

DOI: [10.7242/1999-6691/2017.10.4.38](https://doi.org/10.7242/1999-6691/2017.10.4.38)

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ В ОКРЕСТНОСТИ ВСТРОЕННОГО В ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С УЧЕТОМ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КОМПОЗИТА *

Н.А. Кошелева, Г.С. Сероваев

Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация

Настоящая работа является фрагментом двух важных научных направлений: механики полимерных композиционных материалов (ПКМ) и создания новых средств диагностики и мониторинга механического состояния конструкции на основе использования волоконно-оптических датчиков. Номенклатура и области применения ПКМ расширяются очень быстро. В настоящее время процент использования композиционных материалов является одним из показателей конкурентности соответствующей продукции. При этом теоретические разработки, обеспечивающие оценку работоспособности конструкций из ПКМ, не всегда успевают за запросами конструкторов, создающих новые изделия. Поэтому модельные оценки должны быть дополнены современными системами мониторинга. Волоконно-оптические датчики открывают возможности для создания новых сценариев мониторинга. Один из них связан с использованием датчиков, встроенных в ПКМ. В данном случае появляется новая разновидность smart-материала, в которой ПКМ, наряду с выполнением основных функций представляет информацию о своих параметрах: температура, деформация и т.д. Создание этого класса smart-материалов требует решения ряда задач. Одной из них посвящена настоящая работа, а именно оценке методами математического моделирования изменений жесткостных и прочностных характеристик изделий из ПКМ вследствие встраивания в материал волоконно-оптических датчиков. В отличие от известных работ при построении расчетных моделей учитываются: слоистая структура ПКМ; виды укладки слоев; варианты компоновки слоев и оптического волокна; наличие технологического дефекта в виде смоляного кармана и устранении точек сингулярности напряжений, которые присутствуют в известных расчетных схемах. Результатом работы является использование предлагаемой модели для оценки уровня концентрации напряжений в слоях композиционного материала, прилегающих к оптическому волокну.

Ключевые слова: композитные материалы, оптические волокна, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование

STRESS-STATE MODELING IN THE VICINITY OF AN OPTICAL FIBER EMBEDDED INTO POLYMER COMPOSITE MATERIAL TAKING INTO ACCOUNT THE STRUCTURAL FEATURES OF THE COMPOSITE *

N.A. Kosheleva, G.S. Serovaev

Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russian Federation

The present work is a fragment of two important scientific areas: mechanics of polymeric composite materials (PCM) and creation of new diagnostic tools and monitoring of the mechanical state of a structure based on the use of fiber-optic sensors. The nomenclature and the range of their applications expand very quickly. Currently, the percentage of composite materials is one of the indicators of respective products competitiveness indices. At the same time, theoretical developments that provide an assessment of the performance of PCM products, do not always meet designers requests on new products. Therefore, the model estimates should be supplemented with modern monitoring systems. Fiber-optic sensors offer opportunities for creating new monitoring scenarios. One of them is connected with the use of embedded sensors into PCM. In this case, a new kind of smart material appears, in which the PCM, along with the basic functions, provides information on its parameters: temperature, strain, etc. The creation of this class of smart materials requires the solution a number of tasks. Present work is devoted to the evaluation by mathematical modeling methods of changes in the stiffness and strength characteristics of PCM products due to optical fiber sensors embedding into material. In contrast to the known works, in computational models constructing, the following are taken into account: the layered structure of PCM; options for stacking layers; layers and optical fiber layout options; the presence of a technological defect in the form of a resin pocket with the elimination in the model of points of stress singularity that are present in known design schemes. The result of the work is the use of the proposed model for estimating the level of stress concentration in the layers of composite material adjacent to the optical fiber.

Key words: composite materials, optical fibers, stress-strain state, numerical simulation

1. Введение

Одной из перспективных и востребованных научных и инженерных задач на сегодняшний день является создание smart-материалов и конструкций, обладающих способностью диагностики своего механического состояния в процессе эксплуатации. Smart-материалы, согласно одной из классификаций [1], должны включать одну или несколько из следующих структур: чувствительные элементы, системы исполнительных механизмов, процессорные системы обработки информации в режиме реального времени. В 1996 году в США Комитетом по новым материалам для современных гражданских самолетов, Комиссией по конструкциям и механическим системам и Национальным исследовательском советом [2] был опубликован отчет «Новые материалы для коммерческих транспортных средств следующего поколения». В этом отчете были сделаны выводы о перспективах применения smart-материалов на

начальной стадии их активного развития в ближайшие 15-20 лет. В выводах данного отчета отмечается, что: конструкции, содержащие элементы из smart-материалов, будут доступными, практичными и достаточно экономичными, чтобы их стало возможно применять для коммерческих самолетов; класс smart -материалов исследуется интенсивно, и быстро развивающиеся технологии позволят практически реализовать наработки в данной области; способности smart-материалов в первую очередь найдут применение для мониторинга состояния конструкций и фиксирования состояния окружающей среды.

Анализ современной литературы позволяет сделать заключение, что эти прогнозы оправдались. Доля использования слоистых композитных материалов в производстве объектов самого широкого круга назначений увеличивается с каждым годом [3]. Это происходит благодаря высоким удельным прочностным характеристикам таких материалов, возможности существенно снизить вес проектируемой конструкции, а так же обеспечению контроля получаемых механических характеристик материала за счет сочетания различных видов связующего и армирования и возможности осуществления различных видов и направлений укладки слоев. Структура композитных материалов позволяет эффективно сочетать их с чувствительными элементами, обеспечивающими измерение требуемых характеристик объекта наблюдения. В настоящее время наибольшие перспективы для встраивания в интеллектуальные системы связаны с использованием оптических волокон и пьезоэлектрических материалов. Все большее распространение приобретают волоконно-оптические датчики деформаций (ВОДД). Чувствительные элементы на основе оптических волокон хорошо зарекомендовали себя для измерения деформаций и температуры на уже готовых объектах (здания, мосты и т.д.) [4–9], а совершенствование аппаратуры позволяет осуществлять сбор данных как при статических, квазистатических, так и при динамических воздействиях на контролируемый объект.

Внедрение оптических волокон в структуру полимерных композитных материалов (ПКМ) открывает принципиально новые возможности для контроля состояния конструкций в процессе их эксплуатации. Smart-конструкции на основе композитных материалов с внедренными ВОДД имеют перспективы использования в авиационной, аэрокосмической, гражданской и военной отраслях [10–13]. Они позволят обеспечить контроль безопасности на всех стадиях жизнедеятельности конструкций, начиная с изготовления. Неоспоримыми преимуществами оптических волокон являются их малые размеры, в результате чего их можно встраивать между различными слоями композитного материала, образуя тем самым сеть оптических волокон внутри конструкции. Оптические волокна имеют широкий рабочий температурный диапазон, что дает возможность контроля технологических стадий производства композитных материалов. А отсутствие чувствительности к электромагнитным воздействиям позволяет использовать ВОДД в условиях, где неприемлемы другие виды чувствительных элементов.

Расчет напряженно-деформированного состояния реальных конструкций, выполненных из композиционных материалов, с учетом встраиваемых оптических волокон является важной и актуальной задачей. Оценка влияния волокон на интегральные механические характеристики и перераспределение напряжений и деформаций в окрестности волокна в ПКМ позволит более точно оценить надежность и качество smart-изделий, создаваемых на базе ВОДД. Именно поэтому значительное внимание в современной литературе уделяется численному моделированию: рассматривается влияние встроенных датчиков на механические характеристики композиционных материалов. В качестве примера можно рассмотреть работу [14], в которой аналитическими методами исследуются напряжения и деформации в окрестности оптического волокна при изотропных свойствах композиционного материала. В работе [15] рассматриваются особенности передачи деформации от материала к датчику (оптическому волокну), встроенному в данный материал. В первой части исследования перенос деформации определяется при помощи моделирования методом конечных элементов круглого изотропного оптоволокна, внедренного сначала в изотропный композиционный материал, а затем в анизотропный. Передача деформации зависит от механических свойств принимающего материала и датчика (модуля Юнга и коэффициента Пуассона), от укладки композитного материала (однонаправленная укладка / перекрестная укладка) и положения датчика в определенном слое. Во второй части статьи разработана и рассмотрена модель переноса деформаций для одного конкретного типа укладки и датчика.

Проблемы, связанные с влиянием интегрированного оптоволокна на свойства ПКМ, вопросы ввода-вывода оптоволокна из композита, вопросы выбора модели, связывающей деформацию оптического волокна в месте волоконной брэгговской решетки с измерением ее резонансной длины волны, проблема калибровки достаточно детально освещены в работах [16–19]. В работе [20] при помощи метода конечных элементов предсказывают геометрию смоляного кармана вокруг внедренных оптических волокон. Подробно рассмотрены нюансы определения неотвержденных свойств материала, включая методику определения жесткости при изгибе препрегов с высокой температурой отверждения. Результаты моделирования хорошо коррелируют со всеми рассматриваемыми микроскопическими изображениями, которые были сделаны для нескольких слоев с внедренными оптическими волокнами разного диаметра, включая изменение толщины слоистого композита и укладки слоев. Влияние смоляного кармана – полости вокруг оптического волокна, заполненной связующим, так же рассмотрено в ряде работ других авторов [21–24].

В настоящей работе сделан акцент на моделировании слоистой структуры полимерного композиционного материала, позволяющий более полно оценить влияние армирующих волокон на локальные механические характеристики, учесть наличие технологических дефектов (смоляной карман) в структуре ПКМ при внедрении оптического волокна, а так же учесть перераспределение напряжений деформаций в окрестности волокна.

2. Постановка задачи

Технологии получения слоистых полимерных композитных материалов включают в себя укладку нескольких слоев препрегов, с последующим их прессованием при соответствующих температурах. Препрег – это композитный материал полуфабрикат, представляющий из себя листы тканых или нетканых волокнистых материалов (армирующих волокон) пропитанных неотвержденным полимерным связующим. Как правило, они имеют либо однонаправленную структуру укладки волокон, либо тканую структуру (Рис. 1).

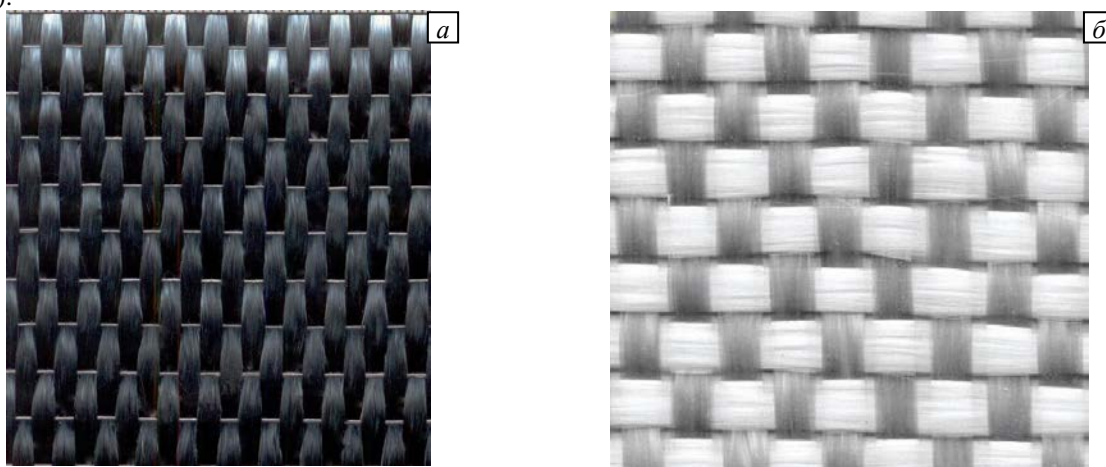


Рис. 1. Варианты препрегов: однонаправленный препрег (а), тканый препрег (б)

Существует несколько масштабных уровней моделирования композиционных материалов: моделирование на микроуровне; представление композитного материала в виде слоистой структуры; однородное приближение с эффективными механическими характеристиками (Рис. 2).

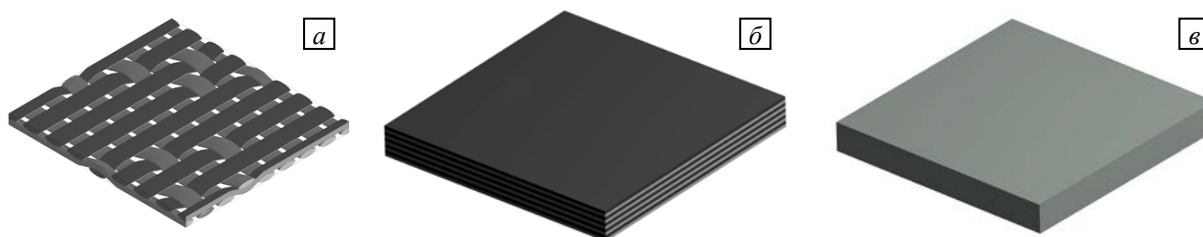


Рис. 2. Масштабные уровни моделирования композитного материала: микромасштабный уровень (а); слоистое представление (б); однородное приближение (в)

На микроуровне учитывается структура композитного материала (армирующие волокна, связующее) и их взаимодействие друг с другом. Для исследования материала на данном масштабе используется представительный объем, который должен достоверно отражать поведение материала в целом. Данный масштаб моделирования наиболее подходит для исследования механических свойств композитного материала при разном объемном содержании составных компонент и видах структуры. В настоящей работе такой подход не рассматривается. В силу слоистого строения большинства композитов, широко распространено моделирование композитного материала как объекта, состоящего из пакета слоев. Такой масштабный уровень позволяет учесть различную ориентацию слоев ПКМ. Самым крупномасштабным является моделирование ПКМ, как однородного материала с эффективными механическими характеристиками, полученными для определенной укладки. Основным преимуществом такого подхода является возможность построения моделей целых конструкций при низких вычислительных затратах по сравнению со слоистым подходом. При моделировании материала в виде слоистой структуры, однонаправленный препрег может быть представлен моделью трансверсально-изотропного тела, тканый – ортотропной упругой средой.

Соизмеримые размеры слоя препрега и оптических волокон позволяют их встраивать между слоями на этапе формирования пакета из слоев. При дальнейшем прессовании пакета оптическое волокно сохраняет свою геометрию, а слои препрега в окрестности волокна искривляются и происходит образование кармана, который заполняется полимерным связующим. Данная подобласть представляет собой технологический дефект, называемый смоляным карманом.

Таким образом, при моделировании ПКМ со встроенным оптоволоконном, рассматривается объект, который состоит из композитного материала, оптического волокна и смоляного кармана (Рис. 3)

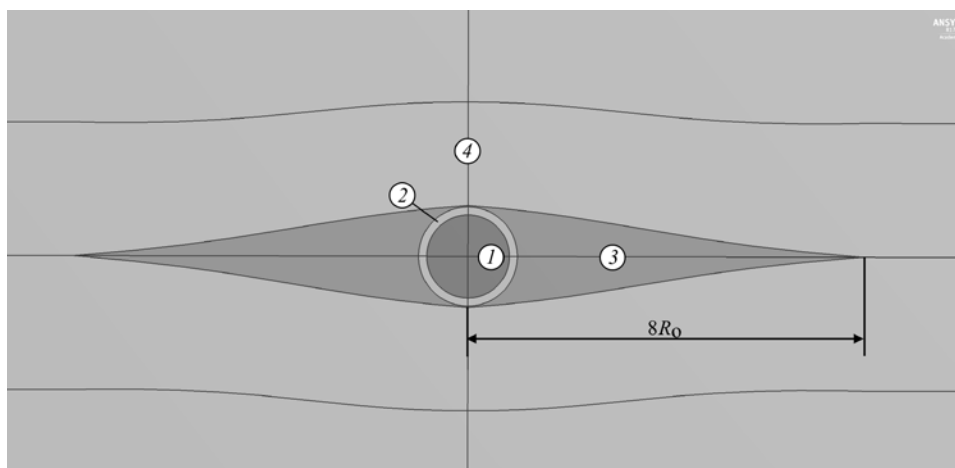


Рис. 3. ПКМ с оптическим волокном и смоляным карманом: оптическое волокно (1); оболочка оптического волокна (2); смоляной карман (3); ПКМ (4); R_0 – радиус оптоволоконна

В настоящей работе исследуется наиболее распространенный вариант оптоволоконна из кварца, который имеет модуль упругости $E = 71,4$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,17$. Защитная оболочка выполнена из полиимида и имеет механические характеристики: $E = 2$ ГПа, $\nu = 0,35$. Смоляной карман заполнен эпоксидной смолой с механическими свойствами $E = 2,9$ ГПа, $\nu = 0,36$. Геометрия смоляного кармана получена на основе анализа фотографий срезов реальных образцов [20]. Его длина составляет 8 радиусов оптического волокна.

В известных моделях [21, 22], как правило, принимается схема, в которой оптическое волокно примыкает к композитному материалу, а устье смоляного кармана имеет форму острого угла. В этом случае точка примыкания оптического волокна к ПКМ и вершина острого угла являются внутренними особыми точками, в которых всегда будет иметь место сингулярность, связанная с наличием бесконечных значений напряжений [25]. Этот результат является следствием геометрической идеализации. Для устранения данного результата, принимается что между оптическим волокном и ПКМ имеется достаточно тонкая прослойка из эпоксидного материала, а устье смоляного кармана имеет малый радиус скругления. Толщина прослойки и радиус скругления могут варьироваться в расчете.

Наиболее распространенным является представление ПКМ в рамках однородной ортотропной упругой среды. В данной работе была рассмотрена модель полимерного композиционного материала, учитывающая слоистое строение. Такой подход позволяет учесть ориентацию волокон, при этом каждый из слоев имеет эффективные упругие характеристики.

Численная модель ПКМ с внедренным оптическим волокном состоит из 20 слоев. Толщина одного слоя составляет 0,2 мм. Рассматриваются варианты укладки слоев, при которых оптическое волокно расположено между слоями с ориентацией [0/0], [90/90] и [0/90]. На рисунке 4 представлены два варианта статического нагружения модели со встроенным оптическим волокном между слоями [0/0] и смоляным карманом: распределенная нагрузка σ_0 вдоль оси Z и распределенная нагрузка σ_0 вдоль оси Y . Здесь слои представляют собой однонаправленные препрега, свойства которых приведены в таблице 1.

В рассматриваемой модели принимается, что вдоль оси Z , при $Y > 8R_0$, все слои имеют одинаковую толщину. Также считается, что вне заданного от волокна числа слоев N (в расчете 5-7 слоев) слои параллельны друг другу. Это означает, что в зоне $-8R_0 < Y < 8R_0$ в N слоях при прессовании происходит уменьшение толщины слоев за счет перетекания смолы из слоев препрега. Изменение толщины убывает по мере удаления от оптического волокна. В представленной расчетной схеме оптическое волокно имеет радиус $R_0 = 0,062$ мм, толщина полиимидной оболочки — 0,012 мм.

Параллельно были выполнены вычисления для модели полимерного композиционного материала с эффективными упругими свойствами (таблица 1), которые получены для характеристик препрега.

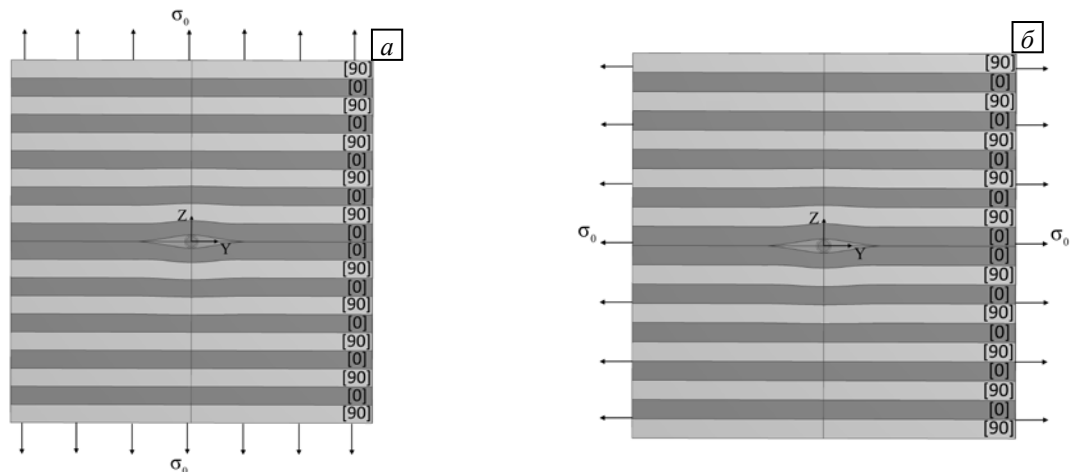


Рис. 4. Расчетная схема слоистого композитного материала со встроенным волокном при наличии смоляного кармана и действии распределенной нагрузки σ_0 вдоль оси Z (а); вдоль оси Y (б)

Таблица 1. Механические свойства однонаправленного препрега

Материал	E_x , ГПа	E_y , ГПа	E_z , ГПа	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} , ГПа	G_{yz} , ГПа	G_{xz} , ГПа
Однонаправленный препрег	158,5	8,96	8,96	0,45	0,32	0,32	3,0	4,6	4,6
Эффективные свойства пакета слоев	70,8	69,0	10,4	0,04	0,46	0,46	4,2	3,4	3,4

Анализ напряженно-деформированного состояния представленных моделей рассматривается в рамках статической задачи теории упругости. Математическую формулировку поставленной задачи можно записать с помощью принципа возможных перемещений:

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_{S_\sigma} F_i \delta u_i dS.$$

Здесь $\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ — компоненты тензора напряжений, C_{ijkl} — тензор упругих постоянных, ε_{ij} — компоненты тензора деформаций u_i — компоненты вектора перемещений, ρ — удельная плотность материала, F_i — компоненты вектора внешних нагрузок, V — рассматриваемый объем, S_σ — поверхность, на которой заданы граничные условия в напряжениях: $\sigma_{yy}|_{S_\sigma} = \sigma_0$ или $\sigma_{zz}|_{S_\sigma} = \sigma_0$.

Численное исследование выполнено с применением пакета конечно-элементного анализа Ansys. Поставленная задача решается в трехмерной постановке. В силу симметрии рассматривается четверть модели с соответствующими условиями симметрии на границах. На поверхности в плоскостях $X=0$ и $X=L$ (где L — толщина модели) накладывается ограничение перемещений вдоль оси X , для того, чтобы обеспечить условие $\varepsilon_x = 0$. Размер конечно элементной сетки подбирается таким образом, чтобы обеспечить сходимость получаемых результатов (Рис. 5).

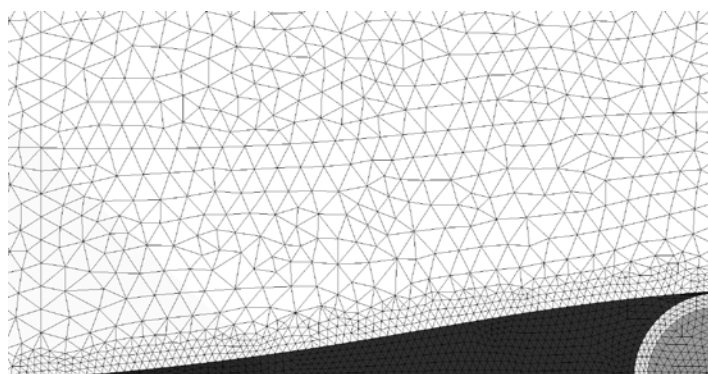


Рис. 5. Вид конечно элементной сетки модели с внедренным оптическим волокном и смоляным карманом

3. Результаты

Во всех рассмотренных случаях вычислен коэффициент концентрации напряжений σ_k , равный отношению максимальных напряжений σ_{\max} к прикладываемой нагрузке σ_0 :

$$\sigma_k = \sigma_{\max} / \sigma_0$$

Также анализируется местоположение максимальных напряжений для каждого из вариантов. Следует отметить, что из рассмотрения исключается область оптического волокна и смоляного кармана, так как наибольший интерес представляет сравнение двух подходов к моделированию композитного материала (слоистая модель и однородная) и то, насколько каждый из подходов способен оценить опасные зоны в композитном материале. Полученные результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Максимальные значения концентрации σ_k

Нагрузка вдоль оси Y			Однородный материал	Нагрузка вдоль оси Z			Однородный материал
Слоистый материал, в котором волокно лежит между слоями:				Слоистый материал, в котором волокно лежит между слоями:			
[0/90]	[0/0]	[90/90]	[0/90]	[0/0]	[90/90]		
6,89	3,77	5,96	2,95	1,58	1,33	1,57	1,51

Оба рассмотренных подхода демонстрируют увеличение максимальных напряжений при встраивании оптического волокна в структуру композитного материала. Наиболее выраженный рост напряжений происходит при нагрузке вдоль оси Y. При данном типе нагружения наблюдается существенное расхождение результатов слоистой и однородной моделей. Кроме того при учете слоистой структуры возможен вариант при котором максимальная концентрация напряжений реализуется не в зоне композитного материала, наиболее близкой к оптическому волокну, а между слоями с ориентацией [0/90]. Данный случай продемонстрирован на рисунке 6. На рисунке 6а изображено поле напряжений σ_{yy} слоистой модели, на рисунке 6б – однородной модели.

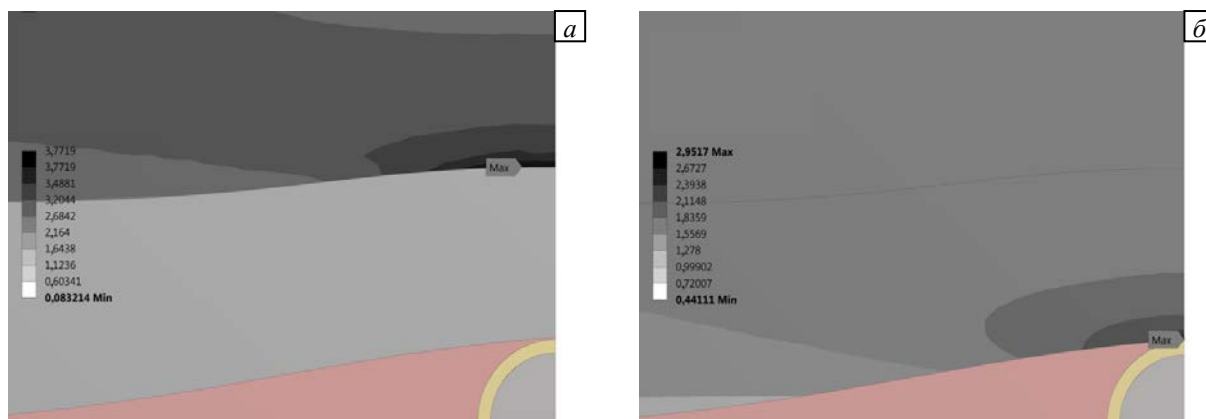


Рис. 6. Поле напряжений при расположении оптического волокна между слоями [0/0]: слоистая модель (а); однородная модель (б)

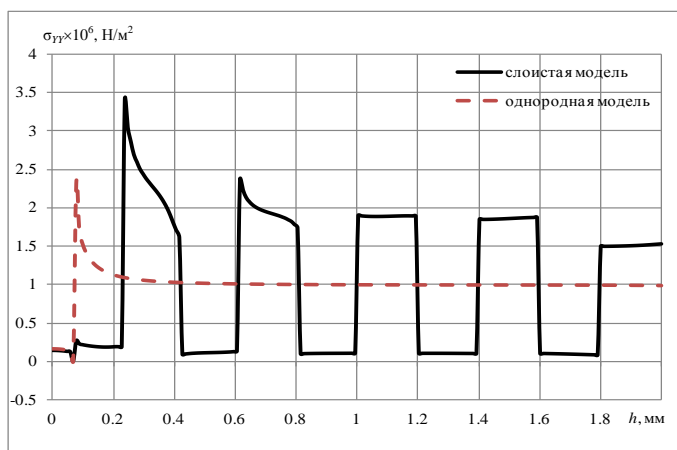


Рис. 7. Распределение напряжений σ_{yy} по толщине модели

Наблюдается существенное различие в местоположении зоны максимальных напряжений для двух подходов. Отличия в распределении напряжений σ_{yy} по толщине модели для двух подходов представлены на рисунке 7.

Подход, основанный на использовании эффективных характеристик пакета слоев, имеет важное достоинство, заключающееся в простоте реализации, но не способен учитывать особенности напряженно-деформированного состояния, возникающие при различной укладке слоев композитного материала.

4. Выводы

В данном исследовании выполнена численная оценка напряженно-деформированного состояния в слоистом композитном материале с внедренным оптическим волокном на примере двух подходов моделирования ПКМ. Построенная модель учитывает наличие технологического дефекта: смоляного кармана. Получены результаты о коэффициенте концентрации напряжений при различных схемах укладки слоев в ПКМ. Показано, что внедрение оптического волокна приводит к перераспределению напряженно-деформированного состояния в его окрестности, а так же к появлению концентраций напряжения в области, близкой к оптическому волокну.

Сопоставление подходов к моделированию ПКМ как однородной среды и с учетом слоистой структуры демонстрирует различные результаты не только относительно значений максимальных напряжений, но и их местоположения. Таким образом, при оценке несущей способности конструкций из ПКМ, необходимо учитывать слоистую структуру, наличие технологических дефектов (смоляного кармана при внедрении оптоволокну), варианты компоновок и ориентации слоев в ПКМ.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-41-590684-р_урал_a).

Литература

1. Kelly A. Concise Encyclopedia of Composite Materials. – Elsevier Ltd, Cambridge, 1994. – 349 p.
2. Council N.R. New Materials for Next-Generation Commercial Transports – DC: The National Academies Press Elsevier Ltd, Washington, 1996. – 84 p.
3. Cai J., Qiu L., Yuan S., Shi L., Liu P., Liang D. Structural Health Monitoring for Composite Materials // Composites and Their Applications: InTech. – 2012. – P. 37-60. [DOI](#)
4. Gebremichael Y., Li W., Boyle W.J.O., Meggitt B. T., Grattan K. T. V., McKinley B., Fernando G. F., Kister G., Winter D., Canning L., Luke S. Integration and assessment of fibre Bragg grating sensors in an all-fibre reinforced polymer composite road bridge // Sensors Actuators, A Phys. – 2005. – Vol. 118, no. 1. – P. 78–85. [DOI](#)
5. Lee J.-R., Ryu C.-Y., Koo B.-Y., Kang S.-G., Hong C.-S., Kim C.-G. In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system // Smart Mater. Struct. – 2003. – Vol. 12. – P. 147–155. [DOI](#)
6. Ghoshal A., Ayers J., Gurvich M., Urban M., Bordick N. Experimental investigations in embedded sensing of composite components in aerospace vehicles // Compos. Part B: Eng. – 2015. – Vol. 71. – P. 52–62. [DOI](#)
7. Wymore M. L., Van Dam J. E., Ceylan H., Qiao D. A survey of health monitoring systems for wind turbines // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2015. – Vol. 52, no. 1069283. – P. 976–990. [DOI](#)
8. Sierra-Pérez J., Torres-Arredondo M. A., Güemes A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison // Compos. Struct. – 2016. – Vol. 135. – P. 156–166. [DOI](#)
9. Hong C. Y., Zhang Y. F., Zhang M. X., Leung L. M. G., Liu L. Q. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques // Sensors Actuators, A: Phys. – 2016. – Vol. 244. – P. 184–197. [DOI](#)
10. Takeda N. Recent Development of Structural Health Monitoring Technologies for Aircraft Composite Structures in Japan // Proc. 26th Int. Congr. Aeronaut. Sci. – 2008. – P. 12. [DOI](#)
11. Kablov E. N., Sivakov D. V., Gulyaev I. N., Sorokin K. V., Fedotov M. Yu., Dianov E. M. Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials // Polym. Sci. Ser. D. – 2011. – Vol. 4, no. 3. – P. 246–251. [DOI](#)
12. Li X. X., Ren W. X., Bi K. M. // FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation // Sensors Actuators, A Phys. – 2015. – Vol. 223. – P. 105–113. [DOI](#)
13. García I., Zubia J., Durana G., Aldabaldetrekú G., Illarramendi M. A., Villatoro J. Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring // Sensors (Basel). – 2015. – Vol. 15, no. 7. – P. 15494–519. [DOI](#)
14. Balać I., Milovančević M. Stress field analysis around optical fiber embedded in composite laminae under transverse loading // FME Trans. – 2006. – Vol. 34, no. 1. – P. 53–56. [DOI](#)
15. Luyckx G., Voet E., DeWaele W., Degrieck J. Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study // Smart Mater. Struct. – 2010. – Vol. 19, no. 10. – P. 1–9. [DOI](#)
16. Максидов В., Федотов М., Шуюнов А., Зуев М. К вопросу об интеграции оптоволокну в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных брэгговских решеток // МКМК. – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 568–574.
17. Di Sante R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications // Sensors. – 2015. – Vol. 15, no. 8. – P. 18666–18713. [DOI](#)
18. Majumder M., Gangopadhyay T. K., Chakraborty A. K., Dasgupta K., Bhattacharya D. K. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present status and applications // Sensors Actuators, A Phys. – 2008. – Vol. 147, no. 1. – P. 150–164. [DOI](#)
19. Каблов Е., Сиваков Д., Гуляев И., Сорокин К., Федотов М., Дианов Е., Васильев С., Медведков О. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2010. – № 3, С. 10–15.
20. Lammens N., Luyckx G., Van Paeppegem W., Degrieck J. Finite element prediction of resin pocket geometries around arbitrary inclusions in composites: Case study for an embedded optical fiber interrogator // Compos. Struct. – 2016. – Vol. 146. – P. 95–107. [DOI](#)
21. Bhargava A., Shivakumar K., Emmanwori L. Stress concentration and failure in composite laminates embedded with fiber optic sensor // Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf. – 2003. – Vol. 6. – P. 4128–4140

22. Shivakumar K., Bhargava A. Failure Mechanics of a Composite Laminate Embedded with a Fiber Optic Sensor // *J. Compos. Mater.* – 2005. – Vol. 39, no. 9. – P. 777–798. [DOI](#)
23. Shivakumar K., Emmanwori L. Mechanics of failure of composite laminates with an embedded fiber optic sensor // *J. Compos. Mater.* – 2004. – Vol. 38, no. 8. – P. 669–680. [DOI](#)
24. Korepanov V. V., Serovaev G. S., Yurlova N. A. Numerical Modelling of Layered Composite Materials with Embedded Optical Fiber Sensors // *Solid State Phenom.* – 2015. – Vol. 243. – P. 83–88. [DOI](#)
25. Banea M. D., Da Silva L. F. M. Adhesively bonded joints in composite materials: An overview // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* – 2009. – Vol. 223, no. 1. – P. 1–18. [DOI](#)

References

1. Kelly A. *Concise Encyclopedia of Composite Materials*. Cambridge, Elsevier Ltd, 1994. 349 p.
2. Council N.R. *New Materials for Next-Generation Commercial Transports*. Washington, DC: The National Academies Press Elsevier Ltd, 1996. 84 p.
3. Cai J., Qiu L., Yuan S., Shi L., Liu P., Liang D. Structural Health Monitoring for Composite Materials. *Composites and Their Applications: InTech*, 2012, pp. 37–60. [DOI](#)
4. Gebremichael Y., Li W., Boyle W.J.O., Meggitt B. T., Grattan K. T. V., McKinley B., Fernando G. F., Kister G., Winter D., Canning L., Luke S. Integration and assessment of fibre Bragg grating sensors in an all-fibre reinforced polymer composite road bridge. *Sensors Actuators, A Phys.*, 2005, vol. 118, no. 1, pp. 78–85. [DOI](#)
5. Lee J.-R., Ryu C.-Y., Koo B.-Y., Kang S.-G., Hong C.-S., Kim C.-G. In-flight health monitoring of a subscale wing using a fiber Bragg grating sensor system. *Smart Mater. Struct.*, 2003, vol. 12, pp. 147–155. [DOI](#)
6. Ghoshal A., Ayers J., Gurvich M., Urban M., Bordick N. Experimental investigations in embedded sensing of composite components in aerospace vehicles. *Compos. Part B: Eng.*, 2015, vol. 71, pp. 52–62. [DOI](#)
7. Wymore M. L., Van Dam J. E., Ceylan H., Qiao D. A survey of health monitoring systems for wind turbines. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2015, vol. 52, no. 1069283, pp. 976–990. [DOI](#)
8. Sierra-Pérez J., Torres-Arredondo M. A., Güemes A. Damage and nonlinearities detection in wind turbine blades based on strain field pattern recognition. FBGs, OBR and strain gauges comparison. *Compos. Struct.*, 2016, vol. 135, pp. 156–166. [DOI](#)
9. Hong C. Y., Zhang Y. F., Zhang M. X., Leung L. M. G., Liu L. Q. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques. *Sensors Actuators, A: Phys.*, 2016, vol. 244, pp. 184–197. [DOI](#)
10. Takeda N. *Proc. 26th Int. Congr. Aeronaut. Sci. Anchorage, Alaska, USA, September 14 - 19, 2008. pp. 12.* [DOI](#)
11. Kablov E. N., Sivakov D. V., Gulyaev I. N., Sorokin K. V., Fedotov M. Yu., Dianov E. M. Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials. *Polym. Sci. Ser. D.*, 2011, vol. 4, no. 3, pp. 246–251. [DOI](#)
12. Li X. X., Ren W. X., Bi K. M. FBG force-testing ring for bridge cable force monitoring and temperature compensation. *Sensors Actuators, A Phys.*, 2015, vol. 223, pp. 105–113. [DOI](#)
13. García I., Zubia J., Durana G., Aldabaldetrekú G., Illarramendi M. A., Villatoro J. Optical Fiber Sensors for Aircraft Structural Health Monitoring. *Sensors (Basel)*, 2015, vol. 15, no. 7, pp. 15494–519. [DOI](#)
14. Balać I., Milovančević M. Stress field analysis around optical fiber embedded in composite laminae under transverse loading. *FME Trans.*, 2006, vol. 34, no. 1, pp. 53–56. [DOI](#)
15. Luyckx G., Voet E., DeWaele W., Degrieck J. Multi-axial strain transfer from laminated CFRP composites to embedded Bragg sensor: I. Parametric study. *Smart Mater. Struct.*, 2010, vol. 19, no. 10, pp. 1–9. [DOI](#)
16. Maksidov V., Fedotov M., Shienok A., Zuev M. K. Voprosu ob integracii optovolokna v PKM i izmerenii deformacii materiala s pomoshch'yu volokonnyh breggovskih reshetok [For an issue of embedded optical fibre in CFRP and strain measurement with fibre Bragg gratings sensors]. *MKMK - Journal on composite mechanics and design*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 568–574.
17. Di Sante R. Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications. *Sensors*, 2015, vol. 15, no. 8, pp. 18666–18713. [DOI](#)
18. Majumder M., Gangopadhyay T. K., Chakraborty A. K., Dasgupta K., Bhattacharya D. K. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications. *Sensors Actuators, A Phys.*, 2008, vol. 147, no. 1, pp. 150–164. [DOI](#)
19. Kablov E., Sivakov D., Gulyaev I., Sorokin K., Fedotov M., Dianov E., Vasil'ev S., Medvedkov O. Primenenie opticheskogo volokna v kachestve datchikov deformacii v polimernyh kompozicionnyh materialah [Application of optical fiber as strain sensors in polymer composite materials]. *Vse materialy. Enciklopedicheskij spravochnik. – All materials. Encyclopedic Guide*, 2010, no. 3, pp. 10–15.
20. Lammens N., Luyckx G., Van Paeppegem W., Degrieck J. Finite element prediction of resin pocket geometries around arbitrary inclusions in composites: Case study for an embedded optical fiber interrogator. *Compos. Struct.*, 2016, vol. 146, pp. 95–107. [DOI](#)
21. Bhargava A., Shivakumar K., Emmanwori L. *Collect. Tech. Pap. - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Struct. Struct. Dyn. Mater. Conf. Norfolk, Virginia, USA, April 07 – 10, 2003*, vol. 6, pp. 4128–4140.
22. Shivakumar K., Bhargava A. Failure Mechanics of a Composite Laminate Embedded with a Fiber Optic Sensor. *J. Compos. Mater.*, 2005, vol. 39, no. 9, pp. 777–798. [DOI](#)
23. Shivakumar K., Emmanwori L. Mechanics of failure of composite laminates with an embedded fiber optic sensor. *J. Compos. Mater.*, 2004, vol. 38, no. 8, pp. 669–680. [DOI](#)
24. Korepanov V. V., Serovaev G. S., Yurlova N. A. Numerical Modelling of Layered Composite Materials with Embedded Optical Fiber Sensors. *Solid State Phenom.*, 2015, vol. 243, pp. 83–88. [DOI](#)
25. Banea M. D., Da Silva L. F. M. Adhesively bonded joints in composite materials: An overview. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, 2009, vol. 223, no. 1, pp. 1–18. [DOI](#)

Поступила в редакцию 09.11.17; опубликована в электронном виде 30.12.17

Сведения об авторах

Кошелева Наталья Александровна, ктн, мнс, Институт механики сплошных сред УрО РАН (ИМСС УрО РАН), 614013, Пермь, ул. Академика Королева, д. 1; e-mail: kosheleva.n@icmm.ru

Сероваев Григорий Сергеевич, б/с, мнс, ИМСС УрО РАН; e-mail: serovaev@icmm.ru