

**Для цитирования:** Бекренев Н.В., Макарова В.М., Павлов С.П. Исследование влияния сложнопрофильных композиционных структур на теплофизические характеристики полимерных аддитивных материалов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (4): 8-17. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-8-17

**For citation:** Bekrenev N.V., Makarova V.M., Pavlov S.P. Study of the effect of complex-composite structures on the thermal characteristics of the polymer additive materials. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (4): 8-17. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-8-17

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-4-8-17

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СТРУКТУР НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИМЕРНЫХ АДДИТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Бекренев Н.В.<sup>1</sup>, Макарова В.М.<sup>3</sup>, Павлов С.П.<sup>2</sup>**

<sup>1-3</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

<sup>1-3</sup>410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: [nikolaj.bekrenev@yandex.ru](mailto:nikolaj.bekrenev@yandex.ru), <sup>2</sup>e-mail: [pavlov@mail.ru](mailto:pavlov@mail.ru),

<sup>3</sup>e-mail: [irinka\\_7@mail.ru](mailto:irinka_7@mail.ru)

**Резюме. Цель.** Применение аддитивных технологий является одним из перспективных направлений совершенствования производства изделий различного назначения в условиях перехода к цифровой экономике. **Метод.** Послойное построение объектов сложной формы в соответствии с разработанной твердотельной моделью из материалов с различными механическими и теплофизическими свойствами позволяет направленно регулировать распределение различных компонентов в объеме композиционного материала и формировать топологические структуры, обеспечивающие рациональное соотношение различных эксплуатационных характеристик и надежность функционирования изделия. **Результат.** На основе экспериментальных исследований установлено, что упрочняющее топологическое армирование объектов 3D печати из пластика ABS композитом, состоящим из углеродных волокон и эпоксидной смолы ЭД-20, наряду с увеличением изгибной прочности и прочности на растяжение способствует повышению теплопроводности материала более, чем на 18 % и температуропроводности – на 20 %. Выполнено компьютерное моделирование элементарных ячеек композиционного материала, состоящих из полимерной матрицы, углеродного волокна и специальных профильных включений с повышенной теплопроводностью, что позволило определить возможность дополнительного повышения теплопроводности в зависимости от относительного диаметра волокна и процентного содержания дополнительного компонента в количестве от 46 до 75 %. **Вывод.** Показано, что аддитивные технологии являются эффективным инструментом создания универсальных топологий, позволяющих технологически управлять сочетанием как механических, так и теплофизических свойств конструкционных материалов за счет определения рационального взаимного расположения их компонентов в зависимости от назначения и уровня достижения требуемых характеристик.

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 17-03-00720 «Методология оптимизационного микроконструирования композиционных материалов для объектов сложной формы повышенной динамической прочности, послойно формируемых электротехнологическими методами».

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, неметаллические материалы, теплопроводность, температуропроводность, термические деформации, долговечность, топологическое структурирование, компьютерное моделирование

## POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

### STUDY OF THE EFFECT OF COMPLEX-COMPOSITE STRUCTURES ON THE THERMAL CHARACTERISTICS OF THE POLYMER ADDITIVE MATERIALS

*Nikolaj V. Bekrenev*<sup>1</sup>, *Valeria M. Makarova*<sup>3</sup>, *Sergei P. Pavlov*<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,

<sup>1-2</sup> 77 Politehnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia,

<sup>1</sup>e-mail: [nikolaj.bekrenev@yandex.ru](mailto:nikolaj.bekrenev@yandex.ru), <sup>2</sup>e-mail: [pavlov\\_@mail.ru](mailto:pavlov_@mail.ru),

<sup>3</sup>e-mail: [irinka\\_7\\_@mail.ru](mailto:irinka_7_@mail.ru)

**Abstract Objectives** The use of additive technologies is one of the promising areas for improving the production of products for various purposes in the transition to a digital economy. **Method.** Layered construction of objects of complex shape in accordance with the developed solid-state model from materials with different mechanical and thermal properties allows directionally controlling the distribution of various components in the volume of the composite material and forming topological structures that provide a rational balance between various performance characteristics and reliability of the product. **Result.** Based on experimental studies, it has been established that reinforcing topological reinforcement of 3D printing objects made from ABS plastic with a composite consisting of carbon fibers and ED-20 epoxy resin, along with an increase in flexural strength and tensile strength, contributes to an increase in thermal conductivity of the material by more than 18% and thermal diffusivity - by 20%. A computer simulation of elementary cells of a composite material consisting of a polymer matrix, carbon fiber and special core inclusions with high thermal conductivity was performed, which made it possible to further increase thermal conductivity depending on the relative fiber diameter and the percentage of the additional component in an amount from 46 to 75%. **Conclusion** It is shown that additive technologies are an effective tool for creating universal topologies that allow technologically managing a combination of both mechanical and thermophysical properties of structural materials by determining the rational relative position of their components depending on the purpose and level of achievement of the required characteristics.

**Acknowledgments** The studies were carried out with the support of the RFBR grant No. 17-03-00720 "Methodology of optimization micro-design of composite materials for objects of complex shape with increased dynamic strength, which are layer-by-layer formed by electrotechnological methods".

**Keywords:** additive technologies, nonmetallic materials, thermal conductivity, thermal conductivity, thermal deformation, durability, topological structuring, computer modeling.

**Введение.** В настоящее время основное внимание в ведущих промышленных странах уделяется четырем направлениям научных исследований в интересах совершенствования производства: CAD/CAM/CAE технологии компьютерного проектирования сложных технических систем и процессов, робототехника, аддитивные технологии, композиционные материалы с иерархической структурой [1, 2]. Последние два направления тесно взаимосвязаны, поскольку наиболее эффективным методом формирования иерархической структуры материалов в условиях многономенклатурного производства, согласно разнообразным требованиям заказчиков, является послойное нанесение моно- или многокомпонентных составов (аддитивные процессы). При этом большое внимание уделяется качеству материалов. В последнее время получают все большее распространение в различных областях производства аддитивные технологии прямого формирования трехмерных объектов любой сложности формы на основе разработанной компьютерной твердотельной модели [3-6]. Среди различных методов данного технологического направления технология FDM позволяет формировать композиционные изделия из различных полимерных материалов в соответствии с заданной структурой путем наплавления на

платформу расплавляемой в экструдере нити из термопластичных материалов типа ABS, PLA и др.

При этом принцип аддитивности позволяет создавать необходимый по структуре и составу материал непосредственно в процессе формообразования изделия и управлять его свойствами, что стало реальным после создания 3D принтеров, оснащенных головками для 4-х компонентной печати.

Достижения материаловедения и цифровых технологий позволяют таким методом изготавливать объекты размерами более 500 мм с толщинами стенок до 0,5 мм, которые могут использоваться не только как модели, прототипы или литьевые формы, но и в производстве основных изделий.

Отмечается перспективность изготовления по технологии FDM и аналогичными методами элементов конструкций воздушного и наземного транспорта, на международных выставках уже представлялись дистанционно пилотируемые малоразмерные летательные аппараты и управляемые снаряды, в основном изготовленные из полимерных материалов путем трехмерной печати. Изложенное делает актуальным совершенствование, как самих аддитивных материалов, так и технологий формирования изделий из них для наиболее полного удовлетворения требований различных отраслей промышленности.

**Постановка задачи.** Несмотря на перспективность и быстрое распространение аддитивных технологий сдерживающим фактором их применения в основном производстве, особенно изделий из полимерных и композиционных материалов, является невысокая механическая прочность, вызванная ячеистой (сетчатой) структурой слоев материала.

Использование сплошной монолитной структуры значительно увеличивает продолжительность формирования объекта, что может стать экономически невыгодным в основном производстве. Упрочнение изделия путем местного конструктивного усиления приводит к росту габаритных размеров, применение встроенных конструкций из другого материала с высокими прочностными характеристиками может привести к увеличению веса, что нежелательно, частности, для сверхлегких летательных аппаратов типа квадрокоптеров.

Выполненные отечественными и зарубежными учеными исследования показали целесообразность местного упрочнения полимерных композиционных материалов путем армирования в зонах с прогнозируемыми повышенными напряжениями, полученными путем моделирования полей напряжений [7-11]. Нами также были получены положительные результаты по формированию упрочняющей топологии в виде армированного углеродными волокнами композита в объектах трехмерной печати путем выкладки армирующего материала в соответствии с полученным на основе компьютерного моделирования распределением полей напряжений. При этом полости для заполнения, имеющие сложную форму, были получены в процессе трехмерной печати основы из пластика ABS [12-14].

Для изделий, эксплуатирующихся в условиях температурных градиентов, например, в высокогорных районах, в Арктике и Антарктике, для воздушного транспорта наличие в структуре разнородных материалов может привести к различным по уровню тепловым деформациям, что может вызвать не только значительное нарушение формы, но и разрушение межфазного слоя, разрушение крепежных элементов, нарушение герметичности и т.п. Необходимо обеспечить повышенную теплопроводность элемента конструкции, чтобы нивелировать указанные различия, вызванные температурными градиентами.

Целью исследований явилось изучение кинетики нагрева и теплопроводности образцов, сформированных по технологии FDM из пластика ABS, влияния армирующей композиционной топологической структуры на основе углеродного волокна на указанные параметры и оценка возможности повышения теплопроводности изделий из аддитивных материалов.

**Методы исследования.** Для исследования теплофизических характеристик образцов с топологической структурой, полученных путем 3D печати, использовали нить толщиной 1,75 мм из пластика ABS из которой на 3D принтере Felix 3.1 Single Extruder формировали пластины соответственно длиной, шириной и толщиной 120, 40 и 5,0 мм. В соответствии с чертежом в

образцах выполнены на противоположных сторонах пазы, заглубленные до средней линии симметрии. При моделировании использовали программную среду Comsol, твердотельную модель нагружали растягивающими силами в 1000 Н. Чертеж образца с выявленными полями напряжений выполняли в программной среде Kompas-3D V.15, затем полученное трехмерное изображение транслировали в формат STL и осуществляли печать. Полости послойно заполняли углеродным волокном производства ООО «Балаково Карбон Продакшн» (г. Балаково Саратовской обл.) и эпоксидной смолой ЭД-20 с отвердителем ПЭПА в соотношении 10:1.

Содержание волокна в композиции составляло (70-75) %. Волокна распределяли таким образом, чтобы они без разрывов связывали все полости и углубления, сформированные принтером согласно твердотельной модели.

Для определения теплофизических характеристик образцов применяли метод Паркера в варианте, описанном в [15,16]. Для нагрева образцов использовали специально разработанную установку с источником в виде прожектора FL(ИО) 1000 IP54 ИЭК LPI01-1-1000-K01 (Россия) (рис. 1) и механизмом регулирования расстояния от источника теплового излучения до образца.

Тепловые поля записывали при помощи тепловизора модели FLIR E40 (США) с калибровкой температуры в опорных точках при помощи пирометра Testo 830-T1 (Германия). Источник теплового излучения закрывался металлическим экраном с вертикальной щелью длиной 100 и шириной 8 мм, напротив которой устанавливали образец.

Тепловизор размещали за образцом на расстоянии в соответствии с паспортными данными. Нагрев выполняли до появления на экране тепловизора полей, соответствующих температуре 150 °С.

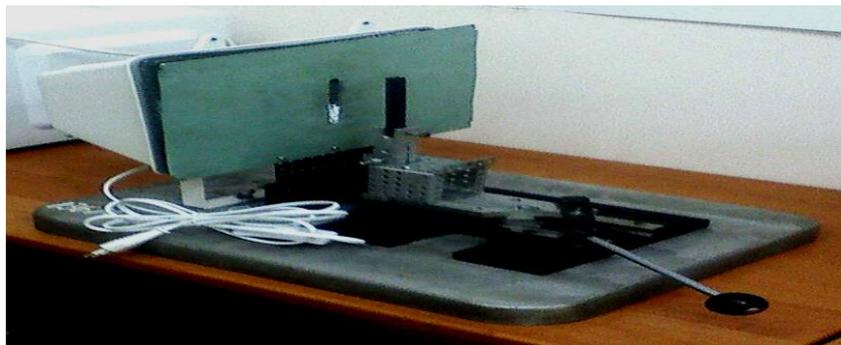


Рис. 1. Экспериментальная установка для нагрева образцов

Fig. 1. Experimental setup for heating samples

Анализировали тепловые поля для каждого из изучаемых материалов (без армирования и с армированием), при этом в соответствии с методикой [16] по термограмме определяли время нагрева образца до температуры, соответствующей половине конечного значения. На основе полученных данных по ниже приведенным зависимостям (1), (2) [16] рассчитывали коэффициенты температуро- и теплопроводности.

Для изучения кинетики нагрева с термограммы каждые 10 с снимали значения температуры образца в среднем сечении и на его периферии.

$$\alpha = Fo \frac{L^2}{\tau_{0,5}}, \quad (1)$$

$$T_{st} = \frac{W\alpha}{\lambda L}, \text{ откуда } \lambda = \frac{W\alpha}{T_{st}L}, \quad (2)$$

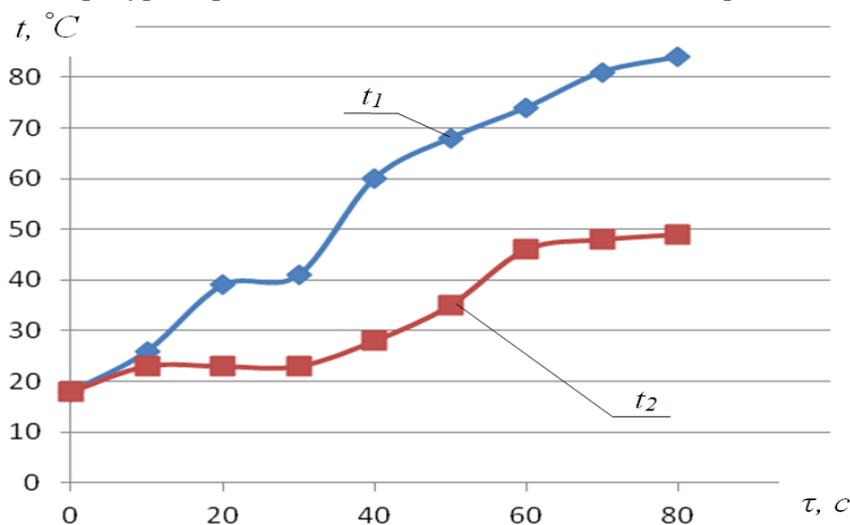
где  $Fo = 0,1388$  – число Фурье, коэффициент при времени нагрева  $\tau = \tau_{0,5}$ ;  $L$  – толщина пластины (образца);  $\tau_{0,5}$  – время достижения половины амплитуды перегрева образца;  $\lambda$  – теплопроводность;  $\alpha$  – температуропроводность;  $T_{st}$  – избыточная температура (стационарное значение) задней поверхности образца;  $W$  плотность поглощенной энергии.

**Обсуждение результатов.** Кинетика нагрева передней и задней (по отношению к источнику тепла) поверхности образцов представлена на рис. 2 и 3, результаты расчетов – табл. 1.

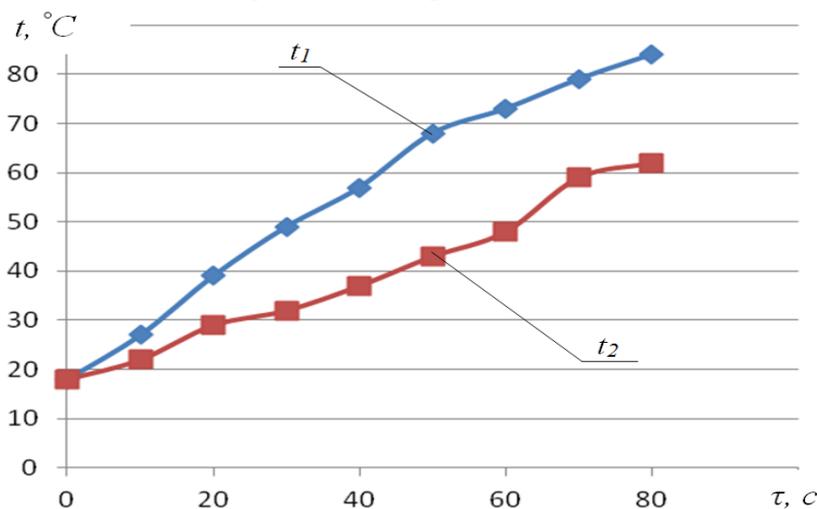
**Таблица 1. Расчетные теплофизические характеристики образцов**  
**Table 1. Estimated thermophysical characteristics of samples**

Температуропроводность $\alpha$ и теплопроводность $\lambda$ Thermal diffusivity $\alpha$ and thermal conductivity $\lambda$	ABS с топологией ABS topology	ABS	$\Delta$ , %
$\alpha \cdot 10^7$ , м <sup>2</sup> /с	15,6	13	20
$\lambda$ , Вт/м·К	11,03	9,3	18,6

При анализе графиков (рис. 2, 3) можно отметить, что при нагреве образцов из пластика за 80 с разница в температуре передней и задней стенки составила в среднем 71%.



**Рис. 2. Кинетика нагрева образца из пластика ABS**  
 $t_1$  – передняя сторона,  $t_2$  – задняя сторона  
**Fig. 2. The kinetics of heating a sample of ABS plastic**  
 $t_1$  - front side,  $t_2$  - back side



**Рис. 3. Кинетика нагрева образца из пластика ABS**  
 $t_1$  – лицевая сторона (обращена к источнику тепла),  $t_2$  – тыльная сторона (не имеет прямого воздействия от источника тепла)  
**Fig. 3. The kinetics of heating a sample of ABS plastic.**  
 $t_1$  is the front side (facing the heat source),  $t_2$  is the back side (it does not have a direct impact from the heat source)

Зависимости имеют ломаный характер – за первые 20 с нагрева различие в температуре составляет также около 70 %, но за последующие 20 с достигает 2-х раз, затем вновь уменьшается.

При нагреве образцов с топологией на основе углепластика различие в температуре составляет 35 %, обе ветви графика плавные, указанное различие в температуре сохраняется практически в течение всего времени нагрева, начиная с 20 с.

Таким образом, образец с упрочняющим армированием путем формирования углеком-позитной структуры при воздействии теплового потока оказывается нагретым существенно более равномерно и, соответственно, будет надежнее функционировать в объекте, подверженном воздействию меняющихся тепловых полей.

Данный результат подтверждается рассчитанной температуро- и теплопроводностью образцов, которые у армированного образца оказались соответственно на 20 % и 18,6 % выше, чем у контрольного.

Полученные изменения теплофизических характеристик образцов могут быть объяснены существенным их различием для основного и армирующего материалов. Согласно справочным данным основной и армирующий материалы обладают не только различной прочностью, но разными тепло- и электрофизическими характеристиками.

Так, пластик ABS имеет теплопроводность от 0,12 до 0,22 Вт/м·град, композит на основе стекловолокна – от 0,35 до 0,75 Вт/м·град, композит на основе углеродного волокна – от 0,8 до 20,9 Вт/м·град. То есть основной и армирующий материалы имеют теплопроводность, различающуюся на порядки, что с учетом неравномерности заполнения образца композитом и наличия межфазного слоя, не обеспечивающего полного контакта приводит к снижению сопротивления распространению теплового потока и его выравниванию по объему.

Очевидно, что для повышения интенсивности тепловых потоков через межфазную зону целесообразно разместить в окрестностях углеродных волокон структуры с повышенной теплопроводностью, имеющие хороший контакт с матрицей основного материала. В этом случае межфазная зона будет обтекаться потоком тепла и проводимость материала для него повысится.

В программной среде Comsol выполнено моделирование топологических теплопроводных структур для случая элементарной ячейки композиционного материала с размещенным в средней части волокном различного диаметра (табл.2).

Были рассчитаны значения теплопроводности композиционного материала ячейки с учетом формы топологии и относительного сечения армирующего волокна.

Условные коэффициенты термической проводимости основного материала и включения были приняты, соответственно равными  $k_0=10$ ,  $k_1=100$ . Коэффициент термической проводимости волокна принимали равным  $k_B = 50$ .

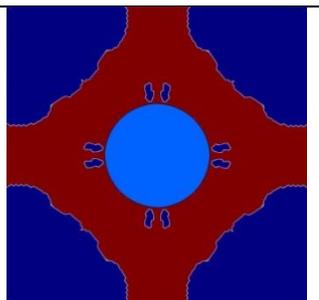
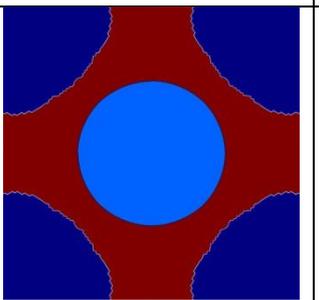
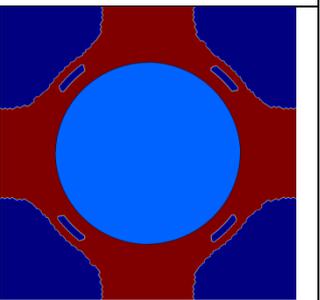
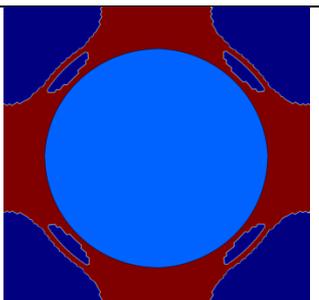
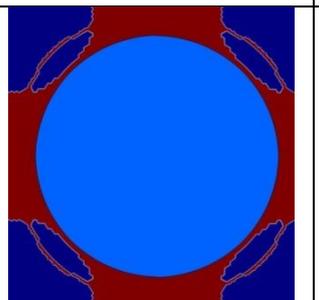
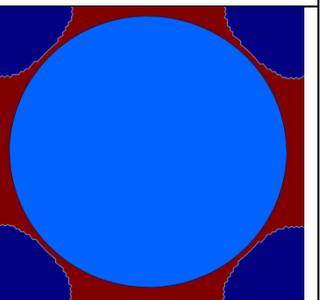
Видно, что при малых соотношениях площади сечения волокна и площади ячейки путем введения дополнительного компонента обеспечивается повышение теплопроводности ячейки на 46 %, при увеличении доли площади сечения волокна в общей площади ячейки этот параметр плавно возрастает и достигает практически 70 % при площади сечения волокна, составляющей половину площади ячейки.

При этом относительная доля дополнительного компонента невелика, что можно считать положительным фактором, поскольку его введение может случайным образом повлиять на другие функциональные свойства материала.

Таким образом, для повышения теплопроводности полимерных аддитивных материалов, подвергнутых упрочнению путем формирования топологических структур, необходимо обеспечить в области этих структур концентрацию армирующих волокон не менее 50 % от общего объема материала, а в межфазной зоне сформировать теплопроводную топологию на основе компьютерного моделирования с учетом теплофизических характеристик основного материала, армирующих волокон и дополнительного включения.

**Таблица 2. Результаты моделирования теплопроводной структуры в межфазной зоне композиционного материала, армированного углеродным волокном**

**Table 2. The simulation results of the heat-conducting structure in the interfacial zone of the carbon fiber-reinforced composite material**

Отношение площади сечения волокна к площади элементарной ячейки, $P$ The ratio of the cross-sectional area of the fiber to the area of the unit cell, $P$	0.1	0.2	0.3
Результат моделирования Simulation result			
%% увеличения теплопроводности ячейки, $tr(k)/2$ %% increase in cell thermal conductivity, $tr(k)/2$	46.116	53.371	58.841
Отношение площади сечения волокна к площади элементарной ячейки, $P$ The ratio of the cross-sectional area of the fiber to the area of the unit cell, $P$	0.4	0.5	0.6
Результат моделирования Simulation result			
%% увеличения теплопроводности ячейки, $tr(k)/2$ %% increase in cell thermal conductivity, $tr(k)/2$	63.987	69.067	74.71

Данный подход может быть успешно реализован с использованием аддитивных технологий, использующих возможности многокомпонентной печати, что подтверждается выполненными нами экспериментальными исследованиями.

**Вывод.** Установлено, что упрочняющее топологическое армирование объектов 3D печати из пластика ABS композитом, состоящим из углеродных волокон и эпоксидной смолы ЭД-20, наряду с увеличением изгибной прочности и прочности на растяжение способствует повышению теплопроводности материала более, чем на 18 % и температуропроводности – на 20 %.

На основе компьютерного моделирования показана возможность повышения теплопроводности в зависимости от относительного диаметра волокна и процентного содержания дополнительного компонента в межфазной зоне от 46 до 75%.

Сочетание упрочняющей и теплофизической оптимизации структуры ПКМ позволит сформировать заданный условиями эксплуатации объекта, оптимизированный комплекс свойств, что особенно важно для динамичных объектов, находящихся в условиях высоких температурных градиентов, например, космических аппаратов, а также инженерных конструкций и транспортной техники для зон Крайнего Севера и Антарктиды.

#### **Библиографический список:**

1. Публичный аналитический доклад по направлению «Новые производственные технологии» [Электронный ресурс] / М.: Сколковский Институт Науки и Технологий – 2015. – 210 с. – Режим доступа: URL: <https://maginnov.ru/assets/files/analytics/publichnyj-analiticheskij-doklad-po-napravleniyu-novye-proizvodstvennye-tehnologii.pdf>. (30.11.2018)
2. Bourell D. L. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead [Текст] / D. L. Bourell, J. J. Beaman, Jr., M. C. Leu, and D. W. Rosen // RapidTech 2009: U.S. –Turkey Workshop on Rapid Technologies. Erfurt, 2009. P. 5-11.
3. The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time [Текст] / R. Ehrenberg // Science News. – 2013. March 9. – P. 20-25.
4. Козлов Б. Г. Предпосылки роста аддитивных технологий в России [Электронный ресурс] / Б. Г. Козлов // Екатеринбург, Междунар. выставка «ИННОПРОМ-2017». – Режим доступа: URL: <https://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tekhnologii-luchshie-praktiki/>. (30.11.2018)
5. Антонов Ф. К. 3D-печать композитов: тренды, перспективы, применение [Электронный ресурс] / Ф. К. Антонов // Екатеринбург, Междунар. выставка «ИННОПРОМ-2017». – Режим доступа: URL: <https://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tekhnologii-luchshie-praktiki/>. (30.11.2018)
6. Павлов С. П. Оптимизация формы термоупругих тел [Текст] / С. П. Павлов, В. А. Крысько. – Монография. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. – 160 с.
7. Павлов С. П. Оптимальное армирование стержней в задачах кручения [Текст] / С. П. Павлов, М. В. Жигалов, Т. С. Балабуха // Межвуз. научн. сб. «Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред». Саратов: Изд-во СГТУ, 2009. – С.151-157.
8. Павлов С. П. Влияние свойств межфазового слоя на эффективные механические характеристики нано композитов [Текст] / С. П. Павлов, Р. С. Пальков // Материалы V междунар. конф. «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (DFMN-2013). М., 2013 г. – С. 554-556.
9. Ahmad A. A. Optimal Design of Tow-Placed Pressurized Fuselage Panels for Maximum Failure Load with Buckling Considerations [Текст] / A. A. Ahmad, M. M. Abdalla, and Z. Gurdal // Journal of Aircraft. – 2010. – Vol. 47. – №. 3. – P. 775-782.
10. Nomura, T. Simultaneous optimization of topology and orientation of anisotropic material using isoparametric projection method [Текст] / Tsuyoshi Nomura, Ercan M. Dede, Tadayoshi Matsumori, Atushi Kawamoto // 11th World congress on structural and multidisciplinary optimization (7-12th June 2015). – Sydney, Australia, 2015.
11. Злобина И. В. Исследование прочности модифицированных в СВЧ электромагнитном поле объектов 3D печати, армированных композитом с углеродным волокном [Текст] / И. В. Злобина, Н. В. Бекренев, С. П. Павлов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 70-81.
12. Злобина И. В. Методика проектирования и изготовления деталей сложной формы с применением аддитивных технологий с применением неметаллических композиционных материалов с топологической структурой [Текст] / И. В. Злобина, Н. В. Бекренев, С. П. Павлов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 6. – С. 69-75.
13. Павлов С. П. Оптимизация армирования элементов микромеханических приборов для геологических изысканий: компьютерное моделирование и эксперимент [Текст] / С. П. Павлов, Н. В. Бекренев, И. В. Злобина и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 44-52.
14. Фалилеев А.Д. Практическая реализация метода Паркера для определения теплопроводности [Текст] // Современная техника и технологии: сб. XVIII междунар. научно-практ. конф. В 3 т. – Т. 3. – Томск. – 2012. – С. 137-138.
15. Вавилов В. П. Определение теплофизических характеристик материалов методом термографии [Текст] / В. П. Вавилов, В. Г. Торгунаков, Д. А. Нестерук и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 130-134.

## References:

1. Publichnyy analiticheskiy doklad po napravleniyu «Novyye proizvodstvennyye tekhnologii» [Elektronnyy resurs] / M.: Skolkovskiy Institut Nauki i Tekhnologii – 2015. – 210 s. – Rezhim dostupa: URL: <https://maginnov.ru/assets/files/analytics/publichnyj-analiticheskij-doklad-po-napravleniyu-novye-proizvodstvennyye-tehnologii.pdf>. (30.11.2018) [Public analytical report on the direction of "New production technologies" [Electronic resource] / M.: Skolkovsky Institute of Science and Technology - 2015. - 210 p. - Access mode: URL: <https://maginnov.ru/assets/files/analytics/publichnyj-analiticheskij-doklad-po-napravleniyu-novye-proizvodstvennyye-tehnologii.pdf>. (11/30/2018) (in Russ.)]
2. D.L. Bourell, J.R. Bourell, J.J. Beaman, Jr., M.C. Leu, and D.W. Rosen // RapidTech 2009: U.S. –Turkey Workshop on Rapid Technologies. Erfurt, 2009. p. 5-11. (in Russ.)]
3. The 3-D Printing Revolution: Dreams Made It Real One Layer at a Time [Text] / R. Ehrenberg // Science News. - 2013. March 9. - P. 20-25.
4. Kozlov B. G. Predposylki rosta additivnykh tekhnologiy v Rossii [Elektronnyy resurs] / B. G. Kozlov // Yekaterinburg, Mezhdunar. vystavka «INNOPROM-2017». – Rezhim dostupa: URL: <https://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tehnologii-luchshie-praktiki/>. (30.11.2018) [Kozlov B. G. Prerequisites for the growth of additive technologies in Russia [Electronic resource] / B. G. Kozlov // Ekaterinburg, Intern. exhibition "INNOPROM-2017". - Access mode: URL: <https://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tehnologii-luchshie-praktiki/>. (11/30/2018) (in Russ.)]
5. Antonov F. K. 3D-pechat' kompozitov: trendy, perspektivy, primeneniye [Elektronnyy resurs] / F. K. Antonov // Yekaterinburg, Mezhdunar. vystavka «INNOPROM-2017». – Rezhim dostupa: URL: <https://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tehnologii-luchshie-praktiki/>. (30.11.2018) [Antonov FK. 3D printing of composites: trends, prospects, application [Electronic resource] / FK Antonov // Ekaterinburg, Intern. exhibition "INNOPROM-2017". - Access mode: URL: <https://www.innoprom.com/media/presentations/kruglyy-stol-additivnye-tehnologii-luchshie-praktiki/>. (11/30/2018) (in Russ.)]
6. Pavlov S. P. Optimizatsiya formy termouprugikh tel [Tekst] / S. P. Pavlov, V. A. Krys'ko. – Monografiya. – Saratov: Izd-vo SGTU, 2000. – 160 s. [Pavlov S. P. Optimization of the shape of thermoelastic bodies [Text] / S. P. Pavlov, V. A. Krysko. - Monograph. - Saratov: Publishing house SSTU, 2000. - 160 p.(in Russ.)]
7. Pavlov S. P. Optimal'noye armirovaniye sterzhney v zadachakh krucheniya [Tekst] / S. P. Pavlov, M. V. Zhigalov, T. S. Balabukha // Mezhvuz. nauchn. sb. «Problemy prochnosti elementov konstruksiy pod deystviyem nagruzok i rabochikh sred». Saratov: Izd-vo SGTU, 2009. – S.151-157. [Pavlov S. P., Optimal Reinforcement of Rods in Torsion Problems [Text] / S. P. Pavlov, M. V. Zhigalov, and T. S. Balabukha, // Mezhvuz. scientific Sat "Problems of strength of structural elements under the action of loads and working environments." Saratov: Publishing house SSTU, 2009. - P.151-157. (in Russ.)]
8. Pavlov S. P. Vliyaniye svoystv mezhfazovogo sloya na effektivnyye mekhanicheskiye kharakteristiki nano kompozitov [Tekst] / S. P. Pavlov, R. S. Pal'kov // Materialy V mezhdunar. konf. «Deformatsiya i razrushe-niye materialov i nanomaterialov» (DFMN-2013). M., 2013 g. – S. 554-556. [Pavlov S. P. The influence of the properties of the interphase layer on the effective mechanical characteristics of nano composites [Text] / S. P. Pavlov, R. S. Palkov // Proceedings of the V Intern. conf. "Deformation and destruction of materials and nanomaterials" (DFMN-2013). M., 2013 - p. 554-556. (in Russ.)]
9. Ahmad A. A. Optimal Design of the Tow-Placed Pressurized Fuselage for Maximum Failure Load with Bucking Considerations [Text] / A. A. Ahmad, M. M. Abdalla, and Z. Gurdal // Journal of Aircraft. - 2010. - Vol. 47. - №. 3. - p. 775-782.
10. Nomura, T. Simulation and orientation of anisotropic material using isoparametric projection method [Text] / Tsuyoshi Nomura, Ercan M. Dede, Tadayoshi Matsumori, Atushi Kawamoto // 11th World Congress and Multidisciplinary optimization (7-12th June 2015). - Sydney, Australia, 2015.
11. Zlobina I. V. Issledovaniye prochnosti modifitsirovannykh v SVCH elektromagnitnom pole ob'yektov 3D pechati, armirovannykh kompozitom s uglerodnym voloknom [Tekst] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev, S. P. Pavlov // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Mashinostroyeniye. – 2017. – T. 17. – № 4. – S. 70-81. [Zlobina I. V. Study of the strength of objects of 3D printing reinforced with carbon fiber composite modified in a microwave electromagnetic field [Text] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev, S. P. Pavlov // Yuzhno-Uralsky Bulletin State University. Series: Mechanical Engineering. - 2017. - V. 17. - № 4. - P. 70-81. (in Russ.)]
12. Zlobina I. V. Metodika proyektirovaniya i izgotovleniya detaley slozhnoy formy s primeneniyyem additivnykh tekhnologiy s primeneniyyem nemetallicheskiykh kompozitsionnykh materialov s topologicheskoy struktu-roy [Tekst] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev, S. P. Pavlov // Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii. – 2017. – № 6. – S. 69-75. [Zlobina I. V. Methods of designing and manu-

- facturing parts of complex shape using additive technologies using non-metallic composite materials with a topological structure [Text] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev, S. P. Pavlov // Fundamental and applied problems of engineering and technology. - 2017. - № 6. - p. 69-75. (in Russ.)]
13. Pavlov S. P. Optimizatsiya armirovaniya elementov mikromekhanicheskikh priborov dlya geologicheskikh izyskaniy: komp'yuternoye modelirovaniye i eksperiment [Tekst] / S. P. Pavlov, N. V. Bekrenev, I. V. Zlobina i dr. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2018. – Т. 329. – № 3. – S. 44-52. [Pavlov S. P. Optimization of the reinforcement of elements of micro-mechanical instruments for geological surveys: computer simulation and experiment [Text] / S. P. Pavlov, N. V. Bekrenev, I. V. Zlobin, etc. // Tomsk Bulletin Polytechnic University. Georesource engineering. - 2018. - V. 329. - № 3. - P. 44-52.]
  14. Falileyev A.D. Prakticheskaya realizatsiya metoda Parkera dlya opredeleniya temperaturoprovodnosti [Tekst] // Sovremennyye tekhnika i tekhnologii: sb. XVIII mezhdunar. nauchno-prakt. konf. V 3 t. – Т. 3. – Tomsk. – 2012. – S. 137-138. [Falileyev A.D. Practical implementation of the Parker method for determining the thermal diffusivity [Text] // Modern technology and technology: Sat. XVIII Intern. scientific and practical conf. In 3 t. - T. 3. - Tomsk. - 2012. - p. 137-138. (in Russ.)]
  15. Vavilov V. P. Opredeleniye teplofizicheskikh kharakteristik materialov metodom termografii [Tekst] / V. P. Vavilov, V. G. Torgunakov, D. A. Nesteruk i dr. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2006. – Т. 309. – № 2. – S. 130-134. [Vavilov V. P. Determination of thermophysical characteristics of materials by thermography [Text] / V. P. Vavilov, V. G. Torgunakov, D. A. Nesteruk, etc. // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. - 2006. - T. 309. - № 2. - P. 130-134. Bekrenev N.V., Makarova M. V., Pavlov S.P. (in Russ.)]

#### **Сведения об авторах.**

**Бекренев Николай Валерьевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая механика и детали машин».

**Макарова Валерия Михайловна** – студентка.

**Павлов Сергей Петрович** – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра «Математика и моделирование».

#### **Information about the authors.**

**Nikolai V. Bekrenev** – Dr. Sci. (Technical), Prof., Department of Technical mechanics and machine parts.

**Valeria M. Makarova** – Student.

**Sergei P. Pavlov** – Dr. Sci. (Physical and Mathematical), Prof., Department of Mathematics and Modeling.

#### **Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 30.11.2018.

**Принята в печать** 25.12.2018.

#### **Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 30.11.2018.

**Accepted for publication** 25.12.2018.