

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-59-66

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ДЕФЕКТОВ ТИПА РАССЛОЕНИЯ В СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ*

© Александр Сергеевич Урнев, Александр Сергеевич Чернятин,
Юрий Григорьевич Матвиенко, Игорь Александрович Разумовский

Институт машиноведения им. А. А. Благонравова РАН, Москва, Россия; e-mail: Urnev-AS@yandex.ru

Статья поступила 25 апреля 2018 г.

Изложен метод оценки зоны локализации и геометрических параметров дефекта типа расслоения в слоистых композитных материалах (КМ) на основе математической обработки результатов измерений деформаций, полученных с помощью сетки волоконно-оптических датчиков в процессе эксперимента. Представлены результаты методических разработок, связанных с определением оптимальной топологии сетки датчиков для обеспечения детектирования дефектов заданных размеров с необходимой точностью и определения их параметров. Описаны методики моделирования дефекта и расчетного анализа НДС в его зоне, основанные на алгоритме моделирования задач анализа напряженно-деформированного состояния в зоне дефекта с использованием двумерных конечных элементов (вместо трехмерных), обеспечивающие возможность использования моделей меньшей размерности при сохранении всех особенностей напряженно-деформированного состояния. Представлены результаты определения параметров дефекта по данным измерений деформаций на основе методики решения обратных задач, основанной на решении задачи минимизации расхождения между вектором деформационных откликов и вектором искомых параметров. Методика реализована в виде вычислительного комплекса (БК), состоящего из ряда макросов для ПК ANSYS и программ с графическим интерфейсом для ПК MATLAB. Приведены результаты циклических испытаний образца из многослойного КМ с дефектом типа расслоения. Оценку приращения размеров дефекта в процессе нагружения выполняли путем математической обработки данных, зарегистрированных волоконно-оптическими датчиками деформаций, наклеенными на одной из поверхностей образца, на основе решения обратной задачи. Сопоставление результатов расчетов геометрических параметров дефектов с данными измерений, полученными методом ультразвуковой дефектоскопии, показало их хорошее соответствие.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; композитный материал; дефект; расслоение; определение геометрических параметров.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIZING OF A DELAMINATION DEFECT IN LAYERED COMPOSITE MATERIALS

© Alexander S. Urnev, Alexander S. Chernyatin,
Yuriy G. Matvienko, Igor A. Razumovskii

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: Urnev-AS@yandex.ru

Submitted April 25, 2018.

A methodical approach to the estimation of the localization zone and geometric parameters of a delamination defect in layered composite materials is presented on the basis of mathematical processing of the experimental results of deformation measurements obtained with a grid of fiber-optic sensors. The results of methodological developments related to the determination of the optimal topology of the grid of sensors to ensure the detection of defects of a given size with the necessary accuracy and determination of their parameters are presented. We present methods for computational analysis and simulation of the strain-stress state in the defect zone, based on the algorithm used for modeling the problems of strain-stress analysis in the defect zone using 2D finite elements, instead of 3D ones, thus allowing the use a model of lower dimensionality and retain all the features of the stress-strain state. The results of methodological developments related to the determination of the defect parameters

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 17-08-00886.

from the results of strain measurements using the methodology of solving the inverse problem, based on solving the problem of minimizing the discrepancy between the vector of deformation response and the vector of initial parameters are presented. The technique is implemented as a software consisting of a series of macros for ANSYS and programs for MATLAB. The results of cyclic testing of a sample from a multilayer CM with a delamination type of defect are presented. Estimation of the increment in the defect size upon loading is performed by mathematical processing of data recorded by fiber-optic strain sensors glued on one of the sample surfaces, based on the solution of the inverse problem. Comparison of the results of calculations of geometric parameters of the defects with the measurement data obtained by the method of ultrasonic flaw detection showed good agreement between them.

Keywords: computer simulation; composite material; defect; delamination; determination of geometrical parameters.

В последние десятилетия композиционные материалы (КМ) стали одними из основных конструкционных материалов, используемых при создании современных деталей машин, механизмов, изделий, которые находят применение не только в авиационной и космической технике, но и в различных отраслях машиностроения, приборостроения, биомедицине и др. [1]. При этом в качестве средства измерения деформаций используют волоконно-оптические датчики (ВОД) на основе брегговских решеток (ВБР) [2 – 4], встроенные непосредственно в КМ и образующие сетку, что открывает возможность измерения деформаций непосредственно в процессе эксплуатации конструкции. К настоящему времени накопленный опыт использования ВБР-датчиков позволяет применять их для непрерывной регистрации деформаций в соответствующих зонах, дискретно расположенных вдоль оптического волокна, как при обслуживании (штатное ТО, ремонт), так и непосредственно во время эксплуатации. Система регистрации и обработки информации обеспечивает возможность записи данных о текущем состоянии труднодоступных и высоконагруженных зон соответствующего элемента конструкции, что может стать основой для оценки накопленного повреждения материала и возможности наступления критического состояния.

Выполненный авторами аналитический обзор публикаций, а также информации, имеющейся в ведущих научно-исследовательских центрах и проектных организациях страны, позволяет сделать вывод о том, что наиболее распространенным структурным дефектом в композитном материале является расслоение [5 – 7]. Данный дефект может возникать в материале на всех стадиях жизненного цикла изделия из КМ, включая производство. Расслоения при эксплуатации изделий из КМ, возникающие вследствие статических перегрузок, усталости, ударных воздействий, оказывают существенное влияние на остаточную прочность и ресурс конструкций.

В основе рассматриваемого в работе способа диагностики дефектов в слоистых КМ лежит оценка изменения поля деформаций, имеющего

место в зоне влияния дефекта. Результаты численного анализа методом конечных элементов (МКЭ) серии типовых краевых задач о напряженно-деформированном состоянии элементов конструкций из КМ показывают, что наличие дефекта типа расслоения вызывает заметное изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) в его окрестности. Вышеупомянутые подходы обеспечивают основу при создании интеллектуальных конструкций [8].

Цель исследования, результаты которого представлены в данной статье, — разработка методической и программной основы для комплексного подхода к оценке размеров скрытых дефектов в слоистых композиционных материалах на основе обработки результатов измерений деформаций во встроенных непосредственно в КМ датчиках деформаций.

Методика определения топологии сетки датчиков

Под оптимальной топологией сетки ВОД понимаются величины максимальных размеров шагов сетки, в узлах которой расположены датчики, обеспечивающие возможность получения достаточного по объему и точности массива экспериментальных данных, последующая математическая обработка которых позволяет определить зоны локализации и размеры дефектов различных типов (в первую очередь дефектов типа расслоения в КМ эллиптической формы). Для решения этой задачи разработана методика, алгоритм которой приведен на рис. 1.

После определения оптимального шага ВОД проводят оценку положения дефекта, заключающуюся в следующем. Сначала определяют положение квадрата сетки, в котором расположен дефект. При его поиске исходят из предположения, что сумма эквивалентных напряжений в четырех вершинах этого квадрата будет максимальна по сравнению со значениями в других квадратах. После этого уточняют положение дефекта как координаты «центра тяжести» фигуры, построенной по значениям напряжений в четырех верши-

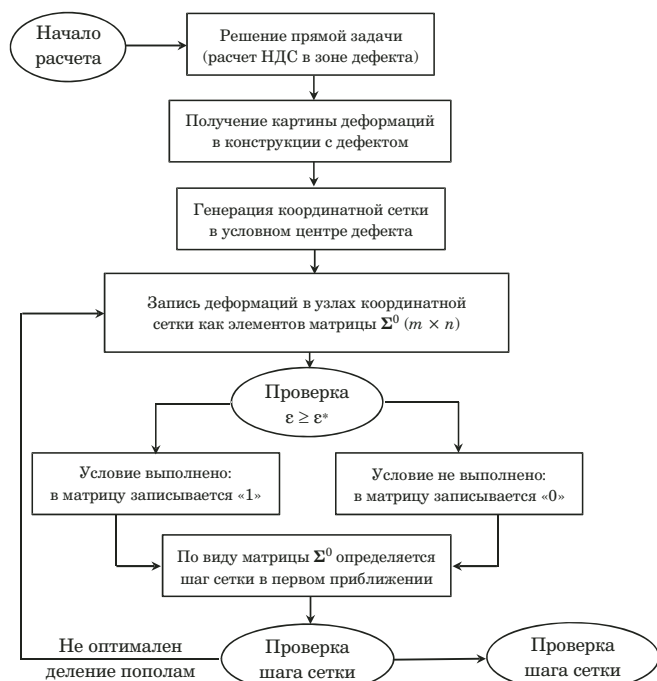


Рис. 1. Схема алгоритма вычисления оптимального шага сетки ВОД (ϵ — деформация, ϵ^* — порог чувствительности ВОД)

нах «дефектного» квадрата (при этом напряжения выступают как весовые коэффициенты для вершин). Проведены тестирование алгоритма и расчеты оптимального шага сеток ВОД в зависимости от уровня и вида нагрузок для дефектов расслоения в ряде типовых задач (испытывали образцы КМ четырех стрингерных панелей и сотовых обшивок авиационных конструкций), которые показали, что предложенный алгоритм и соответствующие программы обеспечивают получение результатов с требуемой для практики точностью.

Методика моделирования дефектов

При использовании разрабатываемой методики оценки параметров повреждений натурных объектов в условиях эксплуатации возникает необходимость быстрой и качественной обработки информации, поступающей со множества датчиков, расположенных по всей конструкции. Это приводит к необходимости быстрого и точного решения большого числа краевых задач в процессе эксплуатации объекта по текущей информации, регистрируемой датчиками.

Практическое использование такого подхода требует наличия значительных вычислительных и временных ресурсов. Последнее требование еще в большей степени относится к анализу элементов из КМ, которые создаются индивидуально под каждую зону конструкции с учетом осо-



Рис. 2. Схема алгоритма моделирования и расчета НДС в зоне дефекта (типа расслоения) в КМ с использованием 2D модели

бенности дефекта, что обуславливает огромную вариативность геометрических параметров, укладки волокон.

В связи с этим в рамках исследований разработана методика моделирования НДС в зоне дефекта в КМ, которая позволяет многократно увеличить скорость расчетов задач о НДС конструкции из КМ при сохранении необходимой точности результатов. В предложенном алгоритме (рис. 2) моделирование дефекта типа расслоения, характеризуемого локальным нарушением связей между слоями КМ и возникновением границы раздела (полости) между двумя слоями, проводится следующим образом. Бездефектная область КМ моделируется оболочечными конечными элементами, для которых указывается весь набор монослоев КМ (имеется N слоев). В дефектной области задается контур дефекта и создаются две пространственно-совпадающие поверхности (обозначаемые как «*bot*» и «*top*») с едиными по контуру границами, через которые они «пристыковываются» к бездефектной области. Обе поверхности также разбиваются оболочечными слоистыми элементами, но одна поверхность

имеет набор из N_{bot} слоев, лежащих ниже границы раздела, а другая поверхность — N_{top} слоев, расположенных выше; соответственно, $N_{bot} + N_{top} = N$. На границе раздела также можно ввести контактную группу, а вдоль контура дефекта — когезионные элементы. Посредством соответствующего задания плоскости приведения узловых сил и перемещений для двух групп слоев («*bot*» и «*top*») удастся учесть взаимное их расположение по толщине, несмотря на то, что моделирующие их элементы геометрически лежат в одной плоскости модели (соответственно, вся КЭ-модель является плоской). Заметим, что предложенный подход моделирования расслоения, в частности, может быть применен к моделированию «выпучивания», т.е. позволяет учитывать локальную потерю устойчивости отслоившейся группы слоев (например, N_{bot}), находящихся в условиях сжимающих напряжений. В зависимости от вида нагружения и учета симметрии на контурах пластины могут накладываться ограничения линейных и угловых перемещений.

Главная особенность предлагаемой концепции моделирования дефектных элементов КМ с расслоением заключается в использовании оболочечных композитных элементов (плоского четырехузлового оболочечного КЭ с шестью степенями свободы в каждом узле и опциями слоистого композиционного материала типа Shell181 в среде ANSYS) вместо объемных композитных элементов (например, Solid186 — двенадцатиузловый КЭ с тремя степенями свободы в каждом). Это дает возможность существенно снизить вычислительные ресурсы, сохраняя точность моделирования деформированного состояния в зоне дефекта, и расширить возможности приложения нагрузок, что позволяет использовать 2D-элементы в более широком спектре задач и расчетов.

Как показывают результаты рассмотренных модельных задач, предложенный подход и алгоритм сведения трехмерной задачи о НДС в зоне дефекта типа расслоения в многослойном КМ к 2D-задаче обеспечивают возможность существенного (на порядок) снижения требований к вычислительным ресурсам (или временных затрат). Заметим, что при увеличении количества слоев многослойного КМ время расчета задачи с использованием 3D-модели будет увеличиваться, в то время как при использовании 2D-модели — оставаться неизменным.

Результаты решения рассмотренных модельных задач [9], а также имеющийся опыт расчетов ряда других практических задач показали высокую эффективность использования данного подхода для оценки влияния дефекта на НДС для дальнейшего его использования в рамках системы мониторинга состояния конструкции. Отме-

тим, что существенно неоднородное и вместе с тем весьма характерное распределение деформаций в зоне дефекта позволяет говорить о потенциальной возможности детектирования появления и расчета параметров дефекта типа расслоения по величинам деформаций, регистрируемых современными экспериментальными методами.

Определение параметров дефекта на основе обработки результатов измерений деформаций

Геометрические параметры дефекта, т.е. оси эллипса a и b , определяли по зарегистрированным с помощью сетки ВОД деформациям на основе методики решения обратных задач, предложенной в работах [9 – 12] и основанной на решении задачи минимизации расхождения между $\mathbf{e}^*$ и $\mathbf{e}$, где $\mathbf{e}$ — вектор деформационных откликов, а $\mathbf{e}^*$ — вектор искомых параметров.

Методика реализована в виде вычислительного комплекса (БК), состоящего из ряда макросов для ПК ANSYS и программ с графическим интерфейсом для ПК MATLAB, которые в совокупности образуют единый программный продукт. Разработанные алгоритмы обладают значительной универсальностью, что обеспечило успешное применение БК для решения задачи идентификации параметров дефекта. Привлечение двух программных сред связано с тем, что по возможностям математической обработки данных и их визуализации APDL в среде ANSYS значительно уступает среде MATLAB. В последней, кроме того, имеется возможность создания интерактивных приложений с графическим интерфейсом.

Работа с вычислительным комплексом базируется на использовании управляющих программ, разработанных в среде MATLAB и имеющих графический (GUI) интерфейс. Среди прочих это программы:

- сбора экспериментальной информации (ПСЭИ);

- решения прямой задачи (ПРПЗ);

- формирования банка откликов (ПФБО);

- решения обратной задачи (ПРОЗ), включая оценку устойчивости решения.

Программа ПСЭИ позволяет непосредственно на загруженных в компьютер картинах деформационных полей (или картах расположения датчиков) на объекте интерактивно формировать массивы данных $\mathbf{e}_i^*$ в произвольных точках измерений и привязывать их к соответствующей КЭ-модели. Программа обладает развитыми возможностями построения сплайновых линий (аналогов интерференционных полос), генерации то-

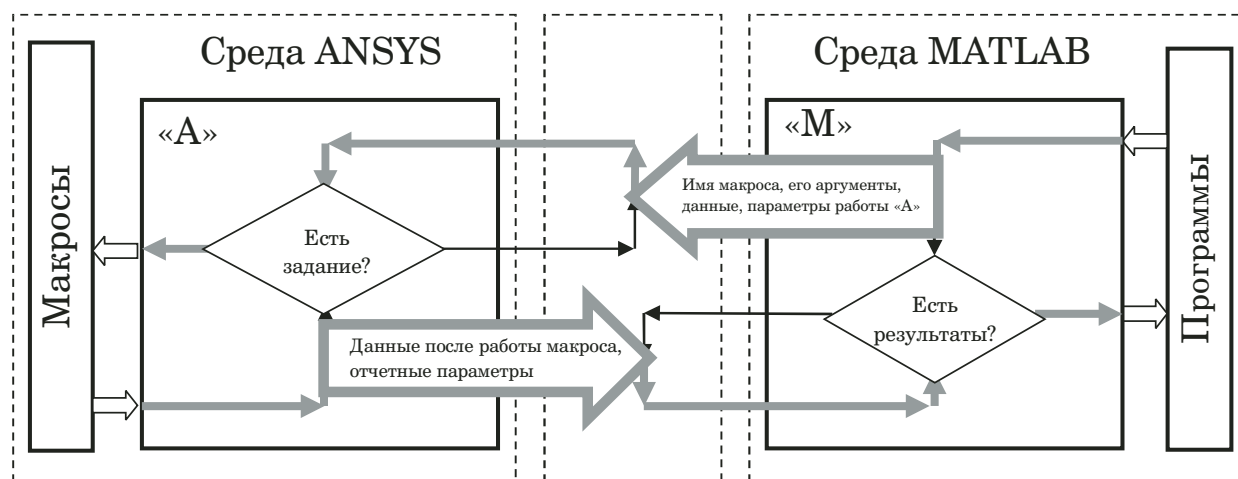


Рис. 3. Принципиальная схема взаимодействия ПК ANSYS и ПК MATLAB при совместном решении общей задачи

чек измерения (массивов точек), управления примитивами и пр.

Программа ПРПЗ, предназначенная для моделирования НДС в КМ, обеспечивает поэтапный контроль построения КЭ-модели, расчет общего НДС, представление и сохранение полей деформационных откликов, а также позволяет проводить процедуру «численного моделирования экспериментальных данных», когда величины деформационных откликов ϵ_i^* автоматически определяются на основе расчетов НДС.

Программа ПФБО предназначена для накопления информации об НДС при определенных заданных значениях искомых параметров P_j и формирования банка откликов в соответствии с принятой структурой.

Программа ПРОЗ обеспечивает контроль и визуализацию решения обратной задачи согласно предложенному в работе подходу, а также позволяет определять разброс решений (P_j) при вариации различных факторов (погрешности данных экспериментов, геометрии области, начальных оценок искомых параметров P_j и др.) для анализа их влияния на устойчивость и точность решения.

Таким образом, функциональные возможности указанных программ в совокупности охватывают все этапы математической обработки экспериментальной информации в целях определения искомых параметров, а также позволяют проводить полноценный численный эксперимент от этапа постановки до проверки адекватности полученного решения.

Решение краевых задач механики деформированного твердого тела в одном ПК (ANSYS) и реализация различных математических алгоритмов и процедур обработки данных — в другом ПК (MATLAB) стало возможным благодаря разработке специального алгоритма (рис. 3) и напи-

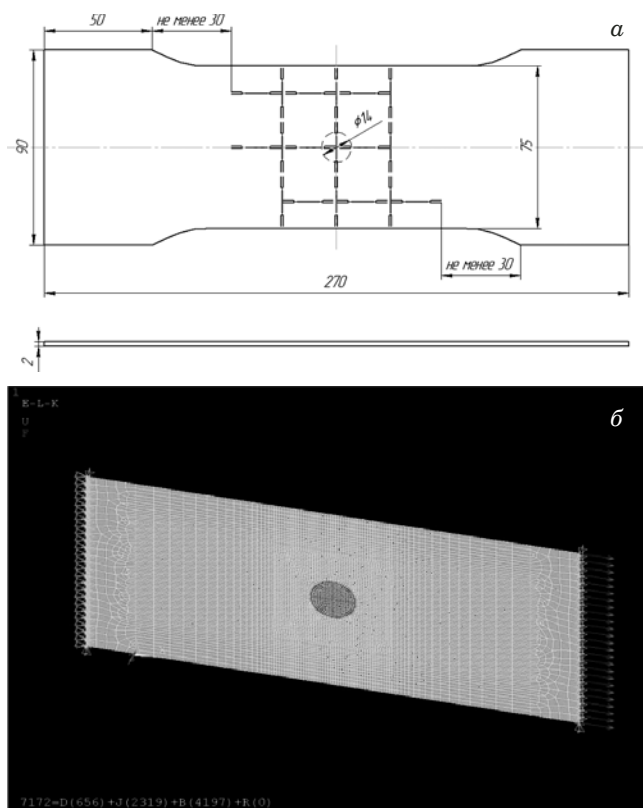


Рис. 4. Эскиз образца с установленными ВОД (а) и схема его конечно-элементной модели (б)

сания соответствующих программ («А» и «М»), осуществляющих совместный непрерывный обмен данными между указанными программными комплексами. В предложенном варианте взаимодействия между программными комплексами функции распределяются следующим образом: MATLAB является управляющей средой, вырабатывающей команды и данные для ANSYS и принимающей от него результаты расчета для дальнейшей обработки и (или) выработки новых команд и данных. В данном случае ANSYS являет-

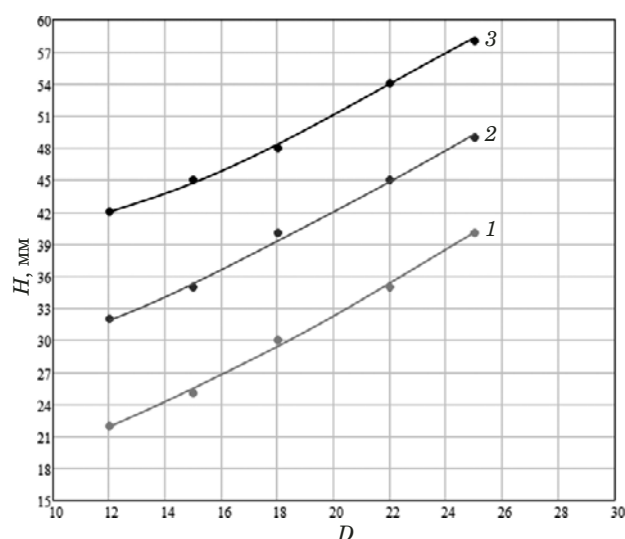


Рис. 5. Зависимость шага сетки H от характерного размера дефекта D : 1 – 3 соответствуют нагрузке, равной 5, 10, 15 кН

ся расчетным модулем, в котором реализована основная краевая задача.

В разработанном вычислительном комплексе процедура взаимодействия выполняется (используется) при формировании банка откликов (БО) и наполнении протокола измерений (ПИ) данными об откликах в точках измерений, полученными расчетным путем (имитация экспериментальных данных). Это позволяет существенно уменьшить трудоемкость решения поставленной задачи, поскольку расчет проводится полностью в автоматическом режиме, исключая необходимость «ручной» обработки, формирования и записи данных расчетов при каждом варианте значений параметров P_j .

Экспериментальное исследование

Экспериментальное исследование процесса развития внутреннего дефекта типа расслоения проводили на плоском образце из КМ (рис. 4, а). Материал образца — слоистый композит, состоящий из 10 слоев толщиной 0,2 мм с укладкой [45/–45/0/90/0], симметричной относительно середины образца. В образце путем наклейки специальной пленки с антиадгезионными свойствами создавался исходный дефект в виде круга диаметром 14 мм, расположенного между пятым и шестым слоями. Образец подвергали циклическому растяжению осевой силой $F_{\max} = 5$ кН, коэффициент асимметрии цикла $r = -1$.

Для расчета НДС образца с дефектом (результаты которого использовали для определения оптимального шага сетки ВОД и оценки изменения размеров дефекта в процессе испытаний образца) использовали КЭ-модель, схема

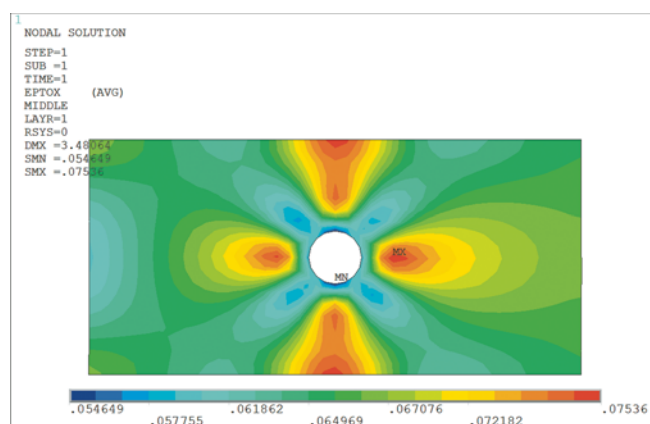


Рис. 6. Неоднородность поля деформаций, вызванная дефектом (зона над и под дефектом исключена из отображения)

которой представлена на рис. 4, б. Моделирование дефекта проводили с помощью изложенного выше методического подхода с применением двухмерных конечных элементов. На КЭ-модели в центре находится зона дефекта, вокруг которого задана сгущенная регулярная сетка; на удалении от зоны дефекта — укрупненная регулярная сетка, а зоны элементарного образца, находящиеся в захватах, разбиты нерегулярной сеткой.

На одну из поверхностей образца наклеивали ВОД чувствительностью 10^{-5} (в величинах деформаций), база датчиков $l = 10$ мм. Полученные на основе разработанной авторами методики зависимости шага сетки датчиков от размера указанного дефекта и величины нагрузки представлены на рис. 5.

Из приведенных на рис. 5 результатов следует, что для принятых размеров исходного дефекта и величины нагрузки величина оптимального шага сетки составляет 25 мм.

Полученное на основе расчета распределение деформаций в зоне исходного дефекта в образце, характеризующее связанную с влиянием расслоения неоднородность поля деформаций, представлено на рис. 6.

Перед началом испытаний проведен ультразвуковой контроль, который подтвердил, что размер дефекта составил $\sim 14,0$ мм в продольном и поперечном направлениях.

В процессе циклических испытаний осуществлены три остановки (после $N_1 = 790\,000$, $N_2 = 1\,065\,000$ и $N_3 = 1\,370\,000$ циклов), во время которых наряду с регистрацией деформаций проводили измерения осей a и b дефекта. При дальнейшем увеличении числа циклов нагружения ($N_k > N_3$) образец начал разрушаться и эксперимент был прекращен.

В табл. 1 представлены результаты измерений деформаций образца в узлах сетки ВОД

после N_3 циклов, а также величины деформаций, полученные расчетным путем. Кроме того, здесь же приведены относительные отклонения экспериментальных значений деформаций от расчетных:

$$\delta = \frac{|\varepsilon_i^{\text{расч}} - \varepsilon_i^{\text{эксп}}|}{\varepsilon_i^{\text{эксп}}} \cdot 100\%, i = x, y.$$

Из табл. 1 следует, что отклонения деформаций для большинства датчиков не превышают 5 %, что позволяет сделать вывод о согласованности результатов расчетов на основе МКЭ с реальным деформированным состоянием. Вместе с тем следует отметить, что в ходе эксперимента несколько датчиков вышли из строя, что, по-видимому, связано с их отслаиванием в условиях циклического нагружения. Кроме того, отклонения показаний нескольких датчиков от расчетных значений превысили величину $\bar{\delta} = 10$ %. С учетом этого для решения основной задачи — определения размеров дефекта — использовали только результаты измерений деформаций датчиков, в которых $\delta < \bar{\delta}$. Заметим также, что поле деформаций в зоне, расположенной в непосредственной близости от дефекта, имеет достаточно высокий градиент, что приводит к дополнительной погрешности результатов измерений, связанной с весьма большой базой датчиков (10 мм), которые регистрируют осредненные величины.

Основные результаты исследования приведены в табл. 2, где представлены величины a^* , b^* , полученные ультразвуковым методом, а также значения a , b , найденные на основе математической обработки результатов измерений деформаций на основе изложенной выше методики и соответствующей программы. Видно, что при малых изменениях величин дефектов по сравнению с их исходными размерами погрешности определения их геометрических параметров составляют < 20 %. Столь значительную (но вполне приемлемую с точки зрения практики) погрешность можно объяснить тем, что при малых величинах деформационного отклика велика относительная погрешность измерений. С ростом размеров дефекта уровень деформационного отклика повышается, о чем свидетельствует весьма низкая погрешность определения максимального размера дефекта $\Delta b = 4,8$ %.

Таким образом, при циклическом нагружении образца сопоставление результатов численной оценки роста размеров дефекта, полученных на основе математической обработки данных, зарегистрированных с помощью ВОД, с результатами измерений размеров дефектов ультразвуковым методом показало их хорошее соответствие.

Следующим этапом развития исследований планируется применение разработанных методик и программ для оценки развития дефектов в элементах конструкций авиационной техники из

Таблица 1. Значения расчетных и экспериментальных деформаций в узлах сетки ВОД после $N = N_3 = 1\,370\,000$ циклов (дефект $a = 15,2$ мм, $b = 17,0$ мм)

№ ВОД	ε_x			№ ВОД	ε_y		
	Эксперимент	Расчет	δ , %		Эксперимент	Расчет	δ , %
1	—	0,0611		10	–0,0181	–0,0149	21,6
2	0,0648	0,0623	3,9	11	–0,0173	–0,0155	11,5
3	0,0545	0,0632	13,7	12	–0,0170	–0,0151	12,7
4	—	0,0647		13	–0,0159	–0,0162	1,6
5	0,0597	0,0631	5,3	14	—	–0,0189	
6	—	0,598		15	–0,0168	–0,0141	18,5
7	0,0599	0,0614	2,6	16	–0,0162	–0,0146	11,2
8	0,0444	0,5913	24,8	17	–0,0152	–0,0143	5,8
9	—	0,0621		18	–0,0209	–0,0219	4,9

Таблица 2. Основные результаты исследования

N , циклов	a^* , b^* , мм (эксперимент)		Число ТИ ($N_{\text{ex}} + N_{\text{cy}}$)	a , b , мм (расчет)		Относительная погрешность	
	a^* , мм	b^* , мм		a , мм	b , мм	Δa , %	Δb , %
N_1	14,5	15,5	14 (7 + 7)	17,20	18,52	18,6	19,5
N_2	15,2	16,0	8 (3 + 5)	17,28	18,91	13,7	18,2
N_3	15,2	17,0	7 (1 + 6)	16,77	17,81	10,4	4,8

слоистых КМ с встроенной сеткой ВОД при циклических испытаниях в лабораторных условиях.

Следует заметить, что в случаях развития дефектов в зонах конструкций, для которых имеет место существенно неоднородное НДС, корректное решение задачи идентификации дефекта на основе математической обработки данных о деформациях в узлах сетки может существенно усложниться с точки зрения необходимого объема и точности экспериментальной информации (которые не всегда могут быть практически достижимы). С другой стороны, используемый подход к решению задачи оценки размеров дефекта не имеет принципиальных ограничений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернышев С. Л. Новый этап применения композиционных материалов в авиационной промышленности / Проблемы машиностроения и автоматизации. 2013. № 1. С. 3 – 10.
2. Каблов Е. Н., Сиваков Д. В., Гуляев И. Н., Сорочкин К. В., Федотов М. Ю., Дианов Е. М., Васильев С. А., Медведков О. И. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах / Все материалы. Энциклопедический справочник. 2010. № 3. С. 10 – 15.
3. Davis C., Tejedor S., Grabovac I., Kopezyk J. and Ravis T. High-Strain Fiber Bragg Gratings for Structural Fatigue Testing of Military Aircraft / Photonic Sensors. 2012. Vol. 2. N 3. P. 215 – 224.
4. Di Sante R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications / Sensors. 2015. N 15. P. 18666 – 18713.
5. Полилов А. Н. Экспериментальная механика композитов. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 375 с.
6. Черепанов Г. П. Механика разрушения композиционных материалов. — М.: Наука, 1983. — 296 с.
7. Справочник по композиционным материалам. В 2-х кн. / Под ред. Дж. Любина, Б. Э. Геллера. — М.: Машиностроение, 1988. — 896 с.
8. Матвиенко Ю. Г. Тенденции нелинейной механики разрушения в проблемах машиностроения. — М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2015. — 56 с.
9. Урнев А. С., Чернятин А. С., Матвиенко Ю. Г., Разумовский И. А. Моделирование трещиноподобных дефектов в слоистой композитной конструкции / Машиностроение и инженерное образование. 2017. № 3(52). С. 64 – 72.
10. Чернятин А. С., Разумовский И. А. Комплексный анализ элементов конструкций с поверхностными трещинами / Машиностроение и инженерное образование. 2011. № 1. С. 66 – 76.
11. Chernyatin A. S., Razumovskii I. A. Methodology and software package for assessment of stress-strain state parameters of full-scale structures and its application to a study of loading level, defect rate, and residual stress level in elements of NPP equipment / Strength of materials. 2013. Vol. 45. Issue 4. P. 506 – 511.
12. Разумовский И. А., Чернятин А. С., Фомин А. В. Экспериментально-расчетные методы определения напряженно-деформированного состояния элементов конструкций / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 10. С. 57 – 65.

REFERENCES

1. Chernyshev S. L. New stage of application of composite materials in aircraft manufacturing / Probl. Mashinostr. Avtom. 2013. N 1. P. 3 – 10 [in Russian].
2. Kablov E. N., Sivakov D. V., Gulyaev I. N., Sorokin K. V., Fedotov M. Yu., Dianov E. M., Vasiliev S. A., Medvedkov O. I. Application of optical fiber as strain sensors in polymer composite materials / Vse Mater. Éntsikloped. Sprav. 2010. N 3. P. 10 – 15 [in Russian].
3. Davis C., Tejedor S., Grabovac I., Kopezyk J. and Ravis T. High-Strain Fiber Bragg Gratings for Structural Fatigue Testing of Military Aircraft / Photonic Sensors. 2012. Vol. 2. N 3. P. 215 – 224.
4. Di Sante R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications / Sensors. 2015. N 15. P. 18666 – 18713.
5. Polilov A. N. Experimental Mechanics of Composites. — Moscow: Izd. MG TU im. N. É. Bauman, 2015. — 375 p. [in Russian].
6. Cherepanov G. P. Fracture mechanics of composite materials. — Moscow: Nauka, 1983. — 296 p. [in Russian].
7. Lubin G. Handbook of composites. — Springer US, 1982. — 786 p. [in Russian].
8. Matvienko Yu. G. Trends in nonlinear fracture mechanics in mechanical engineering problems. — Moscow – Izhevsk: Inst. Komp'yuternykh Issl., 2015. — 56 p. [in Russian].
9. Urnev A. S., Chernyatin A. S., Matvienko Yu. G., Razumovsky I. A. Computer simulation of crack-like defects in the laminated composite material / Mashinostr. Inzh. Obrazov. 2017. N 3(52). P. 64 – 72 [in Russian].
10. Chernyatin A. S., Razumovskii I. A. Complex analysis of constructions' elements with surface cracks / Mashinostr. Inzh. Obrazov. 2011. N 1. P. 66 – 76 [in Russian].
11. Chernyatin A. S., Razumovskii I. A. Methodology and software package for assessment of stress-strain state parameters of full-scale structures and its application to a study of loading level, defect rate, and residual stress level in elements of NPP equipment / Strength of materials. 2013. Vol. 45. Issue 4. P. 506 – 511.
12. Razumovskii I. A., Chernyatin A. S., Fomin A. V. Experimental and computational methods for determining the stress-strain state of structural elements / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2013. Vol. 79. N 10. P. 57 – 65 [in Russian].