

*Для цитирования:* Бекренев Н.В., Злобина И.В. Изучение влияния микроволнового излучения на теплофизические характеристики отвержденных полимерных композиционных материалов, армированных углеродными волокнами Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (3): 58-67. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-58-67

*For citation:* Bekrenev N.V., Zlobina I.V. Studying the influence of microwave radiation on the thermophysical characteristics of reversed polymer composition materials reinforced by carbon fibers. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (3): 58-67. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-3-58-67

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**  
**ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ**

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-3-58-67

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ**

**Бекренев Н.В.<sup>1</sup>, Злобина И.В.<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,

<sup>1,2</sup>2410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, Россия,

<sup>1</sup>e-mail: nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <sup>2</sup>e-mail: irinka\_7\_@mail.ru

**Резюме. Цель.** Целью исследований является изучение влияния СВЧ электромагнитного поля на теплофизические характеристики ПКМ, армированных углеродными волокнами, как одного из факторов, свидетельствующих об определенном переструктурировании материала, приводящем к изменению его эксплуатационных свойств. **Метод.** Применение модифицирующего упрочняющего воздействия, не приводящего к чрезмерному деструктурирующему разогреву материалов. **Результат.** На основе анализа научно-технической литературы и тенденций развития технических транспортных и энергетических систем выявлен стабильный рост потребления в их конструкциях волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ). Показана перспективность применения воздействия микроволнового излучения (СВЧ электромагнитного поля) на формирование требуемых свойств изделий из ПКМ и целесообразность изучения механизмов взаимодействия микроволнового излучения со структурой отвержденных ПКМ. Выполнены экспериментальные исследования теплофизического взаимодействия ПКМ, армированных углеродными волокнами, с СВЧ электромагнитным полем частотой 2450 МГц. **Вывод.** Установлен факт более интенсивного нагрева образцов большей толщины и большей их экранирующей способности. При исследовании модифицированным методом Паркера теплофизических параметров ПКМ, подвергнутых предварительной обработке в СВЧ электромагнитном поле, установлено увеличение при определенных режимах воздействия коэффициентов температуро- и теплопроводности на 20%, что свидетельствует об увеличении адгезионных связей в межфазных зонах и повышении плотности структуры. Данный факт может быть использован при разработке технологий модифицирования изделий из ПКМ, предназначенных для работы в условиях повышенных температурных градиентов, что позволит снизить величину термических напряжений.

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:** полимерные композиционные материалы, физико-механические свойства, микроволновое излучение, температура, температуропроводность, теплопроводность, кинетика нагрева, равномерность нагрева, квазиструктурирование, отвержденное состояние

TECHNICAL SCIENCE  
POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

STUDYING THE INFLUENCE OF MICROWAVE RADIATION ON THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF REVERSED POLYMER COMPOSITION MATERIALS REINFORCED BY CARBON FIBERS

Nikolaj V. Bekrenev<sup>1</sup>, Irina V. Zlobina<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, <sup>2</sup>e-mail: irinka\_7\_@mail.ru

**Abstract. Objectives.** The aim of the research is to study the influence of the microwave electromagnetic field on the thermophysical characteristics of PCM reinforced with carbon fibers as one of the factors indicating a certain restructuring of the material, leading to a change in its operational properties. **Method.** The use of modifying hardening effects that do not lead to excessive destructuring heating of materials. **Result.** Based on the analysis of scientific and technical literature and trends in the development of technical transport and energy systems, a steady increase in the consumption of fibrous polymeric composite materials (PCM) in their structures has been revealed. The prospects of applying the effects of microwave radiation (microwave electromagnetic field) on the formation of the required properties of products from PCM and the feasibility of studying the mechanisms of interaction of microwave radiation with the structure of solidified PCM are shown. Experimental studies of the thermophysical interaction of PCM reinforced with carbon fibers with a microwave electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz were performed. **Conclusion** The fact of more intensive heating of samples of greater thickness and their greater shielding capacity was established. In the study of the thermophysical parameters of PCM subjected to preliminary processing in the microwave electromagnetic field by the modified Parker method, an increase in certain exposure modes of the thermal and thermal conductivities by 20% was observed, which indicates an increase in adhesive bonds in the interfacial zones and an increase in the structure density. This fact can be used in the development of technologies for modifying products from PCM, designed to work in conditions of elevated temperature gradients, which will reduce the magnitude of thermal stresses.

**Acknowledgment** The research was supported by RFBR grant No. 17-03-00720 «Methodology of optimising microconstruction of composite materials for complex shape objects with increased dynamic strength, formed layer-by-layer by electrotechnological methods».

**Keywords:** polymer composite materials, physicomechanical properties, microwave radiation, temperature, thermal diffusivity, thermal conductivity, heating kinetics, heating uniformity, quasi-structured, hardened state

**Введение.** Анализ научно-технической литературы, материалов конференций и выставок свидетельствует об интенсивном развитии производства композиционных материалов на основе углеродных волокон и стеклотканей и их широком применении в авиационной, автомобильной, судостроительной промышленности, ракетостроении и космической технике. По данным исследовательской компании Grand View Research, объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022 году 23,55 млрд. долл. Потребление углеволокна может вырасти с 68 тыс. т. в настоящее время до 130 тыс. т. в 2020 году [1,2].

В настоящее время по объему потребления углеродсодержащих композитов на первом месте стабильно находится энергетика и, в частности – ветроэнергетика (23 %), далее следует аэрокосмическая и оборонная промышленность (18 %), затем – производство товаров для спорта и досуга (17 %). Однако, в стоимостном выражении основной объем потребления приходится на аэрокосмические отрасли и составляет более 40 %, что связано с повышенными требованиями к качеству и, соответственно, большими затратами на высокотехнологичное производство [3,4].

Изложенное, свидетельствует о существовании и сохранении в близкой и отдаленной перспективе потребности высокотехнологичных производств в применении композиционных материалов высокого качества и эффективных технологий изготовления конструкций из них.

Совершенствование прочностных, деформационных, теплофизических характеристик углепластиков и повышение их теплостойкости дает возможность использовать их даже в высоконагруженных деталях типа крыльев, вертикальных рулей маневренной военной авиационной техники.

Разработаны научные основы получения полимерной матрицы непосредственно на наполнителе предварительно полученного полимера. Это дало возможность изготавливать крупногабаритные панели и силовые конструкции авиалайнеров МС-21 и «Сухой-Суперджет» [5] и истребителей пятого поколения [6]. Однако, важнейшим объективным свойством ПКМ, которое отрицательно влияет на их эксплуатационные характеристики, является анизотропия, что в частности определяется укладкой волокон.

Матрица, как правило, является изотропной. Если волокна или частицы расположены в матрице хаотически, то свойства композиционного материала изотропны в объеме материала, являющемся достаточно представительным.

В материалах, изготовленных из волокон наполнителя, нити расположены под прямыми углами друг к другу и свойства композиционного материала в направлении нитей отличаются от свойств в других направлениях.

Если в перекрестном направлении уложено одинаковое число нитей, то свойства материала в этих направлениях одинаковы и такой материал является равновесным.

В тех случаях, когда число нитей, расположенных в одном направлении, больше, чем в другом, свойства материала в направлении с большим числом волокон выше, чем свойства в другом направлении и такой материал относится к неравновесным.

Это справедливо также для армирования однонаправленными тканями.

Очевидно, что если используется комбинированная укладка различных слоев, таких как маты, равновесная и неравновесная ткань, результирующие свойства композита могут быть анизотропными. В частности, это справедливо для случая последовательной укладки под произвольными углами друг к другу слоев ткани или волокон.

Существуют трансверсально-изотропные композиционные материалы, имеющие последовательную укладку под произвольными углами друг к другу слоев ткани или волокон, в результате чего можно выделить плоскость изотропии.

В частности это справедливо для случая последовательной укладки под произвольными углами друг к другу слоев ткани или волокон. Такой однонаправленно армированный материал представляет собой сплошное макроскопически однородное моноотропное (трансверсальное) тело.

Таким образом, возможность ориентировать отдельные слои и волокна при изготовлении конструкций позволяет по мере необходимости варьировать упругие и прочностные свойства в различных направлениях, полностью используя прочность материала наполнителя. Механическое поведение композиции определяется соотношением свойств армирующих элементов и матрицы, а также прочностью связи между ними. Эффективность и работоспособность материала зависят от правильного выбора исходных компонентов и технологии их совмещения, призванной обеспечить прочную связь между компонентами при сохранении их первоначальных характеристик [7].

Влияние анизотропии учитывают различными методами. Композиты упрочняются короткими частицами игольчатой формы, ориентированными в пространстве случайным образом. При этом композитный материал получается анизотропным в микрообъемах, но изотропным в объемах всего изделия.

Однако при этом существуют многочисленные сшивки коротких волокон, могущие стать зародышами трещинообразования и разрушения при динамических нагрузках. Поэтому с целью получения высоких механических характеристик композиционные материалы в нагруженных конструкциях проектируют заданно анизотропными. В результате такие материалы обладают

повышенными прочностными характеристиками в направлении армирующих волокон, но мало прочны при нагружении поперек волокон [8,9].

В целом можно заключить, что известные конструктивные методы повышения прочности конструкционных элементов на макроуровне основаны на увеличении размеров и, следовательно, массы данного элемента. Более перспективными можно считать решения, не приводящие к изменению размеров и массы изделия, например, переконструирование структуры композиционного материала в соответствии с действующей схемой нагрузок. Но проблема оптимизации топологии рассматривается как одна из наиболее сложных задач из-за проблемы сингулярности и сильной нелинейности системы ограничений [10-12].

Таким образом, изыскание альтернативных способов повышения эксплуатационных характеристик изделий из ПКМ представляет собой важную для науки и практики задачу.

**Постановка задачи.** Одной из важных задач, связанных с использованием композиционных материалов, является обеспечение заданных свойств материала.

Существуют различные подходы к решению указанной проблемы, в частности много внимания уделяется соблюдению технологических процессов при производстве материалов, изучению свойств наполнителя и связующего, используются расчетные методы, исходными данными для применения которых является безусловное знание параметров состава, структуры, схемы армирования композита.

Однако лишь некоторые из них, например, объемное соотношение компонентов, геометрические характеристики армирующих элементов, характер анизотропии свойств и некоторые другие можно считать задаваемыми с достаточной степенью точности. При этом другие параметры, напротив, являются весьма вариабельными под действием как технологических, так и эксплуатационных факторов воздействия. К ним относятся практически все характеристики свойств компонентов и межфазного слоя.

Широко известны факты колебаний механических характеристик композиционных материалов, в частности, в 1,5-2 и более раз при формировании заготовок изделий различными способами, например, «мокрой» и «сухой» намоткой, при переработке этих заготовок в готовые изделия различными методами формования, например, вакуумным, автоклавным и прессовым, а также в результате различной подготовки выбранных волокон к переработке в составе композита и отклонений от оптимальных режимов переработки материала.

Указанные технологические отклонения можно устранить отработкой технологического процесса, организацией контроля качества объекта производства на каждом рабочем месте, используя при этом экспериментальные исследования влияния различных факторов на свойства композиционного материала – метода давления формования, остаточных напряжений, угловой погрешности при укладке волокон.

Наиболее сложно учитывать объективные изменения свойств материалов – при переходе от стандартных образцов для испытания свойств к реальным машиностроительным изделиям неизбежно возникает проблема «масштабного фактора», т.е. отклонение от ожидаемых характеристик композита в связи с изменением его размеров [13].

Для локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объекта из неметаллических материалов в качестве наиболее эффективных методов представляются применение микроволнового излучения (СВЧ электромагнитного поля).

Проведенный анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [14-17] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области сверхвысокочастотной обработки материалов уделяется поиску принципиально новых решений для применения микроволновых технологий с целью замещения существующих технологий термообработки различных диэлектрических материалов.

В настоящее время создана теория СВЧ нагрева диэлектрических материалов и разработаны научные основы расчета СВЧ камер различного типа. При этом практически отсутствует информация о механизме воздействия СВЧ электромагнитного поля на отвержденную структуру окончательно сформированного изделия.

Ранее нами выполнены исследования влияния СВЧ электромагнитного поля на прочностные характеристики и микроструктуру изделий из пултрузионного карбона [18,19]. Однако, полученных данных недостаточно для выявления физического механизма взаимодействия СВЧ электромагнитного поля с отвержденными ПКМ, армированными углеродными волокнами.

Целью исследований является изучение влияния СВЧ электромагнитного поля на теплофизические характеристики ПКМ, армированных углеродными волокнами, как одного из факторов, свидетельствующих об определенном переструктурировании материала, приводящем к изменению его эксплуатационных свойств.

**Методы исследования.** В настоящее время механизм воздействия СВЧ электромагнитного поля на полимерные и композиционные материалы описывается следующим образом [12,14,15,20,21]. СВЧ излучение по длине волны, находится между световым излучением и радиоволнами, поэтому и обладает свойствами и света, и радиоволн. Оно, как и свет, может распространяться по прямой и перекрываться твердыми объектами. Как и свет, оно может фокусироваться и распространяться в виде луча.

Стандартной частотой для микроволновых печей и промышленных СВЧ установок является частота 2450 МГц. Это частота резонансного поглощения для молекул воды. Под влиянием физических колебательных воздействий, как и при нагревании, повышается подвижность структурных элементов полимера, то есть по существу такие воздействия эквивалентны повышению температуры. Наибольшего эффекта от применения колебательных воздействий следует ожидать при совпадении частоты внешнего воздействия с частотой собственных колебаний структурных элементов макроцепей [21].

При использовании микроволнового излучения на стадии отверждения на свойства изделия оказывает влияние эффект технологической наследственности предшествующих операций. Для реализации технологии требуется создание совершенно нового технологического оборудования для синтеза и формирования полимера и композита, что сопряжено с изменением существующих нормативных технологий.

Следовательно, целесообразным является применение модифицирующего упрочняющего воздействия, не приводящего к чрезмерному деструктурирующему разогреву материалов. Таким воздействием может явиться обработка в СВЧ электромагнитном поле малой удельной мощности, осуществляемая после завершения всех формообразующих операций, как финишный процесс. С другой стороны, выполненный анализ позволяет предположить, что колебательные процессы в микроструктуре ПКМ могут привести к ее перестройке, изменению количества и характера связей в системе «матрица-волокно» и, как следствие – привести к изменению движения тепловых потоков в материале при его нагреве в процессе эксплуатации.

**Обсуждение результатов.** В качестве образцов использовали композиционный материал КМКУ-1.80.Э0,1, состоящий из матрицы на основе клеевого связующего ВК-51 и наполнителя - углеродной ленты ЭЛУР-П-А. Объемная доля наполнителя составляла 70 %. Экспериментальные исследования проводили по следующей методике.

На первом этапе исследовали степень нагрева образцов из ПКМ различной толщины в СВЧ электромагнитном поле. В процессе исследований образец закрепляли на боковой поверхности емкости из фторопласта Ф4, в которую помещали 100 мл водопроводной воды при температуре +18 °С. На образец воздействовали СВЧ электромагнитным полем частотой 2450 МГц с расстояния 65 мм в течение 10 мин.

Осуществляли непрерывную запись изменения температуры образца и воды в емкости при помощи тепловизора модели FLIR E40 (США). В эксперименте использовали микроволновую установку «Жук-2-02» с излучающей рупорной антенной (ООО «АгроЭкоТех» г. Обнинск Калужской обл.), с выходной мощностью 1200 Вт. Конкретные режимы СВЧ воздействия не приводятся в связи с проходящим патентованием. Для определения теплофизических характеристик образцов применяли метод Паркера в варианте, описанном в [22, 23].

Для нагрева образцов использовали специально разработанную установку с источником в виде прожектора FL(ИО) 1000 IP54 ИЭК LPI01-1-1000-K01 (Россия).

Предварительно образцы подвергали воздействию СВЧ электромагнитного поля в течение 2 мин. На основе полученных данных по зависимостям [23] рассчитывали коэффициенты температуро- и теплопроводности. Для изучения кинетики нагрева с термограммы каждые 10с фиксировали значения температуры образца в среднем сечении и на его периферии.

Установлено, что в начальный момент времени (порядка 30 с) экран из ПКМ меньшей толщины разогревается более интенсивно. При этом начальная температура воды практически не изменяется в течение 3 минут, в то время как температура экранов возрастает практически в 2 раза. С увеличением времени воздействия СВЧ электромагнитного поля экран большей толщины разогревается более интенсивно, а более тонкий экран – в меньшей степени.

По-видимому, различие в интенсивности роста температуры рассматриваемых образцов заключается в большем объеме диэлектрической матрицы в экране большей толщины, которая вносит основной вклад в рост температуры. Спустя 10 мин различие в температуре экрана и воды практически двухкратное (80°C и 40°C соответственно).

Данный факт необходимо учитывать при проектировании технологий СВЧ модифицирования отвержденных ПКМ с различным сечением, чтобы предотвратить перегрев и деструктурирование материала.

Влияние микроволнового излучения на кинетику нагрева ПКМ иллюстрируется графиками на рис. 1.

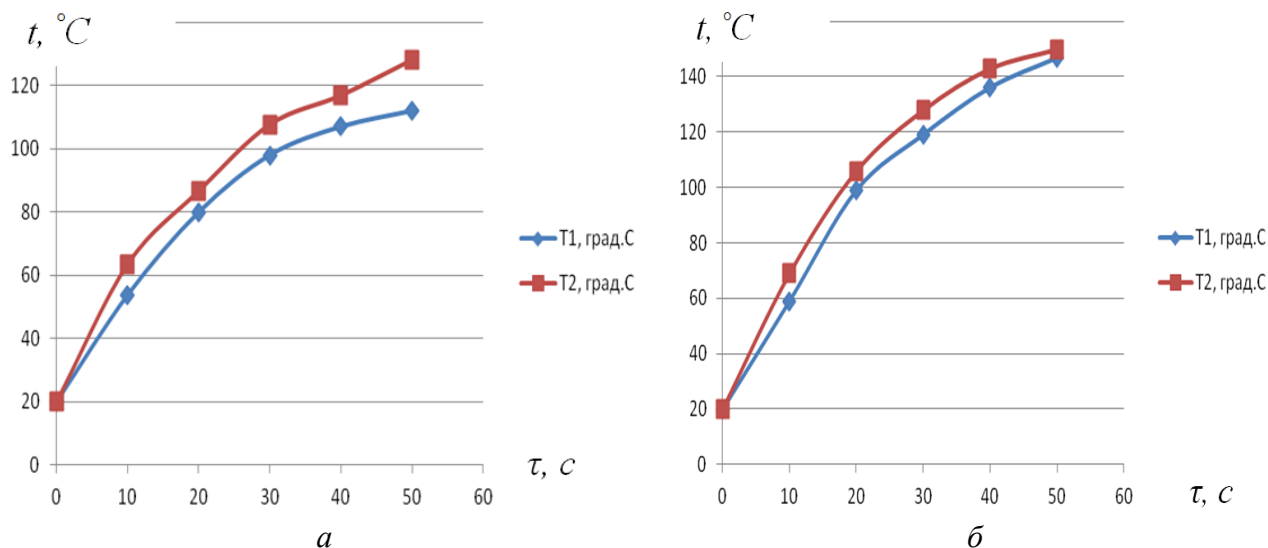


Рис. 1. Кинетика нагрева контрольного (а) и обработанного при малой (б) подведенной СВЧ мощности образцов. T<sub>1</sub> и T<sub>2</sub> соответственно температура периферийной и средней зоны образца

Fig. 1. Kinetics of heating the control (a) and processed at low (b) summed microwave power of the samples. T<sub>1</sub> and T<sub>2</sub>, respectively, the temperature of the peripheral and middle zones of the sample

Воздействие СВЧ электромагнитного поля различной подведенной мощности по-разному влияет на теплофизические свойства ПКМ. Образец, обработанный при большой СВЧ мощности, за одно и то же время нагревается примерно до той же температуры, что контрольный образец. При этом его температуро- и теплопроводность снижены на (23-25) %.

Образец, подвергнутый СВЧ воздействию меньшей мощности, нагревается более интенсивно (увеличение более 15 %).

При этом его температуро- и теплопроводность выше, чем у контрольного образца на (19-20) %. Также следует отметить сближение температур периферийной и центральной зон образца к окончанию процесса нагрева. Объяснить полученные результаты можно, используя приведенные выше гипотезы о механизме влияния СВЧ электромагнитного поля на диэлектрические компоненты ПКМ.

При малых уровнях СВЧ мощности, не приводящих к нагреву материала более 40°C, происходит перестройка физических и химических связей в межфазной зоне, увеличение площади

контактных поверхностей матрицы и армирующих волокон, возможно залечивание микропор и микротрещин. Можно говорить о «квазиструктурировании» обработанного материала.

В результате тепловой поток от нагревателя рассеивается в меньшей степени и распространяется по объему объекта более равномерно, обеспечивая интенсивное прогревание.

При воздействии значительных уровней СВЧ мощности возможны интенсивные колебания диполей матрицы и мгновенное выделение тепла, приводящее к возникновению внутренних напряжений, при релаксации вызывающих растрескивание материала и образование микропустот, создающих барьер на пути тепловых потоков. В результате равномерность и интенсивность нагрева такого образца снижаются.

**Вывод.** Проведенные исследования влияния воздействия СВЧ электромагнитного поля на теплофизические характеристики полимерных композиционных материалов, армированных углеродными волокнами, выявили изменение их температуро- и теплопроводности.

Установлено при воздействии СВЧ электромагнитного поля малой мощности повышение температуро- и теплопроводности на 20 %, что может явиться одним из методов повышения устойчивости изделий из ПКМ при эксплуатации в условиях высоких градиентов температур, например в космических аппаратах и высокоскоростных авиационных системах.

Показано, что изделия из ПКМ, обладающие большей площадью поперечного сечения и, в частности, толщиной, нагреваются в СВЧ электромагнитном поле более интенсивно, что необходимо учитывать при разработке технологий модифицирования отвержденных ПКМ с целью предотвращения их термической деструкции.

#### Библиографический список:

1. Мирный, М. Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году [Электронный ресурс] / М. Мирный // Режим доступа: URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-gyynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>. (28.11.2018 г.)
2. Каблов, Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е. Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82. – № 6. – С. 520-530.
3. Комков, М. А. Технология намотки композиционных конструкций ракет и средств поражения [Текст]: учеб. пособие / М. А. Комков, В. А. Тарасов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 431 с.
4. Ahmad A. A. Optimal Design of Tow-Placed Pressurized Fuselage Panels for Maximum Failure Load with Bucking Considerations [Текст] / A. A. Ahmad, M. M. Abdalla, and Z. Gurdal // Journal of Aircraft. – 2010. – Vol. 47. – №. 3. – P. 775-782.
5. Садовская, Т. Г. Проблемы и перспективы реализации политики импортозамещения при формировании производственной кооперации по применению композиционных материалов в отечественном гражданском авиастроении на примере ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» / Т. Г. Садовская, Е. А. Лукина [Электронный ресурс] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – Вып. 11. – С. 1-12. – Режим доступа: URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>. (30.11.2018)
6. Гуняев, Г. М. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов [Электронный ресурс] / Г. М. Гуняев, В. В. Кривонос, А. Ф. Румянцев и др. // Конверсия и машиностроение. – 2004. – № 4. – Режим доступа: URL: <https://viam.ru/public/files/2003/2003-203958.pdf>. (30.11.2018)
7. Брытков Е.В. Механика композиционных материалов: учебное пособие / Е.В. Быков, В.А. Санников; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2012. 74 с.
8. Гусева, Р. И. Производство изделий из ПКМ в самолетостроении [Текст]: учеб. пособие / Р.И. Гусева. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. – 135 с.
9. Комарова, Т. В. Получение углеродных материалов [Текст]: учеб. пособие / М.: РХТУ им. Д.И Менделеева, 2001. – 95 с.
10. Luo, Y. An enhanced aggregation method for topology optimization with local stress constraints [Текст] / Y. Luo, M. Y. Wang, Z. Kang // Comput Method Appl. – 2013. – М. – 254:31-41.
11. Akash D. Topology Optimization of Bridge Structures Using Optimality Criteria Method [Текст] / D. Akash, M. Anadi // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS ET). – May 2015. – V. 3. – no 5. – P. 1034-1038.
12. Павлов, С. П. Оптимизация формы термоупругих тел [Текст]: монография / С. П. Павлов, В. А. Крысько. – Саратов: Изд-во СГТУ, 2000. – 160 с.
13. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М.Л. Кербер, В.М. Виноградов, Г.С. Головкин и др.; под ред. А.А. Берлина. – СПб.: Профессия, 2008. – 560 с.



14. Архангельский, Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник [Текст] / Ю. С. Архангельский. – Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.
15. Estel, L. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles [Текст] / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. – 2004. – no 11. – P. 33-35.
16. Коломейцев, В. А. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа [Текст] / В. А. Коломейцев, Ю. А. Кузьмин, Д. Н. Никуйко, А. Э. Семенов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – Т. 18. – № 12. – С. 25-31.
17. Коломейцев, В. А. Микроволновые системы с равномерным объемным нагревом. Ч.1. [Текст] / В. А. Коломейцев, В. В. Комаров. – Саратов: Изд-во СГТУ, 1997. – 251 с.
18. Zlobina, I. V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural [Текст] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev // Solid State Phenomena. – 2016. – V. 870. – P. 101-106.
19. Злобина, И. В. Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий [Текст] / И. В. Злобина, Н. В. Бекренев // Вестник РГАТУ, 2017. – № 1(40). – С. 236-242.
20. Комаров, В. В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ-нагревательных системах [Текст] / В. В. Комаров // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 4. – С. 57-63.
21. Studentsov, V. N. Effect of vibration in Processes of structure Formation in Polymers [Текст] / V. N. Studentsov, I. V. Pyataev // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87. – № 3. – P. 352-354.
22. 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.
23. Фалилеев А.Д. Практическая реализация метода Паркера для определения температуропроводности [Текст] // Современные техника и технологии: сб. XVIII междунар. научно-практ. конф. В 3 т. – Т. 3. – Томск. – 2012. – С. 137-138.

#### References:

1. Mirnyy, M. Mirovoy rynek ugleplastikov dostignet otmetki v \$23 mlrd k 2022 godu [Elektronnyy resurs] / M. Mirnyy // Rezhim dostupa: URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>. (28.11.2018 g.) [Mirnyy, M. The global carbon-fiber market will reach \$ 23 billion by 2022 [Electronic resource] / M. Mirnyy // Access mode: URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-rynok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>. (11/28/2018) (In Russ.)]
2. Kablov, Ye. N. Materialy i khimicheskiye tekhnologii dlya aviatsionnoy tekhniki / Ye. N. Kablov // Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. – 2012. – Т. 82. – № 6. – С. 520-530. [Kablov, E.N. Materials and chemical technologies for aviation technology / E.N. Kablov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. - 2012. - Т. 82. - № 6. - p. 520-530. (In Russ.)]
3. Komkov, M. A. Tekhnologiya namotki kompozitsionnykh konstruksiy raket i sredstv porazheniya [Tekst]: ucheb. posobiye / M. A. Komkov, V. A. Tarasov. – М.: MGTU im. N.E. Bauman, 2011. – 431 s. [Komkov, MA Technology of winding composite structures of missiles and weapons of destruction [Text]: studies. manual / M. A. Komkov, V. A. Tarasov. - М.: MSTU. N.E. Bauman, 2011. - 431 p. (In Russ.)]
4. Ahmad A. A. Optimal Design of 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.
5. Sadovskaya, T. G. Problemy i perspektivy realizatsii politiki importozameshcheniya pri formirovaniy proizvodstvennoy kooperatsii po primeneniyu kompozitsionnykh materialov v otechestvennom grazhdanskom aviastroenii na primere OAO «Ob'yedinennaya aviastroitel'naya korporatsiya» / T. G. Sadovskaya, Ye. A. Lukina [Elektronnyy resurs] // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. – 2014. – Vyp. 11. – С. 1-12. – Rezhim dostupa: URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>. (30.11.2018) [Sadovskaya, T. G. Problems and prospects for the implementation of the policy of import substitution in the formation of industrial cooperation on the use of composite materials in the domestic civil aircraft industry as an example of United Aircraft Building Corporation / T. G. Sadovskaya, E. A. Lukina [Electronic resource] // Engineering Journal: Science and Innovation. - 2014. - Vol. 11. - p. 1-12. - Access mode: URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>. (11/30/2018) (In Russ.)]
6. Gunayev, G. M. Polimernyye kompozitsionnyye materialy v konstruksiyakh letatel'nykh apparatov [Elektronnyy resurs] / G. M. Gunayev, V. V. Krivonos, A. F. Rumyantsev i dr. // Konversiya i mashinostro-yeniye. – 2004.– № 4. – Rezhim dostupa: URL: <https://viam.ru/public/files/2003/2003-203958.pdf>. (30.11.2018) [Gunayev, G. M. Polymer composite materials in the construction of aircraft [Electronic resource] / G. M. Gunayev, V. V. Krivonos, A. F. Rumyantsev, etc. // Conversion and machine-building. - 2004.– № 4. - Access mode: URL: <https://viam.ru/public/files/2003/2003-203958.pdf>. (11/30/2018) (In Russ.)]



7. Brytkov Ye.V. Mekhanika kompozitsionnykh materialov: uchebnoye posobiye / Ye.V. Bykov, V.A. Sannikov; Balt. gos. tekhn. un-t. – SPb., 2012. 74 s. [Brytkov E.V. Mechanics of composite materials: study guide / E.V. Bykov, V.A. Sannikov; Balt state tech. un-t - SPb., 2012. 74 p. (In Russ.)]
8. Guseva, R. I. Proizvodstvo izdeliy iz PKM v samoletostroyenii [Tekst]: ucheb. posobiye / R.I. Guseva. – Komsomol'sk-na-Amure: FGBOU VPO «KNAGTU», 2013. – 135 s. [Guseva, R. I. Production of PCM products in aircraft manufacturing [Text]: studies. manual / R.I. Gusev. - Komsomolsk-on-Amur: KNAGTU FGBOU VPO, 2013. - 135 p. (In Russ.)]
9. Komarova, T. V. Polucheniye uglerodnykh materialov [Tekst]: ucheb. posobiye / M.: RKHTU im. D.I Mendeleeva, 2001. – 95 s. [Komarova, T. V. Obtaining carbon materials [Text]: studies. manual / M.: RHTU them. D.I. Mendeleev, 2001. - 95 p. (In Russ.)]
10. Luo, Y. An improved aggregation method with local stress constraints [Text] / Y. Luo, M. Y. Wang, Z. Kang // Comput Method Appl. - 2013. - M. - 254: 31-41.
11. Akash D. Topology Optimization of Bridge Structures Using the Optimality Criteria Method [Text] / D. Akash, M. Anadi // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS ET). - May 2015. - V. 3. - no 5. - p. 1034-1038.
12. Pavlov, S. P. Optimizatsiya formy termouprugikh tel [Tekst]: monografiya / S. P. Pavlov, V. A. Krys'ko. – Saratov: Izd-vo SGTU, 2000. – 160 s. [Pavlov, S. P. Optimization of the shape of thermoelastic bodies [Text]: monograph / S. P. Pavlov, V. A. Krys'ko. - Saratov: Publishing house SSTU, 2000. - 160 p. (In Russ.)]
13. Kerber M.L. Polimernyye kompozitsionnyye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: ucheb. posobiye / M.L. Kerber, V.M. Vinogradov, G.S. Golovkin i dr.; pod red. A.A. Berlina. – SPb.: Profes-siya, 2008. – 560 s. [Kerber M.L. Polymeric composite materials: structure, properties, technology: studies. manual / M.L. Kerber, V.M. Vinogradov, G.S. Golovkin et al.; by ed. A.A. Berlin - SPb.: Profession, 2008. - 560 p. (In Russ.)]
14. Arkhangel'skiy, YU. S. Spravochnaya kniga po SVCH-elektrotermii: spravochnik [Tekst] / YU. S. Arkhangel'skiy. – Saratov: Nauchnaya kniga, 2011. – 560 s. [Arkhangel'skiy, Yu.S. Reference book on microwave electrothermia: a reference [Text] / Yu. S. Arkhangel'skiy. - Saratov: Scientific book, 2011. - 560 p. (In Russ.)]
15. Estel, L. Microwave assisted polyethylene-terephthalate (PET) bottles [Text] / L. Estel, Ph. Lebaudy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // Proceedings of the Fourth World Congress. - 2004. - no 11. - R. 33-35.
16. Kolomeytsev, V. A. Eksperimental'nyye issledovaniya urovnya neravnomernosti nagreva dielektricheskikh materialov i pogloshchennoy moshchnosti v SVCH ustroystvakh rezonatornogo tipa [Tekst] / V. A. Kolomeytsev, YU. A. Kuz'min, D. N. Nikuyko, A. E. Semenov // Elektromagnitnyye volny i elektronnyye si-stemy. – 2013. – T. 18. – № 12. – S. 25-31. [Kolomeytsev, V. A. Experimental studies of the level of irregularity of heating of dielectric materials and the absorbed power in microwave devices of a resonator type [Text] / V. A. Kolomeytsev, Yu. A. Kuzmin, D. N. Nikuyko, A. E. Semenov // Electromagnetic waves and electronic systems. - 2013. - T. 18. - № 12. - P. 25-31. (In Russ.)]
17. Kolomeytsev, V. A. Mikrovolnovyye sistemy s ravnomernym ob'yemnym nagrevom. CH.1. [Tekst] / V. A. Kolomeytsev, V. V. Komarov. – Saratov: Izd-vo SGTU, 1997. – 251 s. [Kolomeytsev, V. A. Microwave systems with uniform volumetric heating. Part 1. [Text] / V. A. Kolomeytsev, V. V. Komarov. - Saratov: Publishing house SSTU, 1997. - 251 p. (In Russ.)]
18. Zlobina, I.V. Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev // The Solid State Phenomena. - 2016. - V. 870. - P. 101-106.
19. Zlobina, I. V. Issledovaniye mikrostruktury konstruksionnykh sloistnykh ugleplastikov, modifitsirovannykh putem elektrofizicheskikh vozdeystviy [Tekst] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev // Vestnik RGATU, 2017. – № 1(40). – S. 236-242. [Zlobina, I. V. Study of the microstructure of structural laminated carbon-reinforced plastics modified by electro-physical influences [Text] / I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev // Bulletin of the Russian State Logistics University, 2017. - № 1 (40). - p. 236-242. (In Russ.)]
20. Komarov, V. V. Formulirovki matematicheskikh modeley protsessov vzaimodeystviya elektro-magnitnykh voln s dissipativnymi sredami v SVCH- nagrevatel'nykh sistemakh [Tekst] / V. V. Komarov // Fi-zika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskiye sistemy. – 2010. – T. 13. – № 4. – S. 57-63. [Komarov, V. V. Formulations of mathematical models of the processes of interaction of electromagnetic waves with dissipative media in microwave heating systems [Text] / V. V. Komarov // Physics of wave processes and radio engineering systems. - 2010. - V. 13. - № 4. - P. 57-63. (In Russ.)]
21. Studentsov, V.N. Effect of vibration in Processes of structure Formation in Polymers [Tekst] / V. N. Studentsov, I. V. Pyataev // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2014. – Vol. 87. – № 3. – P. 352-354. Studentsov, V.N., and N.V. Studentsov, I.V. Pyataev // Russian Journal of Applied Chemistry. - 2014. - Vol. 87. - № 3. - P. 352-354.
22. Vavilov, V. P. Opredeleniye teplofizicheskikh kharakteristik materialov metodom termogra-fii [Tekst] / V. P. Vavilov, V. G. Torgunakov, D. A. Nesteruk i dr. // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. – 2006. – T. 309. – № 2. – S. 130-134.  
[Vavilov, V. P. Determination of thermophysical characteristics of materials by the method of thermography [Text] / V. P. Vavilov, V. G. Torgunakov, D. A. Nesteruk, etc. // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. - 2006. - T. 309. - № 2. - P. 130-134. (In Russ.)]
23. Falileyev A.D. Prakticheskaya realizatsiya metoda Parkera dlya opredeleniya temperaturoprovodnosti [Tekst] // Sovremennyye tekhnika i tekhnologii: sb. XVIII mezhdunar. nauchno-prakt. konf. V 3 t. – T. 3. – Tomsk. – 2012. – S.

137-138.[Falileev 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. - Т. 3. - Tomsk. - 2012. - p. 137-138. (In Russ.)]

**Сведения об авторах.**

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

**Злобина Ирина Владимировна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра «Техническая механика и детали машин»

**Information about the authors.**

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

**Irina V. Zlobina** – Cand. Sci. (Technical), Assoc. Prof., Department of Technical mechanics and machine parts.

**Конфликт интересов.**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Поступила в редакцию** 22.08.2018.

**Принята в печать** 25.09.2018.

**Conflict of interest.**

The authors declare no conflict of interest.

**Received** 22.08.2018.

**Accepted for publication** 25.09.2018.