

## УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОАРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ТОПОЛОГИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СИЛОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2019 Е.И. Куркин, Е.А. Кишов, М.О. Спирина

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 10.10.2019

Представлена методика учета анизотропии механических характеристик короткоармированных композиционных материалов при топологической оптимизации силовых конструкций. Проведено сравнение результатов топологической оптимизации кронштейна в изотропной и ортотропной постановках. В качестве материала использовался полиамид-6, армированный 50% короткими стеклянными волокнами. Оценено влияние анизотропии механических характеристик материала на результаты топологической оптимизации. Показано, что ортотропный характер материала приводит к ориентации силовых элементов конструкции вдоль направления максимальной жесткости материала. На основе результатов топологической оптимизации с учетом технологических ограничений построены трехмерные геометрические модели кронштейна. Проведен поверочный расчет с учетом нелинейности и анизотропности материала и предсказанной с помощью расчета литья пластины-заготовки структуры армирования. Проведенные расчеты подтверждены экспериментально, путем проведения испытаний кронштейнов из материала Ар-амид ПА6 СВ 50-1 на универсальной сервогидравлической машине MTS 793. 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

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одним из начальных этапов проектирования изделия является выбор силовой схемы конструкции [1, 2, 3]. Для выбора силовой схемы с учетом заданных требований может быть использована топологическая оптимизация, основанная на модели тела переменной плотности, вписанного в геометрические ограничения объекта [4]. Алгоритм использования тела переменной плотности предложен В.А. Комаровым в 1976 году [5] и подробно описан в работе [6]. Идея использования пористого специфического материала с переменными прочностными и упругими свойствами также представлена в исследованиях [7, 8, 9]. Оптимизация распределения материала в континуальной модели позволяет определить проект, которому соответствует рациональная, с точки зрения передачи усилий, силовая схема объекта [10].

Жесткость и прочность короткоармированных композиционных материалов существенно зависят от ориентации армирующих волокон,

определяемых в процессе литья изделия [11]. Исследования механических характеристик короткоармированных композитов базируются на работах Эшелби. Тандон и Венг на основе теории Эшелби определили характеристики упругости композиционного материала, армированного однонаправленными короткими волокнами. Короткоармированный композиционный материал может быть представлен трансверсально-изотропной моделью, приводящей к матрице жесткости ортотропного вида. Исследования механических характеристик короткоармированных композитов базируются на работах Эшелби, исследовавшего упругость среды, включающей в себя эллипсоидальную частицу [12, 13, 14]. Тандон и Венг на основе теории Эшелби определили характеристики упругости композиционного материала, армированного однонаправленными короткими волокнами [15]. Расчет характеристик короткоармированного композита с произвольным тензором ориентации представлен в работах [16, 17]. Для расчета механических характеристик короткоармированного материала применяется конечно-элементное моделирование микроструктуры репрезентативного объема [18].

Целью работы является оценка влияния анизотропии короткоармированного композиционного материала на форму конструкций, получаемых в результате топологической оптимизации.

*Куркин Евгений Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: eugene.kurkin@mail.ru*

*Кишов Евгений Алексеевич, ассистент кафедры конструкции и проектирования летательных аппаратов. E-mail: evgeniy.kishov@ssau.ru*

*Спирина Мария Олеговна, аспирант. E-mail: maryspirina@gmail.com*

## 2. ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КРОНШТЕЙНА С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ МАТЕРИАЛА

Рассмотрим задачу топологической оптимизации кронштейна, нагруженного вертикальной силой (рис. 1). Расстояние между осями закрепления кронштейна составляет 12,5 мм, линия действия нагрузки находится от осей проушин закрепления на расстоянии 50 мм. Диаметр отверстий проушин равен 6 мм. Размеры проектной области составляют 50 x 75 x 4 мм. Вокруг отверстий проушин заданы области диаметром 12,5 мм, материал из которых не может быть исключен (рис. 1б). Задача рассматривается в постановке плоского напряжённого состояния, на сетке, состоящей из 61624 призматических элемента, размером 0,25 мм, расположенных в один слой. При оптимизации накладывается условие симметрии относительно плоскости, перпендикулярной вектору действия силы и проходящей через центр оси проушины приложения нагрузки. В ходе проектировочного расчета проушины закрепления определяются с помощью Cylindrical Support (со скольжением в касательном направлении), нагрузка передается путем задания Bearing Load.

Испытания образцов на растяжение по стандарту ISO-527 [19] показали, что жесткость короткоармированных композитов с наполнением 30-50% вдоль направления литья в два раза выше жесткости короткоармированных композиционных материалов поперек направления литья [20]. Рассмотрим два материала с характеристиками, соответствующими характеристикам стеклонаполненного полиамида – изотропный материал с модулем упругости 8 ГПа и коэффициентом Пуассона равным 0,25 и ортотропный материал с  $E_X = 13$  ГПа,  $E_Y = 7$  ГПа,  $E_Z = 6,5$  ГПа,  $\nu_{XY} = 0,272$ ,  $\nu_{YZ} = 0,365$ ,  $\nu_{XZ} = 0,254$ ,  $G_{XY} = 1,979$  ГПа,

$G_{YZ} = 1,639$  ГПа,  $G_{XZ} = 1,763$  ГПа (ось X – по оси симметрии кронштейна, ось Y – по линии действия силы, ось Z – дополняет до правой тройки).

В качестве критерия оптимизации выбрана максимизация жесткости конструкции с ограничением на объем материала, равный 2900 мм<sup>3</sup> (площадь фронтальной проекции кронштейна равна 725 мм<sup>2</sup>). Топологическая оптимизация проводится в модуле Topology Optimization системы ANSYS Workbench. В качестве метода решения использован метод оптимального критерия. Решение сходится за 36 итераций. Результат топологической оптимизации представлен на рисунке 2. В случае учета анизотропии материала (рис. 2а) силовые элементы конструкции располагаются преимущественно в направлении максимальной жесткости материала.

Результаты топологической оптимизации сохранены в формате stl. На их основе в системе Siemens NX построены трехмерные геометрические модели кронштейна (рис. 3), учитывающие технологические ограничения (минимальный радиус фрезерования 0,8 мм). Строительная высота кронштейна, спроектированного с учетом анизотропии материала равна 26,4 мм, что на 23% меньше строительной высоты кронштейна, спроектированного из изотропного материала (рис. 3б).

Расчет жесткости различных вариантов формы кронштейна проведен для нагрузки 500 Н, в линейной постановке для изотропного (рис. 4) и ортотропного (рис. 5) материалов с характеристиками, представленными при решении задачи топологической оптимизации. В случае изготовления кронштейнов из изотропного материала кронштейн с большей строительной высотой оказывается на 4,6% жестче (рис. 4), тогда как в случае изготовления кронштейнов из ортотропного материала, кронштейн, спроектированный в анизотропной постановке топологической оптимизации жестче на 7,7% (рис. 5).

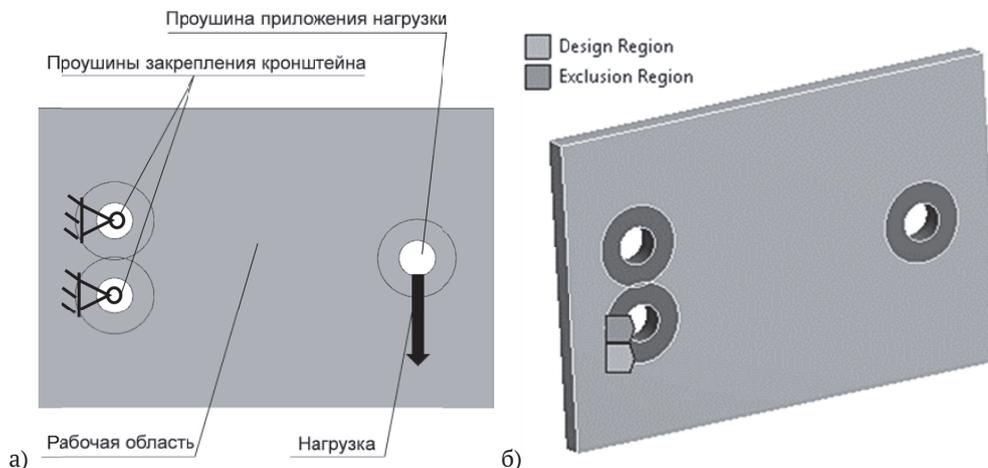


Рис. 1. Постановка задачи топологической оптимизации:  
а) граничные условия, б) проектная область

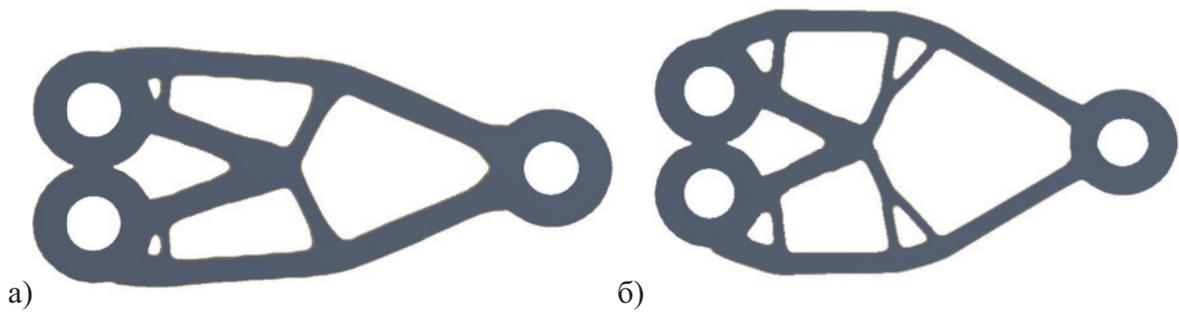


Рис. 2. Результаты топологической оптимизации в постановках:  
а) ортотропной, б) изотропной

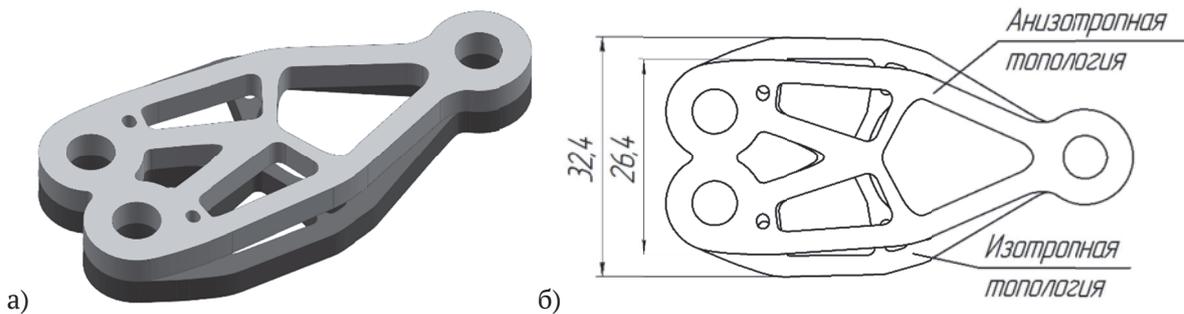


Рис. 3. Кронштейны с учетом технологических ограничений:  
а) трехмерная геометрическая модель, б) форма в плане

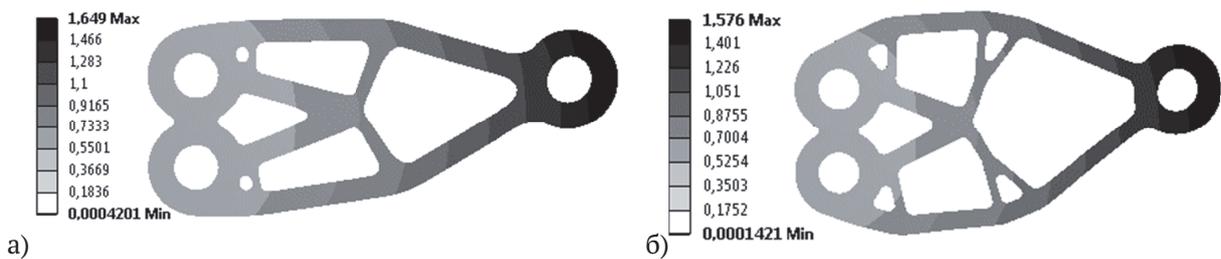


Рис. 4. Перемещения кронштейна из изотропного материала, мм:  
а) топология с учетом анизотропии, б) топология в изотропной постановке

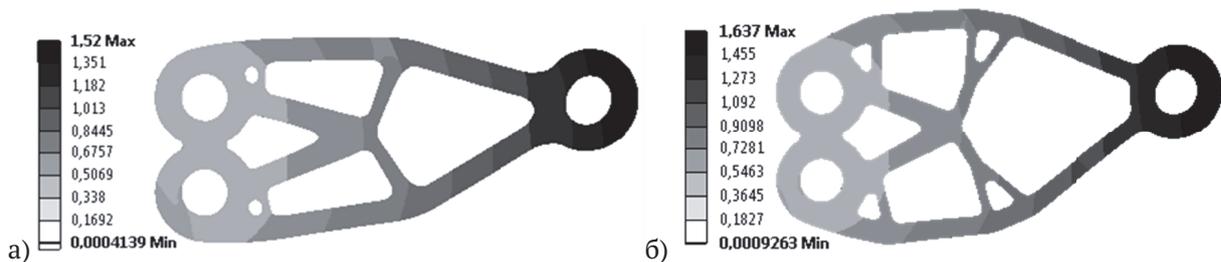


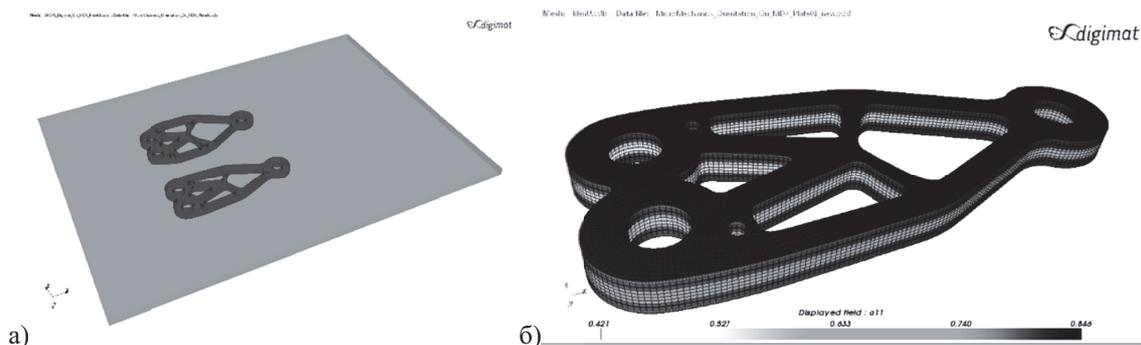
Рис. 5. Перемещения кронштейна из ортотропного материала, мм:  
а) топология с учетом анизотропии, б) топология в изотропной постановке

### 3 ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ С УЧЕТОМ НЕЛИЙНЕЙНОСТИ И СТРУКТУРЫ АРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Проведем поверочный расчет кронштейна с учетом его вырезки из пластины, отлитой из полиамида, армированного 50% стекловолокна. Значение компонент тензора ориентации арми-

рующих волокон рассчитано путем решения гидродинамической задачи в системе Moldex3D, и перенесено на сетку решения задачи определения напряженно-деформированного состояния с помощью модуля Digimat MAP (рис. 6).

Для поверочного расчета используется нелинейная анизотропная модель композиционного материала, построенная в системе Digimat MX методом реверс-инженеринга на основе



**Рис. 6.** Задание ориентации армирующих волокон с помощью Digitat MAP: а) расположение кронштейнов на пластине, б) компонента  $a_{XX}$  тензора ориентации

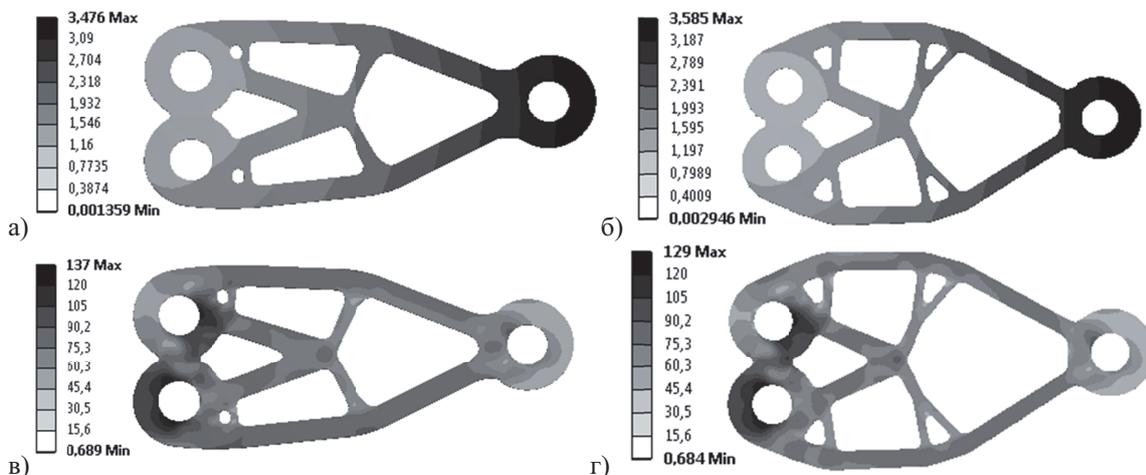
анализа экспериментальных данных по испытанию образцов на растяжение материала Армаид ПА6 СВ 50-1 (армированный 50% стекловолокна полиамид-6). Свойства волокна: модуль упругости 74 ГПа, коэффициент Пуассона 0,22, плотность 2600 кг/м<sup>3</sup>. Свойства связующего: плотность 1400 кг/м<sup>3</sup>, J2 модель пластичности, модуль упругости 3,6 ГПа, коэффициент Пуассона 0,48, начало кривой текучести 6,8 МПа, модель текучести – степенная с  $hardening\_modulus = 135$  и  $hardening\_exponent = 0,3$ . Массовая доля волокна 0,5. Для предсказания прочности конструкции использовались критерии эквивалентных напряжений, а также критерий Цяя-Хилла для трансверсально-изотропных тел (3D), с использованием постановки первого разрушенного псевдо-зерна FPGF [21]. Предел прочности вдоль направления армирования 122 МПа, поперек волокна 95,7 МПа, сдвиговая прочность 55 МПа.

Закрепление и нагружение кронштейнов проводится в модели через закрепление и нагружение стальных осей, соединённых с проушинами кронштейна с помощью Frictionless контакта, что позволяет корректно моделиро-

вать распределение напряжений в проушинах. Расчет напряженно-деформированного состояния при нагрузке 500 Н (рис. 7) показывает, что жесткость кронштейна, спроектированного с учетом анизотропии материала выше на 3,14% чем жесткость кронштейна, спроектированного в изотропной постановке. Это значения несколько ниже оценки 7,7%, полученной на этапе проектировочного расчета, за счет учета пластичности материала вокруг проушин. Поле критерия прочности (рис. 8) показывает, что именно в местах крепления проушин основания предполагается разрушение конструкции кронштейна.

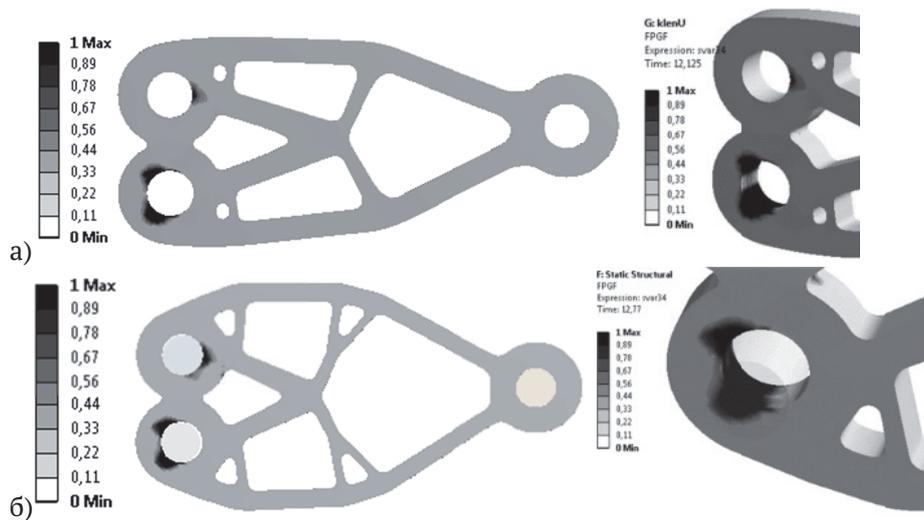
#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ КРОНШТЕЙНОВ, СПРОЕКТИРОВАННЫХ С УЧЕТОМ И БЕЗ УЧЕТА АНИЗОТРОПИИ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Кронштейны спроектированной с учетом и без учета анизотропии материала формы вырезаны фрезерованием из пластины толщиной 4,41...4,61 мм из стеклонаполненного полиами-

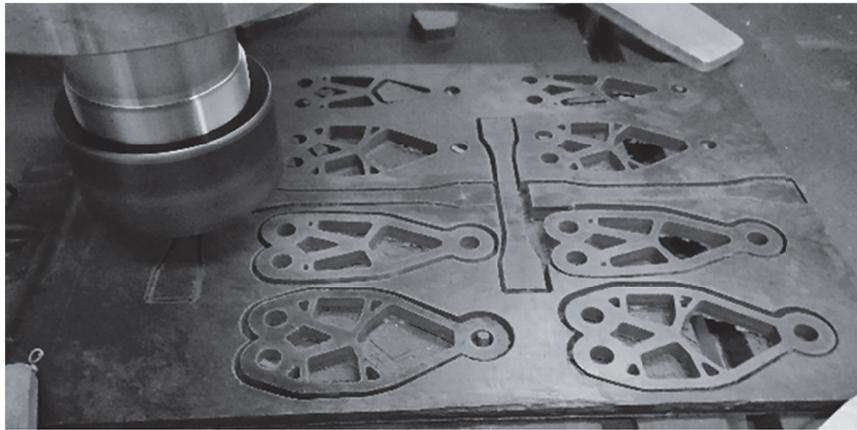


**Рис. 7.** Расчет напряженно-деформированного состояния кронштейнов с учетом нелинейности и структуры армирования материала:

а, б) перемещения, мм; в, г) эквивалентные напряжения по Мизесу, МПа; а, в) топология с учетом анизотропии; б, г) топология в изотропной постановке



**Рис. 8.** Значение FPGF критерия прочности:  
а) топология с учетом анизотропии, б) топология в изотропной постановке

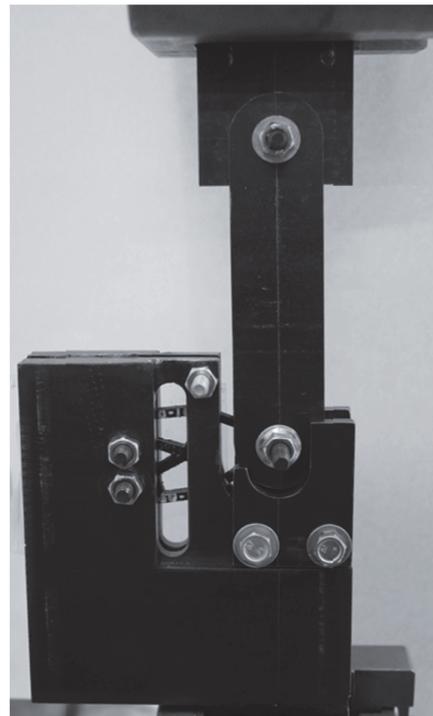


**Рис. 9.** Фрезерование кронштейнов из полученной литьем плиты материала Армамид ПА6 СВ 50-1

да Армамид ПА6 СВ 50-1, отлитой на термопласт-автомате Negri-Bossi VE 210 – 1700 (рис. 9). Для испытания образцов кронштейнов спроектирована и изготовлена оснастка (рис. 10). В ходе эксперимента измеряется сила, прикладываемая на шток цилиндра испытательной машины и его перемещения (рис. 11). Для исключения влияния толщины пластины результаты эксперимента отнесены к толщине каждого образца.

Жесткость кронштейнов  $\left(k = \frac{\Delta F}{\Delta d}\right)$ , вычислен-

ная на линейном участке кривых растяжения, отнесенная к толщине кронштейнов, представлена в таблице 1. Экспериментально полученное среднее значение жесткости кронштейнов вырезанных с учетом ортотропной топологии на 5,1% выше, чем значение жесткости кронштейнов, спроектированных без учета анизотропии материала. Экспериментально подтверждается, что кронштейны разрушаются в основании проушины, в месте, предсказанном на основе FPGF критерия прочности (рис. 12).



**Рис. 10.** Проведение испытаний на универсальной сервогидравлической машине MTS 793

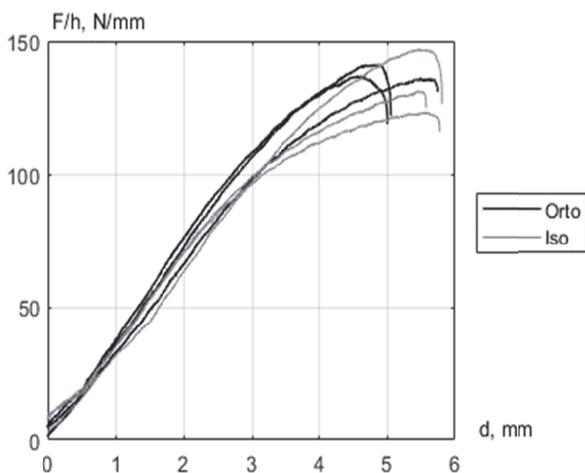


Рис. 11. Кривая растяжения кронштейнов из Армамид ПА6 СВ 50-1, спроектированных с учетом и без учета анизотропии



Рис. 12. Образцы после испытаний. Разрушение – в проушинах основания

Таблица 1. Жесткость кронштейнов из Армамид ПА6 СВ 50-1

Топология	Ортотропная	Изотропная
№ образца	k / h, Н / мм <sup>2</sup>	
1	37,90	30,94
2	36,14	35,60
3	32,83	35,29
Среднее значение	35,67	33,94
Среднеквадратичное отклонение	2,5	2,6
Коэффициент вариации, %	7,2	7,7

## ВЫВОДЫ

Анизотропия короткоармированных композиционных материалов оказывает существенное влияние на результаты топологической оптимизации конструкций. Учет анизотропии материала в процессе топологической оптимизации приводит к расположению элементов конструкции вдоль направления максимальной жесткости. В случае использования полиамида, армированного 50% стеклянными волокнами, учет анизотропии материала позволил уменьшить строительную высоту кронштейна на 23% и повысить жесткость кронштейна на 5,1%. Представленная методика позволяет корректно учитывать влияние анизотропии материала на жесткость изделий и предсказывать место разрушения конструкций.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Чарквиани Р.В. и Чарквиани Г.В. за помощь в проектировании и изготовлении испытательной оснастки. Авторы благо-

дарят Павлова А.А., Павлову С.А. и Селиванова С.Е. за помощь в изготовлении и испытании образцов кронштейна.

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 / СГАУ, - Самара, 2012.
2. Головченко Я.О. Выбор рациональных конструктивно-силовых схем агрегатов самолета из композитов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии № 63, 2014. – 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 № 62, 2013. – С.13-20
4. Комаров В.А. Проектирование силовых схем авиационных конструкций // Актуальные проблемы авиационной науки и техники. М.: Машинострое-

- ние, 1984. С. 114–129.
5. Комаров В.А. Рациональное проектирование силовых авиационных конструкций: дисс. ... докт. техн. наук. – Московский авиац. ин-т – Москва, 1976. – 329 с.
  6. 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, 84 (3) (2012), pp. 162-171.
  7. Bendsoe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method// Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1988. V. 71. – P. 197–224
  8. Eschenauer H.A., Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: A review // Appl. Mech. Rev. 2001. V. 54. – P. 331–389.
  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 / Самар. гос. аэрокосм. ун-т. С.П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Самара, 2011.
  11. Мэттьюз Ф., Роллингс Р. Мир материалов и технологий. Композиционные материалы. Механика и технология / М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
  12. Eshelby J.D. The force on an elastic singularity // R. Soc. Lond. A. Vol. 244. 1951. P.87-112.
  13. 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.
  14. Eshelby J.D. The elastic field outside an ellipsoidal inclusion // Proc. R. Soc. Lond. A. Vol. 252. 1959. P.561-569.
  15. Tandon G.P., Weng G.J. The effect of aspect ratio of inclusions on the elastic properties of unidirectionally aligned composites// Polymer Composites. Vol. 5. Is. 4, 1984. P. 327-333 (<https://doi.org/10.1002/pc.750050413>).
  16. Lasपाल M., Crespo C., Jiménez M.A., García 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, Vol. 86, Is. 9, 2008. P. 977-987 (<https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.04.024>)
  17. Gusev A.A. Finite element estimates of viscoelastic stiffness of short glass fiber reinforced composites // Composite Structures, Vol. 171, 2017. P. 53-62 (<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.021>).
  18. Jain A., Lomov S.V., Abdin Y., Verpoest I., Paeppegem 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. (<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.009>)
  19. ГОСТ 34370-2017 (ISO 527-1:2012) Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении.
  20. Комаров В.А., Куркин Е.И., Спирина М.О., Чертыковцева В.О. Многоуровневая расчетно-экспериментальная система для анализа прочности и жесткости элементов конструкций из короткоармированных композитов // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 6. – С.36-45.

## CONSIDERATION OF ANISOTROPY OF THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SHORT FIBERS REINFORCED COMPOSITE MATERIALS IN POWER STRUCTURES TOPOLOGICAL OPTIMIZATION

© 2019 E.I. Kurkin, E.A. Kishov, M.O. Spirina

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolyov

A technique for consideration of anisotropy of the mechanical characteristics of short fibers reinforced composite materials in power structures topological optimization is presented. The results of bracket topological optimization in isotropic and orthotropic cases are compared. Polyamide-6 reinforced with 50% short glass fibers was used as the material. The influence of the mechanical characteristics anisotropy on the results of topological optimization is estimated. It is shown that the orthotropic nature of the material leads to the orientation of the structural elements along the direction of maximum material stiffness. Based on the results of topological optimization, taking into account technological limitations, three-dimensional geometric models of the bracket are constructed. A verification calculation was carried out taking into account the nonlinearity and anisotropy of the material and the reinforcement structure predicted by calculation of plate-blank molding. The calculations are confirmed experimentally by testing brackets made of Aramamide PA6 CB 50-1 material on a universal servo-hydraulic machine MTS 793. The reported study was funded by RFBR according to the research project mol\_a\_ved № 18-31-20071.

**Keywords:** composite material, short fibers, topology optimization, anisotropy

*Eugene Kurkin, PhD., Associate Professor of Aircraft Construction and Design Department.*

*E-mail: eugene.kurkin@mail.ru*

*Eugene Kishov, Assistant of Aircraft Construction and Design Department. E-mail: evgeniy.kishov@ssau.ru*

*Maria Spirina, PhD Student. E-mail: maryspirina@gmail.com*