Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева
Серия: Механика предельного состояния. 2019. № 1 (39). С. 57–65

И. В. Злобина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С КОНСТРУКЦИЯМИ ИЗ ОТВЕРЖДЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА СО ВСТРОЕННЫМИ РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ В ОБЪЕМЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Россия, г. Саратов, Россия

Аннотация. Проведен анализ тенденций развития авиационной техники различного назначения, показавший расширение применения в ее несущих конструкциях полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных углеродными волокнами с комбинированной структурой, содержащей распределенные в объеме металлические элементы, в частности – сотовые заполнители. Отмечено, что при этом ярко выраженная анизотропия физико-механических свойств таких конструкций из различных по химическому составу и свойствам материалов затрудняет маневрирование летательных аппаратов с большими перегрузками вследствие различной устойчивости к динамическим нагрузкам, действующим в различных направлениях. Особенно важно обеспечение прочности конструкций из ПКМ, при действии изгибающих и сдвиговых нагрузок. Показано на примере выполненных ранее авторами исследований, что проблема повышения прочностных характеристик ПКМ может быть решена путем их квазиструктурирования в СВЧ электромагнитном поле. С целью выявления возможности упрочняющей СВЧ обработки конструкций из ПКМ со встроенными сотовыми металлическими панелями, наиболее распространенных а современной и перспективной авиационной технике, выполнены экспериментальные исследования распределения плотности потока энергии микроволнового излучения частотой 2450 МГц в ближней зоне, прошедшего через ПКМ и отраженного от его поверхности. Сравнивались отвержденный ПКМ, армированный углеродными волокнами, ПКМ со встроенными сотовыми элементами и конструкционный диэлектрический материал на примере полипропилена PP. Установлено, что плотность отраженного полипропиленом толщиной 7 мм потока СВЧ энергии составляет 1,42% падающего потока, для отвержденного углепластика толщиной 7 мм этот показатель равен 9,9%. От конструкции с сотовым элементом, расположенным между двумя пластинами отвержденного углепластика толщиной по 3 мм отражается менее 1% потока СВЧ энергии. При этом прошедший через преграду поток СВЧ энергии составляет соответственно для углепластика и сотовой конструкции (85-86)% и (75-76)%. Таким образом, наличие встроенных сотовых элементов в конструкции из армированных углеродными волокнами ПКМ не приводит к повышенному отражению СВЧ электромагнитного поля, а, напротив, меньше, чем наблюдается у обычных конструкций из ПКМ. Это позволяет выполнять упрочняющее квазиструктурирование подобных изделий и повысить их эксплуатационные параметры.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, армирующие углеродные волокна, встроенные распределенные металлические структуры, сотовые элементы, микроволновое излучение, плотность потока энергии, отражение, поглощение.

УДК: 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI: 10.26293/chgpu.2019.39.1.008

Введение. Конструкционные элементы авиационной техники различного назначения, в частности, беспилотных и дистанционно пилотируемых летательных аппаратов в последнее время изготавливаются из полимерных композиционных материалов (ПКМ) типа углепластиков, состоящих из полимерной матрицы и армирующей структуры из определенным образом ориентированных углеродных волокон. По данным аналитических обзоров и научных публикаций объем мирового рынка углепластиков достигнет к 2022 году 23,55 млрд. долл. [1, 2]. В тоже время, полимерные композиционные материалы, армированные волокнами, характеризуются малой прочностью по изгибу и межслоевому сдвигу, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов [3, 4], что вызывает необходимость усиления конструкции в опасных участках [5, 6], но при этом приводит к увеличению веса. Для изделий авиационно-космической техники, особенно для высокоманевренных и скоростных объектов, увеличение веса силовых конструкций и обшивки не желательно, а в ряде случаев - недопустимо. Известные методы улучшения характеристик изделий из ПКМ, в частности – прочности, заключающиеся в использовании волокон повышенного качества, применении новых составов связующего (матрицы), совершенствовании технологий формирования и отверждения композиций [7], не учитывают влияния технологической наследственности операций последующей обработки на окончательные характеристики готового изделия. Внедрение новых методов в структуру действующих технологий подготовки волокон, препрегов, выкладки композиций и т.п. операций сопряжено с большими затратами, связанными с перестройкой отлаженных технологий.

Изложенное делает актуальным изыскание альтернативных методов повышения качества изделий из ПКМ.

Постановка задачи. Для увеличения прочности изделий из ПКМ и повышения равномерности ее значений в различных участках конструкции целесообразно применение методов кратковременного воздействия на протекающий процесс синтеза или на структуру готового изделия как внешней операции без вмешательства в существующую технологию. К таким методам можно отнести воздействие СВЧ электромагнитного поля в качестве модифицирующей операции.

© Злобина И. В., 2019

Злобина Ирина Владимировна

e-mail: irinka_7_@mail.ru, кандидат технических наук, доцент, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов , Россия.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-79-00240 «Раскрытие механизма взаимодействия микроволнового излучения с отвержденными полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон в сочетании с внедренными в поверхностный слой связанными металлическими элементами, периодически распределенными в плоскости армирования наполнителем, применительно к конструкционным элементам авиационных робототехнических комплексов».

Поступила 10.12.2018

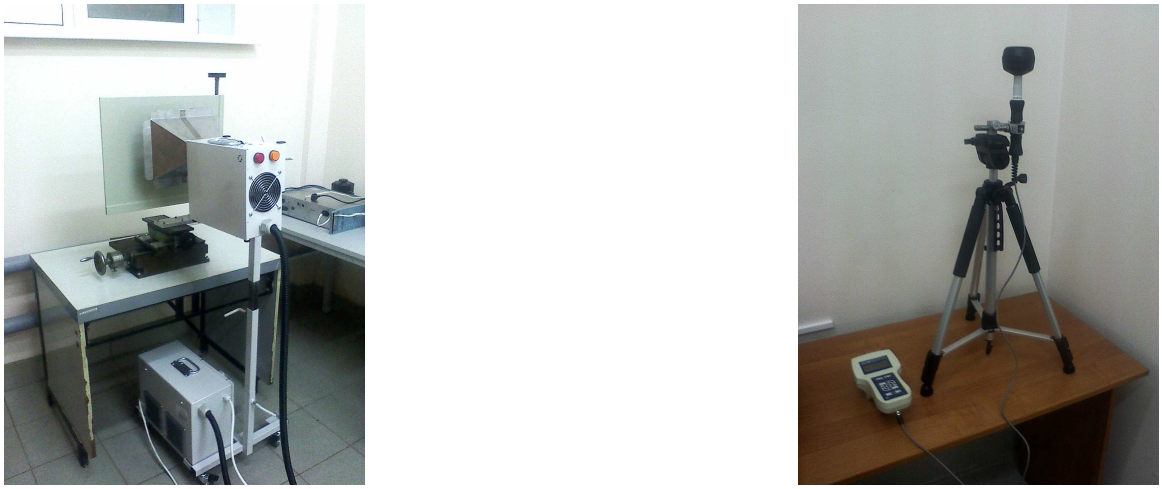
Анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [8-10] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области сверхвысокочастотной обработки диэлектрических материалов уделяется применению микроволновых технологий нагрева с целью замещения существующих технологий термообработки композиций на стадии их формирования и отверждения, что не устраняет негативного влияния на внутренние напряжения, возникающие в процессе размерной обработки и сборки изделий. Математическое моделирование процессов взаимодействия СВЧ электромагнитного поля с диэлектриками и их композициями, а также исследования структуры касались также в основном материалов до их отверждения с СВЧ воздействием на сформированную композицию в вязко-текучем состоянии или на исходные волокна [11, 12], что не учитывало изменений структуры на последующих стадиях процесса изготовления изделий. Нами были получены положительные результаты по увеличению прочностных характеристик отвержденных ПКМ, армированных углеродными волокнами, подвергнутых воздействию СВЧ электромагнитного поля среднего уровня мощности в течение 2-3 минут [13-15].

Однако, в современной и перспективной авиации основной объем несущих элементов из ПКМ имеет сложную конструкцию, состоящую из внешних и внутренних панелей из углепластика с расположенными между ними сотовыми структурами из алюминиевого или другого легкого и прочного сплава. Металлы и их сплавы являются хорошими отражателями сверхвысокочастотных волн, в том числе применяемого в технологических целях частотного диапазона, что позволяет предположить возникновение определенных трудностей в реализации разрабатываемого нами технологического метода упрочняющего модифицирования отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле вследствие предполагаемого экранирующего эффекта сотовых заполнителей.

Целью исследований явилось сравнительное изучение доли отраженного и поглощенного микроволнового излучения монолитными и содержащими сотовые структуры ПКМ для обоснования возможности упрочняющей обработки последних.

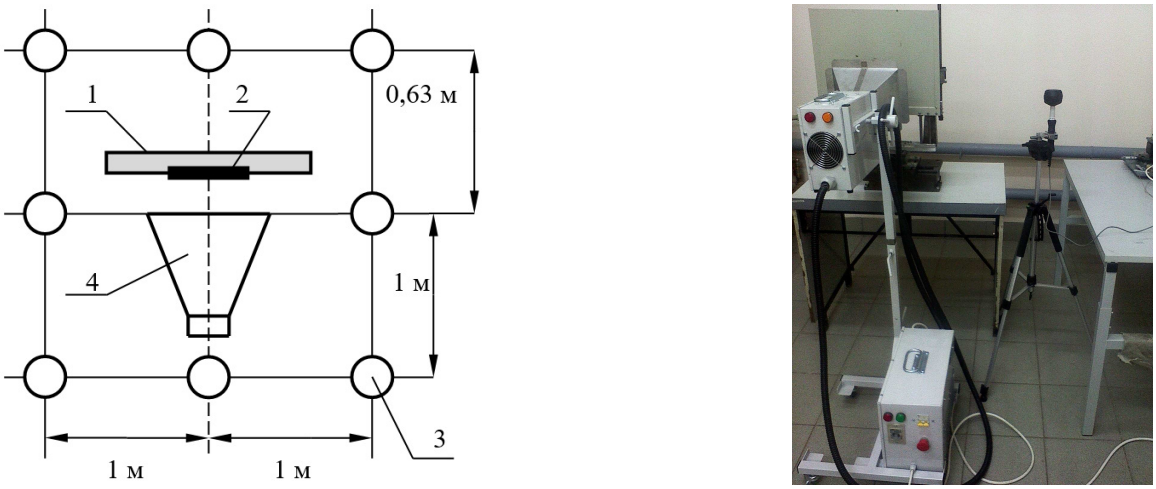
Методика исследований и аппаратура. В экспериментах исследовали образцы из отвержденного армированного углеродным волокном композита типа ВКУ. Использовали монолитные образцы в виде пластин толщиной 7 мм размерами 200x200 мм и образцы с сотовым заполнителем толщиной 15 мм, расположенным между пластинами ВКУ толщиной 3 мм. Поперечные размеры образцов с сотовыми заполнителями были аналогичными образцам из монолитного ПКМ. Эксперименты проводили с использованием специальной СВЧ установки “Жук-2-02” (ООО “АгроЭкоТех” г. Обнинск Калужской обл.) с излучателем рупорного типа (рис. 1а). Частота электромагнитного поля составляла 2450 МГц, мощность магнетрона – 1200 Вт. Уровни отраженного от поверхности образцов и прошедшего через образец микроволнового излучения оценивали по плотности потока энергии при помощи электронного прибора П3-33М (рис. 1б) с экспозицией 1 минута. В процессе измерений антенну прибора устанавливали на штативе на уровне оси излучающего рупора согласно схеме, представленной на рис. 2.

Установка была модернизирована путем размещения в рабочей зоне трехкоординатного предметного стола для закрепления и фиксированного изменения положения образцов относительно излучающего рупора. Измерения осуществляли последовательно в 8-и точках, указанных на схеме Рис. 2 а, в каждой точке измерения повторяли по три раза. Предварительно для определения плотности потока энергии в нулевой точке, лежащей на оси излучающего рупора в плоскости его раскрыва, осуществляли



а) *б*)

Рис. 1. Оборудование для выполнения исследований: СВЧ установка «Жук-2-02» (*а*), электронный измеритель плотности потока энергии П3-33М с антенной на штативе (*б*)



а) *б*)

Рис. 2. Схема исследований. Расположение измерительной антенны относительно излучающего рупора (*а*), внешний вид зоны измерений (*б*) 1 – стол из полипропилена PP, 2 – образец, 3 – измерительная антенна, 4 – излучающий рупор

измерения на расстояниях, равных 0,5; 1,0 и 2,0 м от плоскости раскрыва излучающего рупора. Путем экстраполяции графика (рис. 3) определяли плотность потока энергии в нулевой точке. Для сравнения осуществляли измерения плотности потока энергии при взаимодействии микроволнового излучения с полипропиленом PP, из которого изготовлен предметный стол экспериментальной установки.

Результаты и обсуждение График изменения плотности потока энергии в зависимости от расстояния до плоскости раскрыва излучающего рупора представлен на рис. 3. Путем экстраполяции средних значений определено, что в нулевой точке значение данного параметра достигают 145000 мкВт/см^2.

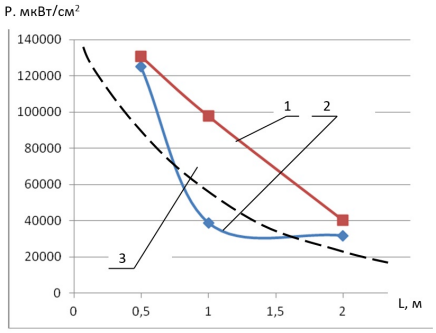


Рис. 3. Изменение максимального (1) и среднего (2) уровня плотности потока энергии СВЧ электромагнитного поля с расстоянием до плоскости раскрыва излучающего рупора. 3 – кривая интерполяциграфика (2).

На рис. 4-5 представлено распределение среднего уровня плотности потока энергии в точках измерения параметра и теоретически определенного уровня в точке 0.

Плотность потока энергии, прошедшего через исследуемый материал и измеренного по оси излучающего рупора, составила для полипропилена 129917 мкВт/см^2, для монолитного углепластика типа ВКУ - 123859 мкВт/см^2, для трехслойного композита с промежуточным сотовым заполнителем – 110420 мкВт/см^2. При этом в задней зоне величина данного параметра оказалась одинаковой для всех исследованных материалов – 723 мкВт/см^2. Существенные отличия отмечены в уровнях плотности потока энергии, отраженного от поверхности материала. В плоскости раскрыва рупора их значения соответственно составили: 2066, 8900-5100 и 1249 мкВт/см^2. В задней зоне плотность отраженного потока энергии составила: 3293-2114, 14336 и 1223 мкВт/см^2. В передней зоне плотность отклоненного при прохождении через материал потока энергии составила: 7191-3588, 5800-3100 и 1450-1500 мкВт/см^2. С учетом полученных данных допустив отсутствие других потоков энергии можно отметить, что полипропиленом PP поглощается при времени экспозиции, равном 1 минуте, энергия, равная 12383 мкВт/см^2, монолитным углепластиком типа ВКУ – 6805 мкВт/см^2. Материал с металлическим сотовым заполнителем поглощает до 33357 мкВт/см^2 подведенной энергии СВЧ электромагнитного поля, или почти 23%. В тоже время для монолитного ПКМ этот показатель не превышает 4,7%.

Сравнивая полотность отраженного потока энергии СВЧ электромагнитного поля можно отметитьо, что для полипропилена данный показатель составляет 1,42% падающего потока, для отвержденного углепластика ВКУ - 9,9%. От конструкции с сотовым элементом, расположенным между двумя пластинами отвержденного углепластика ВКУ отражается менее 1% потока СВЧ энергии. При этом прошедший через преграду поток СВЧ энергии составляет соответственно для углепластика и сотовой конструкции (85-86)% и (75-76)%. Различие в уровнях отраженного и поглощенного потоков энергии для монолитного углепластика и углепластика с сотовым

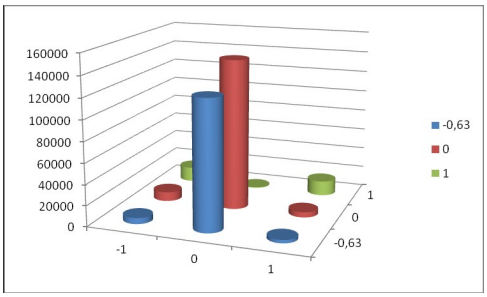


Рис. 4. Распределение плотности потока энергии СВЧ электромагнитного поля, измеренного в передней и задней ближней зоне излучающего рупора при микроволновом облучении монолитного углепластика типа ВКУ

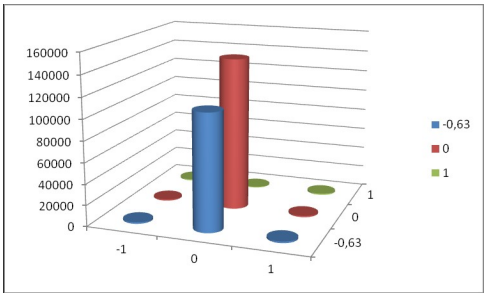


Рис. 5. Распределение плотности потока энергии СВЧ электромагнитного поля, измеренного в передней и задней ближней зоне излучающего рупора при микроволновом облучении углепластика типа ВКУ со встроенным между слоями сотовым металлическим элементом

заполнителем может быть связано со сложной картиной внутреннего переотражения прошедшего через относительно тонкий внешний слой ПКМ потока в сотовых ячейках, приводящего к преимущественному распределению последнего в своеобразной камере-резонаторе, образованной двумя слоями углепластика. В монолитном ПКМ такого внутреннего переотражения не происходит и действует обычный механизм отражения и преломления электромагнитных волн, падающих на границу раздела двух сред.

Таким образом, наличие встроенных сотовых элементов в конструкции из армированных углеродными волокнами ПКМ не приводит к повышенному отражению СВЧ электромагнитного поля, а, напротив, меньше, чем наблюдается у обычных конструкций из ПКМ. Это позволяет выполнять упрочняющее квазиструктурирование в СВЧ электромагнитном поле подобных изделий и повысить их эксплуатационные параметры.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Кошкин Р. П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://spmagazine.ru/420.

[2] Мирный М. Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в 23 млрд к 2022 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://mplast.by/novosti/2016-04-29 -mirovoy-ryinok-ugleplastikov- dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/.

[3] Каблов Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520–530.

[4] Композитный мир 2011 спецвыпуск – Авиация и космос: Издательский дом «Мир композитов», 36 с. www:kompomir.ru.

[5] Садовская Т. Г., Лукина Е. А. Проблемы и перспективы реализации политики импортозамещения при формировании производственной кооперации по применению композиционных материалов в отечественном гражданском авиастроении на примере ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 11. С. 1-12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html

[6] Гуняев Г. М., Кривонос В. В., Румянцев А. Ф. и др. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов // Конверсия и машиностроение. № 4, 2004. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www: viam.ru/public.

[7] Гусева Р. И., Производство изделий из ПКМ в самолетостроении: учеб. пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. 135 с.

[8] Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник. Саратов : Научная книга, 2011. 560 с.

[9] Коломейцев В. А.,Кузьмин Ю. А., Никуйко Д. Н., Семенов А. Э. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа // Электромагнитные волны и электронные системы, 2013. Т. 18. № 12. С. 25–31.

[10] Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A., Bonnet C., Delmotte M. Microwave assisted blow molding of polyethylene-terephthalate (PET) bottles // Proceedings of the Fourth World Congress on Microwave and Radio Frequency Applications. 2004. № 11. P. 33.

[11] Комаров В. В. Формулировки математических моделей процессов взаимодействия электромагнитных волн с диссипативными средами в СВЧ- нагревательных системах // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т. 13. № 4. С. 57-63.

[12] Studentsov V. N., Pyataev I. V. Effect of vibration in Processes of structure Formation in Polymers // Russian Journal of Applied Chemistry. 2014. Vol. 87. №3. P. 352–354.

[13] Zlobina I. V., Bekrenev N. V., The influence of electromagnatic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural // Solid State Phenomena. 2016. V. 870. P. 101–106.

[14] Злобина И. В., Бекренев Н. В., Павлов С. П. Прочностные испытания модифицированных в СВЧ электромагнитном поле композиционных материалов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2017. № 3 (33). С. 42–57.

[15] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // Наукоемкие технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.

I. V. Zlobina

STUDY OF THE INTERACTION OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELDS WITH STRUCTURES FROM THE CURED CFRP WITH EMBEDDED DISTRIBUTED IN VOLUME OF METAL ELEMENTS

Yuri Gagarin Saratov state technical University, Saratov, Russia

Abstract. The analysis of trends in the development of aviation technology for various purposes, showed the expansion of its application in the load-bearing structures of polymer composite materials (PCM), reinforced with carbon fibers with a combined structure containing distributed in the volume of metal elements, in particular – honeycomb fillers. It is noted that the pronounced anisotropy of physical and mechanical properties of such structures of different chemical composition and properties of materials makes it difficult to maneuver aircraft with large overloads due to different resistance to dynamic loads acting in different directions. It is especially important to ensure the strength of structures made of PCM, under the action of bending and shear loads. It is shown by the example of studies carried out earlier by the authors that the problem of increasing the strength characteristics of PCM can be solved by their quasi-structuring in the microwave electromagnetic field. In order to identify the possibility of strengthening microwave processing of structures made of PCM with built-in honeycomb metal panels, the most common and modern and advanced aviation technology, experimental studies of the distribution of the energy flux of microwave radiation with a frequency of 2450 MHz in the near zone, passed through the PCM and reflected from its surface. The hardened PCM reinforced with carbon fibers, PCM with built-in honeycomb elements and structural dielectric material on the example of PP polypropylene were compared. It was found that the density of the reflected 7 mm thick polypropylene microwave energy flow is 1.42Thus, the presence of built-in cellular elements in the structure of carbon fiber reinforced PCM does not lead to an increased reflection of the microwave electromagnetic field, but, on the contrary, less than is observed in conventional designs of PCM. This makes it possible to perform hardening quasi-structuring of such products and increase their operating parameters.

Keywords: Polymer composite materials, reinforcing carbon fibers embedded distributed metal structure, cellular elements, microwave radiation, energy flux density, reflection, absorption.

REFERENCES

1] Koshkin P. P. Main directions of development and improvement of unmanned aircraft systems [Electronic resource]. - Access mode: http://spmagazine.ru/420. (in Russian).

[2] Mirny M. The global market of carbon fiber plastics will reach 23 billion by 2022 [Electronic resource]. - Access mode: https://mplast.by/novosti/2016-04-29 -mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu /. (in Russian).

[3] Kablov E. N. Materials and chemical technologies for aviation technology // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. 2012. T. 82. №6. Pp. 520–530. (in Russian).

[4] Composite World 2011 special issue - Aviation and Space: World of Composites Publishing House, 36 p. www: kompomir.ru. (in Russian).

[5] Sadovskaya T. G., Lukin E. A. Problems and prospects of implementing 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

Zlobina Irina Vladimirovna, Cand. Sci. Tech., Assoc. Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russia.

example of United Aircraft Building Corporation // Engineering Journal: Science and Innovation. 2014. Vol. 11. P. 1-12. [Electronic resource]. - Access mode: http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html. (in Russian).

[6] Gunyaev G. M., Krivonos V. V., Rumyantsev A. F. et al. Polymer composite materials in the structures of aircraft / G. M. Gunyaev, // Conversion and engineering. Number 4, 2004. [Electronic resource]. - Access mode: www: viam.ru/public. (in Russian).

[7] Guseva R. I. Manufacture of articles from PCM in aircraft construction: studies. manual Komsomolsk-on-Amur: KNAGTU, 2013. 135 p. (in Russian).

[8] Arkhangelsky Yu. S. Reference book on microwave electrothermal: a reference book. Saratov: Scientific book, 2011. 560 p. (in Russian).

[9] Kolomeitsev V. A., Kuzmin Yu. A., Nikuiko D. N., Semenov A. E. Experimental studies of the level of uneven heating of dielectric materials and the absorbed power in microwave devices of a resonator type // Electromagnetic Waves and Electronic Systems, 2013. V. 18. 18. No. 12. P. 25–31. (in Russian).

[10] Estel L., Lebaudy Ph., Ledoux A.,Bonnet C., Delmotte M. Microwave, Polyethylene terephthalate (PET) bottles // Proceedings of the Fourth World Congress. 2004. No. 11. R. 33.

[11] Komarov V. V. Formulations of mathematical models of the processes of interaction of electromagnetic waves with dissipative media in microwave heating systems // Physics of wave processes and radio engineering systems. 2010. Vol. 13. No. 4. P. 57–63. (in Russian).

[12] Studentsov V. N., Pyataev I. V. The effect of vibration in polymers / Russian Journal of Applied Chemistry, 2014, vol. 87, No. 3, pp p 352-354.- Pleiades Publishing, Ltd. 2014

[13] Zlobina I. V., Bekrenev N. V.The carbon fiber-reinforced polymer mechanical structure of the carbon fiber-reinforced polymer structural // Solid State Phenomena. 2016. V. 870, p.p. 101–106.

[14] Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Pavlov S. P. Strength tests of composite materials modified in a microwave electromagnetic field // Bulletin of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State. 2017. No. 3 (33). Pp. 42-57. (in Russian).

[15] Zlobina I. V., Bekrenev N. V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field Effects // High technology. 2016. V. 17. № 2. P. 25–30.