

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI:10.30987/2223-4608-2020-7-35-40

**И.В. Злобина**, к.т.н

(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,  
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: irinka\_7\_@mail.ru

## **Повышение адгезионной прочности отвержденного углепластика с молниезащитным покрытием в СВЧ электромагнитном поле\***

*Выполнены экспериментальные исследования изменения параметров шероховатости области повреждения образцов из углепластика с молниезащитным покрытием после обработки в СВЧ электромагнитном поле и испытании на межслоевой сдвиг. Установлено, по сравнению с контрольными образцами, увеличение параметра Ra в области повреждения на 35...36 % при снижении относительного шага Sm/Ra на 16...36 %. Полученные результаты свидетельствуют об усилении адгезионного взаимодействия в зоне контакта «матрица – волокно», что подтверждает возможность использования СВЧ технологии для упрочнения изделий из полимерных композиционных материалов.*

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы; отверждение; СВЧ электромагнитное поле; молниезащитное покрытие; межслоевой сдвиг; напряжения; прочность; повреждения; параметры шероховатости.

**I.V. Zlobina**, Can. Sc. Tech.

(Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Polytechnicheskaya Str., Saratov, 410054)

## **Adhesive strength increase in hardened carbon plastic with lightning protection coating in MWF electromagnetic field**

*The experimental investigations of roughness parameter changes in the damage area of carbon plastic samples with lightning protection coating after processing in the MWF electromagnetic field after testing for inter-layer shift are carried out. It is defined that in comparison with test samples the increase of the parameter Ra in the area of damage makes 35...36% at the decrease of the pitch ratio Sm/Ra makes 16...36%. The results obtained indicate the adhesive interaction increase in the area of "matrix-fiber" contact that confirms the possibility of MWF technology used for polymer composite product strengthening.*

**Keywords:** polymer composites; hardening; MWF electromagnetic field; lightning protection coating; inter-layer shift; stresses; strength; damages; roughness parameters.

### **Введение**

Поступательное развитие и эффективное применение современной техники, инженерных сооружений во многом определяется разработкой новых конструкционных материалов с высокими эксплуатационными характеристиками, а также технологий формообразования изделий из них.

\* Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-79-00240.

В настоящее время в конструкционных элементах беспилотных летательных аппаратов, в производстве истребителей 5-го поколения, перспективных гражданских авиалайнеров (МС-21, «Сухой-суперджет»), космических аппаратов, автомобильного транспорта, атомной и ветроэнергетики расширяется применение неметаллических полимерных композиционных материалов (ПКМ). Значительный объем ПКМ занимают материалы, армированные углеродными волокнами.

С учетом успешного применения данных материалов в спортивном инвентаре, товарах широкого потребления, а также успешного

испытания их использования при сооружении путепроводов эта тенденция будет усиливаться в ближайшей перспективе [1, 2].

Однако ПКМ отличаются высокой анизотропией свойств, что особенно характерно для прочности по напряжениям межслоевого сдвига, которые могут быть в два и более раз меньше, чем при растяжении-сжатии. Поэтому при проектировании изделий из ПКМ и разработке технологий их изготовления необходимо наибольшее внимание уделять увеличению прочности именно по данному параметру.

Технологии синтеза новых компонентов ПКМ и их формирования достаточно сложны и требуют длительных сроков для совершенствования, а также создания нового сложного оборудования [3].

### Постановка задачи

Применение СВЧ электромагнитных полей для тепловой и нетепловой обработки диэлектрических материалов, к которым можно отнести большинство ПКМ, позволяет интенсифицировать процесс отверждения и повысить степень равномерности обработки вследствие объемного характера воздействия.

Доказано, что, варьируя геометрией и напряженностью электрического поля, можно значительно интенсифицировать процесс термообработки, повысить качество изделий, разработать новые виды термических процессов, невозможные для реализации при использовании традиционных методов нагрева [4 – 7]. Однако последующие операции размерной обработки и сборки вносят плохо прогнозируемые изменения в достигнутые в ходе отверждения в СВЧ электромагнитном поле показатели вследствие, так называемого, эффекта «технологической наследственности».

В области направленного СВЧ модифицирования отвержденных неметаллических материалов с уже сформированной структурой исследований немного и они посвящены в основном однородным по диэлектрическим свойствам композициям: компаундам, синтетическим волокнам и стеклотканым материалам.

Выполненные авторами исследования [8 – 11] позволили установить, что кратковременная обработка отвержденных углепластиков в СВЧ электромагнитном поле способствует увеличению прочности материала по напряжениям изгиба на 70...80 % и межслоевого сдвига – на 14...16 %. При этом модуль упругости увеличивается на 14...20 %, и почти на порядок снижается дисперсия значений напряжений межслоевого сдвига.

Одним из полученных результатов может быть усиление адгезии в контактной зоне

«матрица – волокно» с увеличением точек контактного взаимодействия, что приводит к более полному и равномерному перераспределению нагрузок между волокнами через матрицу в случае разрыва части волокон в процессе нагружения.

Для изделий современной авиационной техники и ветроэнергетики характерно широкое применение ПКМ с встроенными металлическими элементами с целью защиты от поражения разрядами атмосферного электричества. Молниезащита конструктивных элементов современных летательных аппаратов и лопастей ветрогенераторов, выполненных из ПКМ, являющихся диэлектриками, представляет собой одну из важнейших задач обеспечения надежности этого вида технических систем при эксплуатации в сложных метеорологических условиях грозовых фронтов и активной циклонической деятельности. Это связано как с поражением разрядами молний, так и накоплением статического электричества. В особенности это относится к стекло- и органоэластам. В то же время углепластики, являясь полупроводниками, при поражении разрядами атмосферного электричества получают повреждения, не обеспечивающие безопасности дальнейшей эксплуатации объекта [12, 13].

Наличие встроенных металлических структур с молниезащитным покрытием (МЗП) вносит дополнительные факторы, влияющие на восприятие эксплуатационных нагрузок конструкциями из ПКМ, которые отличаются от расчетных. Это необходимо учитывать при разработке технологий обработки и упрочняющего модифицирования изделий из отвержденных ПКМ со встроенными элементами МЗП.

Вышесказанное свидетельствует о необходимости исследований и разработки методов повышения эксплуатационных характеристик конструктивных элементов из ПКМ различных технических систем с учетом наличия в их составе равномерно распределенных металлических элементов.

Цель исследований: оценка упрочняющего эффекта за счет усиления адгезионного взаимодействия в области «матрица–волокно» после обработки отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле путем изучения параметров шероховатости (ГОСТ 2789-73) области повреждения.

### Методика исследований

Образцы подвергали испытанию на межслоевой сдвиг методом короткой балки согласно ГОСТ 32659-2014. В экспериментах использовали образцы в виде плоскопарал-

лельных пластин размерами 70×35×7 мм из отвержденного углепластика ООО «Евроком-плект» (г. Калуга) с закрепленным на поверхности молниезащитным покрытием из медной луженой сетки производства завода «Текстильмаш».

Сетку фиксировали эпоксидной смолой ЭД-20 с отвердителем ПЭПА (соотношение 10:1). Образцы обрабатывали на экспериментальной установке, созданной на базе микроволнового излучателя «Жук-2-02» производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск, Калужской обл.). Установка оснащена трехординатным столом с точностью позиционирования закрепляемых на нем образцов относительно оси рупора 0,05 мм. Микроволновый излучатель генерирует электромагнитное поле частотой 2450 МГц при выходной мощности 1200 Вт. На образец воздействовали СВЧ электромагнитным полем с плотностью потока энергии  $(17...18) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup>. Время обработки по результатам ранее проведенных авторами исследований [8 – 11] принимали равным 2 мин.

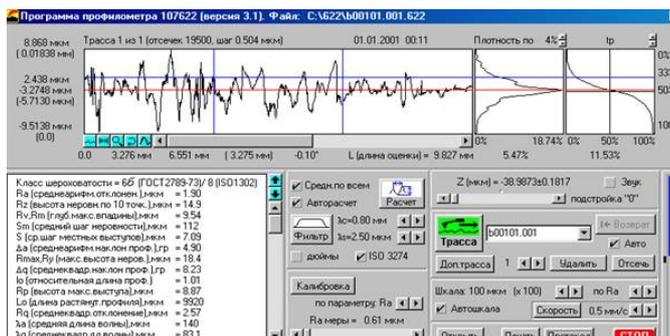
Испытания образцов до и после обработки проводили на компьютерной установке раз-

работки ИП «Майоров» (г. Орел) до момента расслоения образцов по боковым поверхностям. После расслоения образцы расклинивали по плоскости максимального расслоения до полного разделения. Параметры шероховатости поверхности раздела определяли при помощи цифрового профилографа-профилометра «Калибр-170623» во взаимно перпендикулярных плоскостях: вдоль и поперек направления армирования. Дополнительно оценивали шероховатость на внешней поверхности образцов, представляющей собой тонкий слой отвержденной эпоксидной смолы ЭД-20.

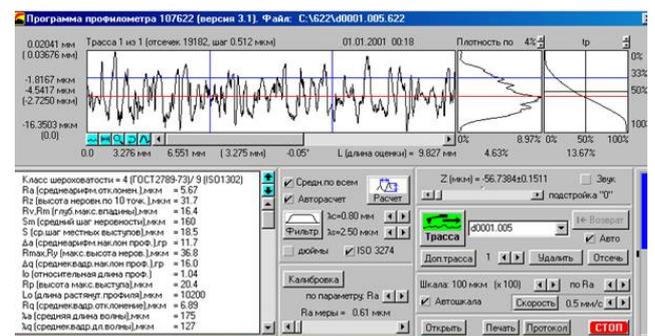
### Результаты и обсуждение

Типичные профилограммы области повреждения представлены на рис. 1 и рис. 2, обобщенные результаты их обработки – в табл. 1 и табл. 2.

На рис. 3 представлены профилограммы внешней поверхности образцов, результаты сравнительной оценки параметра шероховатости – в табл. 3.



а)



б)

Рис. 1. Профилограммы поверхности области повреждения контрольных (а) и обработанных (б) образцов, записанные в продольном направлении

#### 1. Изменение параметров шероховатости в направлении вдоль волокон

Образец	Ra	Rz	Rmax	Rp	Sm	Sm/Ra	L <sub>0</sub>
Контрольный	3,02	22,2	26,2	13,04	124	41,06	10060
Обработанный	4,09	25,45	40,25	18,7	142	34,7	10095
Δ	1,35	1,146	1,536	1,434	1,145	0,845	1,003
Δ, %	+35	+14,6	+53,6	+43,4	+14,5	-15,5	+0,3

#### 2. Изменение параметров шероховатости в направлении поперек волокон

Образец	Ra	Rz	Rmax	Rp	Sm	Sm/Ra	L <sub>0</sub>
Контрольный	11,43	94,9	125,1	70,35	164,5	14,39	11400
Обработанный	15,5	116,4	187,5	85,05	142	9,16	12050
Δ	1,356	1,227	1,499	1,209	0,863	0,637	1,057
Δ, %	+35,6	+22,7	+49,9	+20,8	-13,7	-36,3	+5,7

3. Изменение параметров шероховатости наружной поверхности

Образец	$R_a$	$R_z$	$R_{max}$	$R_p$	$S_m$	$S_m/R_a$	$L_0$
Контрольный	5,67	31,7	36,8	20,4	160	28,2	10200
Обработанный	4,14	29,5	34	17,2	136	32,85	10200
$\Delta$	1,37	1,075	1,08	1,186	1,176	1,165	1
$\Delta, \%$	-37	-7,5	-8,2	-18,6	-17,6	+16,5	0

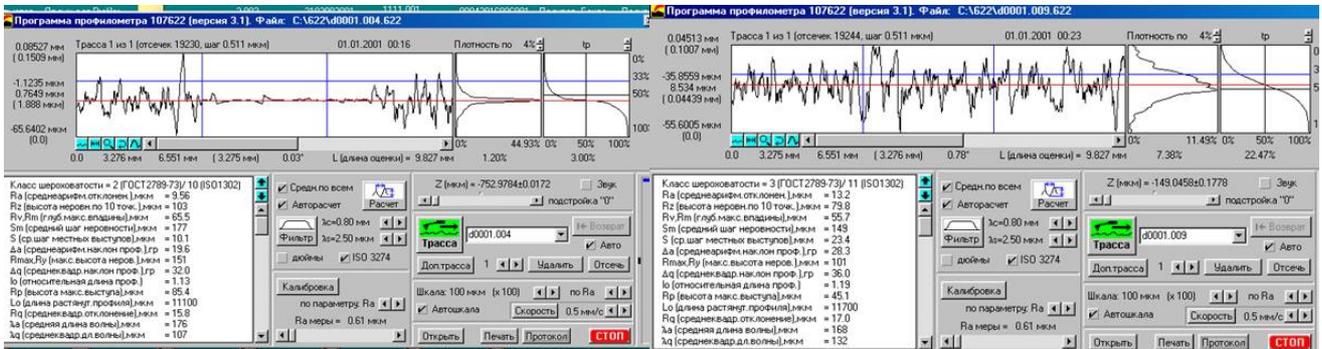


Рис. 2. Профилграммы поверхности области повреждения контрольных (а) и обработанных (б) образцов, записанные в поперечном направлении

Видно, что основные параметры, характеризующие параметры шероховатости области повреждения обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов, значительно превышают аналогичные параметры контрольных образцов. При этом микрорельеф, определенный в направлении вдоль армирующих волокон, значительно менее развит, чем определенный в поперечном направлении. Данный факт может явиться следствием того, что на показания измерительного датчика профилметра оказали влияние промежутки между волокнами, зафиксированные в виде впадин.

Усредняя изменения величин параметров шероховатости, определенных в направлении армирующих волокон и в поперечном направлении, приняли заключение, что поверхность повреждения обработанных образцов характеризуется следующими изменениями параметров шероховатости:  $R_a$  увеличивается на 35...36 %;  $R_z$  – на 15...23 %;  $R_{max}$  – на 50...54 %. При этом  $S_m$  при измерении вдоль волокон увеличивается на 14,5 %, а при измерении поперек волокон – снижается на 13,7 %. Длина растянутого профиля шероховатости практически не изменяется. Следует отметить, что соотношение  $S_m/R_a$  уменьшается на 16...36 %.

Установленные изменения показывают увеличение «рельефности» области повреждения, вызванной большими размерами агломератов матрицы и большим их количеством на единице исследуемой поверхности. Данный результат свидетельствует о возрастании прочности адгезионного взаимодействия мат-

рицы и армирующих волокон в процессе воздействия СВЧ электромагнитного поля. Вследствие этого при разрушении образца по межслойным границам в процессе воздействия изгибающей нагрузки преимущественно происходит когезионный отрыв агломератов матрицы и сохранение их связей с волокнами.

Поскольку для ПКМ характерны большие значения когезии в матрице, чем адгезии связующего материала и материала волокон, вследствие существенных их различий в химической природе и энергетическом потенциале, увеличение количества областей адгезионного взаимодействия свидетельствует о больших усилиях, необходимых для образования и развития повреждения. Таким образом, обеспечивается отмеченное авторами в работе [11] увеличение прочности углепластиков по напряжениям межслоевого сдвига.

Для внешней поверхности обработанных образцов (рис. 4, табл. 3), наоборот, характерно уменьшение величин основных параметров шероховатости на 7,5 – 37 % и увеличение отношения  $S_m/R_a$  более, чем на 16 %. Данный факт свидетельствует об определенной сглаженности рельефа.

Предлагается следующий механизм отмеченных изменений в области повреждения и на внешней поверхности образцов. В ходе предыдущих исследований [11] отмечалось повышение температуры образцов углепластика в процессе воздействия СВЧ электромагнитного поля. Для исследуемых в данном эксперименте образцов установлено путем измерения пирометром Testo 830-T1 непо-

средственно после выключения СВЧ излучателя повышение температуры, обращенной к излучателю поверхности образца, до уровня 32...34 °С, противоположной поверхности – 27...30 °С, торцевой поверхности – 36...42 °С.

Повышение температуры связано, с одной стороны, с диэлектрическим нагревом матрицы вследствие выделения тепла в процессе высокочастотных колебаний дипольных молекул и агломератов в СВЧ электромагнитном поле, а с другой стороны – с интенсивным вы-

делением тепла на поверхности углеродных волокон, являющихся полупроводниками, вследствие скин-эффекта.

Под действием СВЧ диэлектрического нагрева и колебаний диполей происходит движение дефектов и уплотнение структуры, а также измельчение агломератов и повышение их фрактальной размерности, что приводит к увеличению числа точек контактного взаимодействия в матрице и к увеличению когезионного взаимодействия [14].

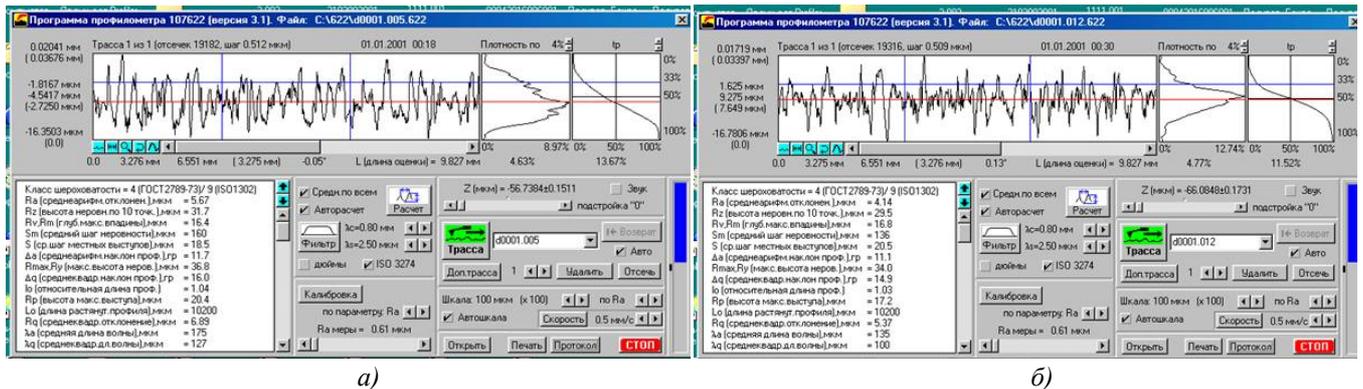


Рис. 3. Профилграммы внешней поверхности контрольных (а) и обработанных (б) образцов

В еще большей степени данный процесс протекает в контактной зоне «матрица – волокно» из-за значительно большей степени нагрева вследствие скин-эффекта. В данной зоне возможно, наряду с увеличением точек контактного взаимодействия, ускорение диффузионных процессов и более значимое повышение прочности так называемого межфазного слоя. Таким образом, усиливается адгезионное взаимодействие и повышается прочность материала, выражающаяся в росте напряжений межслоевого сдвига. Полученные результаты по увеличению параметров шероховатости в области повреждения подтверждают факт усиления адгезионного взаимодействия матрицы и армирующих структур.

### Выводы

1. В ходе сравнительного изучения шероховатости области повреждения образцов из отвержденного углепластика на эпоксидном связующем установлено существенное изменение основных ее параметров после воздействия на СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц с плотностью потока энергии  $(17...18) \cdot 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup>: параметр Ra увеличивается на 35...36 %; Rz – на 15...23 %; Rmax – на 50...54 %; отношение Sm/Ra снижается на 16-36 % в зависимости от направления измерений – вдоль или перпендикулярно укладке волокон в поврежденном слое.

2. При повреждении (расслоении) ПКМ после обработки в отвержденном состоянии в СВЧ электромагнитном поле происходит преимущественно когезионный отрыв матрицы при значительном количестве агломератов на поверхности армирующих волокон, что приводит к росту параметров шероховатости.

3. Полученные результаты могут быть интерпретированы, как свидетельство усиления адгезионного взаимодействия в зоне контакта «матрица – волокно», что является одним из основных механизмов увеличения прочности исследованного типа углепластика.

4. Поскольку физико-механические свойства ПКМ и, в частности, углепластиков существенно зависят от внешних климатических воздействий, связанных с колебаниями температуры, солнечным излучением, техногенными факторами и, особенно, влагопоглощением при воздействии атмосферных осадков, представляется важным проведение изучения изменений параметров шероховатости области повреждения ПКМ, подвергнутого обработке в СВЧ электромагнитном поле, после климатических воздействий и в процессе старения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошкин, Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>; дата последнего обращения 28.01.2017 г.

REFERENCES

2. **Мирный, М.** Мировой рынок углепластиков достигнет отметки в \$23 млрд к 2022 году URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, (дата последнего обращения 20.09.2016 г.).

3. **Каблов, Е.Н.** Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской Академии Наук. – 2012. – Т. 82. – №6. – С. 520-530.

4. **Архангельский, Ю.С.** Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник. – Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.

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

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

7. **Inderdeep Singh** Feasibility study on microwave joining of ‘green’ composites / Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajraia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara // Akademeia (2011) 1(1): ea0101. – pp. 1-6.

8. **The iInfluence** of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / Zlobina I.V., Bekrenev N.V. // High Technology. – 2016. – V. 17. [№ 2](#). – pp. 25-30.

9. **The influence** of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. // Solid State Phenomena. – 2016. – V. 870. – pp. 101-106.

10. **Increasing** of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. Muldasheva, G.K., // AIP Publishing, vol. 1783, 10 November 2016, 020236-1 – 020236-4.

11. **Злобина, И.В., Бекренев, Н.В.** Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструктивных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография. – Саратов: Саратов. техн. ун-т, 2017. – 164 с.

12. **Вишняков, Л.Р., Зубков, О.В., Коханый, В.А., Коханая, И.Н.** Вязано-паяные проволочные сетки для молниезащиты лопастей ветрогенераторов // Технологические системы. – 2014. – №1. – С. 58-63.

13. **Гуляев, Г.М.** Молниезащитные покрытия для конструктивных углепластиков, содержащие наночастицы / Г.М. Гуляев, Л.В. Чурсова, А.Е. Раскутин и др. // Все материалы. Энциклопедический справочник. – 2012. – № 3. – С. 24-35.

14. **Злобина, И.В.** Теоретико-экспериментальное исследование влияния параметров межфазной зоны отвержденного полимерного композиционного материала под действием микроволнового излучения на его прочностные характеристики / И.В. Злобина, К.С. Бодягина, С.П. Павлов и др. // Вестник ЧГПУ им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – 2018. – №4(38). – С. 34-48.

1. Koshkin, R.P. *Basic Directions of Development and Improvement of Unmanned Aircraft Systems*: <http://spmagazine.ru/420>; last address date: 28.01. 2017.

2. Mirny, M. *World Carbon Plastic Market Will Achieve \$23 billion by 2022* URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, (last address date: 20.09.2016).

3. Kablov, E.N. Materials and chemical technologies for aircraft production // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. – 2012. – Vol. 82. – No.6. – pp. 520-530.

4. Arkhangelsky, Yu.S. *References Book on MWF-electrothermics*: reference book. – Saratov: Scientific Book, 2011. – pp. 560.

5. Kolomeitsev, V.A. Experimental investigations of heating irregularity level in dielectric materials and absorbed power in MWF devices of resonating type / V.A. Kolomeitsev, Yu.A. Kuzmin, D.N. Nikuiko, A.E. Semyonov // *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, - 2013. – Vol.18. – No.12. – pp. 25-31.

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

7. Inderdeep Singh Feasibility study on microwave joining of ‘green’ composites / Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajraia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara // Akademeia (2011) 1(1): ea0101. – pp. 1-6.

8. **The iInfluence** of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / Zlobina I.V., Bekrenev N.V. // High Technology. – 2016. – V. 17. [№ 2](#). – pp. 25-30.

9. **The influence** of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. // Solid State Phenomena. – 2016. – V. 870. – pp. 101-106.

10. **Increasing** of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field / Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. Muldasheva, G.K., // AIP Publishing, vol. 1783, 10 November 2016, 020236-1 – 020236-4.

11. Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. New design-technological methods for strength increase of non-metallic composite design elements: *Monograph*. – Saratov: Saratov State Technical University, 2017. – pp. 164.

12. Vishnyakov, L.R., Zubkov, O.V., Kokhany, V.A., Kokhanaya, I.N. Tired-soldered wire nets for lightning protection of wind-generators // *Technological Systems*. – 2014. – No.1. – pp. 58-63.

13. Lightning protection coatings for structural carbon plastics having nano-particles / G.M. Gulyaev, L.V. Chursova, A.E. Raskutin et al. // *All Materials. Encyclopedic Reference Book*. – 2012. – No.3. – pp. 24-35.

14. Zlobina, I.V. Theoretical and experimental investigation of inter-phase area parameter of hardened polymer composite impact under microwave radiation influence upon its strength characteristics / I.V. Zlobina, K.S. Bodyagina, S.P. Pavlov et al. // *Bulletin of Yakovlev ChGPU. Series: Mechanics of Limiting State*. – 2018. – No.4(38) – pp. 34-48.

Рецензент д.т.н. Д.А. Зимняков