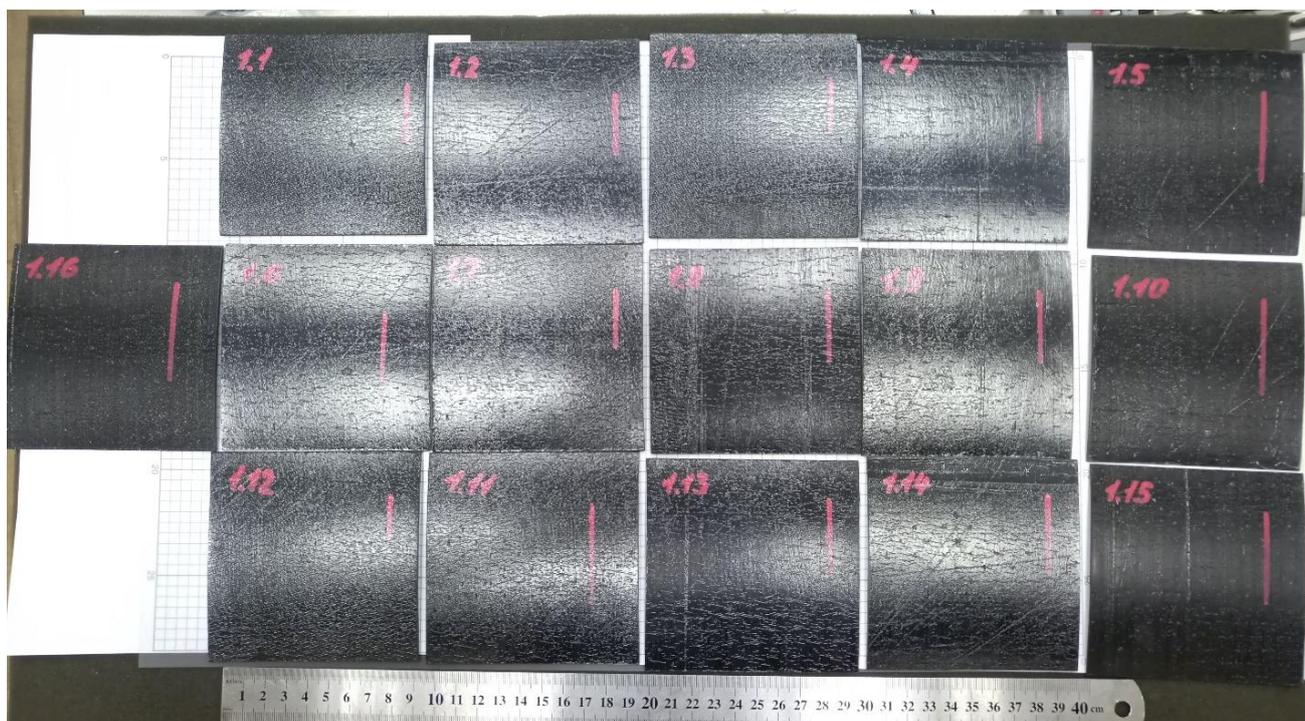


Рис. 3. Образцы углепластика ВКУ-30

У полученных образцов взвешиванием оценивалось объемное содержание волокна (~50%) и максимальные прогибы, которые составили 4-5 мм в центральной части на 100 мм длины грани образца. Свойства всех используемых материалов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства исследованных материалов

Марка	Плотность, [кг/см ³]	Модуль упругости, [ГПа] (вдоль / поперек)	Коэф. Пуассона (вдоль / поперек)	Предел текучести, [МПа]	Предел прочности, [МПа]	Удлинение при разрыве, [%] (вдоль / поперек)
АМг6	2,64	71	0,33	157	400	22
Алюмо-стеклопластик	2,1	55	0,27	230	530	2,5
ВКУ-30	1,6	127 / 9	0,35/0,04	-	1780 / 53	1,1 / 0,4

В третьей главе представлена методика измерений остаточных напряжений, основанная на методе корреляции цифровых изображений.

Фотоизображения и видеокadres применяются для анализа широкого круга прочностных, газодинамических, материаловедческих задач. Имеющееся двухмерное изображение позволяет качественно отслеживать картины исследуемых процессов. Но без соответствующей обработки данных фотографий (видеокadres) нельзя судить о количественных параметрах происходящих процессов в исследуемых объектах. В данной работе предлагается методика цифровой обработки теневых снимков (видеокadres) по параметру интенсивность (яркости) изображения.

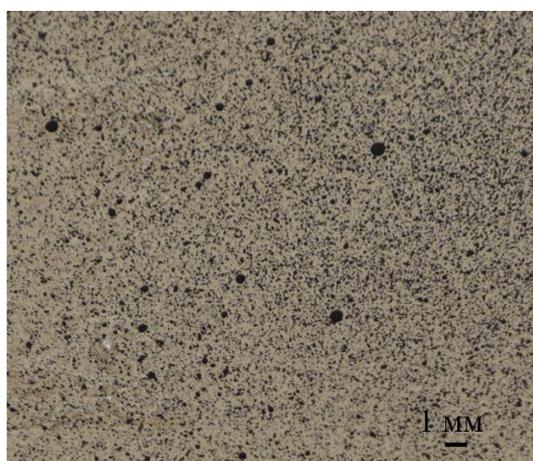
Задача распадается на две части:

- обработка фотографий (видеокadres) изображения, с выявлением заданного качества и размеров изображения, а также способов ее кадрирования. Выявление минимально допустимой погрешности обработки изображения с целью минимального ее влияния на анализ конкретного результата.

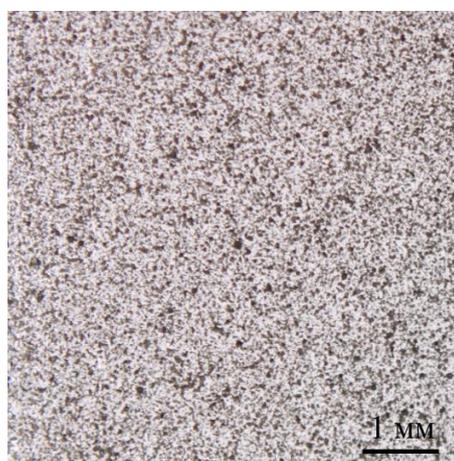
- разработка методики обработки полученных матриц интенсивности (яркости) изображения $L=f(x,y)$. Здесь x, y - координаты точек (ячеек) изображения, L – интенсивность (яркость) в заданной дискретной ячейке. Разработка математического аппарата анализа закономерностей исследуемого процесса в заданных кадрированных областях, с выявлением корреляционной взаимосвязи между L и соответствующей характеристикой исследуемого процесса.

На поверхность каждого полученного образца наносился различный тип паттерна – нерегулярного контрастного рисунка, который обеспечивает возможность применения КЦИ-методов для оценки перемещений точек поверхности образца: 1) покраска поверхности аэрозольным баллончиком; 2) покраска поверхности аэрографом. Поверхность образца обезжиривалась обезжиривателем Нефрас С 2-80/120 (БР-2). Далее на исследуемую часть поверхности наносился равномерный слой белой краски аэрозольным

баллончиком, автоэмаль Mobihel 1К. Процесс нанесения проводился с выполнением рекомендаций производителя. После нанесения белого фона образец высушивался 3 часа при комнатной температуре до полного высыхания. Исследовались два варианта паттерна данного типа: паттерн, нанесенный аэрозольным баллончиком, и паттерн, нанесенный аэрографом. Для нанесения паттерна аэрозольным баллончиком использовалась акриловая аэрозольная краска Ред Фокс черного цвета №4(212) FLAT BLACK. Образец при нанесении находился на расстоянии 500-600 мм от распылительного клапана для получения наименьшего точечного паттерна. Характерный размер точек в получаемых паттернах варьировался от 0,05 мм до 0,8 мм. Пример покрашенной поверхности образца представлен на рис. 4 (а). Для нанесения более мелкого рисунка использовался компрессор FENGDA № AS-176 и аэрограф BD-134 с диаметром сопла 0,2 мм. Образец при нанесении находился на расстоянии 250-300 мм от диффузора для получения наименьшего точечного паттерна. Характерный размер точек в получаемых рисунках варьировался от 0,02 мм до 0,2 мм. Пример нанесенного паттерна представлен на рис. 4 (б).



(а)

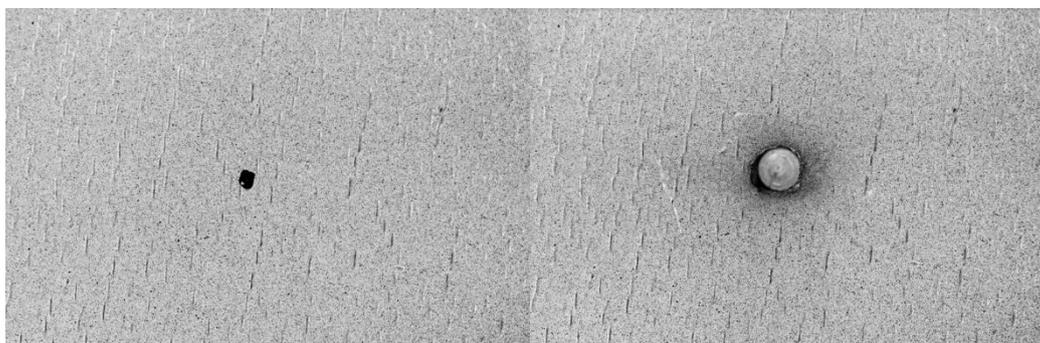


(б)

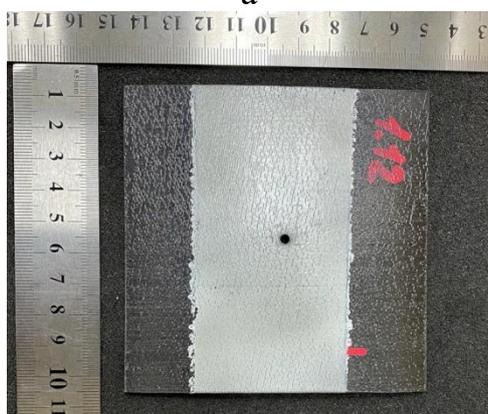
Рис.4. Паттерн а – нанесенный аэрозольным баллончиком, б – нанесенный аэрографом.

Снимки образца углепластика до и после выполнения зондового отверстия показаны на рис.5. Вокруг отверстия возникает затемнение вследствие нарушения структуры композиционного материала в процессе сверления,

частицы которого окрашивают поверхность образца. Однако это затемнение не значительно сказывается на качестве анализа.



а



б

Рис.5. Образец углепластика до и после выполнения зондирующего отверстия (а – макросъемка, б – испытанный образец).

Для обработки экспериментальных данных применялась программа DICe (Digital Image Correlation Engine). Эта свободно-распространяемая программа реализует метод корреляции цифровых изображений. Программа DICe имеет открытый исходный код, предназначенный для использования в качестве модуля во внешнем приложении или как самостоятельное приложение. Авторские права принадлежат National Technology & Engineering Solutions of Sandia, LLC (NTESS). Т.к. DICe собственным постпроцессором не обладает, для визуализации результатов анализа использовалось программное обеспечение ParaView, многоплатформенное приложение для анализа и визуализации данных, которое также имеет открытый исходный код и используется многими программами для анализа экспериментальных данных и физического

моделирования. ParaView разрабатывается Национальной Лабораторией Сандиа, компанией Kitware и Национальной Лабораторией Лос-Аламоса.

Результаты с паттерном, нанесенным аэрозольным баллончиком, были получены слишком низкого качества КЦИ-анализа из-за достаточно больших характерных размеров элементов паттерна.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования и развитие метода для более точного и детального изучения остаточных напряжений

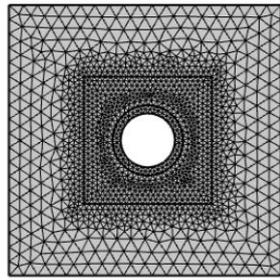
Для оценки остаточных напряжений в образце проводилось решение обратной задачи в среде COMSOL. Решение обратных задач теории упругости для идентификации остаточных напряжений выполнено в системе COMSOL с использованием численного конечно-элементного моделирования, метода Монте-Карло и Нельдера-Мида. Для этого моделировалась та же геометрия области, в которой проводится анализ изображения.

На границах области задавались условия однородного напряженного состояния. Задавались значения вектора напряжений, равного скалярному произведению тензора остаточных напряжений и внешней единичной нормали к границе области. Компоненты тензора остаточных напряжений, на основе которых на границе области анализа задаются внешние нагрузки, являются неизвестными. Эти значения, σ_{xx}^0 , σ_{xy}^0 , σ_{yy}^0 (константы), определяются на основе решения обратной задачи линейной теории упругости. Для этого многократно строилось решение задачи о деформациях рассматриваемой области с различными значениями σ_{xx}^0 , σ_{xy}^0 , σ_{yy}^0 . С применением методов нелинейного программирования определялся набор значений σ_{xx}^0 , σ_{xy}^0 , σ_{yy}^0 , при которых отличие расчета от эксперимента оказывалось наименьшим. Применялся метод Монте-Карло для поиска глобального минимума функции невязок и метод Нелдера-Мида для уточнения локального минимума. Функция невязок расчетных и экспериментальных данных вычислялось в среднеквадратичном приближении:

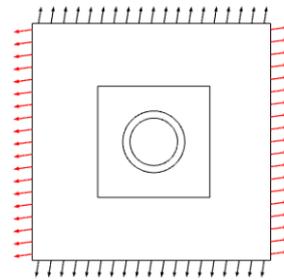
$$e = \int_{\Omega_1} \left((\varepsilon_{xx}^0 - \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{xx}^*)^2 + (\varepsilon_{xy}^0 - \varepsilon_{xy} + \varepsilon_{xy}^*)^2 + (\varepsilon_{yy}^0 - \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{yy}^*)^2 \right) ds, \quad (1)$$

где интегрирование проводится по выбранной области сопоставления расчета и эксперимента Ω_1 ; ε_{xx} , ε_{xy} , ε_{yy} – компоненты тензора деформаций, вычисляемые на основе решения задачи теории упругости; ε_{xx}^* , ε_{xy}^* , ε_{yy}^* – вводимые малые поправки (константы) для уточнения средних деформаций, определенных из эксперимента.

Поправки ε_{ij}^* использовались, когда уровень действующих остаточных напряжений является невысоким, и возникающие вокруг зондирующего отверстия деформации могут быть достоверно идентифицированы методом КЦИ-анализа только в зоне концентрации (вблизи границы отверстия). Введение малых значений ε_{ij}^* позволяет уточнить среднее поле деформаций в эксперименте и игнорировать неустранимые погрешности, связанные с неточностью экспериментальных данных. Таким образом, было получена возможность наиболее аккуратным образом сопоставить результаты расчетов с экспериментальными данными в зонах относительно больших деформаций вблизи отверстия, где эти деформации определены наиболее достоверно. Интегрирование в (1) проводится по узлам конечно-элементной сетки. В анализе используются конечные элементы с аппроксимацией второго порядка. Пример конечно-элементной модели и вариант заданных действующих нагрузок на границах области показаны на рис. 6. На рис. 6 (а) представлен внешний контур модели, на котором задаются граничные условия, квадратная область вокруг отверстия, где проводится сопоставления численного решения и эксперимента, и кольцевая область вокруг контура отверстия, исключенная из сопоставления. На рис. 6 (б) представлено состояние близкое к двухосному растяжению с незначительным сдвигом.



(a)



(б)

Рис.6. Пример конечно-элементной сетки (а) и направления задаваемого вектора напряжений на границе зоны анализа (б).

Постановка задачи идентификации действующих напряжений, формально, записывается следующим образом:

$$\begin{aligned}
 \min : & e(\sigma_{ij}^0, \varepsilon_{ij}^*) \\
 \text{s.t.} : & \sigma_{ij,j} = 0, \quad x_i \in \Omega \\
 & \sigma_{ij} n_j = \sigma_{ij}^0 n_j, \quad x_i \in \Omega \\
 & \sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} ; \\
 & \varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Решение задачи теории упругости находится с учетом известных изотропных или анизотропных характеристик материала, определяемых тензором C_{ijkl} . Решение строится в приближении плоского напряженного состояния.

Результаты первичного анализа в DICe и ParaView показаны на рис.7. На представленных результатах анализа волокна ориентированы в горизонтальном направлении, и поэтому линейные деформации X более чем в два раза меньше, чем деформации Y. Компоненту деформаций XY оказывается сложнее определить в эксперименте – на соответствующем изображении возникает больше шумов и погрешностей.

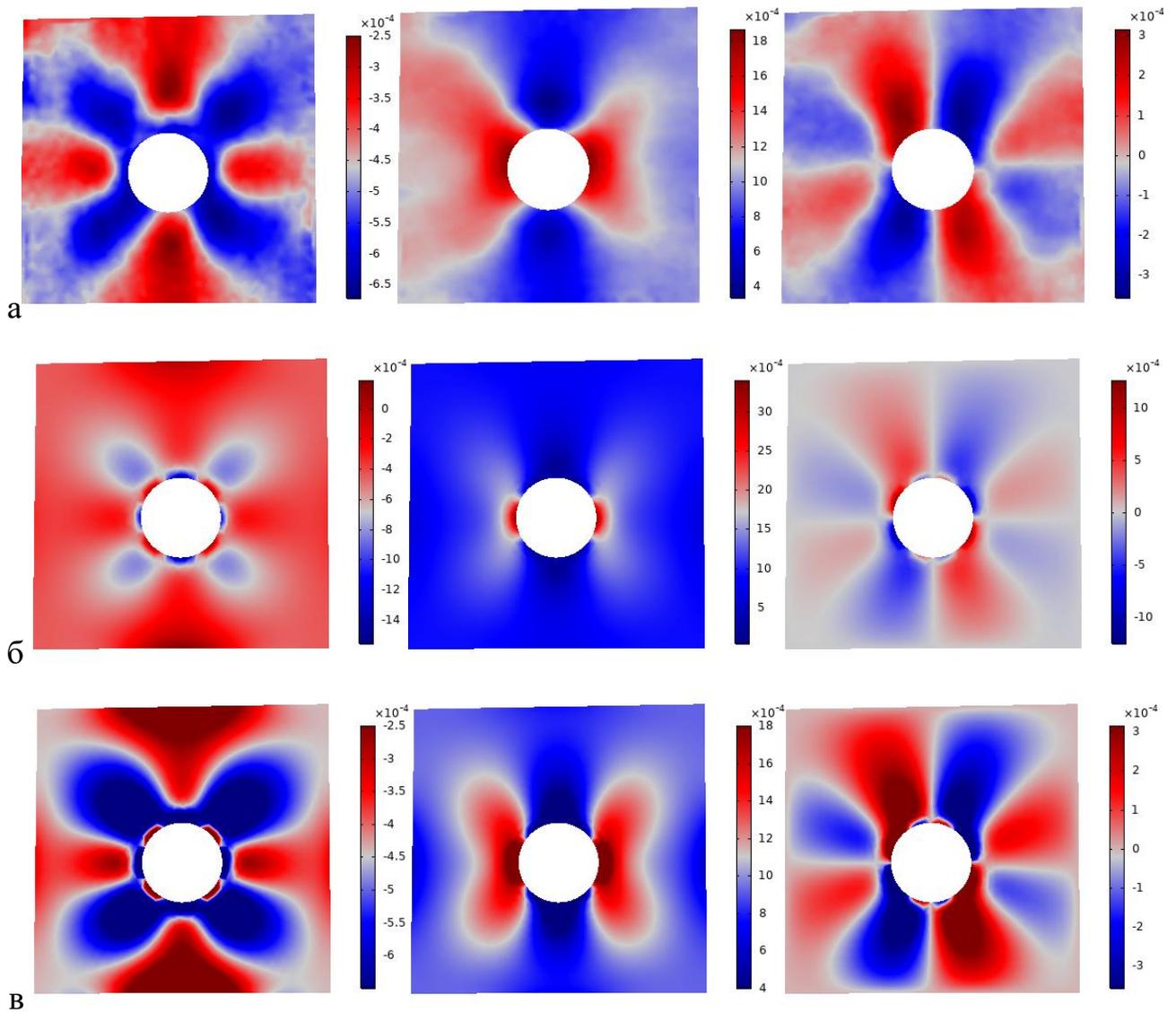


Рис.7. Результаты анализа в DICe и Paraview. (а – деформация в направлении X, б – деформация в направлении Y, в – деформация в направлении XY).

Результаты решения обратной задачи в COMSOL проиллюстрированы на рис.8, где показано сопоставление картины распределения деформаций в эксперименте и в расчете.

Для оценки остаточных напряжений в изотропных и ортотропных образцах, был разработан следующий алгоритм:

- использование корреляции цифровых изображений, в программном обеспечении DICe, получение компонент деформаций (ε_{xx} , ε_{yy} , ε_{xy});
- преобразование компонент деформаций из декартовой системы координат в цилиндрическую;
- определение компонент напряжений (σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, $\tau_{r\theta}$) с использованием закона Гука;
- решение обратной задачи Кирша. – определение интенсивности компонент нагружения σ_{xx} , σ_{yy} , τ_{xy} .

С использованием указанного выше алгоритма определялись остаточные напряжения в образцах из алюмоплекспластика марки СИАЛ-3/2 и углеплекспластика ВКУ-30, возникшими в плите в процессе ее изготовления.

Компоненты деформаций преобразовываются из декартовой системы координат в цилиндрическую по формуле

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{rr} & \varepsilon_{r\theta} \\ \varepsilon_{r\theta} & \varepsilon_{\theta\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (3)$$

Учитывая, что свойства образцов, изготовленные из алюмоплекспластика марки СИАЛ-3/2, в плоскости не сильно отличаются, то в первом приближении рассмотрим образцы из СИАЛа как из изотропного материала.

При сложном напряженном состоянии изотропной пластины закон Гука в цилиндрической системе координат записывается как

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E} (\sigma_{rr} - \nu \sigma_{\theta\theta}), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\theta\theta} = \frac{1}{E} (\sigma_{\theta\theta} - \nu \sigma_{rr}), \quad (5)$$

$$\varepsilon_{r\theta} = \frac{\tau_{r\theta} 2(1+\nu)}{E}, \quad (6)$$

где E – модуль упругости, ν - коэффициент Пуассона.

Из уравнений (4)-(6) находятся компоненты напряжений σ_{rr} , $\sigma_{\theta\theta}$, $\tau_{r\theta}$.

Обратная задача Кирша решается по формулам:

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \left(1 - \left(\frac{a}{r} \right)^2 \right) +$$

$$+ \left(1 - 4 \left(\frac{a}{r}\right)^2 + 3 \left(\frac{a}{r}\right)^4\right) \left(\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\right), \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \left(1 + \left(\frac{a}{r}\right)^2\right) - \quad (8)$$

$$- \left(1 + 3 \left(\frac{a}{r}\right)^4\right) \left(\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right) \cos 2\theta - \tau_{xy} \sin 2\theta\right),$$

$$\tau_{r\theta} = - \left(1 + 2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 - 3 \left(\frac{a}{r}\right)^4\right) \left(\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right) \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta\right), \quad (9)$$

где a – радиус отверстия, r – расстояние от одной из точек, фиксированной на поверхности образца, до начала координат, θ – угол наклона к оси.

Для определения оптимального количества опорных точек проводился анализ зависимости значений средних напряжений (Рисунок 9а), стандартных отклонений (Рисунок 9б) и коэффициента вариации (Рисунок 9в) от количества точек (в образце из СИАЛ, рассматриваемого как образец из изотропного материала). Оказалось, что при достаточно малом количестве точек (от 550 до 3000), определяемом шагом от 45 до 100 пикселей, наблюдается незначительный разброс значений средних напряжений, стандартных отклонений и коэффициента вариации, что дает основания считать, что именно такое количество опорных точек позволит получить корректные значения остаточных напряжений.

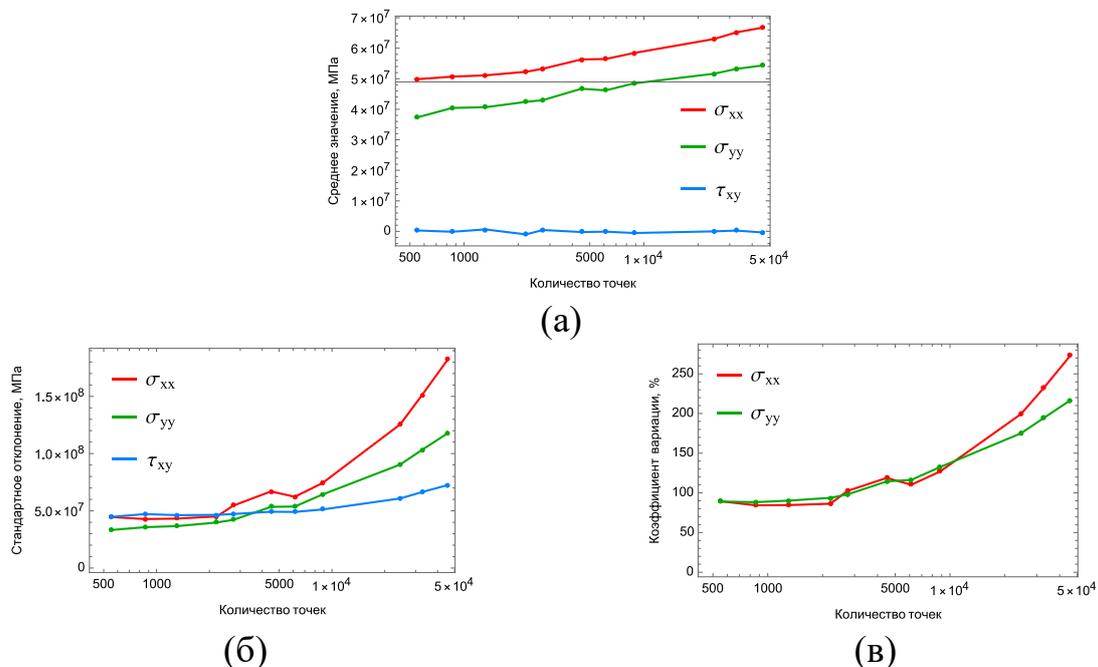


Рисунок 9. Зависимости статистических функций от количества опорных точек а-средние значения напряжений, б-стандартные отклонения напряжений, в-коэффициенты вариаций напряжений

Поля распределения деформаций в образце из СИАЛ, полученные при помощи программного обеспечения DICe и Para View, представлены на рисунке 10. Расчёт полей деформаций проводился для 550 опорных точек.

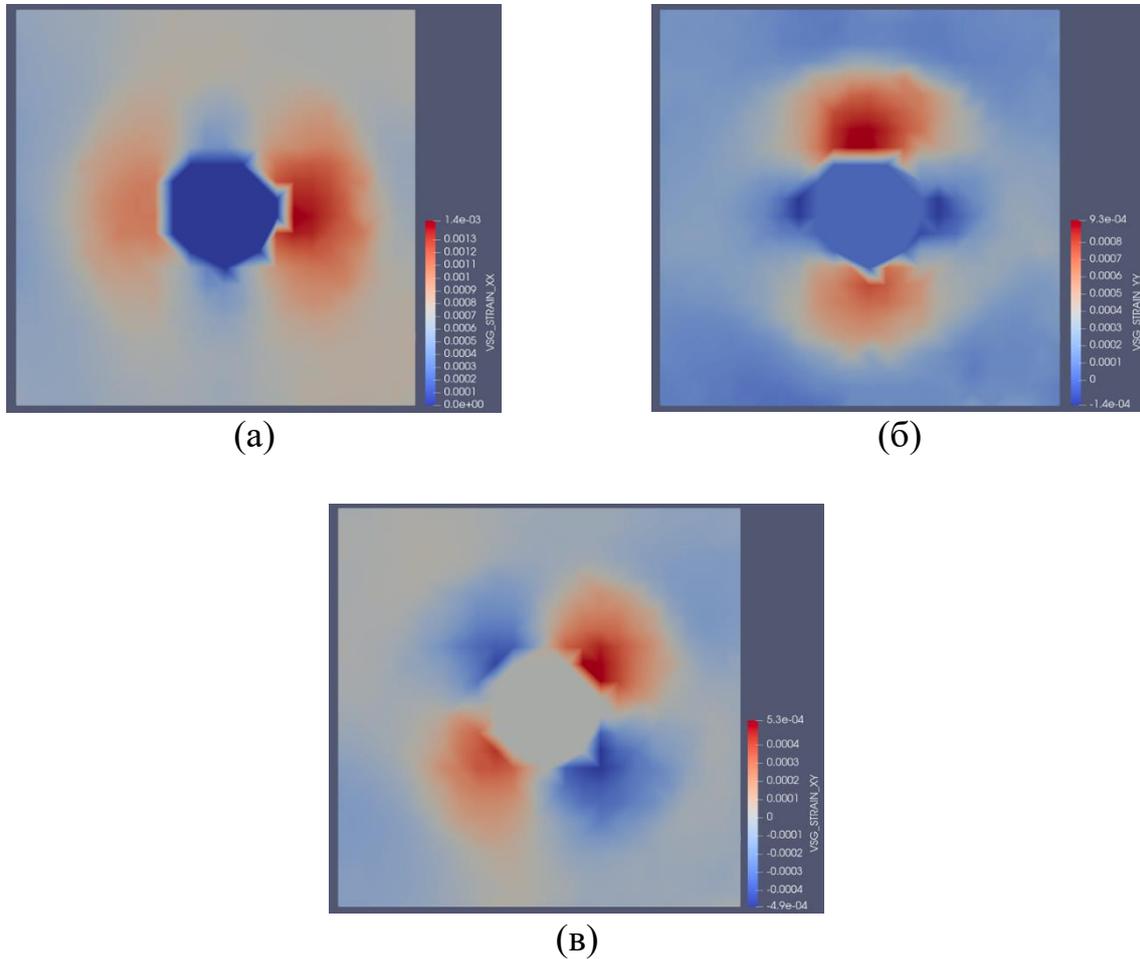


Рисунок 10. Поля распределения деформаций в образце из СИАЛ (изотропный материал) а – нормальные деформации ϵ_{xx} , б – нормальные деформации ϵ_{yy} , в – касательные деформации ϵ_{xy}

В заключении диссертационной работы перечислены основные результаты и возможные области их применения.

Основные результаты диссертационной работы:

- предложен метод достоверного определения остаточного НДС в металлах и композитах с применением сочетания методов зондирующих отверстий и корреляции цифровых изображений и экспериментально исследовано остаточное напряжение в металлах, включая образцы, полученные трехмерной печатью, и в КМ, в том числе в образцах металлополимерных композитов.
- отработана методика проведения всех этапов исследований, начиная с подготовки образцов, проведения процедуры нанесения зондирующих отверстий, фотографирования образцов и проведения цифровой корреляции изображений, обработки результатов на основе решения обратных задач теории упругости численными и аналитическими методами.
- показана возможность получения достоверных и высокоточных результатов измерений остаточного НДС в исследуемых материалах и применения, как более точных численных методов обработки данных метода ЦКИ (с использованием методов оптимизации и нелинейного программирования), так и более простых аналитических методов, основанных на решении задачи Кирша и статистической обработки экспериментальных данных.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в журналах из перечня ВАК РФ.

1. Бабайцев А. В., Рабинский Л. Н., Мин Я. Н. Методика оценки остаточных напряжений в образцах из сплава AlSi10Mg, полученных по технологии SLM. Труды МАИ, 2021. № 119. DOI: 10.34759/trd-2021-119-10
2. Бабайцев А.В., Насонов Ф.А., Рабинский Л.Н., Ян Наин Мин. Применение метода зондирующих отверстий и метода корреляции цифровых изображений для определения остаточных напряжений в полимерном композитном материале. Механика композиционных материалов и конструкций. 2021. Том 27, №3, с.427-440.

Статьи в журналах, индексируемых Scopus

3. Valeriy V. Bodryshev. Arseniy V. Babaytsev. Alexander A. Orekhov, Yan Naing Min. Digital method for analysing speckle-interferometric images of material

deformation Periodicals of Engineering and Natural Sciences Vol. 9, No. 3, 2021, pp. 886-900.

Прочие публикации по тематике диссертационной работы

4. Бабайцев А.В., Ян Наин Мин, Шестеркин П. С. Применение метода корреляции цифровых изображений для определения остаточных напряжений в сплавах и композиционных материалах при изготовлении баков космических аппаратов. Международная конференция «Космические системы». Москва, 2021. С. 28
5. Бабайцев А.В., Рипецкий А.В., Ян Н.М. Исследование влияние паттерна на фиксацию деформаций методом корреляционных цифровых изображений. В сборнике: Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы XXVII Международного симпозиума им. А.Г. Горшкова. Москва, 2021. С. 14-15.