



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.13

УДК 539.3

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ СЛОИСТЫХ КОМПОЗИТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВНЕДРЕННЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ ДЕФОРМАЦИЙ

М.А. Ташкинов¹, В.П. Матвеев^{2,1}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 21 ноября 2018 г.
Принята: 3 декабря 2018 г.
Опубликована: 28 декабря 2018 г.

Ключевые слова:

смарт-материалы, системы мониторинга, волоконно-оптические датчики деформаций, оптимизационный алгоритм, метод конечных элементов, механические характеристики.

АННОТАЦИЯ

Проблема анализа и прогнозирования механического поведения современных композиционных материалов и конструкций при их проектировании, производстве и эксплуатации является крайне актуальной, в настоящее время ей посвящено множество исследований. Одно из наиболее перспективных направлений в области мониторинга состояния композитных конструкций в процессе их эксплуатации связано с созданием смарт-материалов и смарт-систем на основе использования сенсорных элементов. Полученные в ходе эксплуатации данные о состоянии конструкции при последующем анализе могут быть использованы как для мониторинга механического состояния конструкции, так и для уточнения параметров математических моделей процессов деформирования и разрушения.

Описывается подход, согласно которому показания внедренных волоконно-оптических датчиков деформаций (ВОДД) с брэгговскими решетками используются для уточнения механических характеристик слоя многослойного композиционного материала. Суть подхода заключается в оценке разницы между деформационным откликом, спрогнозированным с использованием модели, с данными, полученными в реальном времени при помощи ВОДД. Предложен алгоритм, согласно которому выполняется решение обратных задач с целью обеспечения совпадения с заданной точностью численных и экспериментальных результатов. В качестве параметров оптимизации выступают упругие константы слоя, которые в конечном счете должны обеспечить соответствие результатов моделирования и показаний ВОДД в контрольных точках. Для оптимизации параметров для созданной регрессионной модели применяются различные алгоритмы поиска минимума.

Реализация алгоритма продемонстрирована на примере тестовых задач двух типов композитных образцов с концентратором (вырезами): с квазиизотропными и трансверсально-изотропными слоями.

© ПНИПУ

© Ташкинов Михаил Анатольевич – к.ф.-м.н., доц., e-mail: m.tashkinov@pstu.ru, [iD: 0000-0003-4660-0020](https://orcid.org/0000-0003-4660-0020).

Матвеев Валерий Павлович – акад. РАН, д.т.н., проф., зав. каф., e-mail: mvp@icmm.ru, [iD: 0000-0003-2787-6558](https://orcid.org/0000-0003-2787-6558).

Mikhail A. Tashkinov – CSc in Physical and Mathematical Science, Associate Professor, e-mail: m.tashkinov@pstu.ru, [iD: 0000-0003-4660-0020](https://orcid.org/0000-0003-4660-0020).

Valeriy P. Matveenko – Academician of the RAS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, e-mail: mvp@icmm.ru, [iD: 0000-0003-2787-6558](https://orcid.org/0000-0003-2787-6558).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

OPTIMIZATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF MODELS OF LAMINATE COMPOSITES USING EMBEDDED OPTICAL FIBER STRAIN SENSORS

M.A. Tashkinov¹, V.P. Matveenko^{2,1}

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²Institute of Continuous Media Mechanics, Ural Branch of Russian Academy of Science, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 21 November 2018
Accepted: 03 December 2018
Published: 28 December 2018

Keywords:

smart materials, monitoring systems, fiber-optical strain sensors, optimization algorithm, finite elements method, mechanical properties.

ABSTRACT

The problem of analysis and prediction of the mechanical behavior of modern composite materials and structures at the stage of their design, production and in-service conditions is of great importance. One of the most promising solutions in the field of real-time monitoring of the mechanical state of composite structures is associated with smart materials and smart systems based on the sensor elements. The data obtained during operation on the state of the structure can be used both for monitoring the mechanical state of structures and for refining mathematical models to predict the failure processes.

This paper is devoted to the approach according to which indications of the embedded fiber-optical strain sensors (FOSS) with Bragg gratings are used to refine the mechanical characteristics of a laminate composite material. The essence of the approach is to estimate the difference between the deformation response predicted using the model with the data obtained in real time with the help of the FOSS. To refine the model parameters in accordance with the information received from the FOSS, an algorithm is proposed, according to which the inverse problems are solved in order to ensure that the numerical and experimental results having the specified accuracy. The optimization parameters are the elastic material constants, which, in the final analysis, should ensure that the simulation results and the FOSS measurements are consistent in the control points. To optimize the parameters for the regression model, various minimization algorithms are used.

The algorithm implementation is demonstrated on the example of the test problems of two types of composite samples with a concentrator (notches): with quasi-isotropic and transversal-isotropic plies.

© PNRPU

Введение

Композиционные материалы являются распространенным инструментом при создании ответственных конструкций для приложений индустрии и техники. Актуальным вопросом является всестороннее изучение поведения композитов и конструкций из них при характерных эксплуатационных нагрузках с целью оптимизации функциональных свойств, которые могут быть заложены на стадии производства. Одним из наиболее широко используемых типов композитов являются многослойные композитные конструкции, состоящие из слоев препрега угле- и стеклопластика. Несмотря на уникальные прочностные характеристики, при определенных нагрузках композиционные материалы подвержены возникновению ряда эксплуатационных дефектов, которые невозможно выявить невооруженным глазом. Тем не менее такие дефекты могут привести к критическим повреждениям и потере несущей способности всей конструкции. В связи с этим активно развиваются методы неразрушающего контроля композиционных конструкций, которые позволяют получать информацию о состоянии конструкции в процессе ее эксплуатации.

Одним из известных решений в данной области является измерение параметров внутреннего состояния с помощью волоконно-оптических датчиков [1–10]. Такие датчики могут быть внедрены между слоями композита без снижения механических свойств конструкции. В зависимости от используемой технологии оптоволоконные датчики способны регистрировать изменение полей деформаций, температуры и других величин в процессе нагружения конструкции. Широкое распространение получили оптоволоконные датчики с брэгговскими решетками, принцип работы которых основан на факте изменения длины волны пропускаемого решеткой света при внешнем воздействии [11–21].

При проектировании конструкций из композиционных материалов особое внимание уделяется моделированию механического поведения, что позволяет избежать затратных и ресурсоемких экспериментов. Для создания моделей необходимой точности требуется определение исходных механических констант, характеризующих поведение того или иного микроструктурного компонента, слоя или всего материала. Как правило, для этого проводятся механические испытания, а также используются аналитические теории, связывающие характеристики структурных элементов различных

масштабных уровней. Из-за особенностей технологических процессов изготовления композитных конструкций свойства компонентов, реализованные в конструкции, могут отличаться от свойств, полученных при экспериментальных исследованиях. Такое несоответствие способно внести ощутимую погрешность в результаты численного моделирования механического поведения композитных конструкций, что требует корректировки заданных механических характеристик и констант и приведения их в соответствие с реальными свойствами конструкций.

Данная статья посвящена развитию подхода, в котором показания внедренных оптоволоконных датчиков используются для уточнения упругих механических характеристик композиционного материала, применяемых в численных моделях. Суть подхода заключается в оценке разницы между деформационным откликом, спрогнозированным с использованием модели, с данными, полученными в реальном времени при помощи средств мониторинга, и уточнении модельных констант на основе решения задачи оптимизации [22, 23].

1. Постановка задачи оптимизации

На начальном этапе имеется конструкция или конструктивно-подобный элемент (далее – образец) с внедренными ВОДД с брэгговскими решетками, которому соответствует послынная конечно-элементная модель. Положение брэгговских решеток в образце определяет координаты контрольных точек, в которых в дальнейшем будет производиться сопоставление данных. Оно должно быть достоверно зафиксировано, например, с помощью рентгена или других методов неразрушающего контроля. Создается конечно-элементная модель, сетка которой построена таким образом, чтобы геометрическому местоположению брэгговских решеток соответствовали конкретные расчетные узлы. В модели задаются свойства слоя материала, известные с определенной точностью, которые являются начальным набором констант. Далее образец нагружается с контролем нагрузки или перемещений, при этом соответствующие граничные условия устанавливаются и для конечно-элементной модели. В процессе деформирования образца в контрольных точках регистрируются показания ВОДД, строится зависимость деформаций от значений приложенной нагрузки. Аналогичные данные извлекаются из результатов моделирования. По разности значений экспериментально измеренных и расчетных значений деформаций в контрольных точках строится функционал, который необходимо минимизировать. Таким образом, можно найти такие значения констант материала, которые приводили бы в соответствие результаты расчета и деформации, регистрируемые ВОДД при заданной нагрузке.

В качестве параметров оптимизации выступают константы материала, которые в конечном счете должны обеспечить соответствие результатов моделирования

и показаний ВОДД в контрольных точках. Для оптимизации параметров создается регрессионная модель и используется алгоритм Левенберга-Марквардта (Л-М), который заключается в последовательном приближении заданных начальных значений параметров к искомому локальному оптимуму [24, 25]. Данный алгоритм был выбран из-за его расширенных возможностей в плане подбора параметров для минимизации, что играет роль при необходимости уменьшить количество шагов оптимизации.

В качестве регрессионной выборки выступает множество (ε_{ij}, F) , где ε_{ij} – значения деформаций в контрольной точке при нагрузке F . Регрессионная функция представляет собой определяющее соотношение для изотропных сред, связывающее напряжения и деформации. Так, если оптическое волокно направлено вдоль оси 1, то функция записывается в следующем виде для изотропного и трансверсально-изотропного слоя соответственно:

$$\varepsilon_{11}(\mathbf{p}, \sigma_{ij}) = \frac{1}{E} (\sigma_{11} - \nu(\sigma_{22} + \sigma_{33})), \quad (1)$$

$$\varepsilon_{11}(\mathbf{p}, \sigma_{ij}) = \frac{1}{E_1} \sigma_{11} - \frac{\nu_{12}}{E_2} (\sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad (2)$$

при этом напряжения σ_{ij} зависят от приложенной нагрузки F .

Таким образом, требуется найти такое значение вектора параметров $\mathbf{p} = (E, \nu)$ (где E – упругий модуль, а ν – коэффициент Пуассона слоя), которое доставляло бы минимум функции:

$$M = \sum_{i=1}^N (\varepsilon_i^{FBG}(F) - \varepsilon_i^{FEM}(\mathbf{p}, \sigma_{ij}))^2, \quad (3)$$

где $\varepsilon_i^{FBG}(F_i)$ – значения деформаций, полученных с ВОДД при нагрузке F_i ; $\varepsilon_i^{FEM}(\mathbf{p}, \sigma_{ij})$ – расчетные значения деформаций полученные с помощью моделирования при нагрузке F_i . Значения деформаций $\varepsilon_i^{FBG}(F_i)$, полученных с ВОДД, зависят от относительной величины резонансной волны отраженного брэгговской решеткой спектра, изменения температуры оптического волокна в месте расположения решетки, деформационных и температурных коэффициентов. Подробнее о принципе и особенностях работы брэгговских решеток можно узнать из работ [19, 26].

В случае наличия нескольких контрольных точек возникает многокритериальная задача оптимизации, которая преобразуется в задачу однолинейной оптимизации при помощи весовых коэффициентов w_j . Тогда функция оценки погрешности записывается в виде суммы:

$$G = \sum_{j=1}^K w_j M_j, \quad (4)$$

где K – количество контрольных точек; M_j – функционал (3) для контрольной точки j ; значения весовых коэффициентов w_j выбираются исходя из параметров и начальных условий конкретной задачи (например, они могут быть связаны с местоположением контрольных точек относительно критических зон).

Начальное значение вектора параметров $\mathbf{p} = (E, \nu)$ соответствует известным значениям констант слоя. Для оценки приращения вектора параметров $\Delta \mathbf{p}$ согласно алгоритму Левенберга–Марквардта используется формула

$$\Delta \mathbf{p} = \left(J^T J + \lambda \text{diag} [J^T J] \right)^{-1} J^T \left(\varepsilon^{FBG} - \varepsilon^{FEM} \right), \quad (5)$$

где ε^{FBG} и ε^{FEM} – значения деформаций при изменении нагрузки $F = F_1, F_2, F_3, \dots$, полученные с ВОДД и по результатам расчетов соответственно; параметр λ контролирует скорость аппроксимации; J – якобиан функции $\varepsilon^{FEM}(\mathbf{p}, \sigma_{ij})$ при текущем значении параметров \mathbf{p} ,

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \varepsilon^{FEM}(\mathbf{p}, \sigma_{ij}(F_1))}{\partial p_1} & \frac{\partial \varepsilon^{FEM}(\mathbf{p}, \sigma_{ij}(F_1))}{\partial p_2} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial \varepsilon^{FEM}(\mathbf{p}, \sigma_{ij}(F_n))}{\partial p_1} & \frac{\partial \varepsilon^{FEM}(\mathbf{p}, \sigma_{ij}(F_n))}{\partial p_2} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

В упругом случае достаточно знать лишь начальное и конечное значения приложенной нагрузки. Таким образом, в результате решения задачи оптимизации нахо-

дится оптимальный набор констант материала для использования в конечно-элементной модели.

2. Результаты отработки алгоритма в случае квазиизотропного слоя

Для иллюстрации изложенного подхода была рассмотрена тестовая задача для композитного образца с концентратором (вырезами), состоящего из 14 равнопрочных слоев стеклопластика (рис. 1).

В некотором приближении слой тканого материала может быть представлен как квазиизотропный, то есть обладающий изотропными свойствами в макрообъеме, но в котором при этом можно выделить анизотропные представительные элементы на микромасштабном уровне. В этом случае слой материала характеризуется двумя независимыми константами, а для выполнения алгоритма оптимизации достаточно одной линии оптоволоконных датчиков. Для удобства расчетов принималось, что 5 контрольных точек располагаются вдоль оси 1 (соосно с направлением приложенной нагрузки) между 7-м и 8-м слоем, как показано на рис. 1, б.

Для проверки работоспособности алгоритма в тестовой задаче вместо показаний оптоволоконных датчиков использовались деформации, полученные в результате расчета модели с эталонными модельными константами, которые представлены в табл. 1 вместе с начальными значениями констант модели. Отклонение начальных констант выбиралось из практического опыта оценки разницы между свойствами слоя и ламината и составило около 15 %.

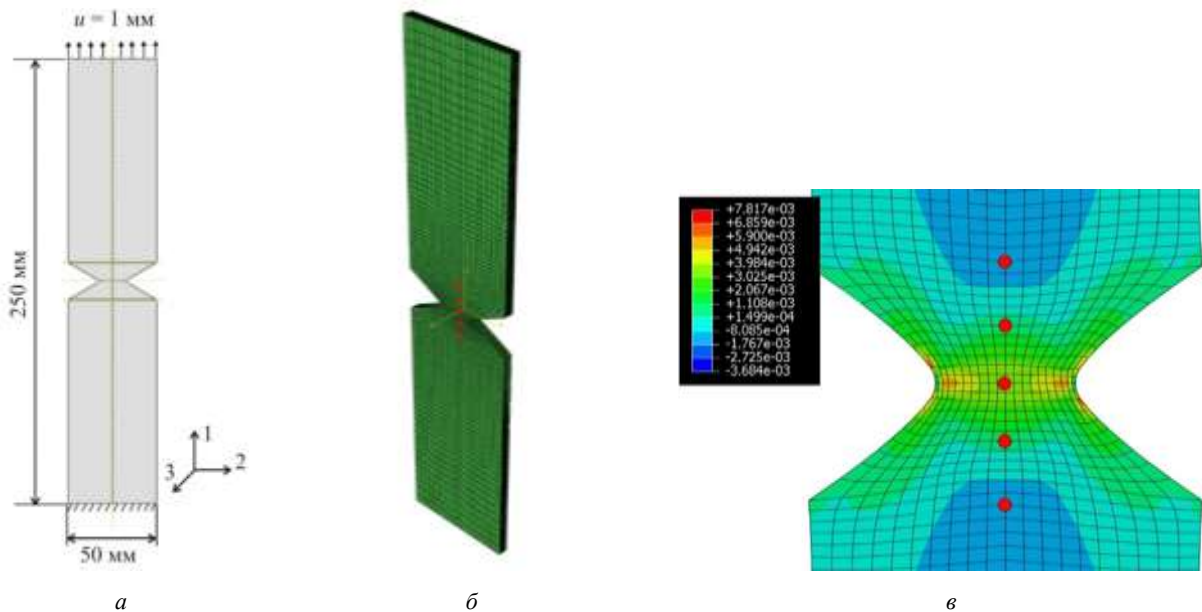


Рис. 1. Схема образца с концентратором напряжений (а); послойная КЭ-модель образца с концентратором напряжений (б); расположение контрольных точек в узлах КЭ-сетки, наложенное на поле деформаций ε_{11} (в)

Fig. 1. Sample with stress concentrator (a); the layered FE model of sample with stress concentrator (b); the map of the control points in the nodes of FE mesh projected on the strain field ε_{11} (c)

Таблица 1

Начальные и уточненные свойства изотропного слоя
стеклопластика

Table 1

Initial and optimized properties of isotropic GFRP ply

	Модуль Юнга E , ГПа	Коэффициент Пуассона ν
Эталонное значение	23,608	0,14
Значение на начальном шаге оптимизации	20,067	0,12

В качестве граничных условий были заданы растягивающие перемещения 1 мм на торце образца. При различном значении констант для реализации заданных перемещений требуются нагрузки различной величины. В качестве переменной в задачу оптимизации входит величина нагрузки, а не перемещения, поэтому, чтобы значениям $\varepsilon_i^{FBG}(F)$ поставить в соответствие значения $\varepsilon_i^{FEM}(p, \sigma_{ij})$, необходимо интерполировать экспериментальные и расчетные данные вида «сила – деформации». В упругом случае эта зависимость линейна, соответственно, провести интерполяцию не составляет труда. Такое преобразование может быть использовано также в практических приложениях, когда оценить приложенную нагрузку на реальных конструкциях не представляется возможным, но перемещения могут быть измерены, например, тензодатчиком или другим способом.

На рис. 1, в представлено поле значений компоненты ε_{11} тензора деформаций при заданных граничных условиях в слое 7, содержащем контрольные узлы. Свойства слоя при этом соответствовали начальным значениям. Расчеты проведены в пакете Abaqus. Регрессионная выборка формировалась путем сопоставления значений деформаций в контрольных узлах при расчете модели с начальными и эталонными константами.

Реализация оптимизационной задачи выполнена в программном пакете Wolfram Mathematica. На рис. 2 представлено контурное изображение значения функционала (3) для тестовой задачи при пошаговом уточнении входящих в вектор параметров значений модуля Юнга и коэффициента Пуассона слоя. Точками обозначены шаги оптимизационного алгоритма. В ходе работы алгоритма получены следующие уточненные значения констант: $E = 23,623$ ГПа и $\nu = 0,139$, что составляет погрешность 0,063 и 0,71 % соответственно от заданных эталонных значений.

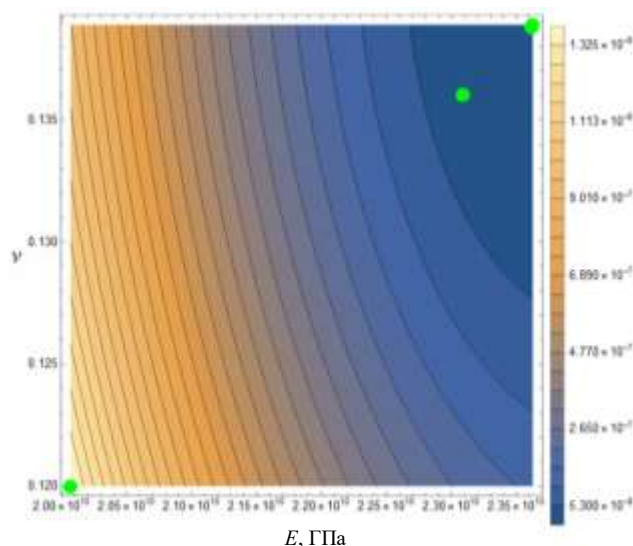


Рис. 2. Схема зависимости значений функционала от упругих констант. Зелеными точками обозначены шаги оптимизационного алгоритма

Fig. 2. The Dependence diagram of the functional values on elastic constants. Green dots indicate the optimization algorithm steps

Для сравнения результатов и анализа сходимости оптимизационного алгоритма Л-М для конкретного случая был исследован пошаговый ход поиска констант, выполненный с помощью метода Ньютона, описание которого можно найти, например, в книге [27]. График зависимости значений констант от шага оптимизационного алгоритма для двух случаев представлен на рис. 3, а, б. Видно, что алгоритм Л-М сходится быстрее метода Ньютона (5 итераций против 8). Задание тех или иных начальных значений параметров может оказать существенное влияние на скорость сходимости алгоритма. Так, работа алгоритма Л-М при нулевом векторе начальных параметров продемонстрирована на рис. 3, в. Очевидно, для получения оптимального результата в этом случае требуется больше итераций (около 40). Тем не менее алгоритм демонстрирует сходимость даже при нулевом векторе начальных параметров, что говорит о возможности применения алгоритма на практике даже при отсутствии какой-либо информации о начальных константах материала.

На рис. 4 для всех контрольных точек представлены значения деформаций ε_{11} , полученные с помощью конечно-элементной модели с начальным значением констант, эталонной модели и при помощи модели с оптимизированными константами. По данному графику видно, что в результате оптимизации удается значительно приблизить результаты численного моделирования к данным эталонной модели.

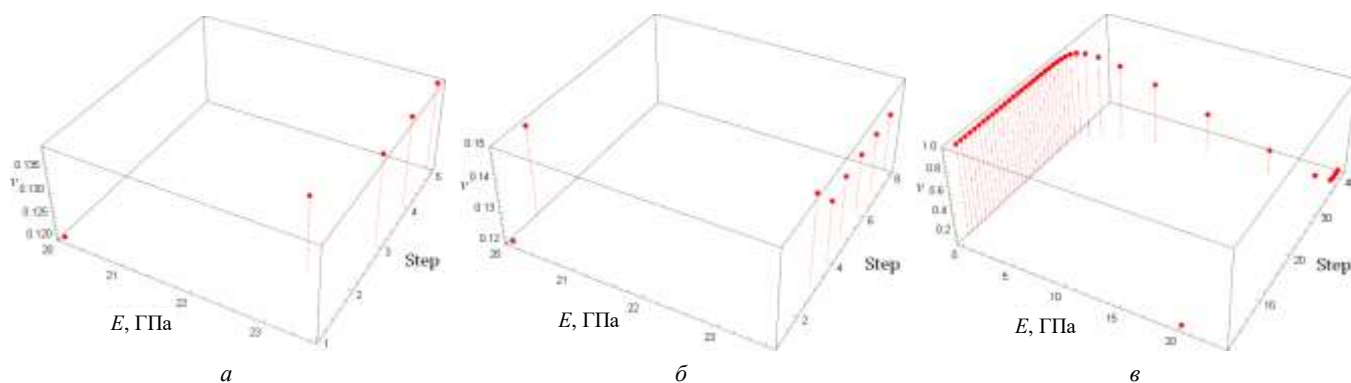


Рис. 3. Значения констант в зависимости от шага оптимизационного алгоритма: а – метод Л-М; б – метод Ньютона; в – метод Л-М при нулевом векторе начальных параметров

Fig. 3. The values of the constants depending on a step of the optimization algorithm: (a) the LM method; (b) Newton's method; (c) L-M method with zero vector of initial parameters

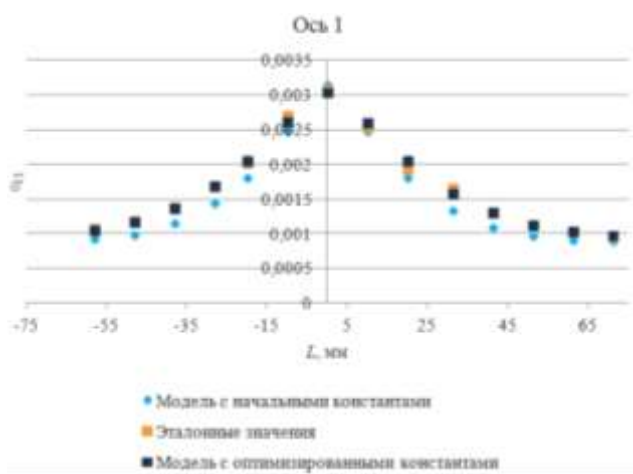


Рис. 4. Сравнение значений деформаций, полученных из расчета модели с использованием начальных констант (♦), при помощи оптоволоконных датчиков (■) и из расчета модели с использованием оптимизированных констант (■);

L – расстояние от центра образца по длине

Fig. 4. Comparison of strain values obtained from the model calculation using initial constants (♦) using fiber optic sensors (■) and using model with optimized constants (■); L is the distance from the center of the sample along its length

3. Результаты обработки алгоритма в случае трансверсально-изотропного слоя

В большинстве случаев свойства слоев из ПКМ в рамках численного моделирования считаются трансверсально-изотропными. Тогда используется регрессионная функция вида (2), а вектор параметров состоит из трех констант: $p = (E_1, E_2, \nu)$. Поскольку ВОДД регистрирует деформацию только по одному направлению, для решения оптимизационной задачи в этом случае требуются показания датчиков, расположенных в двух ортогональных направлениях.

Была рассмотрена тестовая задача с использованием экспериментальных данных с оптоволоконных датчиков, внедренных в композитный образец с концентраторами (вырезами). Образец состоял из 14 уложенных

в одном направлении трансверсально-изотропных слоев стеклопластика (рис. 5, а). Принималось, что 14 контрольных точек на одном ВОДД располагаются вдоль оси 1 (соосно с направлением приложенной нагрузки) между 7-м и 8-м слоем (см. рис. 5, а), и 5 контрольных точек на другом ВОДД располагаются вдоль оси 2, между 8-м и 9-м слоем (рис. 5, б).

На рис. 6 продемонстрировано изменение значений оптимизируемых констант в ходе работы алгоритма Л-М.

Значения деформаций ϵ_{11} , полученные с помощью конечно-элементной модели с начальным значением констант, деформаций с ВОДД, а также полученные при помощи модели с оптимизированными константами представлены на рис. 7 для всех контрольных точек, расположенных по оси 1. Соответствующие значения деформаций ϵ_{22} для контрольных точек по оси 2 отображены на рис. 8. Сравнение значений начальных и оптимизированных упругих констант для трансверсально-изотропного слоя представлено в табл. 2. В приведенном примере при помощи предложенного оптимизационного алгоритма удалось добиться практически полного соответствия значений расчетных и экспериментально определенных деформаций.

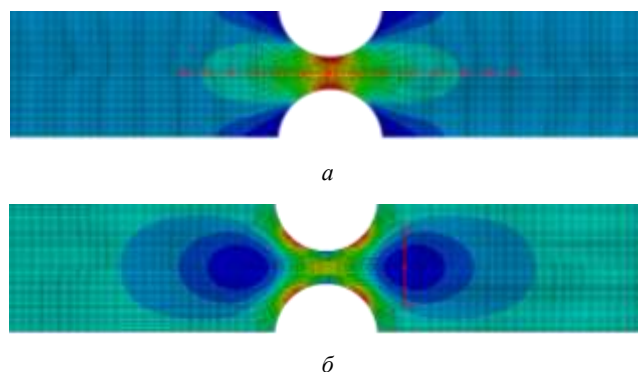


Рис. 5. Численный результат расчета поля деформаций (с использованием начальных констант) и расположение контрольных точек: (а) ϵ_{11} , (б) ϵ_{22}

Fig. 5. The numerical result of the calculation of the strain field (using the initial constants) and the location of control points: (a) ϵ_{11} , (b) ϵ_{22}

Таблица 2

Начальные и уточненные свойства
трансверсально-изотропного слоя стеклопластика

Table 2

Initial and optimized properties
of a transversely-isotropic GFRP ply

	Модуль Юнга E_1 , ГПа	Модуль Юнга E_2 , ГПа	Коэффициент Пуассона ν
Начальное значение	26,0	8,0	0,15
Уточненное значение	22,05	10,81	0,137

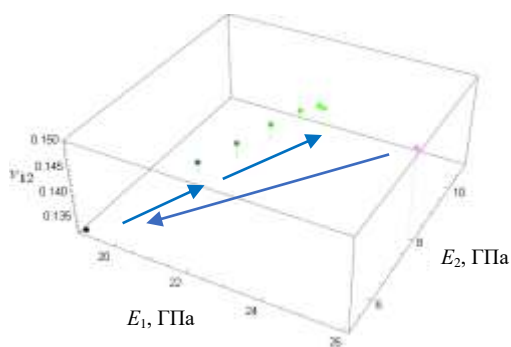


Рис. 6. Значения констант в зависимости от шага оптимизационного алгоритма для трансверсально-изотропного слоя

Fig. 6. The values of the constants depending on a step of the optimization algorithm for the transversally isotropic ply

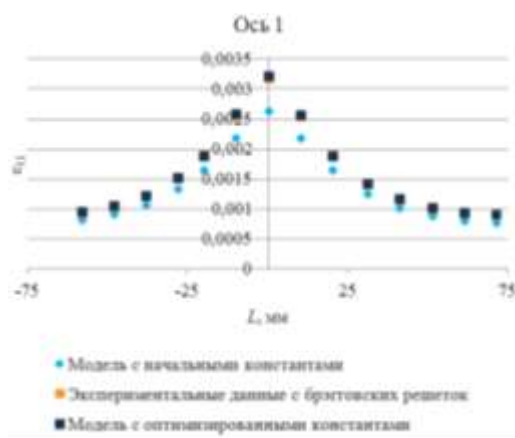


Рис. 7. Сравнение значений деформаций ϵ_{11} , полученных из расчета модели с использованием начальных констант (♦), при помощи оптоволоконных датчиков (■) и из расчета модели с использованием оптимизированных констант (■);

L – расстояние от центра образца по длине

Fig. 7. Comparison of deformation values ϵ_{11} obtained from the model calculated with initial constants (♦), using fiber optic sensors (■) and using model with optimized constants (■); L is the distance from the center of the sample along its length



Рис. 8. Сравнение значений деформаций ϵ_{22} , полученных из расчета модели с использованием начальных констант (♦), при помощи оптоволоконных датчиков (■) и из расчета модели с использованием оптимизированных констант (■);

L – расстояние от центра образца по ширине

Fig. 8. Comparison of deformation values ϵ_{22} obtained from the model calculated with initial constants (♦), using fiber optic sensors (■) and using model with optimized constants (■); L is the distance from the center of the sample along its width

Заключение

В данной работе представлен алгоритм оптимизации значений упругих констант слоев композиционного материала на основе вычислительно-экспериментального подхода с использованием встроенных ВОДД и конечно-элементного моделирования. Приведен пример численной реализации алгоритма для решения тестовой задачи для изотропного слоя, а также в случае трансверсально-изотропного слоя. Показана возможность использования средств неразрушающего мониторинга для уточнения параметров механических моделей, которые, таким образом, позволяют с большей достоверностью прогнозировать поведение и разрушение материалов и конструкций из них. Также анализ констант материала может быть произведен на образцах материалов, которые используются для изготовления конструкций. Например, это может быть полезно при исследовании влияния на свойства материала тех или иных технологических процессов.

Необходимо отметить, что в рамках данной методологии показания оптоволоконных датчиков должны считаться достоверными с точностью, необходимой для того, чтобы служить «эталоном» значений деформаций. Существует множество работ, посвященных измерениям деформаций при помощи внедренных и нанесенных на композиционный материал ВОДД с описанием технических и методологических вопросов, некоторые результаты содержатся в работах [11, 19, 28]. Эта область исследований в настоящий момент активно развивается, и можно утверждать, что последние достижения будут способствовать развитию ВОДД как все более надежного инструмента независимого неразрушающего мониторинга состояния конструкций.

Предложенный метод может быть обобщен для материалов с более выраженной анизотропией свойств. В таком случае необходимо регистрировать большее число компонент тензора деформаций в контрольных точках. Для этого при использовании в качестве средства мониторинга ВОДД может быть реализовано расположение оптоволоконных линий в виде розеток, позволяющих получать значения деформаций по разным направлениям [29, 30].

Благодарность

Исследование выполнено в Пермском национальном исследовательском политехническом университете при поддержке Российского научного фонда (проект №15-19-00243).

Библиографический список

1. Optic fibre sensor for real-time damage detection in smart composite / R. de Oliveira [et al.] // *Comput. Struct.* – 2004. – Vol. 82. – No. 17. – P. 1315–1321. DOI:10.1016/j.compstruct.2004.03.028
2. Lebid S., Habel W., Daum W. How to reliably measure composite-embedded fibre Bragg grating sensors influenced by transverse and point-wise deformations? // *Meas. Sci. Technol.* – 2004. – Vol. 15. – No. 8. – P. 1441–1447. DOI:10.1088/0957-0233/15/8/001
3. Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials / K.S.C. Kuang [et al.] // *Compos. Sci. Technol.* – 2001. – Vol. 61. – No. 10. – P. 1379–1387. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00037-9
4. Применение оптического волокна в качестве датчиков деформации в полимерных композиционных материалах / Е.Н. Каблов [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2010. – Т. 3. – С. 10–15.
5. Takeda N., Okabe Y., Mizutani T. Damage detection in composites using optical fibre sensors // *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.* – 2007. – Vol. 221. – No. 4. – P. 497–508. DOI: 10.1243/09544100JAERO148
6. Staszewski W., Tomlinson G., Boller C. Health monitoring of aerospace structures smart sensor technologies and signal processing // *Aircraft Design.* – 2004. – Vol. 29. – P. 61–70.
7. Farrar C.R., Worden K. An introduction to structural health monitoring. // *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.* – 2007. – Vol. 365. – No. 1851. – P. 303–315. DOI:10.1098/rsta.2006.1928
8. Diamanti K., Soutis C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures // *Prog. Aerosp. Sci.* – 2010. – Vol. 46. – No. 8. – P. 342–352. DOI: 10.1016/j.paerosci.2010.05.001
9. Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials / E.N. Kablov [et al.] // *Polym. Sci. Ser. D.* – 2011. – Vol. 4. – No. 3. – P. 246–251. DOI: 10.1134/S1995421211030063.
10. Process monitoring of fibre reinforced composites using a multi-measurand fibre-optic sensor / A.K. Nair [et al.] // *Sensors Actuators, B Chem.* – 2015. – Vol. 212. – P. 93–106. DOI: 10.1016/j.snb.2015.01.085
11. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present status and applications / M. Majumder [et al.] // *Sensors Actuators, A Phys.* – 2008. – Vol. 147. – No. 1. – P. 150–164. DOI: 10.1016/j.sna.2008.04.008
12. Fundamentals and applications of optical fiber Bragg grating sensors to textile structural composites / W. Du [et al.] // *Compos. Struct.* – 1998. – Vol. 42. – No. 3. – P. 217–229. DOI: 10.1016/S0263-8223(98)00045-2
13. Review on composite structural health monitoring based on fiber Bragg grating sensing principle / Y. Qiu [et al.] // *J. Shanghai Jiaotong Univ.* – 2013. – Vol. 18. – No. 2. – P. 129–139. DOI: 10.1007/s12204-013-1375-4
14. Rao Y.J. Recent progress in in-fibre Bragg grating sensors // *Opt. Lasers Eng.* – 1999. – Vol. 31. – P. 297–324. DOI: 10.1016/S0143-8166(99)00025-1
15. Guemes J.A., Menéndez J.M. Response of Bragg grating fiber-optic sensors when embedded in composite laminates //

Acknowledgement

The research was performed at the Perm National Research Polytechnic University, with the support of the Russian Science Foundation (project №15-19-00243).

16. Damage identification system of CFRP using fiber bragg grating sensors / S. Lu [et al.] // *Compos. Struct.* – 2015. – Vol. 125. – P. 400–406. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.02.038
17. Strain measurements of composite laminates with embedded fibre bragg gratings: Criticism and opportunities for research / G. Luyckx [et al.] // *Sensors.* – 2011. – Vol. 11. – P. 384–408. DOI: 10.3390/s110100384
18. К вопросу об интеграции оптоволокон в ПКМ и измерении деформации материала с помощью волоконных брэгговских решеток / В.В. Махсидов [и др.] // *Механика композиционных материалов и конструкций.* – 2014. – Т. 20, № 4. – С. 568–574.
19. Измерение неоднородных полей деформаций встроенными в полимерный композиционный материал волоконно-оптическими датчиками / А.Н. Аношкин [и др.] // *Механика твердого тела.* – 2016. – Т. 5. – С. 42–51.
20. Lu H., Gu X. Fiber Bragg Grating Strain Sensor for Microstructure in Situ Strain Measurement and Real-Time Failure Detection // *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors: Research, Technology, and Applications in Mechanical Sensing.* – 2018. – P. 75-96. DOI: 10.1016/B978-0-12-803131-5.00004-0
21. Impact localization on composite laminates using fiber Bragg grating sensors and a novel technique based on strain amplitude / G. Zhao [et al.] // *Opt. Fiber Technol.* – 2018. – Vol. 40. – P. 172–179. DOI: 10.1016/j.yofte.2017.12.001
22. Матвеев В.П., Юрлова Н.А. Идентификация эффективных упругих постоянных композитных оболочек на основе статических и динамических экспериментов // *Механика твердого тела.* – 1998. – Т. 3. – С. 12–20.
23. Tashkinov M., Spaskova E. Estimation of microstructural failure probability based on restoration of the field distributions laws in components of heterogenous media // *Procedia Struct. Integr.* – 2017. – Vol. 5. – P. 608–613. DOI: 10.1016/J.PROSTR.2017.07.023
24. Levenberg K. A Method for the solution of certain non-linear problems in least squares // *Q. Appl. Math.* – 1944. – Vol. 11. – No. 2. – P. 164–168.
25. Marquardt D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of nonlinear Parameters // *J. Soc. Ind. Appl. Math.* – 1963. – Vol. 11. – No. 2. – P. 431–441. DOI: 10.1137/0111030.
26. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material / V.P. Matveenko [et al.] // *Struct. Control Heal. Monit.* – 2017. – P. e2118. DOI: 10.1002/stc.2118
27. Fletcher R. *Practical Methods of Optimization.* – Chichester, West Sussex England: John Wiley & Sons, Ltd, 2000. DOI: 10.1002/9781118723203
28. Di Sante R., Bastianini F. Temperature-compensated fibre Bragg grating based sensor with variable sensitivity // *Opt. Lasers Eng.* – 2015. – Vol. 75. – P. 5–9. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.06.002

29. Chow H.L. and K.L. and L.C. and K. Embedded fibre Bragg grating sensors for non-uniform strain sensing in composite structures // *Meas. Sci. Technol.* – 2005. – Vol. 16. – No. 12. – P. 2415.

References

1. de Oliveira R. et al. Optic fibre sensor for real-time damage detection in smart composite. *Comput. Struct.* 2004. vol. 82, no.17, pp. 1315–1321. DOI: 10.1016/j.compstruc.2004.03.028.

2. Lebid S., Habel W., Daum W. How to reliably measure composite-embedded fibre Bragg grating sensors influenced by transverse and point-wise deformations?. *Meas. Sci. Technol.* 2004, vol. 15, no.8, pp. 1441–1447. DOI: 10.1088/0957-0233/15/8/001.

3. Kuang K.S.C. et al. Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials. *Compos. Sci. Technol.* 2001, vol. 61, no.10, pp. 1379–1387.

4. Kablov E.N. et al. Primeneniye opticheskogo volokna v kachestve datchikov deformatsii v polimernykh kompozitsionnykh materialakh [The use of optical fiber as strain sensors in polymer composite materials]. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, 2010, vol. 3, pp. 10–15.

5. Takeda N., Okabe Y., Mizutani T. Damage detection in composites using optical fibre sensors. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng.* 2007, vol. 221, no.4, pp. 497–508. DOI: 10.1016/S0266-3538(01)00037-9.

6. Staszewski W., Tomlinson G., Boller C. Health monitoring of aerospace structures smart sensor technologies and signal processing. *Aircraft Design*, 2004, vol. 29, pp. 61–70.

7. Farrar C.R., Worden K. An introduction to structural health monitoring. *Philos. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci.*, 2007, vol. 365, no.1851, pp. 303–315. DOI: 10.1098/rsta.2006.1928.

8. Diamanti K., Soutis C. Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures. *Prog. Aerosp. Sci.*, 2010, vol. 46, no.8, pp. 342–352. DOI: 10.1016/j.paerosci.2010.05.001.

9. Kablov E.N. et al. Application of optical fiber as strain gauges in polymer composite materials. *Polym. Sci. Ser. D.*, 2011, vol. 4, no.3, pp. 246–251. DOI: 10.1134/S1995421211030063.

10. Nair A.K. et al. Process monitoring of fibre reinforced composites using a multi-measurand fibre-optic sensor. *Sensors Actuators, B Chem.*, 2015, vol. 212, pp. 93–106. DOI: 10.1016/j.snb.2015.01.085.

11. Majumder M. et al. Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present status and applications. *Sensors Actuators, A Phys.* 2008, vol. 147, no.1, pp. 150–164. DOI: 10.1016/j.sna.2008.04.008.

12. Du W. et al. Fundamentals and applications of optical fiber Bragg grating sensors to textile structural composites. *Compos. Struct.* 1998, vol. 42, no.3, pp. 217–229. DOI: 10.1016/S0263-8223(98)00045-2.

13. Qiu Y. et al. Review on composite structural health monitoring based on fiber Bragg grating sensing principle. *J. Shanghai Jiaotong Univ.* 2013, vol. 18, no.2, pp. 129–139. DOI: 10.1007/s12204-013-1375-4.

14. Rao Y.J. Recent progress in in-fibre Bragg grating sensors. *Opt. Lasers Eng.* 1999, vol. 31, pp. 297–324. DOI: 10.1016/S0143-8166(99)00025-1.

15. Guemes J.A., Menéndez J.M. Response of Bragg grating fiber-optic sensors when embedded in composite laminates. *Compos. Sci. Technol.*, 2002, vol. 62, no.7–8, pp. 959–966. DOI: 10.1016/S0266-3538(02)00010-6.

16. Lu S. et al. Damage identification system of CFRP using fiber bragg grating sensors. *Compos. Struct.*, 2015, vol. 125, pp. 400–406. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.02.038.

30. Simultaneous Measurement of Two Strain Components in Composite Structures Using Embedded Fiber Sensor / X.D. Jin [et al.] // *J. Compos. Mater.* – 1999. – Vol. 33. – No. 15. – P. 1376–1389. DOI: 10.1177/002199839903301501

17. Luyckx G. et al. Strain measurements of composite laminates with embedded fibre bragg gratings: Criticism and opportunities for research. *Sensors.*, 2011, vol. 11, no.1. pp. 384–408. DOI: 10.3390/s110100384.

18. Makhidov V.V. et al. K voprosu ob integratsii optovolokna v PKM i izmerenii deformatsii materiala s pomoshch'yu volokonnykh breggovskikh reshetok [On the question of the integration of fiber in PCM and the measurement of material deformation using fiber Bragg gratings]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy*, 2014, vol. 20, no.4, pp. 568–574.

19. Anoshkin A.N. et al. Measurement of inhomogeneous strain fields by fiber optic sensors embedded in a polymer composite material. *Mech. Solids.*, 2016, vol. 51, no.5, pp. 542–549. DOI: 10.3103/S0025654416050058.

20. Lu H., Gu X. Fiber Bragg Grating Strain Sensor for Microstructure in Situ Strain Measurement and Real-Time Failure Detection. *Opto-Mechanical Fiber Optic Sensors: Research, Technology, and Applications in Mechanical Sensing*, 2018, pp. 75–96. DOI: 10.1016/B978-0-12-803131-5.00004-0.

21. Zhao G. et al. Impact localization on composite laminates using fiber Bragg grating sensors and a novel technique based on strain amplitude. *Opt. Fiber Technol.*, 2018, vol. 40, pp. 172–179. DOI: 10.1016/j.yofte.2017.12.001.

22. Matveenko V.P., Yurlova N.A. Identifikatsiya effektivnykh uprugikh postoyannykh kompozitnykh obolochek na osnove staticheskikh i dinamicheskikh eksperimentov [Identification of effective elastic constant composite shells based on static and dynamic experiments]. *Mekhanika tverdogo tela*, 1998, vol. 3, pp. 12–20.

23. Tashkinov M., Spaskova E. Estimation of microstructural failure probability based on restoration of the field distributions laws in components of heterogenous media. *Procedia Struct. Integr.* 2017, vol. 5, pp. 608–613. DOI: 10.1016/J.PROSTR.2017.07.023.

24. Levenberg K. A Method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Q. Appl. Math.* 1944, vol. 11, no.2, pp. 164–168.

25. Marquardt D. An Algorithm for Least-Squares Estimation of nonlinear Parameters. *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 1963, vol. 11, no.2, pp. 431–441. DOI: 10.1137/0111030.

26. Matveenko V.P. et al. Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material. *Struct. Control Heal. Monit.*, 2017, pp. e2118. DOI: 10.1002/stc.2118.

27. Fletcher R. Practical Methods of Optimization. Chichester, West Sussex England: John Wiley & Sons, Ltd, 2000. DOI: 10.1002/9781118723203.

28. Di Sante R., Bastianini F. Temperature-compensated fibre Bragg grating based sensor with variable sensitivity. *Opt. Lasers Eng.*, 2015, vol. 75, pp. 5–9. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2015.06.002.

29. Chow H.L. and K.L. and L.C. and K. Embedded fibre Bragg grating sensors for non-uniform strain sensing in composite structures. *Meas. Sci. Technol.*, 2005, vol. 16, no.12, pp. 2415.

30. Jin X.D. et al. Simultaneous Measurement of Two Strain Components in Composite Structures Using Embedded Fiber Sensor. *J. Compos. Mater.*, 1999, vol. 33, no.15, pp. 1376–1389. DOI: 10.1177/002199839903301501.