

УДК 539.3

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, СВЯЗАННЫЕ
С ИЗМЕРЕНИЕМ ДЕФОРМАЦИЙ, ВСТРОЕННЫМИ В МАТЕРИАЛ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИМИ ДАТЧИКАМИ НА БРЭГГОВСКИХ РЕШЕТКАХ**

© 2021 г. В. П. Матвеевко^{a,*}, Н. А. Кошелева^{a,**}, Г. С. Сероваев^{a,***}

^a Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

*e-mail: mvp@icmm.ru

**e-mail: kosheleva.n@icmm.ru

***e-mail: serovaev@icmm.ru

Поступила в редакцию 05.03.2021 г.

После доработки 15.03.2021 г.

Принята к публикации 22.03.2021 г.

В работе представлены результаты экспериментов по измерению деформаций волоконно-оптическими датчиками деформаций на основе брэгговских решеток, встроенными в материал. Среди этих экспериментов измерение деформаций в образце из полимерного композиционного материала с концентратором напряжений, измерение технологических деформаций в процессе формирования полимерного композиционного материала, измерение технологических деформаций в процессе отверждения цементной смеси при изготовлении бетона, измерение деформаций ползучести в полимерном материале. Наряду с экспериментами, демонстрирующими возможности измерения деформаций встроенными в материал волоконно-оптическими датчиками деформаций на брэгговских решетках, приводятся результаты численного анализа проблем, возникающих при использовании этих датчиков. Среди этих проблем анализ перераспределения напряженно-деформированного состояния, возникающего в результате встраивания оптического волокна в материал, и достоверности значений деформаций, вычисляемых на основе физических величин, поступающих от датчиков.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик, брэгговская решетка, измерение деформаций, технологические деформации, полимерный композиционный материал, бетон, численное моделирование

DOI: 10.31857/S0572329921060088

1. Введение. Открытое в 1978 году явление фоточувствительности кварцевых волокон, легированных германием [1], привело к появлению структуры в сердцевине оптического волокна, получившей название волоконной брэгговской решетки (ВБР) и являющейся основой наиболее распространенного типа волоконно-оптических датчиков (ВОД), позволяющих измерять деформацию и температуру, а так же другие “производные” этих параметров (давление, сила, влажность и т.д.). ВОД имеет ряд преимуществ по сравнению с другими датчиками: они не чувствительны к электромагнитному воздействию, могут работать в широком диапазоне температур, имеют возможности размещения нескольких датчиков на одной линии оптического волокна и одновременной регистрации показаний с этих датчиков. Одно из главных достоинств и преимуществ по сравнению с другими типами датчиков связано с возможностью встраивания ВОД в материал вследствие малости их размеров и принципа рабо-

ты. Процедура встраивания ВОД в материал реализуется в технологических процессах изготовления изделий, в которых имеет место переход материала из жидкой фазы в твердую или формование материала из мелких фракций. Основным ограничением в таких технологиях является температура, которая не должна приводить к нарушению работоспособности датчика.

ВОД можно разбить на две группы: точечные и распределенные. В настоящей работе рассматривается наиболее распространенный тип точечных датчиков, а именно: ВОД на основе брэгговской решетки. Для измерения деформаций на поверхности конструкций зарубежной и отечественной промышленностью выпускаются ВОД на брэгговских решетках в различном конструктивном исполнении. Встраивание оптических волокон в материал, в частности, в структуру полимерных композиционных материалов (ПКМ), открывает принципиально новые возможности для контроля состояния конструкции и контроля механических деформаций в процессе изготовления материала. При использовании встроенных в материал ВОД на основе ВБР возникает ряд проблем. Одна из них связана с влиянием на механические характеристики материала встроенного волокна и с перераспределением напряженно-деформированного состояния в окрестности встроенного в материал волокна. Эта проблема наиболее сложна для ПКМ, в связи с возможностью появления технологического дефекта в форме смоляного кармана вокруг волокна. Можно отметить ряд работ, в которых экспериментальными и численными методами анализируется геометрия смоляного кармана, которая существенно определяет перераспределение напряжений при встраивании волокна в ПКМ [2–5]. Задачам оценки изменения механических свойств материала при встраивании волокна и перераспределения напряжений в его окрестности посвящены различные экспериментальные и теоретические работы. Примерами таких исследований являются: экспериментальная работа [6], где анализируется влияние на механические характеристики композита встроенных волокон при статических, ударных и циклических испытаниях; работа [7], в которой аналитическими методами оценивается напряженное состояние в окрестности волокна, встроенного в однородный трансверсально-изотропный материал; работы [4, 8], в которых для анализа перераспределения напряжений в окрестности волокна используется метод конечных элементов.

Наиболее сложной задачей при использовании ВОД на основе ВБР, встроенных в материал, является получение достоверных значений деформаций на основе физических величин, получаемых с датчика. Различные аспекты этой задачи приводятся в обзорной работе [9].

В настоящей работе приводятся примеры использования ВОД на брэгговских решетках для измерения деформаций в различных материалах и результаты численных экспериментов по оценке концентрации напряжений в окрестности оптического волокна, встроенного в ПКМ, и оценки погрешности деформаций, вычисленных на основе физических величин, регистрируемых датчиком.

2. Примеры измерения деформаций, встроенными в материал волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках и задачи, решаемые при измерении деформаций. Размеры оптического волокна ($125 \text{ мкм} < \varnothing < 250 \text{ мкм}$ [10]) и допускаемые минимальные радиусы изгиба ($\sim 10 \text{ мм}$) обычных оптических волокон диаметром до 200 мкм, открывают широкие возможности встраивания волокна в материал на технологической стадии его изготовления.

Измерение деформаций встроенными в материал ВОД позволяет решать различные задачи: использовать полученные значения деформаций для оценки достоверности результатов моделирования механического поведения конструкций, оценивать на основе выбранных критериев текущую прочность и целостность материала, регистрировать появление и развитие дефектов в материале, измерять деформации в материале на всех стадиях технологического процесса получения материала, получать новую ин-

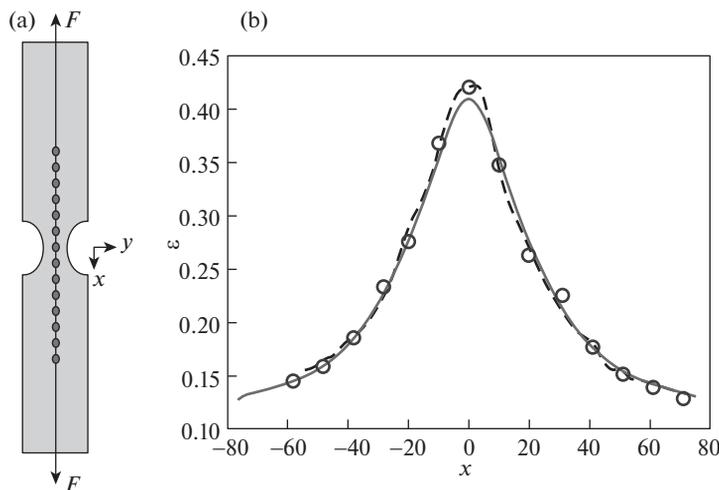


Рис. 1. Образец с вырезами на боковых гранях и встроенными ВОД (а); распределение деформаций вдоль осевой линии образца (б)

формацию для верификации моделей механического поведения материалов, в том числе, в условиях сложнапряженного состояния.

Известные примеры измерений деформаций ВОД, встроенными в ПКМ, ограничиваются демонстрацией результатов показаний с одного датчика и, как правило, расположенного в зоне достаточно однородного распределения деформаций, например, датчик встроен в стандартный плоский образец для испытаний на растяжение [11], в панель из углепластика при растяжении [12]. В настоящей работе, в отличие от известных экспериментов, в качестве объекта исследования используется прямоугольная пластина ($50 \times 300 \times 5$ мм) из ПКМ с вырезами на боковых гранях, геометрия которых определяется половиной окружности (радиус 18.8 мм) (рис. 1,а). Данная геометрия обеспечивает при одноосном растяжении существенную неоднородность деформаций [13].

ПКМ получают на основе препрега стеклопластика, имеющего следующие механические характеристики: модуль упругости при растяжении по основе $E_{xx} = 26.5$ ГПа; модуль упругости при растяжении по утку $E_{yy} = 26.1$ ГПа; модуль упругости при растяжении перпендикулярно плоскости слоя $E_{zz} = 6$ ГПа; модули сдвига: $G_{xy} = 4$ ГПа, $G_{xz} = 3$ ГПа, $G_{yz} = 3$ ГПа (первый индекс обозначает направление нормали к плоскости скольжения, второй – направление скольжения); коэффициенты Пуассона: $\nu_{xy} = 0.144$, $\nu_{xz} = 0.138$, $\nu_{yz} = 0.18$ (первый индекс обозначает направление растяжения, второй – направление поперечной деформации). Оптическое волокно из кварца с механическими характеристиками $E_k = 71.4$ ГПа, $\nu_k = 0.17$ имеет диаметр 0.124 мм и защитную оболочку толщиной 0.012 мм, которая выполнена из полиимида с механическими характеристиками $E_0 = 2.7$ ГПа, $\nu_0 = 0.31$. Образцы были получены методом прямого прессования [14]. Этот технологический процесс включает следующие основные операции: выкладку на технологическую оснастку 20 слоев препрега; укладку оптоволоконных датчиков между 10 и 11 слоями; сборку технологического пакета для проведения подпрессовки материала; проведение режима полимеризации; демонтаж технологического пакета. Процесс полимеризации и отверждения пластины из ПКМ с внедренными ВОД производился в прессе Langzauner. Боковые вырезы в прямоугольных образцах получались путем механической обработки.

Для испытаний на растяжение использовалась универсальная электромеханическая система Instron 5982. Наряду с показаниями ВОД получены экспериментальные данные на основе оптической системы Vis-3D [15]. Дополнительно к экспериментам выполнен расчет напряженно-деформированного состояния образцов на основе метода конечных элементов в трехмерной постановке задачи. На рис. 1, b представлены распределения деформаций (ϵ , %) вдоль осевой линии образца (x , мм) при силе $F = 7$ кН, полученные на основе показаний волоконно-оптических датчиков на брэгговских решетках (показано символом \bullet), оптической системы Vis-3D (пунктирная линия) и численного моделирования в рамках трехмерной постановки задачи теории упругости (сплошная линия). Численные результаты получены на основе метода конечных элементов, реализованного в коммерческом пакете ANSYS. Отличие результатов, полученных с ВОД, от результатов полученных оптической измерительной системой и численным моделированием, не превышает 6%.

В данном и других экспериментах, приведенных в настоящей работе, деформация на основе физической величины, регистрируемой датчиком, вычислялась с использованием предположения об одноосном напряженном состоянии в оптическом волокне.

Встраивание ВОД в материал позволяет регистрировать деформации в течение всего технологического процесса, в том числе, получить информацию об остаточных технологических деформациях. Этот вариант контроля технологических деформаций в объеме материала практически не имеет альтернатив. Возможность такого контроля особенно важна для обеспечения целостности и выбора параметров технологического процесса получения изделий из ПКМ, так как в этих процессах материал и изделие создаются одновременно. Измерение технологических деформаций ВОД, встроенными в ПКМ, было реализовано в процессе изготовления пластины ($300 \times 300 \times 5$ мм) из препрега вышеописанным методом прямого прессования. В технологическом процессе после сборки пакета из 20 слоев препрега формирование производилось при следующих параметрах: подъем температуры до 120°C со скоростью $3^\circ\text{C}/\text{мин}$; выдержка 0.4 часа при температуре 120°C , подъем давления прессования до 0.3 МПа; подъем температуры до 180°C со скоростью $3^\circ\text{C}/\text{мин}$; выдержка 1.5 часа при температуре 180°C ; охлаждение со скоростью $3^\circ\text{C}/\text{мин}$ до 55°C ; сброс давления [13].

Регистрация технологических деформаций ВОД, встроенными в ПКМ, проводилась во время технологического процесса формирования методом прямого прессования в режиме реального времени. Для компенсации температурных деформаций использовались показания ВОД на брэгговской решетке, который располагался свободно на поверхности пластины. Показания этого датчика проверялись дополнительным регистратором температуры. Процедура вычисления технологических деформаций на основе показаний ВОД, встроенных в материал, и ВОД, регистрирующих температуру, приведена в работе [16].

На рис. 2 приведены изменения (пунктирная линия) температуры (T , $^\circ\text{C}$) и изменения (сплошная линия) технологических деформаций (ϵ , %) в течение процесса формирования пластины (t , с). Значения деформаций после завершения процесса формирования ($t > 2.4 \times 10^4$ с) определяют уровень остаточных технологических деформаций. Использование подобной методики получения информации о деформациях и их эволюции в течение технологического процесса позволяет выбрать параметры технологического процесса, обеспечивающие получение бездефектных изделий из ПКМ с заданным уровнем остаточных деформаций.

Другим процессом, в котором технологические деформации имеют важное значение, является отверждение цементной смеси при изготовлении изделий из бетона. ВОД могут быть встроены в бетон до начала его твердения. При этом возможен вариант использования датчика встроенного в капилляр, который исключает взаимодействие датчика с материалом, и использование датчика без капилляра. Для демонстрации возможностей регистрации технологических деформаций в бетоне реализован вто-

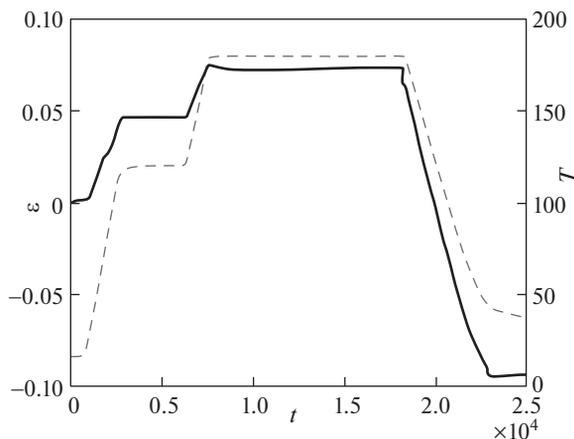


Рис. 2. Показания ВОД в течение процесса формирования ПКМ

рой вариант. В качестве образца выбран цилиндр диаметром 150 мм и высотой 400 мм, формирование и твердение которого осуществлялось в полипропиленовом резервуаре с дном и свободной верхней поверхностью. Пять ВОД на брэгговских решетках, расположенных на одном волокне на расстоянии 10 мм друг от друга были встроены в цилиндрический образец вдоль его оси на этапе заливки бетонной смеси в цилиндрический резервуар. На рис. 3,а приведена схема образца со встроенными в материал ВОД, где 1–5 – номера ВБР, 6 – оптоволоконная линия. На рис. 3,б представлено изменение деформаций (ϵ , %) в образце на протяжении 3х месяцев (t , с), где 1–5 – номера ВБР. Эти данные позволяют констатировать наличие технологических деформаций и их неоднородность в объеме материала. Последнее обстоятельство указывает на возможность образования дефектов в изделиях из бетона на этапе их формирования и возможность управления процессом твердения с целью обеспечения более однородного распределения деформаций, уровень которых может контролироваться датчиками, встроенными в материал.

Встроенные в материал ВОД позволяют решать задачи, связанные с получением информации для верификации моделей механического поведения материала. Рассмотрен пример экспериментальной регистрации реологических свойств материала. В качестве образца выбран призматический стержень $200 \times 10 \times 5$ мм [17] из заполимеризовавшейся эпоксидной смолы. В образец вдоль его длины встроено ВОД. При нагружении образца постоянной нагрузкой датчик будет регистрировать процесс ползучести. Измерение деформаций (ϵ , %) в образце проводилось в течение пяти суток (t , с). На рис. 4 деформации ползучести приведены при нагружении образца постоянной нагрузкой 50 Н. Полученные результаты могут быть использованы для определения констант входящих в уравнения, описывающие механическое поведение материалов. Подобные эксперименты могут быть реализованы и на других образцах, в том числе, с получением информации при сложном напряженном состоянии.

Приведенные в данном разделе приложения встроенных в материал ВОД деформаций иллюстрируют широкий спектр их возможностей.

3. Численный анализ концентрации напряжений в окрестности ВОД, встроенных в ПКМ. Одной из проблем при использовании встроенных в материал ВОД является перераспределение напряженно-деформированного состояния в окрестности волокна, которое может приводить к локальным зонам концентрации напряжений. Наиболее ярко эта проблема проявляется при встраивании волокна в ПКМ. Для оценки пе-

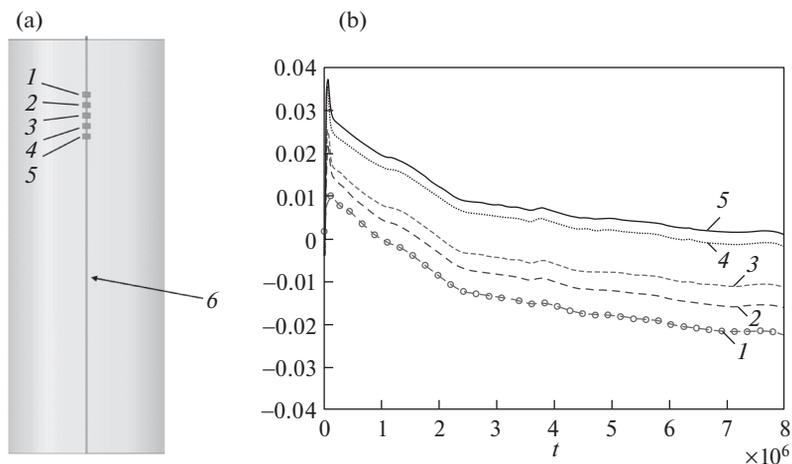


Рис. 3. Образец со встроенными в материал ВОД (а) и изменение во времени деформаций, регистрируемых ВОД (б)

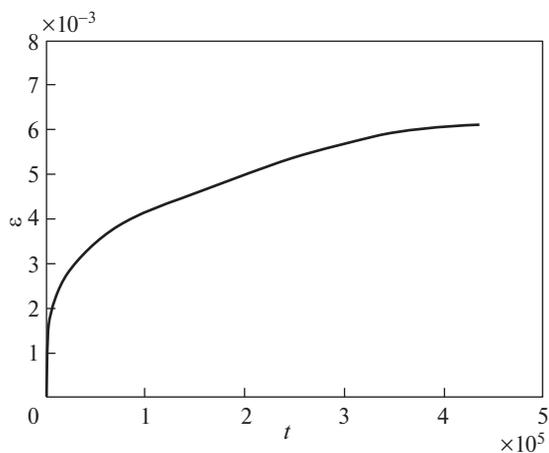


Рис. 4. Измерение деформации во времени для заполимеризовавшейся эпоксидной смолы

пераспределения напряжений и деформаций предлагается использовать математическое моделирование на основе модели линейного упругого поведения материалов. Для численных расчетов используется трехмерный вариант метода конечных элементов.

В примерах рассматриваются широко распространенные в конструкциях слоистые композиционные материалы. Для этих материалов существует несколько масштабных уровней моделирования: структурная, слоистая и однородная модели. В настоящей работе используются слоистая модель, в которой композиционный материал моделируется в виде пакета слоев, каждый из которых является однородным анизотропным телом, и однородная модель, в которой ПКМ рассматривается как однородная среда с

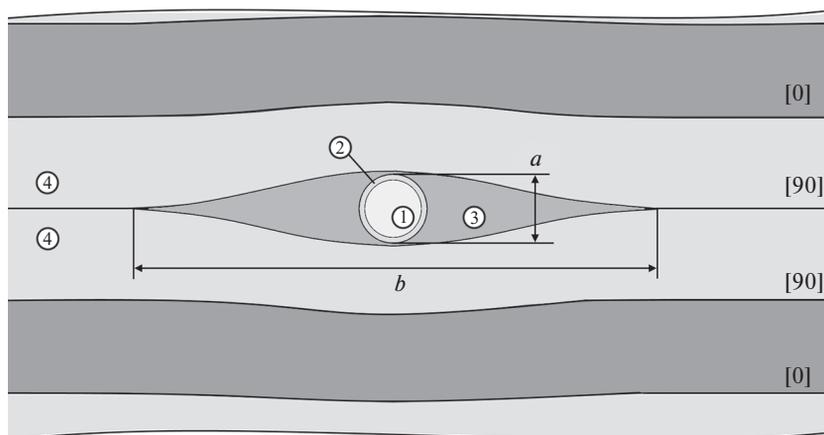


Рис. 5. Полимерный композитный материал с оптическим волокном и смоляным карманом: оптическое волокно (1); оболочка оптического волокна (2); смоляной карман (3); слой полимерного композитного материала (4)

эффективными механическими характеристиками. Однородная модель достаточно адекватно отражает ПКМ, сформированный из тканых препрегов.

Оптические волокна при встраивании между слоями сохраняют свою геометрию, а слои препрега в окрестности волокна искривляются и образуют карман, который заполняется полимерным связующим. Эта подобласть представляет технологический дефект, называемый смоляным карманом. Геометрия такого кармана при встраивании волокна между однонаправленными препрегами под углом 90° , относительно направления армирования достаточно хорошо подтверждена теоретическими и экспериментальными результатами [3–5]. Данная геометрия представлена на рис. 5. В работе [4] отмечается, что длина смоляного кармана составляет $12 \div 16$ радиусов встроенного волокна. Для других вариантов ориентации волокна относительно направления армирования симметрия геометрии смоляного кармана может быть нарушена и иметь другие соотношения размеров a и b .

При моделировании напряженного состояния в окрестности встроенного в ПКМ оптического волокна рассматривается несколько вариантов расчетных схем: однородная ортотропная упругая среда с встроенным оптическим волокном без образования смоляного кармана (рис. 6,а) и с образованием смоляного кармана (рис. 6,б), слоистая модель ПКМ с волокном встроенным между слоями [0/0], что не приводит к образованию смоляного кармана (рис. 6,с), слоистая модель ПКМ с волокном встроенным между слоями [0/90] (рис. 6,д) и [90/90] (рис. 6,е) с учетом смоляного кармана.

Для всех вариантов представления ПКМ моделирование напряженно-деформированного состояния в окрестности волокна проводится на элементе в виде параллелепипеда со встроенным оптическим волокном (рис. 7) при вариантах нагружения $P_x = P_0$, $P_y = P_z = 0$; $P_y = P_0$, $P_x = P_z = 0$; $P_z = P_0$, $P_x = P_y = 0$. Для моделирования выбран ПКМ состоящий из 20 слоев однонаправленных препрегов. В табл. 1 приведены механические характеристики препрега, а в табл. 2 характеристики волокна и клея. Оптическое волокно имеет радиус $R_0 = 0.062$ мм, а толщина полиимидной оболочки – 0.012 мм. Размеры параллелепипеда обеспечивают на удалении от волокна ($\sim 5b$) однородное напряженное состояние.

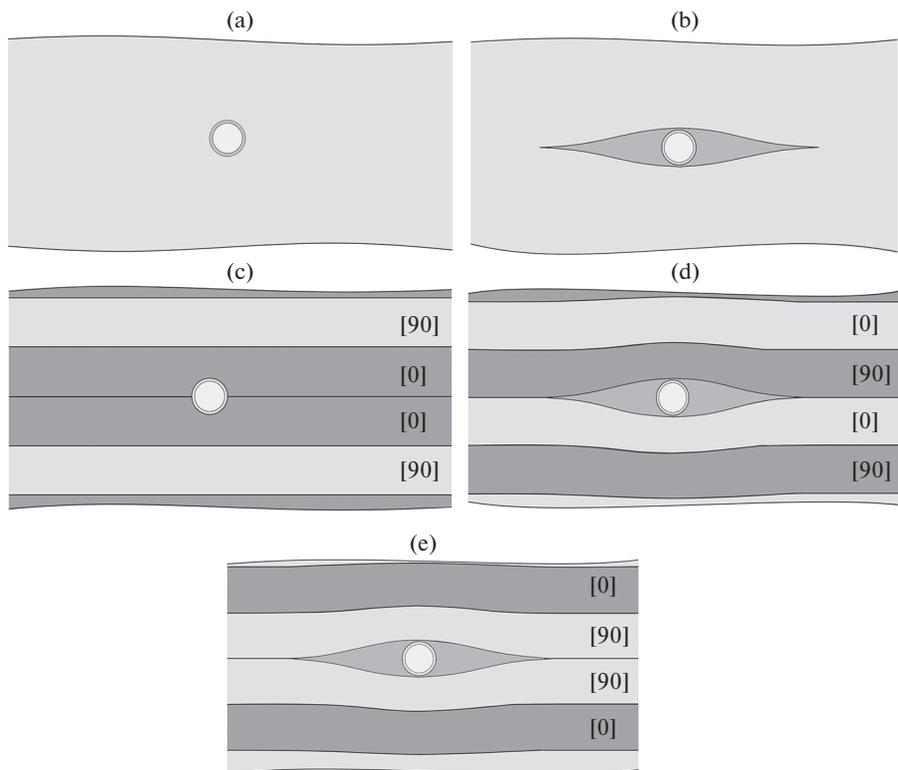


Рис. 6. Расчетные схемы ПКМ со смоляным карманом

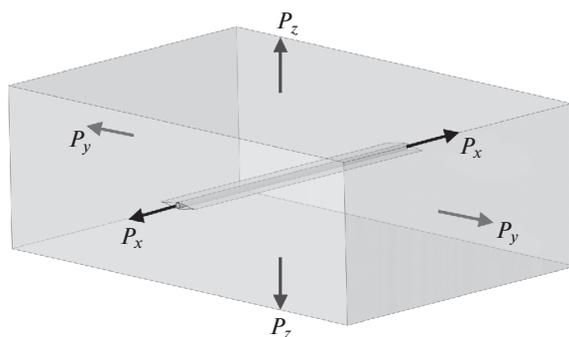


Рис. 7. Модель ПКМ со смоляным карманом и встроенным оптическим волокном

Наибольший уровень концентрации напряжений имеет место при схеме нагружения $P_y = P_0$, $P_x = P_z = 0$ и определяется компонентой тензора напряжений σ_y . В качестве характеристики уровня напряженного состояния принимается коэффициент концентрации напряжений $K_y = \sigma_y^{\max} / P_0$.

Таблица 1. Механические свойства однонаправленного препрега и эффективные механические характеристики пакета слоев

Материал	E_{xx} , ГПа	E_{yy} , ГПа	E_{zz} , ГПа	ν_{xy}	ν_{yz}	ν_{xz}	G_{xy} , ГПа	G_{yz} , ГПа	G_{xz} , ГПа
Однонаправленный препрег	158.5	8.96	8.96	0.32	0.45	0.32	4.6	3.0	4.6
Эффективные свойства пакета слоев	84.1	84.1	10.7	0.035	0.45	0.45	4.3	3.5	3.5

Таблица 2. Механические характеристики оптического волокна и клея

Материал	E , ГПа	ν
кварц	71.4	0.17
полиимид	2.5	0.35
клей	2.9	0.36

Результаты расчетов позволяют сделать ряд выводов. Для слоистых ПКМ из однонаправленных препрегов при встраивании волокна вдоль направления армирования (рис. 6,с) и диаметре оптического волокна меньше толщины препрега концентрация напряжений практически отсутствует. Для однородной модели ПКМ со встроенным оптическим волокном без образования смоляного кармана (рис. 6,а), что наиболее полно соответствует слоистому ПКМ на основе тканевых препрегов, коэффициент концентрации напряжений равен 3.78. Для слоистых композиционных материалов из однонаправленных препрегов при укладке волокна между слоями [90/90] и [0/90] коэффициент концентрации напряжений равен соответственно 4.55 и 4.33. При расчете напряжений на основе однородной модели с образованием смоляного кармана коэффициент концентрации напряжений равен 2.1. Это объясняется тем, что в зоне концентрации напряжений нагрузку воспринимает слой с наибольшей жесткостью в направлении армирования, что учитывается при использовании слоистой модели ПКМ.

Для оценки достоверности результатов математического моделирования были использованы результаты работы [18], которая является одной из немногих, где приводятся экспериментальные данные по деформациям в окрестности смоляного кармана. В приведенном примере оптическое волокно встроено между 4 и 5 слоями следующих вариантов укладки слоев: [90₂/0₂/0₂/90₂] и [0₂/90₂/90₂/0₂]. В качестве армирующего материала рассматривается углеродное волокно, а связующим материалом является эпоксидная смола. Экспериментальные данные получены на основе метода муаровой интерференции. Данные об оптическом волокне в работе отсутствуют. Результаты численного моделирования при нагрузке, действующей перпендикулярно направлению оптического волокна и данных об оптическом волокне из табл. 2 отличаются от экспериментальных данных в пределах 65%. В данном случае, несмотря на относительно большое различие численных и экспериментальных результатов с учетом неполной информации о геометрических размерах и отсутствии информации об оптическом волокне, можно сделать заключение о возможности использования численного моделирования для оценки концентрации напряжений в окрестности оптического волокна встроенного в ПКМ.

4. Численное моделирование достоверности значений деформаций, вычисленных на основе физических величин, регистрируемых волоконно-оптическим датчиком на брэгговской решетке. Основное свойство брэгговской решетки состоит в генерировании отра-

женного сигнала. Длина волны отраженного сигнала зависит от показателя преломления оптического волокна n и длины периода структуры решетки L

$$\lambda^* = 2nL \quad (4.1)$$

При взаимодействии волоконно-оптического датчика с деформируемым материалом происходит изменение длины брэгговской решетки, приводящее к изменению длины волны отраженного сигнала, которое регистрируется интеррогатором. Взаимосвязь изменения длины волны отраженного спектра с деформацией волокна в зоне брэгговской решетки определяется соотношениями [9]

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda^*} &= \varepsilon_3 - \frac{1}{2}n^2(p_{11}\varepsilon_1 + p_{12}(\varepsilon_2 + \varepsilon_3)) \\ \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda^*} &= \varepsilon_3 - \frac{1}{2}n^2(p_{11}\varepsilon_2 + p_{12}(\varepsilon_1 + \varepsilon_3)) \end{aligned} \quad (4.2)$$

где ε_3 – деформация вдоль волокна, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – главные деформации в плоскости перпендикулярной оптическому волокну. $\Delta\lambda_1 = \lambda_1 - \lambda^*$, $\Delta\lambda_2 = \lambda_2 - \lambda^*$ – разница величин резонансных длин волн отраженного спектра в текущий (λ_1, λ_2) и начальный (λ^*) моменты времени, p_{11}, p_{12} – коэффициенты Погкельса.

При одноосной деформации оптического волокна свободного от взаимодействия с окружающей средой деформации $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_3$, где ν – коэффициент Пуассона оптического волокна. В этом случае $\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_2 = \Delta\lambda$ и

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left(1 - \frac{n^2}{2}(p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12}))\right)\varepsilon_3 \quad (4.3)$$

или

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda^*} \quad (4.4)$$

Для используемых оптических волокон $k = 0.78$.

Из соотношений (4.2), (4.4) следует, что однозначная связь между экспериментальными данными об изменении длины волны отраженного сигнала и компонентой тензора деформаций в волокне вдоль его длины имеет место только при одноосном деформировании брэгговской решетки. Во встроенном в материал оптическом волокне реализуется сложнапряженное состояние, в общем случае с тремя различными компонентами тензора деформаций $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. В данном случае один из наиболее приемлемых вариантов получения значений измеряемых деформаций основан на использовании допущения об одноосном напряженном состоянии в оптическом волокне, то есть использовании формулы (4.4). При этом погрешность вносимая этим допущением устраняется введением калибровочных коэффициентов.

В настоящей работе рассматривается методика позволяющая для ВОД, встроенных в материал оценить погрешность вычисления деформаций на основе соотношения (4.4), а следовательно и получить значения калибровочных коэффициентов. В данной методике для моделирования, как и в предыдущем разделе статьи, рассматривается параллелепипед со встроенным оптическим волокном (рис. 7) при различных вариантах нагружения боковых граней нормальными усилиями. Для численных экспериментов выбран вариант представления ПКМ однородной средой с эффективными механическими характеристиками, приведенными в табл. 1. Рассмотрены варианты со смоляным карманом и без смоляного кармана. Механические характеристики и размеры оптического волокна такие же, как и в предыдущих численных экспериментах. Рассматриваемая методика включает следующую последовательность операций: при заданном варианте нагружения параллелепипеда вычисляются деформация $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ в

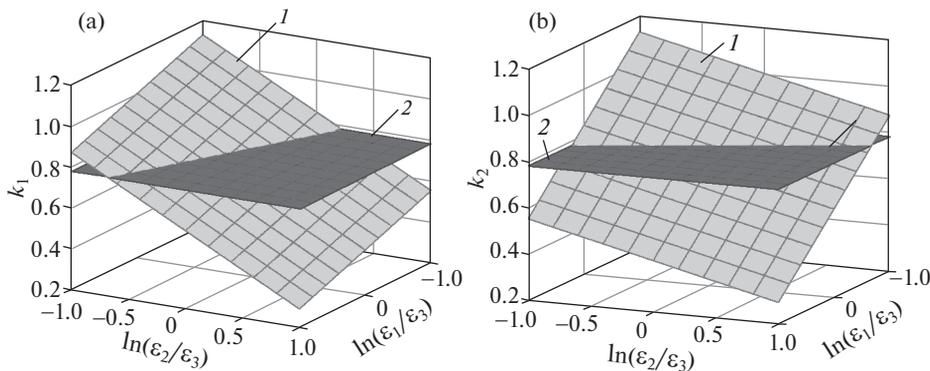


Рис. 8. Зависимости k_1 и k_2 от компонент тензора деформаций

волокне, при этом контролируется совпадение деформации ϵ_3 с соответствующей деформацией в зоне материала прилегающей к волокну; на основе вычисленных значений деформаций по формулам (4.2) вычисляются значения $\Delta\lambda_1/\lambda^*$, $\Delta\lambda_2/\lambda^*$, которые принимаются за экспериментальные данные; на основе найденных в численном эксперименте величин $\Delta\lambda_1/\lambda^*$, $\Delta\lambda_2/\lambda^*$ по соотношению (4.4) вычисляется деформация $\epsilon_3^1 = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta\lambda_1}{\lambda^*}$, и деформация $\epsilon_3^2 = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda^*}$. Полученные значения деформаций ϵ_3^1 и ϵ_3^2 принимаем за результаты эксперимента, который был численно промоделирован. Погрешность вычисления деформаций, связанная с использованием допущения об одноосном деформировании оптического волокна оценивается следующим образом.

$$\delta_1 = \frac{\epsilon_3^1 - \epsilon_3}{\epsilon_3}, \quad \delta_2 = \frac{\epsilon_3^2 - \epsilon_3}{\epsilon_3} \quad (4.5)$$

где ϵ_3 деформация вдоль волокна в зоне материала прилегающей к волокну. Значения деформаций ϵ_3^1 и ϵ_3^2 вычислены при значении коэффициента $k = 0.78$. Полученные результаты позволяют найти коэффициенты $k_1 = (\lambda_1/\lambda^*)/\epsilon_3$, $k_2 = (\lambda_2/\lambda^*)/\epsilon_3$, которые обеспечивают при использовании соотношения (4.4) достоверные значения деформаций ϵ_3 . В данном случае коэффициенты k_1 и k_2 являются результатом умножения коэффициента k на соответствующий калибровочный коэффициент. На рис. 8 представлены для рассматриваемого варианта ПКМ и оптического волокна зависимости k_1 и k_2 в координатах $\ln(\epsilon_2/\epsilon_3)$, $\ln(\epsilon_1/\epsilon_3)$ (поверхность 1 на рис. 8). Для наглядности на этих графиках приведена плоскость $k = 0.78$ (поверхность 2 на рис. 8).

Полученные результаты позволяют сделать заключение, что непосредственное использование брэгговской решетки на одномодовом оптическом волокне обеспечивает получение приемлемой информации о компоненте тензора деформаций вдоль волокна при условии, что датчик располагается в зоне материала, где данная компонента деформаций является преобладающей. В остальных случаях необходимы дополнительные меры для получения достоверных значений деформаций, в частности, использование калибровочных коэффициентов.

Заключение. В экспериментах с волоконно-оптическими датчиками на брэгговских решетках, встроенными в образцы из полимерных композиционных материалов, бетонов, полимерных материалов, получены результаты измерения существенно неод-

народных полей деформаций, технологических деформаций в полимерных композиционных материалах, связанных с химическими процессами при формировании материала из жидкой в твердую фазу, технологических деформаций, возникающих при твердении цементной смеси при получении бетона, деформаций ползучести в полимерном материале. Рассмотрены возможности математического моделирования при решении задачи, связанной с перераспределением напряженно-деформированного состояния, возникающего при встраивании оптического волокна в полимерный композиционный материал. Для решения этой задачи приведена математическая модель при различных схемах представления ПКМ и с учетом технологического дефекта, возникающего при встраивании волокна в материал. Получены качественные и количественные результаты о напряженном состоянии в окрестности оптического волокна встроеного в один из вариантов ПКМ. Приведена методика численного анализа погрешности, возникающей при вычислении деформации на основе данных о физических величинах регистрируемых встроеным в ПКМ волоконно-оптическим датчиком на брэгговской решетке при использовании допущения об одноосном напряженном состоянии в этом датчике.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 19-77-30008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hill K.O., Fujii Y., Johnson D.C., Kawasaki B.S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication // Appl. Phys. Lett. 1978. V. 32. № 10. P. 647–649.
2. Dasgupta A., Wan Y., Sirkis J.S. Prediction of resin pocket geometry for stress analysis of optical fibers embedded in laminated composites // Smart Mater. Struct. 1992. V. 1. № 2. P. 101–107.
3. Lammens N., Luyckx G., Voet E., Van Paepegem W., Degrieck J. Finite element prediction of resin pocket geometry around embedded optical fiber sensors in prepreg composites // Compos. Struct. 2015. V. 132. P. 825–832.
4. Shivakumar K., Bhargava A. Failure Mechanics of a Composite Laminate Embedded with a Fiber Optic Sensor // J. Compos. Mater. 2005. V. 39. № 9. P. 777–798.
5. Shivakumar K., Emmanwori L. Mechanics of failure of composite laminates with an embedded fiber optic sensor // J. Compos. Mater. 2004. V. 38. № 8. P. 669–680.
6. Silva J.M.A., Devezas T.C., Silva A.P., Ferreira J.A.M. Mechanical Characterization of Composites with Embedded Optical Fibers // J. Compos. Mater. 2005. V. 39. № 14. P. 1261–1281.
7. Zhou G., Sim L.M. Damage detection and assessment in fibre-reinforced composite structures with embedded fibre optic sensors-review // Smart Mater. Struct. 2002. V. 11. № 6. P. 925–939.
8. Al-Shawk A., Tanabi H., Sabuncuoglu B. Investigation of stress distributions in the resin rich region and failure behavior in glass fiber composites with microvascular channels under tensile loading // Compos. Struct. 2018. V. 192. P. 101–114.
9. Luyckx G., Voet E., Lammens N., Degrieck J. Strain measurements of composite laminates with embedded fibre bragg gratings: criticism and opportunities for research // Sensors. 2011. V. 11. № 1. P. 384–408.
10. Hadzic R., John S., Herszberg I. Structural integrity analysis of embedded optical fibres in composite structures // Compos. Struct. 1999. V. 47. № 1–4. P. 759–765.
11. Махсидов В., Федотов М., Шиенок А., Зуев М. К вопросу об интеграции оптоволокна в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных брэгговских решеток // МКМК. 2014. Т. 20. № 4. С. 568–574.
12. Ильичев А., Махсидов В., Шиенок А., Яковлев Н. Измерение деформации углепластика с помощью интегрированных в его структуру волоконных брэгговских решеток // Механика композиционных материалов и конструкций. 2015. Т. 21. № 3. С. 360–369.
13. Matveenko V.P., Shardakov I.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Lobanov D.S., Serovaev G.S., Spaskova E.M., Shipunov G.S. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material // Struct. Control Heal. Monit. 2018. V. 25. № 3. P. e2118.

14. *Anoshkin A.N., Voronkov A.A., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S., Spaskova E.M., Shardakov I.N., Shipunov G.S.* Measurement of inhomogeneous strain fields by fiber optic sensors embedded in a polymer composite material // *Mech. Solids*. 2016. V. 51. № 5. P. 542–549.
15. *Tretyakova T.V., Dushko A.N., Strungar E.M., Zubova E.M., Lobanov D.S.* Comprehensive analysis of mechanical behavior and fracture processes of specimens of three-dimensional reinforced carbon fiber in tensile tests // *PNRPU Mech. Bull.* 2019. № 1. С. 175–185.
16. *Matveenko V.P., Kosheleva N.A., Shardakov I.N., Voronkov A.A.* Temperature and strain registration by fibre-optic strain sensor in the polymer composite materials manufacturing // *Int. J. Smart Nano Mater.* 2018. V. 9. № 2. P. 99–110.
17. *Kosheleva N., Serovaev G.* Registration of the Creep Behavior by Embedded and Surface Mounted FOSS // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2019. V. 581. P. 012043.
18. *Czarnek R., Guo Y.F., Bennett K.D., Claus R.O.* Interferometric measurements of strain concentrations induced by an optical fiber embedded in a fiber reinforced composite // *Fiber Optic Smart Structures and Skins* / Ed. by *Udd E.* 1989. P. 43.
<https://doi.org/10.1117/12.948886>