

УДК 629.7.01

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОРОТКОАРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТОВ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ РАСЧЕТОМ ИХ ЛИТЬЯ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

© 2020 Е.И. Куркин, Е.А. Кишов, О.Е. Лукьянов, О.У. Эспиноса Барсенас

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева
г. Самара, Россия

Статья поступила в редакцию 01.10.2020

Представлена методика решения связанной задачи топологической оптимизации конструкций из короткоармированных композитов с учетом определения анизотропии материалов путем полного решения задачи литья изделия. Методика рассмотрена на примере оптимизации кронштейна, нагруженного перерезывающей силой. Решение проводится в модуле Ansys Topology Optimization с использованием метода Sequential Convex Programming. Анизотропная постановка задачи включает в себя расчет процесса литья в системе Autodesk Moldflow на сетке, редуцированной промежуточными итерациями топологической оптимизации, и обновлением свойств материала на промежуточных шагах алгоритма на основе программы на языке С. Показано, что учет анизотропии материала может приводить к смещению линий спая за рамки основных несущих элементов конструкции и приводить к росту жесткости конструкций из короткоармированных композиционных материалов. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта мол_а_вед № 18-31-20071.

Ключевые слова: композиционный материал, короткие волокна, топологическая оптимизация, анизотропия, литье.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-114-119

1. ВВЕДЕНИЕ

Топологическая оптимизация конструкций позволяет определять оптимальную силовую схему конструкций на начальном этапе проектирования изделия [1 - 5]. Алгоритм использования тела переменной плотности предложен В.А. Комаровым в 1976 году [6] и подробно описан в работе [7]. Многие расчетные алгоритмы, использующие методы топологической оптимизации, опираются на работы Бендсое и Зигмунда [8, 9]. Оптимизация распределения материала в континуальной модели позволяет определить проект, которому соответствует рациональная, с точки зрения передачи усилий, силовая схема объекта [10]. В настоящее время метод топологической оптимизации обобщен на случай оптимизации поверхностных конструкций из слоистых композиционных материалов [11, 12].

Свойства анизотропных материалов зависят от ориентации армирующих волокон, определяемых в процессе литья изделия [13]. Для расчета ориентации армирующих волокон используются модели Фолгара-Тукера [14]. Исследования механических характеристик короткоармированных композитов базируются на работах Эшелби [15]. Для прогнозирования механических характеристик изделий, армированных короткими высокопрочными волокнами в зависимости от ориентации волокон в изделии используется модель Мори-Танака [16, 17]. В работе Тандона и Венга представлено определение характеристик упругости композиционного материала, армированного однонаправленными короткими волокнами [18]. Расчет характеристик короткоармированного композита с произвольным тензором ориентации представлен в работах [19, 20]. Известно решение задачи топологической оптимизации для короткоармированных композитов, представленное в работе [21], но в данной работе расчет нестационарной задачи литья композитов в целях упрощения заменяется решением уравнения эйконала.

Целью данной работы является разработка методики решения связанной задачи топологической оптимизации конструкций из короткоармированных композитов с учетом определения анизотропии материалов путем полного решения задачи гидродинамики литья изделия.

Куркин Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru
Кишов Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: evgeniy.kishov@ssau.ru
Лукьянов Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: lukuяnovoe@mail.ru
Эспиноса Барсенас Оскар Улиссес, магистрант института авиационной техники.
E-mail: oscar.espinosa.barcenas@gmail.com

2. МЕТОДИКА ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ КОРОТКОАРМИРОВАННОГО КОМПОЗИТА С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА, ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ ПРОЦЕССОМ ЛИТЬЯ

Методику топологической оптимизации конструкций из короткоармированного композиционного материала рассмотрим на примере оптимизации кронштейна, схема закрепления и нагружения которого представлена на рис. 1. Проектная область имеет размеры $105 \times 60 \times 10$ мм. Задача рассматривается на сетке из 163325 тетрагональных элементов размером 1,5 мм.

Рассмотрим решение задачи в изотропной и анизотропной постановке – для материалов, с характеристиками, соответствующими характеристикам полиамида, армированного 50% стекловолокна. Изотропный материал имеет модуль упругости 8 ГПа и коэффициент Пуассона равный 0,25. Для описания жесткости анизотропного материала используется модель материала, основанная на работах Эшелби [15], Тандона, Венга [18] и Гусева [20]. Короткоармированный композит состоит из связующего, плотностью $1,4 \text{ г/см}^3$, и короткого стекловолокна плотностью $2,6 \text{ г/см}^3$, имеющего удлинение 9,7. Массовые доли волокна и связующего равны 50%. Для решения задачи топологической оптимизации используется линейная модель связующего с модулем упругости 3158 МПа и коэффициентом Пуассона 0,243 и линейная модель упрости волокна с модулем упругости 74 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,22.

Цель топологической оптимизации – минимизация податливости с ограничением на объем материала, составляющий 25% от проектной области, и учётом технологических ограничений – направления разъема пресс-формы (pull out direction) в две стороны относительно середины толщины проектной области и минимального размера конструктивных элементов (member size minimum), составляющего 6 мм. Для решения задачи использовался решатель

Sequential Convex Programming системы Ansys Workbench, итерации останавливались при достижении Convergence Accuracy равного 0,05%.

В изотропной постановке используется классическое решение задачи с использованием модуля Ansys Topology Optimization. Анизотропная постановка дополнена расчетом процесса литья промежуточных решений топологической оптимизации и обновлением свойств материала на промежуточных шагах алгоритма. Управление ожиданием решателя топологической оптимизации достигается добавлением APDL скрипта в систему топологической оптимизации с циклом запроса /INQUIRE к файлу-флагу. Если файла-флага не оказывается в рабочей папке, происходит ожидание /WAIT, 10. Обновление свойств материала в каждой ячейке производится APDL скриптом, добавленным в систему Static Structural, являющимся базой для Topology Optimization. Анизотропные матрицы жёсткости конечных элементов из короткоармированного композиционного материала вычисляются разработанным кодом на языке C с использованием уравнений [18, 20] на основе значений тензора ориентации армирующих волокон, вычисляемых в системе Autodesk Moldflow на редуцированной сетки промежуточных шагах топологической оптимизации по методике, представленной в работе [22]. Пример расчет фронта литья и ориентации армирующих волокон на одном из промежуточных шагов топологической оптимизации представлен на рис. 2.

Результаты топологической оптимизации с учетом и без учета анизотропии свойств материала представлены на рис. 3. Видно, что учет анизотропии материала привел к изменению топологии – появлению трех диагональных несущих элементов в средней части кронштейна вместо двух элементов большего диаметра в изотропной постановке. На основании переданных в формате STL результатов топологической оптимизации в системе Siemens NX построены геометрические модели кронштейнов (рис. 4), дополненные проушинами крепления.

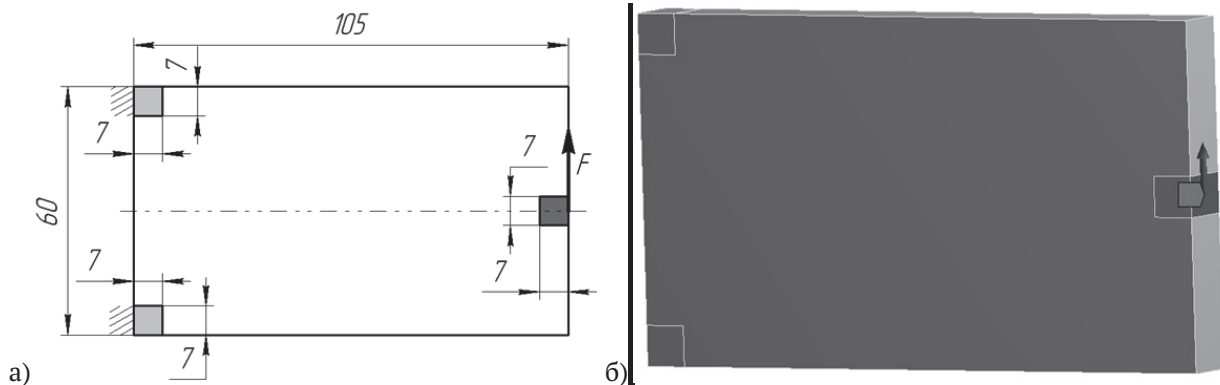


Рис. 1. Постановка задачи топологической оптимизации: а) схема закрепления и нагружения, б) геометрическая модель проектной области

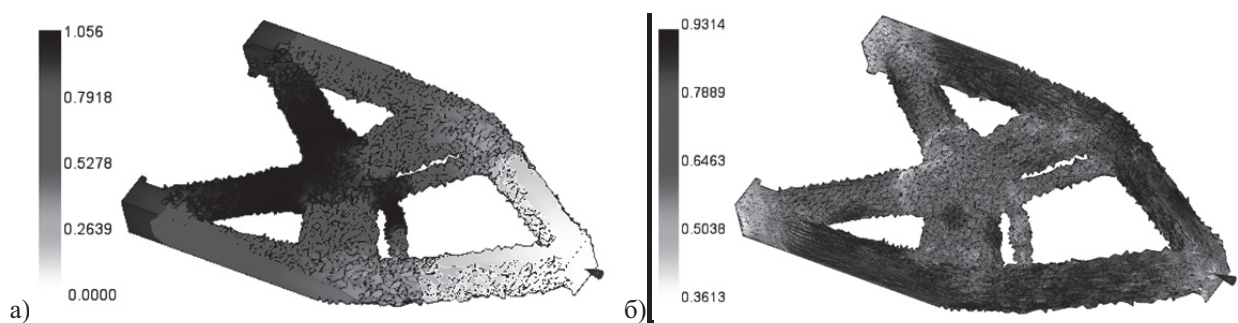


Рис. 2. Решение задачи литья короткоармированного композита на редуцированной сетке топологической оптимизации: а) фронт литья, с; б) ориентация армирующих волокон

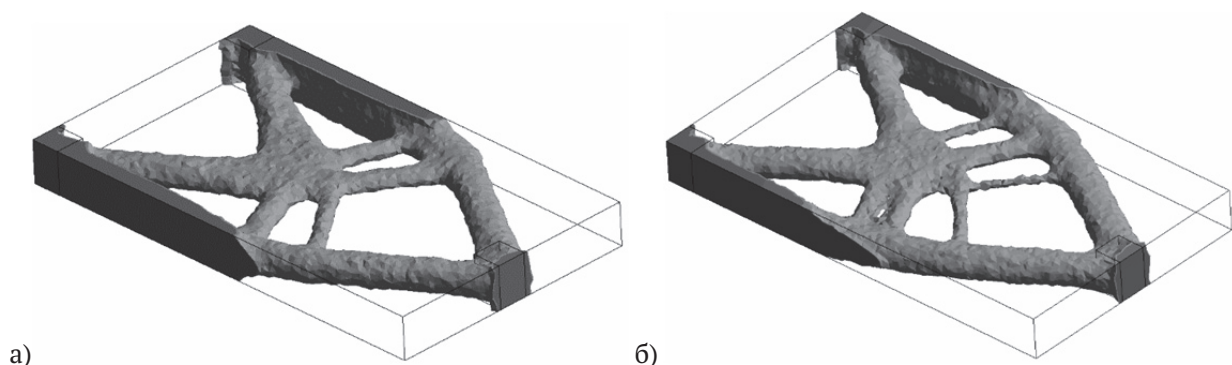


Рис. 3. Результаты топологической оптимизации в постановках: а) изотропной, б) анизотропной

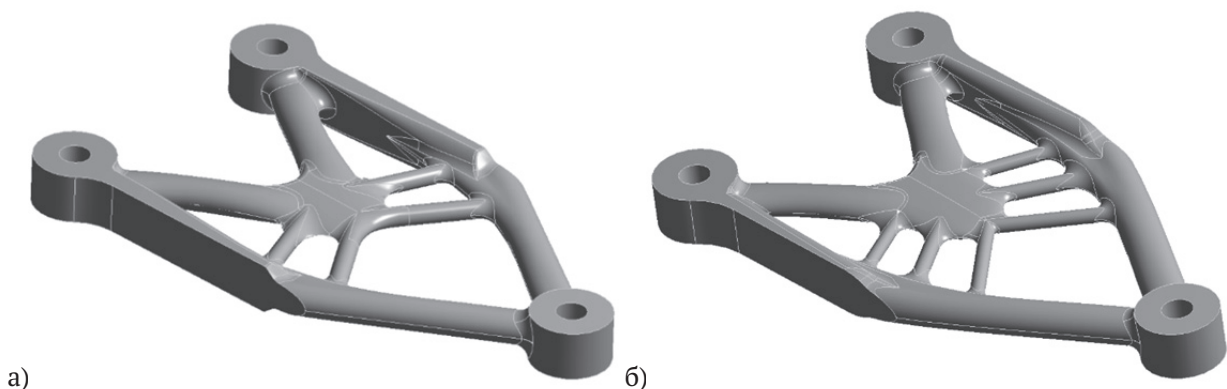


Рис. 4. Геометрические модели кронштейнов, форма которых определена топологической оптимизацией в постановках: а) изотропной, объем 17382 мм³, б) анизотропной, объем 16997 мм³

3. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ КРОНШТЕЙНОВ

Проведем поверочный расчет кронштейнов с учетом анизотропии материала, определяемой процессом их литья под давлением. Расчет литья под давлением кронштейнов, определенных их трехмерными геометрическими моделями проведен в системе Autodesk Moldflow. Линии смятия в случае литья кронштейнов, форма которых определена топологической оптимизацией в изотропной постановке разделяют диагональные элементы вблизи закрепленных опор кронштейна, тогда как в кронштейне, форма которо-

го определена топологической оптимизацией в анизотропной постановке протяженные силовые элементы не содержат линии смятия (рис. 5).

Поверочный расчет, постановка задачи которого представлена на рис. 6а, проведем с учетом сравнения двух материалов – изотропного и анизотропного. В качестве изотропного используем представленный выше материал с модулем упругости 8 ГПа и коэффициентом Пуассона равный 0,25. В качестве анизотропного материала используем нелинейный композиционный материал, в котором линейно-упругое стекловолокно массовой долей 50% с модулем упругости 74 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,22 сочета-

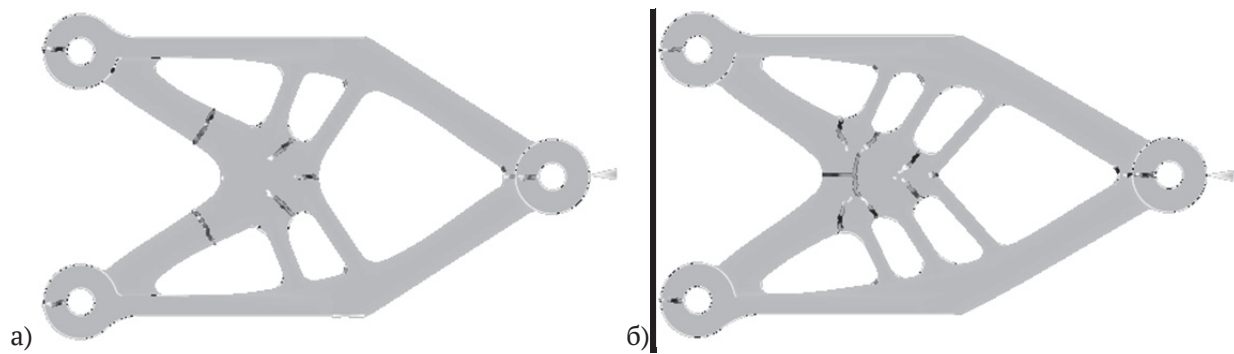


Рис. 5. Линии спая при литье кронштейнов, форма которых определена топологической оптимизацией в постановках: а) изотропной, б) анизотропной

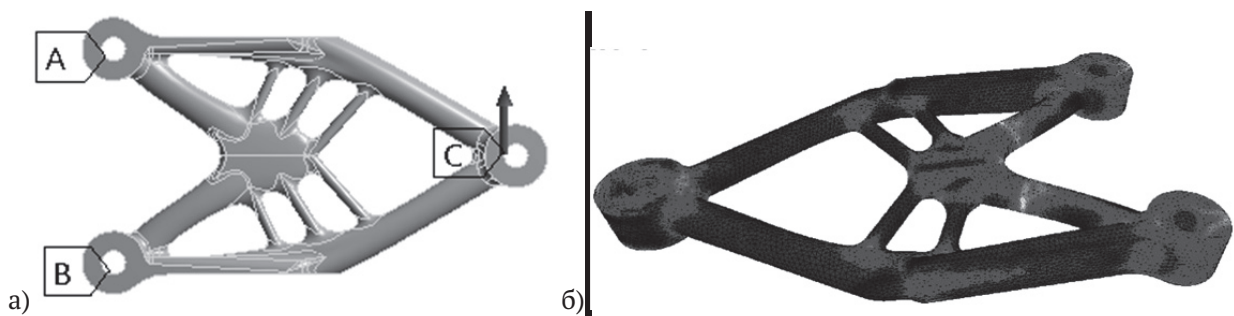


Рис. 6. Постановка задачи поверочного расчета кронштейнов: а) жёсткое закрепление в точках А и В а также приложение перерезывающей силы в точке С; б) перенос информации о значениях элементов тензора ориентации армирующих волокон в системе Digimat MAP

ется с нелинейной моделью связующего с модулем упругости 4486 МПа, коэффициентом Пуассона 0,24418, пределом текучести 10,93 МПа и экспоненциально-линейным законом упрочнения Digimat MF с модулями упрочнения 44 МПа, и 28 МПа и коэффициентом показателя экспоненты 142. Учет характеристик материала проведен с помощью модуля Digimat CAE, значения тензора ориентации, полученные при расчете литья кронштейнов интерполированы на сетку расчета напряженно-деформированного состояния в модуле Digimat MAP (рис. 6б).

Расчет жесткости различных вариантов формы кронштейна проведен для нагрузки 4000 Н для изотропного (рис. 7) и нелинейного анизотропного (рис. 8) материалов. Сравнение эффективности проведем на основании удельной податливости кронштейнов – произведе-

ния объема кронштейнов на максимальные значения перемещений. В случае изготовления кронштейнов из изотропного материала (рис. 7) кронштейн с формой, определяемой с помощью изотропной постановки задачи топологической оптимизации имеет на 1% меньшую удельную податливость, чем кронштейн, форма которого определена с учетом анизотропии материала, что говорит о том, что топологическая оптимизация в изотропной постановке дает предпочтительный результат в случае использования изотропного материала. В случае учета изготовления кронштейнов методом литья (рис. 8) удельная жесткость кронштейна, форма которого определена с учетом анизотропии материала, на 3,7% выше, чем удельная жесткость кронштейна, форма которого определена на основе изотропной постановки задачи топологической

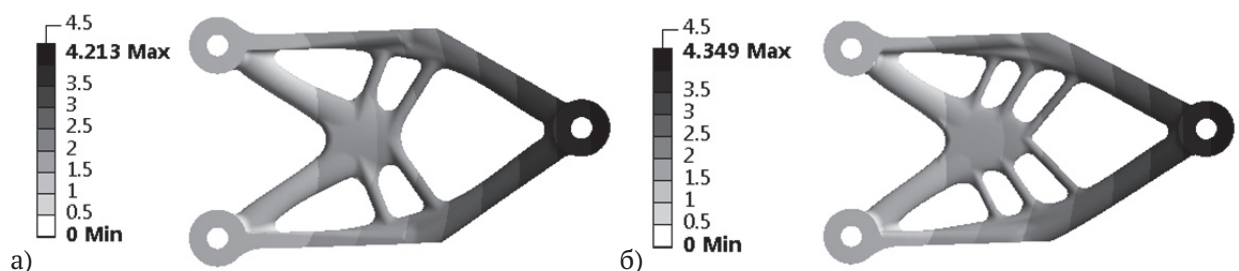


Рис. 7. Перемещения кронштейна из изотропного материала, мм: а) топология в изотропной постановке; б) топология с учетом анизотропии

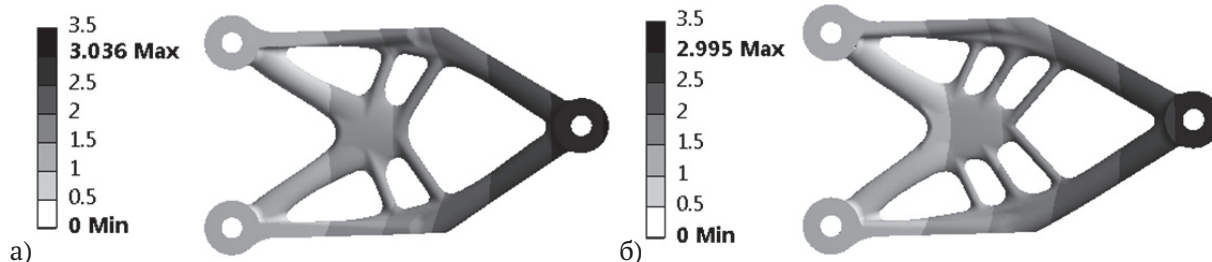


Рис. 8. Перемещения кронштейна из анизотропного материала, мм:
а) топология в изотропной постановке; б) топология с учетом анизотропии

оптимизации, что подтверждает преимущество учёта анизотропии материала в задачах топологической оптимизации изделий, изготавливаемых методом литья из короткоармированных композиционных материалов.

4. ВЫВОДЫ

Предложена методика учета анизотропии короткоармированного композиционного материала в задачах топологической оптимизации конструкций, изготавливаемых методом литья под давлением. Показано, что учет анизотропии материала может приводить к смещению линий сая за рамки основных несущих элементов конструкции и приводить к росту жесткости конструкций из короткоармированных композиционных материалов.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта мол_a_вед № 18-31-20071.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В. А., Кузнецов А. С. Выбор облика летательного аппарата с использованием технологии многодисциплинарной оптимизации / Самара: СГАУ, 2012. – 76 с.
2. Головченко Я.О. Выбор рациональных конструктивно-силовых схем агрегатов самолета из композитов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2014. № 63. – С. 5-11.
3. Редько А.А. Выбор в первом приближении конструктивно-силовой схемы крыла на этапе эскизного проектирования // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2013. № 62. – С.13-20.
4. Комаров В.А. Проектирование силовых схем авиационных конструкций // Актуальные проблемы авиационной науки и техники. М.: Машиностроение, 1984. С. 114-129.
5. Eschenauer H.A., Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: A review // Appl. Mech. Rev. V. 54. 2001. – P. 331-389.
6. Комаров В. А. Рациональное проектирование силовых авиационных конструкций: дисс. ... докт. техн. наук. – Московский авиац. ин-т. – Москва, 1976. – 329 с.
7. Komarov V.A., Boldyrev A.V., Kuznetsov A.S., Lapteva M.Yu. Aircraft design using a variable density model/ Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An Int Journal, V. 84 (3), 2012. - P. 162-171.
8. Bendsoe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method// Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. V. 71. 1988. – P. 197-224.
9. Bendsoe M.P., Sigmund O. Topology optimization: Theory, methods and applications // Springer, 2003. – 370 p.
10. Болдырев А.В., Комаров В.А. Проектирование крыльев летательных аппаратов с использованием 3D-моделей переменной плотности. - Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т), 2011. – 175 p.
11. Dai Y., Feng M., Zhao M. Topology optimization of laminated composite structures with design-dependent loads // Composite Structures, V. 167, 2017. – P. 251-261.
12. Coelho P.G., Guedes J.M., Rodrigues H.C. Multiscale topology optimization of bi-material laminated composite structures// Composite Structures, V. 132. 2015. – P. 495-505.
13. Мэттьюз Ф., Роллингс Р. Мир материалов и технологий. Композиционные материалы. Механика и технология / М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
14. Folgar F., Tucker Ch. Orientation behavior of fibres in concentrated suspensions// Journal of Reinforced Plastics and Composites, V.3. I.2. 1984. – P. 98-119.
15. Eshelby J.D. The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems// R. Soc. Lond. A. Vol. 241. 1957. P.376-396.
16. Jain A., Lomov S.V., Abdin Y., Verpoest I., Paepegem W.V. Pseudo-grain discretization and full Mori Tanaka formulation for random heterogeneous media: Predictive abilities for stresses in individual inclusions and the matrix // Composites Science and Technology V.87, 2013. P. 86-93.
17. Mishurova T., Rachmatulin N., Fontana P., Oesch T., Bruno G., Radi E., Sevostianov I. Evaluation of the probability density of inhomogeneous fiber orientations by computed tomography and its application to the calculation of the effective properties of a fiber-reinforced composite // International Journal of Engineering Science. V. 122. 2018. – P. 14-29.
18. Tandon G.P., Weng G.J. The effect of aspect ratio of inclusions on the elastic properties of unidirectionally aligned composites// Polymer Composites. V. 5. I. 4.

1984. – P. 327-333.
19. *Lasपाल M., Crespo C., Jiménez M.A., Garcia B., Pelegay J.L.* Application of micromechanical models for elasticity and failure to short fibre reinforced composites. Numerical implementation and experimental validation // *Computers and Structures*, V. 86. I. 9. 2008. – P. 977-987.
20. *Gusev A.A.* Finite element estimates of viscoelastic stiffness of short glass fiber reinforced composites // *Composite Structures*, Vol. 171. 2017. – P. 53-62.
21. *Ospald F., Herzog R.* Topology Optimization for Injection Molding of Short Fiber-Reinforced Plastics // *Proc. Appl. Math. Mech.* Vol. 17, 2017. – P. 337-338.
22. *Куркин Е.И., Лукьянов О.Е., Кишов Е.А.* Расчет ориентации коротких волокон на конечно-элементной модели, редуцированной алгоритмами топологической оптимизации конструкций // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2019. Т. 21. №. 5. – С. 90 – 95.

**TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF SHORT FIBERS REINFORCED COMPOSITE STRUCTURES
CONSIDERING THE MATERIAL ANISOTROPY DETERMINED BY THE CALCULATION
OF THEIR INJECTION MOLDING PROCESS**

© 2020 E.I. Kurkin, E.A. Kishov, O.E. Lukyanov, O.U. Espinosa Barcenas

Samara National Research University, Samara, Russia

A methodology is presented for solving the related problem of topological optimization of short-reinforced composites structures, considering the attributes of the material anisotropy by fully solving the injection molding problem. The methodology is considered on the example of optimizing a bracket loaded with a shearing force. The solution is performed in the Ansys Topology Optimization module using the Sequential Convex Programming method. The anisotropic formulation of the problem involves the calculation of the injection molding process in the Autodesk Moldflow system on a mesh reduced by intermediate iterations of topological optimization, and updating the material properties at intermediate steps of the algorithm based on a C program. It is shown that the anisotropy of the material can lead to the displacement of weld lines beyond the main load-bearing structural elements and to increase the stiffness of short-reinforced composite materials structures. The research was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 18-31-20071 mol_a_ved.

Keywords: composite material, short fibers, topological optimization, anisotropy, injection.

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-5-114-119

*Eugene Kurkin, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor at Aircraft Construction and Design Department.
E-mail: eugene.kurkin@mail.ru*

*Eugene Kishov, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor at Aircraft Construction and Design Department.
E-mail: evgeniy.kishov@ssau.ru*

*Oleg Lukyanov, Candidate Degree in Engineering, Associate Professor at Aircraft Construction and Design Department.
E-mail: lukyanovoe@mail.ru*

*Oscar Ulises Espinosa Barcenas, Master's Student at Institute of Aeronautical Engineering.
E-mail: oscar.espinosa.barcenas@gmail.com*