

УДК 620.178.7

DOI 10.33113/mkmk.ras.2021.27.03.427_440.09

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЗОНДИРУЮЩИХ ОТВЕРСТИЙ И МЕТОДА КОРРЕЛЯЦИИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОЛИМЕРНОМ КОМПОЗИТНОМ МАТЕРИАЛЕ*

Бабайцев А.В.¹, Насонов Ф.А.^{1,2}, Рабинский Л.Н.¹, Ян Наин Мин¹¹ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия²ПАО «Компания «Сухой», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Остаточные напряжения могут появиться из-за технологических особенностей процесса изготовления, из-за конструктивных особенностей (несимметричности укладки), вследствие длительных силовых или температурных воздействий, и т.п. В работе исследуется применение корреляции цифровых изображений в методе зондирующих отверстий для определения остаточных напряжений в композиционных материалах. Исследовались образцы, вырезанные из панели полимерного композиционного материала с несимметричной укладкой, в которых определялись деформации, появившиеся после просверливания отверстия в образце. Фиксация деформаций проводилась бесконтактно, с использованием метода корреляции изображений. Для повышения точности фиксации деформации на образцы наносился паттерн. В рамках данной работы рассматривались два варианта паттерна: крупный (размер маркера 0,05-0,8 мм) и мелкий (размер маркера 0,02-0,2 мм). Так как остаточные деформации были небольшими, то крупный паттерн не дал показательных результатов. Полученные экспериментальные деформации сравнивались с численным расчетом методом конечных элементов. Решение обратной задачи теории упругости для идентификации остаточных напряжений проводилось в системе Comsol с использованием численного конечно-элементного моделирования, метода Монте-Карло и Нельдера-Мида. Метод Монте-Карло применялся для поиска глобального минимума функции невязок, а метод Нелдера-Мида для уточнения локального минимума. Функция невязок расчетных и экспериментальных данных вычислялась в среднеквадратичном приближении. Для уточнения среднего поля деформаций в эксперименте и игнорирования неустраняемых погрешностей, связанные с неточностью экспериментальных данных, вводились малые значения поправки. В результате исследования было получено достаточное совпадение численных и экспериментальных результатов. Отличием реализованного метода от других методов измерения деформаций вокруг зондирующих отверстий является получение полной картины для всех компонент деформаций.

Ключевые слова: углепластик; остаточные напряжения; зондирующие отверстия; корреляции цифровых изображений

APPLICATION OF PROBING HOLE METHODS TO DETERMINE RESIDUAL STRESSES IN COMPOSITE MATERIALS

Babaytsev A.V.¹, Nasonov F.A.^{1,2}, Rabinskiy L.N.¹, Yan Naing Min¹

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект №20-01-00517).

ABSTRACT

Residual stresses can appear due to technological features of the manufacturing process, due to design features (asymmetric stacking), due to long-term force or temperature influences, etc. This work investigates the application of digital image correlation in the probing hole method to determine residual stresses in composite materials. Samples cut from a panel of a polymer composite material with asymmetric stacking were investigated, in which deformations that appeared after drilling a hole in the sample were determined. Deformation fixation was performed non-contactly, using the image correlation method. To improve the accuracy of strain fixation, a pattern was applied to the specimens. Two variants of the pattern were considered in this work: large (marker size 0.05-0.8 mm) and small (marker size 0.02-0.2 mm). Since the residual deformations were small, the coarse pattern did not produce representative results. The experimental deformations obtained were compared with numerical calculations using the finite element method. The solution of the inverse problem of elasticity theory to identify residual stresses was performed in the Comsol system using numerical finite-element modeling, the Monte Carlo method, and the Nelder-Meade method. The Monte Carlo method was used to find the global minimum of the residual stress function, and the Nelder-Meade method to refine the local minimum. The function of deviations of the calculated and experimental data was calculated in the root-mean-square approximation. Small correction values were introduced to refine the mean strain field in the experiment and to ignore the unrecoverable errors associated with the inaccuracy of the experimental data. As a result of the study, the numerical and experimental results were found to sufficiently coincide. The difference of the implemented method from other methods of measuring deformations around probing holes is the obtaining of a complete picture for all strain components.

Keywords: CFRP; residual stresses; probing holes; digital image correlations

ВВЕДЕНИЕ

Большое число работ посвящено изучению остаточных напряжений, возникающих в процессе литья, сварки, термической и механической обработки в ходе других процессов изготовления деталей, в особенности это касается композиционных материалов [1-3]. 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 деталях, которые впоследствии могут привести к снижению прочности композитов, нарушению структур армирования и изменению величин коэффициентов армирования, что снижает эксплуатационные характеристики деталей [3]. 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 [4-7]. Наибольшему негативному действию остаточных напряжений подвержены однонаправленные слои в поперечном направлении. 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.

Существуют следующие экспериментальные методы определения наличия и уровня остаточных напряжений; химические, механические, рентгенографические [8], поляризационно-оптические (метод фотоупругости), оптически чувствительных покрытий, голографической интерферометрии, электронной спекл-интерферометрии [9], акустические, твердости, магнитные, резистивные электроконтактные [10], лазерной интерферометрии [11], корреляции цифровых изображений (КЦИ). Широко распространены теоретические подходы к описанию распределения остаточных напряжений, основанные на теореме о разгрузке, методе решения связанных задач термоупругопластичности [12,13] и конечно-элементном анализе [14]. Укрупненно метод определения остаточных напряжений разделяют на две составляющие: способ воздействия на объект, нацеленный на проявление остаточных напряжений, и способ получения данных, являющихся исходными при расчете напряжений.

С точки зрения способов воздействия, разрушающие методы позволяют получать наиболее полную информацию: данные о напряжениях по всему объему соединения. Малоразрушающие и неразрушающие методы в большинстве случаев предназначены для исследования напряженного состояния поверхности. Однако при этом первые предполагают полное разрушение, а вторые требуют лишь создания локального дефекта на поверхности при сохранении целостности объекта.

Механические методы основаны на принципе упругой разгрузки объема материала при его освобождении от остаточных напряжений путем разрезки. Измеряя деформации, возникающие при разрезке, можно вычислить остаточные напряжения по формулам теории упругости.

Метод сверления отверстий – один из наиболее популярных полуразрушающих методов оценки остаточных напряжений. Благодаря просверливанию отверстия заблокированные остаточные напряжения снимаются, и соответствующие деформации на поверхности измеряются с помощью тензодатчиков, прикрепленных вокруг отверстия на поверхности. Из измеренных деформаций вокруг отверстия рассчитываются остаточные напряжения с использованием соответствующих калибровочных констант.

В работах [15-19] разработан и верифицирован метод определения остаточных напряжений в ортотропных композитных пластинах из различных материалов в пространственно-временном наблюдении, основанный на измерении локальных перемещений методом электронной спекл-интерферометрии. В работах [16-19] проведены детальные исследования анализа напряженного состояния в пластинах с наличием отверстий разного диаметра. В статье [16] разработан и верифицирован новый метод определения основных компонентов остаточных напряжений в композитных пластинах. Он основан на сквозном сверлении отверстий и дальнейших измерениях приращений диаметра отверстий в основных направлениях напряжений методом электронной спекл-интерферометрии. Теоретические и метрологические основы подхода вытекают из аналитического решения С.Г. Лехницкого, описывающего концентрацию напряжений вдоль края центрального открытого отверстия в прямоугольной ортотропной пластине при растяжении в главных направлениях анизотропии.

В настоящей работе рассматривается метод определения остаточных напряжений в композиционных материалах методом сверления отверстия.

Для этого были изготовлены однотипные композитные пластины с несимметричной укладкой. Исследовались два типа паттерна, отличающиеся между собой средним размером наносимых на поверхность точек. Образец фотографировался до сверления и после для определения деформаций. Полученные экспериментальные результаты сравнивались с численным моделированием в среде Comsol Multiphysics.

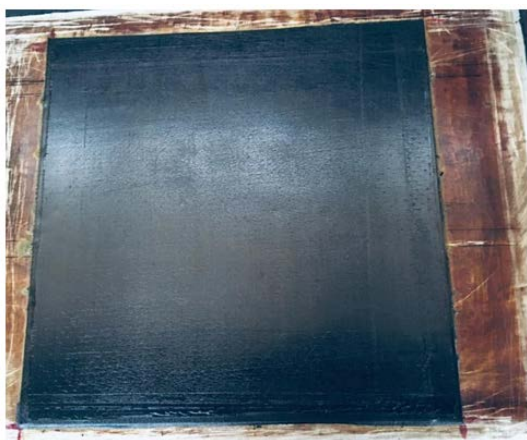
1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование остаточных напряжений в композиционных материалах проводилось на образцах из углепластика ВКУ-30 разработки ФГУП «ВИАМ» [20]. Изготавливалась панель с размерами 500x500 мм и несимметричной схемой укладки [0₄, 90₄]. Схема укладки представлена на рис.1а. Углепластик ВКУ-30 имеет в своем составе углеродное волокно UMT49S-12K-EP фирмы «Алабуга-Волокно» в качестве армирующего наполнителя, а матрицей является отвержденная эпоксидная композиция ВСК-14-3. После послойной выкладки и сборки технологического пакета была проведена предварительная холодная вакуумная подформовка пакета-заготовки.

Формование заготовки проводилось автоклавным методом по типовому режиму отверждения (3 часа выдержки при температуре 175°С и давлении формования 6 атм). У полученной панели после извлечения из оснастки появился изгиб по цилиндрической поверхности, высота которой составляет 94 мм. Полученная панель и ее изгиб представлены на рис.1б,в.

Номер слоя	Направление укладки
1	0°
2	0°
3	0°
4	0°
5	90°
6	90°
7	90°
8	90°

а



б



в

Рис.1. Изготовленная пластина из ВКУ-30 (а – схема укладки, б – заготовка на оснастке, в – изготовленная пластина).

Полученная панель была раскроена на образцы с размерами 100x100 мм на фрезерном станке с использованием диска с алмазным напылением. Полученные образцы углепластика после раскроя представлены на рис.2.

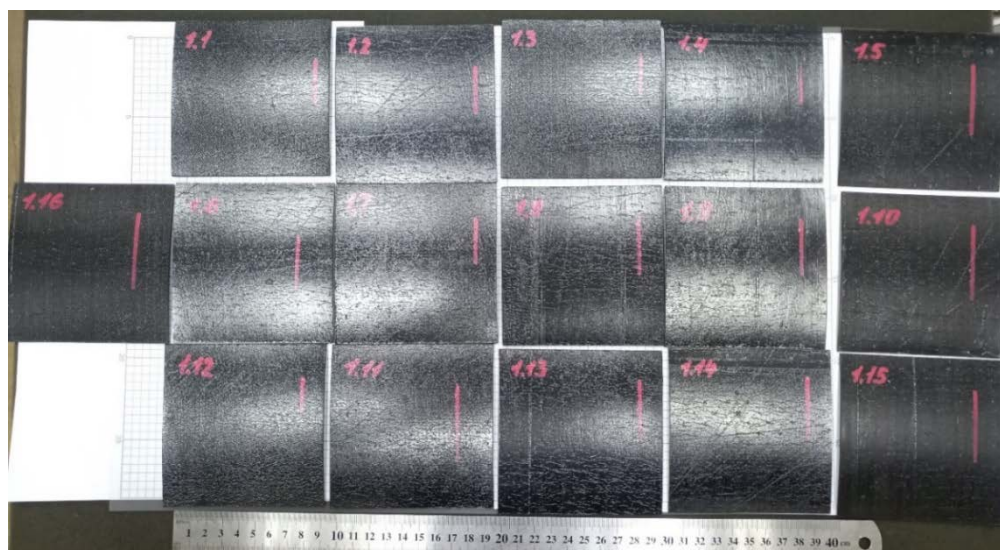


Рис.2. Образцы углепластика ВКУ-30.

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. Указанные свойства получены экспериментально. Погрешность определения коэффициента Пуассона составляет ~38%. Подобная погрешность измерения обуславливается малой величиной значения коэффициента Пуассона.

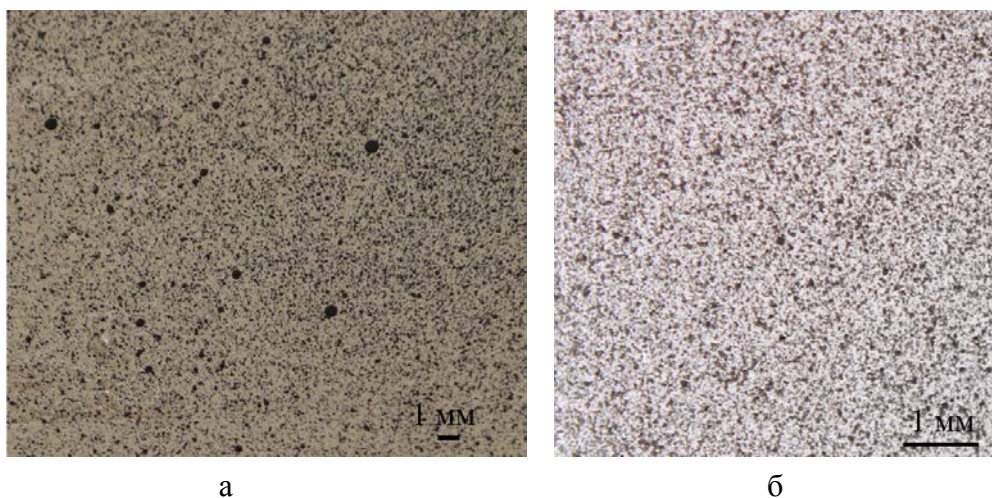
Таблица 1.

Механические свойства.

Марка	Плотность, [кг/см ³]	Модуль упругости, [ГПа] (вдоль / поперек)	Коэф. Пуассона (вдоль / поперек)	Предел прочности, [МПа]	Удлинение при разрыве, [%] (вдоль / поперек)
ВКУ-30	1,6	127 / 9	0,35/0,04	1780 / 53	1,1 / 0,4

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 1K. 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.4а. 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.3б.



а

б

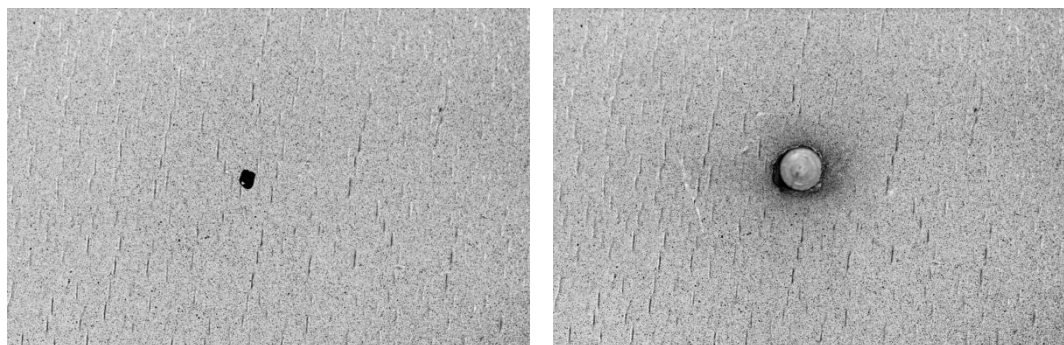
Рис.3. Паттерн (а – нанесенный аэрозольным баллончиком, б – нанесенный аэрографом).

Снимки образца углепластика до и после выполнения зондового отверстия показаны на рис.4. 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.

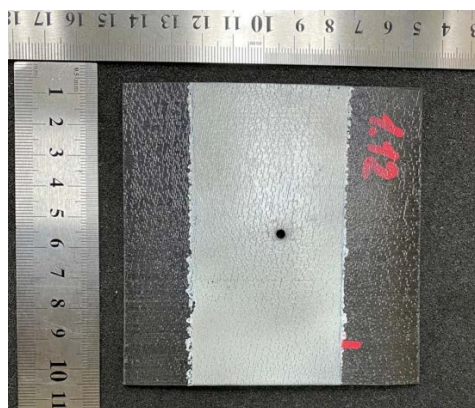
Для обработки экспериментальных данных применялась программа DICe (Digital Image Correlation Engine). Эта свободно-распространяемая программа реализует метод корреляции цифровых изображений. Программа DICe имеет открытый исходный код, предназначенный для использования в качестве модуля во внешнем приложении 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. 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.



а



б

Рис.4. Образец углепластика до и после выполнения зондирующего отверстия (а – макросъемка, б – испытанный образец).

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 неустраняемые 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.5. На рис.5а 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.5б представлено состояние близкое к двухосному растяжению с незначительным сдвигом.

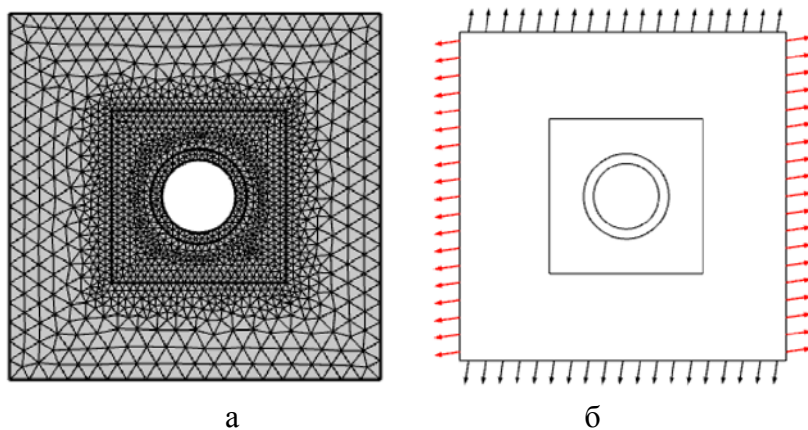


Рис.5. Пример конечно-элементной сетки (а) и значений задаваемого вектора напряжений на границе зоны анализа (б).

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.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты первичного анализа в DICe и ParaView показаны на рис.6. 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.

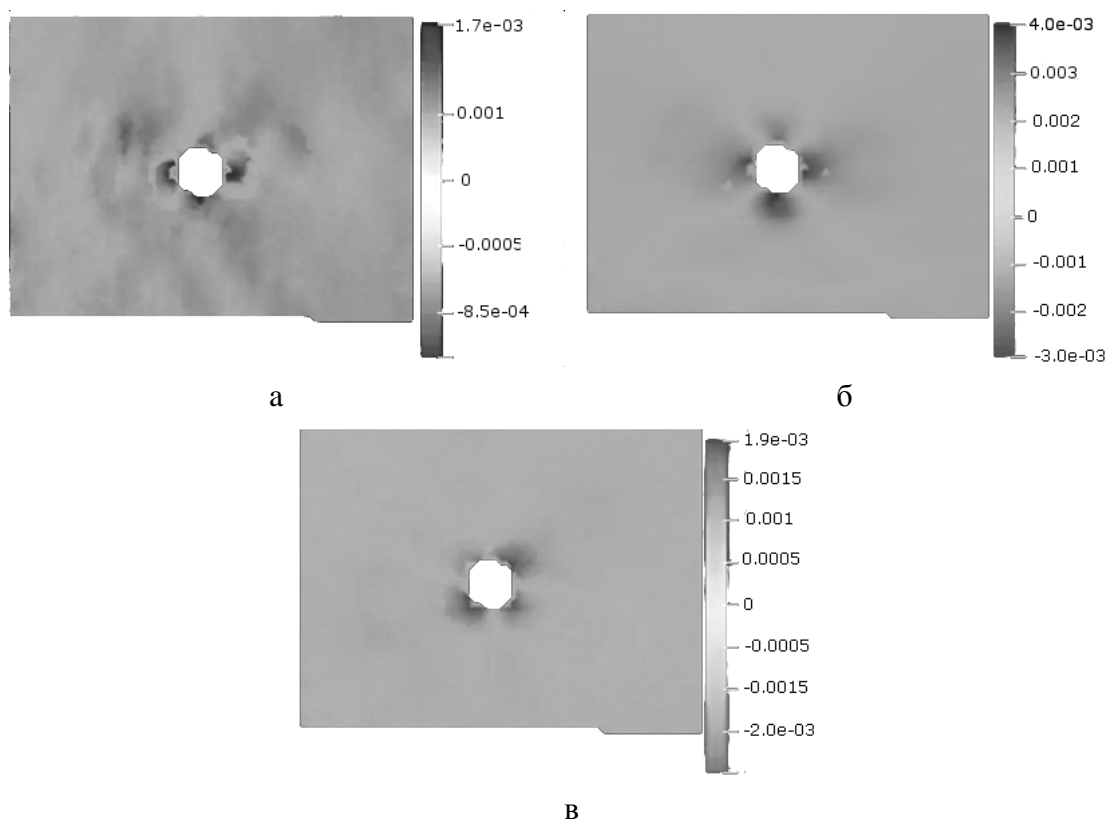


Рис.6. Результаты анализа в DICe и Paraview. (а – деформация в направлении X, б – деформация в направлении Y, в – деформация в направлении XY).

Результаты решения обратной задачи в COMSOL проиллюстрированы на рис.7, где показано сопоставление картины распределения деформаций в эксперименте и в расчете.

Найденные значения напряжений в композите составили 25 МПа (в направлении X) и 30 МПа (в направлении Y), то есть их уровень близок к значению прочности матрицы при растяжении (порядка 50-60 МПа), но не достигает его, поэтому образцы после изготовления не содержали дефектов, связанных с остаточными напряжениями. Остаточные касательные напряжения были близки к нулю, что соответствует использованной схеме армирования композита.

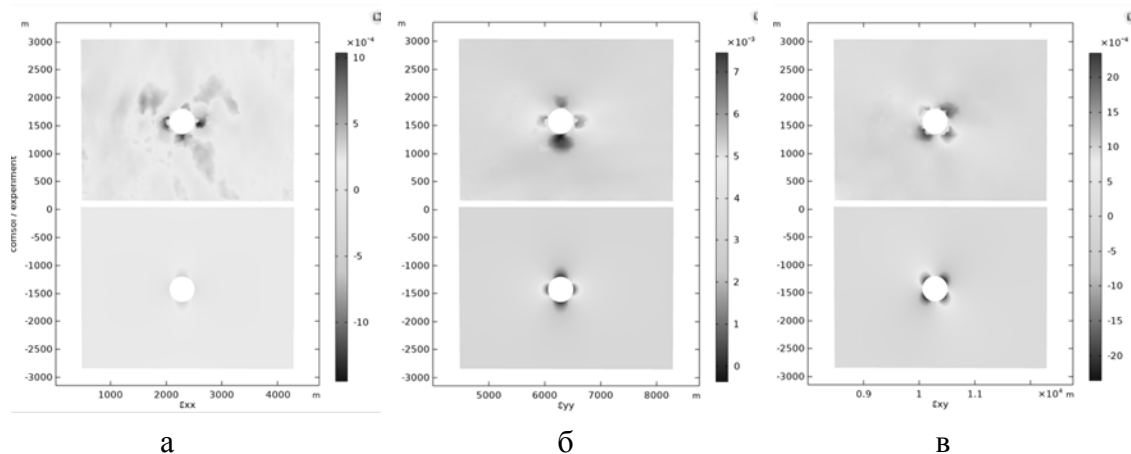


Рис.7. Результаты решения обратной задачи. Рисунки сверху – результат, полученный из эксперимента, рисунки внизу – численное решение с найденными остаточными напряжениями (а – деформация в направлении X, б – деформация в направлении Y, в – деформация в направлении XY).

При анализе результатов испытаний композиционных материалов могут возникать некоторые дефекты изображений (например, полосы линейных деформаций), которые говорят о повреждении образца в процессе сверления. В результатах КЦИ-анализа могут проявляться дефекты типа расслоения в виде полос с измененной интенсивностью деформаций. Таким образом, потенциально, КЦИ методы могут применяться и для контроля качества процессов обработки композиционных материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования остаточных напряжений в композиционных материалах методом зондирующих отверстий с применением корреляции цифровых изображений. Отличием реализованного метода от других методов измерения деформаций вокруг зондирующих отверстий является получение полной картины для всех компонент деформаций. Одновременно с деформациями определялись перемещения, которые, вообще говоря, являются первичными данными измерений.

Предложен и реализован метод оценки остаточных напряжений в композиционных материалах, основанный на сверлении зондирующих отверстий и применении метода корреляции цифровых изображений. В ходе рассмотрения двух типов паттерна наиболее мелкий размер паттерна показал более точную фиксацию деформаций. Проведенное численное моделирование в среде Comsol с достаточной точностью (менее 5%) совпало

с экспериментальными результатами. В ходе численного расчета были определены действующие напряжения.

Полученные результаты могут быть использованы для разработки методов проектирования и исследования НДС перспективных композитных тонкостенных авиационных конструкций, а также для контроля качества процессов обработки композиционных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышев Г.Н. *Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах.* – М.: Наука, 1996. – 240 с.
2. Babaytsev A.V., Kuznetsova E.L., Rabinskiy L.N., Tushavina O.V. *Investigation of permanent strains in nanomodified composites after molding at elevated temperatures // Periodico Tche Quimica.* – 2020. – Vol.17. – Iss.34. – Pp.1055-1067.
3. Дементьев И.И., Устинов А.Н. *Метод снижения остаточных напряжений в композитных элементах конструкций космических аппаратов // Альманах современной науки и образования.* – 2017. – Т.119. – №6. – С.27-31.
4. Виноградов В.М. *Остаточные напряжения в изделиях из композиционных материалов / В кн. Пластики конструкционного назначения.* – М.: Химия, 1974. – С.85-110.
5. Тростянская Е.Б., Виноградов В.М., Якусевич В.И. *Пути снижения остаточных напряжений в деталях из пластических масс // Механика полимеров.* – 1975. – №6. – С.1128-1129.
6. Афанасьев А.В. *Исследование влияния физико-механических факторов на остаточное напряженно-деформированное состояние изделий из композиционных материалов: дис. канд. техн. наук.* – М.: МАИ, 2010. – 124 с.
7. Берлин А.А. *Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: 4-е изд.* – СПб.: ЦОП «Профессия», 2011. – С.531-540.
8. Алексеев А.А., Тренинков И.А. *Способ определения остаточных напряжений в изделиях из монокристаллических материалов рентгеновским методом.* Патент RU 2 427 826 С1, 2010.
9. Игнатъев А.Г., Шахматов М.В., Зарезин А.А. *Электронная спекл-интерферометрия при измерении остаточных сварочных напряжений // Сварочное производство.* – 1998.– №12.– С.24-27.
10. Васильков С.Д., Тальнишних С.А. *Исследование остаточных напряжений резистивным электроконтактным методом // Изв. вузов. Приборостроение.* – 2010. – Т.53. – №8. – С.30-33.
11. ГОСТ Р 52891-2007 *Контроль остаточных технологических напряжений методом лазерной интерферометрии. Общие требования.* – М., 2009. – 12 с.
12. Васильев В.В. *Механика конструкций из композиционных материалов.* – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
13. Молодцов Г.А., Биткин В.Е., Симонов В.Ф., Урмансов Ф.Ф. *Формостабильные и интеллектуальные конструкции из композиционных материалов.* – М.: Машиностроение, 2000. – 352 с.

14. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. *Металлургия. Остаточные напряжения в металлопродукции: учеб. пособие для СПО.* – М.: Издательство Юрайт, 2018. – 247 с.
15. Супрапеди, Тойоока С. *Пространственно-временное наблюдение пластической деформации и разрушения методом лазерной спекл-интерферометрии* // Физическая мезомеханика. – 1998. – №1. – С.55-60.
16. Pisarev V.S., Eleonsky S.I., Chernov A.V. *Residual stress determination in orthotropic composites by displacement measurements near through hole* // Experimental mechanics. – 2015. – No.55. – Pp.1225-1238.
17. Pisarev V.S., Matvienko Y.G., Eleonsky S.I., Odintsev I.N. *Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses* // Engineering fracture mechanics. – 2017. – No.179. – Pp.348-374.
18. Pisarev V., Odintsev I., Eleonsky S., Apalkov A. *Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments* // Optics and lasers in engineering. – 2018. – No.110. – Pp.437-456.
19. Lekhnitsky S.G. *Theory of elasticity of an Anisotropic elastic body.* – New York: Holden-day, 1963. – 404 p.
20. Старков А.И., Куцевич К.Е., Тюменева Т.Ю. *Разработка композиционного материала клеевого на основе альтернативного углеродного жгутowego наполнителя марки UMT49S-12K-EP и клеевого связующего марки ВСК-14-3* // Труды ВИАМ. – 2020. – №6-7(89). – С.62-71.

REFERENCES

1. Chernyshev G.N. *Ostatochnye napryazheniya v deformiruemykh tverdykh telakh [Residual stresses in deformable solids].* Moskva, Nauka, 1996, 240 p.
2. Babaytsev A.V., Kuznetsova, E.L., Rabinskiy, L.N., Tushavina, O.V. *Investigation of permanent strains in nanomodified composites after molding at elevated temperatures.* Periodico Tche Quimica, 2020, Vol.17, Iss.34, Pp.1055-1067.
3. Dement'ev I.I., Ustinov A.N. *Metod snizheniya ostatochnykh napryazhenij v kompozitnykh ehlementakh konstruksij kosmicheskikh apparatov [Method of reducing residual stresses in composite elements of spacecraft structures].* Al'manakh sovremennoj nauki i obrazovaniya, 2017, Vol.119, No.6, Pp.27-31.
4. Vinogradov V.M. *Ostatochnye napryazheniya v izdeliyakh iz kompozitsionnykh materialov [Residual stresses in products made of composite materials].* V knige Plastiki konstruksionnogo naznacheniya. Moskva, Khimiya, 1974, Pp.85-110.
5. Trostyanskaya E.B., Vinogradov V.M., Yakusevich V.I. *Puti snizheniya ostatochnykh napryazhenij v detalyakh iz plasticheskikh mass [Ways to reduce residual stresses in plastic parts].* Mekhanika polimerov, 1975, No.6, Pp.1128-1129.
6. Afanas'ev A.V. *Issledovanie vliyaniya fiziko-mekhanicheskikh faktorov na ostatochnoe napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie izdelij iz kompozitsionnykh materialov [Research of influence of physical and mechanical factors on residual stress-strain state of products from composite materials].* Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk, Moskva, MAI, 2010, 124 p.

7. Berlin A.A. *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya, 4-e izdanie [Polymer composite materials: structure, properties, technology]*. Sankt-Peterburg, Tsentr obrazovatel'nykh programm "Professiya", 2011, Pp.531-540.
8. Alekseev A.A., Treninkov I.A. *Sposob opredeleniya ostatochnykh napryazhenij v izdeliyakh iz monokristallicheskikh materialov rentgenovskim metodom [Method of Determination of Residual Stresses in Articles Made of Monocrystalline Materials by X-Ray Method]*. Patent RU 2 427 826 C1, 2010.
9. Ignat'ev A.G., SHahmatov M.V., Zarezin A.A. *Ehlektronnaya spekl-interferometriya pri izmerenii ostatochnykh svarochnykh napryazhenij [Electronic speckle interferometry in measuring residual welding stresses]*. Svarochnoe proizvodstvo, 1998, No.12, Pp.24-27.
10. Vasil'kov S.D., Tal'nishnih S.A. *Issledovanie ostatochnykh napryazhenij rezistivnym ehlektrokontaktnym metodov [Residual stress research by resistive electro-contact methods]*. Izvestiya vuzov. Priborostroenie, 2010, Vol.53, No.8, Pp.30-33.
11. GOST R 52891-2007 *Kontrol' ostatochnykh tekhnologicheskikh napryazhenij metodom lazernoj interferometrii. Obshhie trebovaniya [Control of residual technological stresses by laser interferometry]*. Moskva, 2009, 12 p.
12. Vasil'ev V.V. *Mekhanika konstruksij iz kompozitsionnykh materialov [Mechanics of Structures of Composite Materials]*. Moskva, Mashinostroenie, 1988, 272 p.
13. Molodtsov G.A., Bitkin V.E., Simonov V.F., Urmansov F.F. *Formostabil'nye i intellektual'nye konstruksii iz kompozitsionnykh materialov [Formostable and intelligent structures from composite materials.]*. Moskva, Mashinostroenie, 2000, 352 p.
14. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. *Metallurgiya. Ostatochnye napryazheniya v metalloproduksii: uchebnoe posobie dlya SPO [Residual stresses in metal products: textbook for SPO]*. Moskva, Izdatel'stvo Yurajt, 2018, 247 p.
15. Suprapedi, Tojooka S. *Prostranstvenno-vremennoe nablyudenie plasticheskoy deformacii i razrusheniya metodom lazernoj spekl-interferometrii*. Fizicheskaya mezomekhanika, 1998, No.1, Pp.55-60.
16. Pisarev V.S., Eleonsky S.I., Chernov A.V. *Residual stress determination in orthotropic composites by displacement measurements near through hole*. Experimental mechanics, 2015, No.55, Pp.1225-1238.
17. Pisarev V.S., Matvienko Y.G., Eleonsky S.I., Odintsev I.N. *Combining the crack compliance method and speckle interferometry data for determination of stress intensity factors and T-stresses*. Engineering fracture mechanics, 2017, No.179, Pp.348-374.
18. Pisarev V., Odintsev I., Eleonsky S., Apalkov A. *Residual stress determination by optical interferometric measurements of hole diameter increments*. Optics and lasers in engineering, 2018, No.110, Pp.437-456.
19. Lekhnitsky S. G. *Theory of elasticity of an Anisotropic elastic body*. New York, Holden-day, 1963, 404 p.
20. Starkov A.I., Kucevich K.E., Tyumeneva T.Yu. *Razrabotka kompozitsionnogo materiala klevogo na osnove al'ternativnogo uglerodnogo zhgutovogo napolnitelya marki UMT49S-12K-ER i klevogo svyazuyushhego marki VSK-14-3 [Development of composite adhesive material based on alternative carbon bundle]*

filler UMT49S-12K-ER and adhesive binder VSK-14-3]. Trudy VIAM, 2020, No.6-7(89), Pp.62-71.

Поступила в редакцию 10 мая 2021 года.

Сведения об авторах:

Бабайцев Арсений Владимирович – к.т.н., н.с., НИО-9, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: ar77eny@gmail.com

Насонов Федор Андреевич – к.т.н., ст. преп., Кафедра 101, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: nasonovf2006@mail.ru

Рабинский Лев Наумович – д.ф.-м.н., директор дирекции Института №9, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: rabinskiy@mail.ru

Ян Наин Мин – асп., Кафедра 910Б, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: yannaingminn52@gmail.com