

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-5-11

**ВЛИЯНИЕ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТВЕРДОСТЬ  
АРМИРОВАННОГО ВОЛОКНАМИ УГЛЕПЛАСТИКА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ  
В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МОЛНИЕЗАЩИТНОЙ СЕТКОЙ**

© И.В. Злобина

На основе анализа научно-технической литературы и тенденций развития летательных аппаратов различного назначения выявлено устойчивое расширение применения в их конструкции полимерных композиционных материалов (ПКМ). Отмечена важность молниезащиты летательных аппаратов, обшивка которых в основном состоит из ПКМ, и показано, что одним из распространенных средств является молниезащитное покрытие (МЗП) в виде распределенной в поверхностном слое ПКМ металлической сетки. Анизотропия свойств ПКМ и пониженная по сравнению с металлами вязкость разрушения определяют необходимость совершенствования как составов ПКМ и технологий их формирования, так и разработку методов финишной упрочняющей обработки в отвержденном состоянии, которая эффективно может осуществляться воздействием СВЧ электромагнитного поля. Изучено влияние кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля на устойчивость армированных углеродными волокнами ПКМ с МЗП к воздействию ударных нагрузок, а также на твердость поверхности. Установлено уменьшение области повреждений в зоне удара на (40–60)%, отсутствие микротрещин и расслоений, а также увеличение твердости на 7.8%. Особо отмечено снижение в 3 раза разброса значений твердости после СВЧ воздействия, что свидетельствует о значимом повышении равномерности данной важной для эксплуатации изделия характеристики. В качестве механизма указанных изменений предложено уменьшение размеров пор, снижение пористости и увеличение количества точек контактного взаимодействия агломератов матрицы и волокна, приводящие к повышению плотности структуры.

Ключевые слова: ударное воздействие, твердость, повреждение, морфология поверхности, СВЧ электромагнитное поле.

**Введение.** Анализ научно-технической информации свидетельствует о широком применении в авиационной промышленности, ракетостроении и космической технике полимерных композиционных материалов (ПКМ) на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон, а также тканей. По данным исследовательской компании Marketsand Markets, рынок углепластиков к 2020 г. составит 35.74 млрд долл. [1]. Рынок производства композитов постоянно расширяется и охватывает не только авиаракетную отрасль и ветроэнергетику, а также строительство, производство маломерных судов, автомобилестроение, робототехнику [2–6].

Для современных изделий из полимерных композиционных материалов весьма характерна сложная структура, включающая сотовые металлические конструкции и распределенные в поверхностном объеме металлические элементы сетчатых молниезащитных покрытий (МЗП).

Это вызывает определенные сложности при расчете, проектировании и изготовлении таких изделий [7–9].

Наличие встроенных металлических структур МЗП и сотовых заполнителей вносит дополнительные факторы, влияющие на отличие восприятия эксплуатационных нагрузок конструкциями из ПКМ от расчетных. Это необходимо учитывать при разработке технологий обработки и упрочняющего модифицирования изделий из отвержденных ПКМ со встроенными элементами МЗП.

**Постановка задачи.** Перспективные авиационные, также ракетные комплексы являются высокоманевренными, используются в атмосфере и ближнем космосе, что выдвигает повышенные требования к механической и термической прочности их конструктивных элементов, имеющих сложные формы, сильно влия-

ющие на распределение опасных механических и температурных напряжений, а также восприятие динамических нагрузок, в т.ч. ударов скоростными твердыми телами. При этом проявляются отрицательные особенности волокнистых композиционных материалов, в частности пониженная вязкость разрушения, что требует проведения конструкторско-технологических упрочняющих мероприятий.

Для повышения физико-механических характеристик ПКМ используются различные химические, физические, механические, электрические методы, а также конструктивные решения. Одним из электрофизических упрочняющих методов является финишное модифицирование структуры отвержденных ПКМ в процессе кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля, о чем свидетельствуют полученные нами результаты [10, 11]. Кратковременная (до 2-х минут) обработка отвержденных ПКМ со встроенными металлическими элементами в СВЧ электромагнитном поле способствует повышению статической прочности на 16%, а прочности при малоцикловом нагружении почти в 2 раза. Однако влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на восприятие ПКМ с металлическими элементами ударных нагрузок и твердость их поверхности ранее не рассматривалась.

Целью данной работы явилось изучение влияния ударного воздействия на модифицированные в СВЧ электромагнитном поле отвержденные ПКМ с распределенными в объеме металлическими элементами и твердости их поверхности.

**Методика исследований.** Твердость образцов оценивали прямым измерением по Роквеллу и по устойчивости к воздействию падающего ударника, проявляющейся в размерах области повреждений и изменении морфологии поверхности. В процессе исследований использовались методика испытаний полимерных композитов по сопротивлению повреждениям падающим грузом по ГОСТу 33496-2015 и методика определения твердости пластмасс по Роквеллу по ГОСТу 24622-91. Для проведения исследований использовалось экспериментальное лабораторное место на базе компьютерного виброакустического комплекса ВК-01 с программным обеспечением ZetLab (ООО «Электронные технологии и метрологические системы», г. Зеленоград) и компьютерной тензомет-

рической установки с программным обеспечением LabView (ИП «Майоров», г. Орел). В экспериментах использовали образцы из углепластика типа ВКУ с распределенным в поверхностном слое молниезащитным покрытием в виде медной сетки завода «Текстильмаш», внешний защитный слой сетки МЗП – стеклопластик. Размеры образцов в соответствии с ГОСТ 33496-2015 приняты равными 150×100×5 мм. Ударное воздействие обеспечивалось падающим с высоты 330, 660 и 1000 мм ударником со сферическим наконечником Ø 22.5 мм весом 47.44 г из закаленной стали ШХ-15 (HRC 50...55). Ориентация удара обеспечивалась трубчатой направляющей с зазором 1 мм для исключения трения ударника о стенки. Повторное воздействие ударника исключалось подкладыванием в момент отскока деревянной пластины толщиной 5 мм.

Использовали по 5 контрольных образцов и подвергнутых воздействию в течение 1 минуты СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц на дистанции 200 мм, что соответствовало плотности потока энергии (ППЭ)  $17 \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup>. При данных режимах согласно выполненным нами ранее исследованиям [10–13] обеспечивается максимальное повышение прочности ПКМ при действии статических нагрузок. Для моделирования технологии обработки крупногабаритных изделий обшивки летательных аппаратов для обработки применяли установку «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск, Калужской обл.) с излучателем рупорного типа.

Морфологию поверхности образцов в области ударных повреждений при помощи цифрового микроскопа Bresser LCD 50x–2000x при увеличении ×100. Размер зоны повреждений определяли при помощи лупы Бриннеля, оснащенной измерительной шкалой. Твердость поверхности образцов определяли при помощи цифрового твердомера HVS-1000.

**Результаты и обсуждение.** Изучение поверхности контрольных образцов выявило наличие видимых отпечатков неправильной формы в местах воздействия ударника (рис. 1 а) при всех высотах падения. При этом при высоте падения 330 и 660 мм отпечатки имеют относительно правильную форму, близкую к эллиптической, при высоте падения 1000 мм форма отпечатка неправильная, на ней заметны трещины и микрорасслоения внешнего слоя стеклопластика.

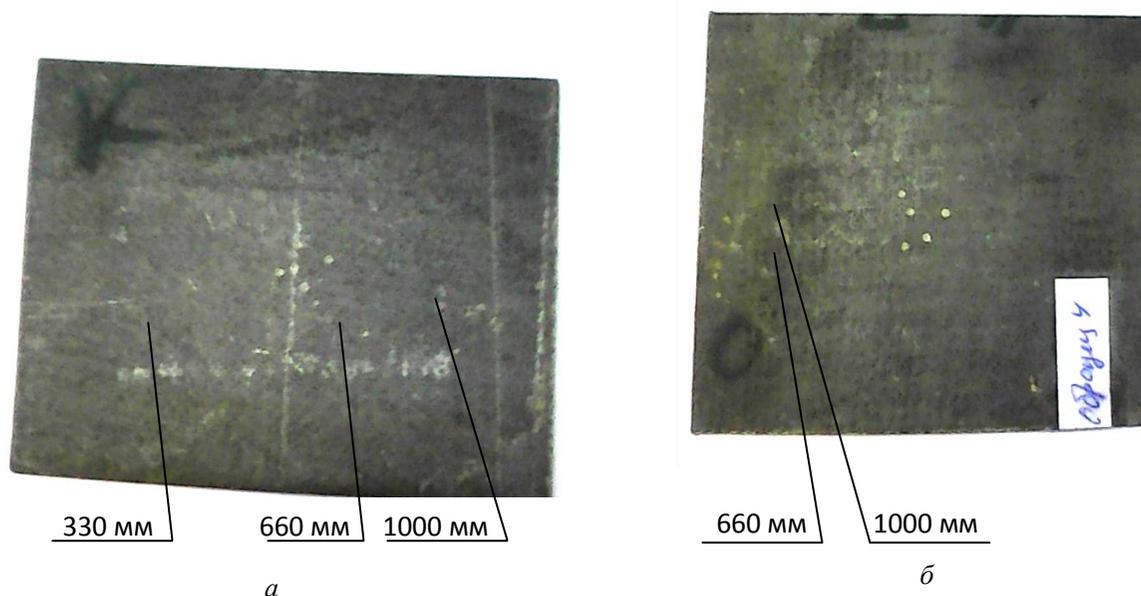


Рис. 1. Внешний вид образцов: контрольный (а), обработанный в течение 3-х минут при ППЭ  $(17-18) \times 10^4$  мкВт/см<sup>2</sup> (б). Отмечены следы воздействия падающего с различной высоты сферического стального ударника массой 47.74 г

Т а б л и ц а 1

Размеры отпечатков на местах падения ударника

Высота падения, мм	330	660	1000
Контрольный	1–1.5	2–2.5	3–4
Обработанный	–	1.3–1.5	2.4–2.6

Воздействие ударника при падении с высоты 330 мм не оказало влияния на поверхность обработанного образца. При высотах 660 и 1000 мм образовались овальные отпечатки значительно меньшего размера по сравнению с контрольным образцом. Количественное сравнение размеров отпечатков представлено в табл. 1.

Видно, что размеры области повреждений (отпечатка) обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов в месте воздействия ударника при падении с высоты 660 мм в 1.6 раза меньше, а при падении с высоты 1000 мм – в 1.4 раза меньше, чем контрольных образцов. Меньший эффект в последнем случае может быть объяснен большей энергией удара, которая нивелирует упрочнение структуры, произошедшее в результате воздействия СВЧ электромагнитного поля. Данный факт можно считать свидетельством, с одной стороны, большей твердости поверхности обработанного ПКМ, с другой – большей его упругости, что приводит к частичному восстановлению морфологии поверхности после прекращения воздействия. Очевидно, кон-

трольные образцы имеют большую пластичность поверхности, которая проявляется в сохранении деформированного состояния области удара. В то же время наличие микроразрывов и трещин в поверхности контрольных образцов и практическое отсутствие таковых у обработанных образцов является подтверждением большей прочности механических связей элементов структуры после ее модифицирования в СВЧ электромагнитном поле.

Высказанное выше подтверждается микрофотографиями поверхности области удара контрольных и обработанных образцов (рис. 2). Видно, что поверхность контрольных образцов характеризуется наличием большого количества понижений и каверн, вызванных воздействием элементов шероховатости поверхности ударника и пластическим оттеснением матричного материала к периферии области воздействия.

Особенно это проявляется на черно-белых изображениях (рис. 2 а, в). В месте воздействия ударника на поверхность обработанных образцов сохраняются значительные по площади не-

деформированные и не разрушенные элементы морфологии (светлые области на черно-белых изображениях), что подтверждает повышенную твердость и прочность материала после СВЧ воздействия (рис. 2 б, з).

Полученные результаты по устойчивости ПКМ с МЗП в виде медной сетки вполне согласуются с результатами определения твердости поверхности образцов (табл. 2).

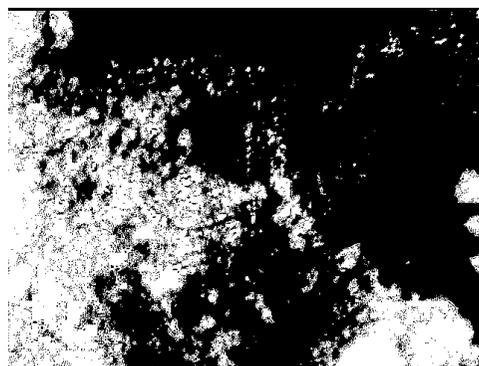
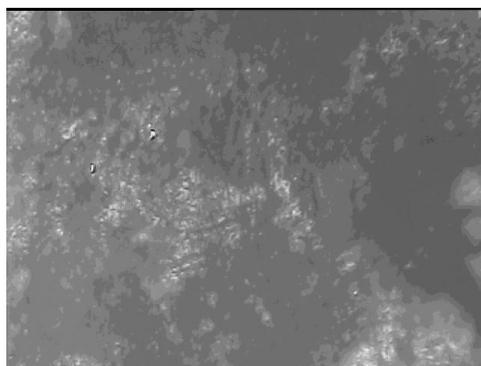
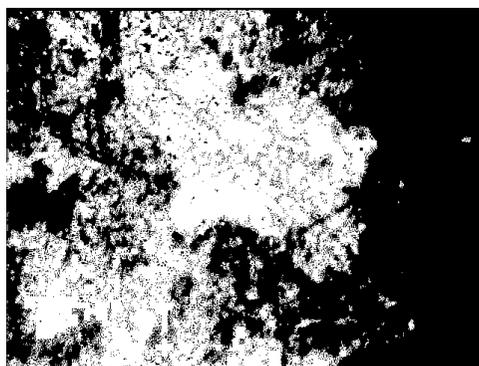
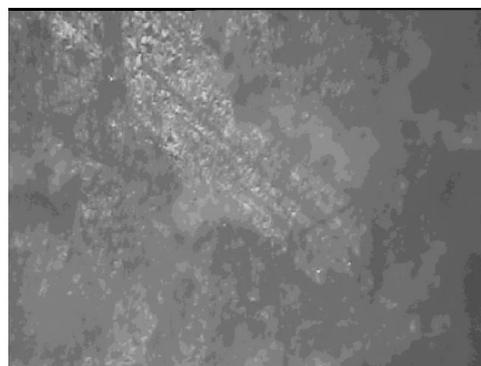
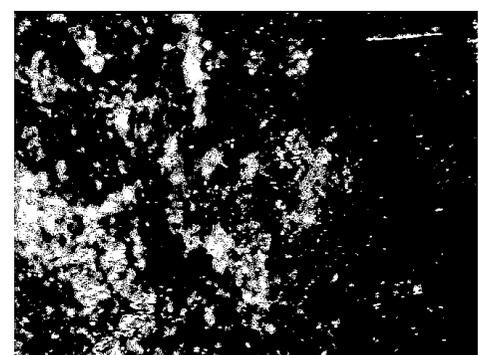
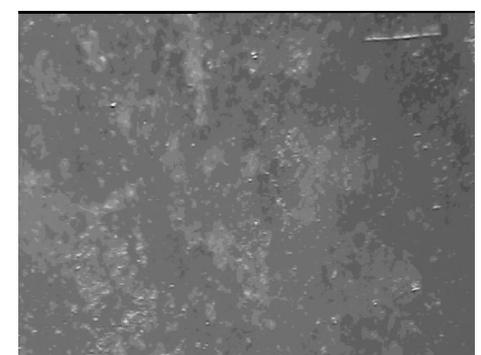
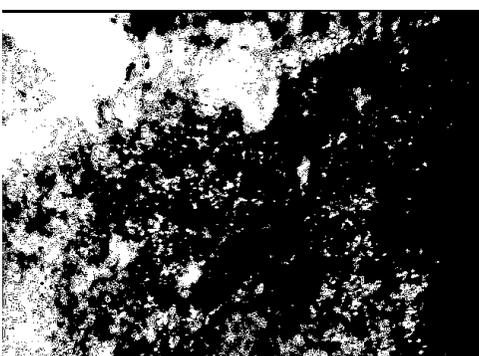
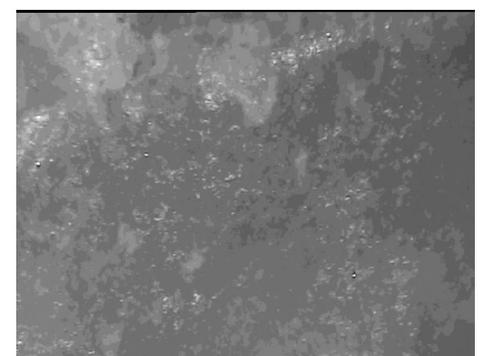
*a**б**в**з*

Рис. 2. Морфология поверхности места падения с высоты 330 мм (*а, б*) и 660 мм (*в, з*) сферического ударника массой 47.74 г. Фото *а* и *в* – контрольный образец. Поле зрения 460 мкм.

Твердость поверхности в единицах HRC

Параметр	Твердость	Средняя твердость по 5-и измерениям	Дисперсия твердости
Контрольный	45–47	46	0.667
Обработанный	49–50	49.6	0.203
Изменение		1.078 (+7.8%)	–3.28

Обработка в СВЧ электромагнитном поле в среднем приводит к не очень большому повышению твердости материала (почти на 8%). Однако очень значительно (более чем в 3 раза) повышается равномерность показателей твердости по поверхности образца. Именно этот факт можно считать определяющим для объяснения результатов устойчивости к ударному воздействию обработанных образцов. Воздействие ударника на контрольные образцы вызывало большие повреждения на участках с меньшей твердостью и малые повреждения на участках с большей твердостью. Средние размеры области повреждения оказывались при этом большими, на участках с меньшей твердостью образовывались впадины и каверны. В ряде случаев размеры области повреждения поверхности обработанных образцов практически равны таковым для контрольных образцов, но в большинстве случаев – значительно меньше. Разброс размеров области повреждений контрольных образцов составляет 25–33%, обработанных – 8–15%, что вполне согласуется с дисперсиями и абсолютными значениями измеренной твердости.

Механизм повышения устойчивости ПКМ с МЗП к ударному воздействию и увеличения твердости поверхности может быть обоснован с учетом установленных ранее нами фактов снижения пористости матричной структуры и увеличения количества точек контактного взаимодействия в области «матрица-волокно» после воздействия на материал СВЧ электромагнитного поля [10, 12]. Совместно с измельчением агломератов матрицы и увеличением их количества это приводит к повышению плотности структуры и, как следствие, к сопротивлению внедрению твердого тела как при воздействии статической, так и ударной нагрузки. Снижение пористости, уменьшение размеров пор и агломератов создает предпосылки для повышения однородности структуры и выравниваю параметров твердости по поверхности образцов.

**Заключение.** Обработка в СВЧ электромагнитном поле отвержденных углепластиков с распределенной в поверхностном слое молниезащитной сеткой способствует увеличению устойчивости материала к воздействию ударных нагрузок, что проявляется в уменьшении на 40–60% размеров области повреждения и отсутствии трещин и микроразрывов.

В результате воздействия СВЧ электромагнитного поля незначительно увеличивается твердость поверхности, при этом дисперсия значений твердости снижается более чем в 3 раза, что свидетельствует о значимом повышении равномерности данного параметра и может оказать положительное влияние на стабильность эксплуатационных характеристик изделия из ПКМ, в т.ч. в экстремальных условиях.

Механизм повышения твердости ПКМ и устойчивости к действию ударных нагрузок заключается в снижении пористости матричной структуры и увеличении количества точек контактного взаимодействия в области «матрица-волокно» после воздействия на материал СВЧ электромагнитного поля, что приводит к повышению плотности структуры и улучшению контактного взаимодействия матрицы с армирующим волокном.

*Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 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».*

## Литература

1. 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 обращения 03.03.2019 г.).

2. Кошкин Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем. URL: <http://spmagazine.ru/420> (дата обращения 03.03.2019 г.).

3. <http://compositeonline.ru/technology/3989/> (дата обращения 03.03.2019 г.).

4. [https://vpk.name/news/195774\\_fpi\\_sozdat\\_kompaktnogo\\_letayushego\\_robota.html](https://vpk.name/news/195774_fpi_sozdat_kompaktnogo_letayushego_robota.html) (дата обращения 03.03.2019 г.).

5. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГИЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 3–33.

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

7. Вишняков Л.Р., Коханый В.А., Коханая И.Н., Андриенко Е.М. Разработка сеток для молниезащитных авиационных конструкций из полимерных материалов // Мат-лы XXV Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности». Центр «Наука. Техника. Технологии», 2005. С. 277.

8. 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.

9. Гуняев Г.М., Чурсова Л.В., Раскутин А.Е. и др. Молниезащитные покрытия для конструкционных углепластиков, содержащие наночастицы // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 3.

10. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструкционных элементов из неметаллических композиционных материалов. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.

11. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // High technology. 2016. V. 17. № 2. P. 25–30.

12. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий // Вестник РГАТУ. 2017. № 1(40). С. 236–242.

13. Злобина И.В., Бодягина К.С., Павлов С.П. и др. Теоретико-экспериментальное исследование влияния параметров межфазной зоны отвержденного полимерного композиционного материала под дейст-

вием микроволнового излучения на его прочностные характеристики // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева Серия: Механика предельного состояния. 2018. № 4(38). С. 34–48.

## References

1. Mirny M. The global carbon fiber reinforced plastic market will reach \$23 billion by 2022. Available at: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/> (accessed March 3, 2019).

2. Koshkin R.P. Main trends in development and improvement of unmanned aircraft systems. Available at: <http://spmagazine.ru/420> (accessed March 3, 2019).

3. American scientists have created two robots – a cockroach and a bird using composites. Available at: <http://compositeonline.ru/technology/3989/> (accessed March 3, 2019).

4. FPI is developing a small flying robot. Available at: [https://vpk.name/news/195774\\_fpi\\_sozdat\\_kompaktnogo\\_letayushego\\_robota.html](https://vpk.name/news/195774_fpi_sozdat_kompaktnogo_letayushego_robota.html) (accessed March 3, 2019).

5. Kablov E.N. Innovation developments of Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials" State Research Center of the Russian Federation to Implement «Strategic Directions of the Development of Materials and Technologies of Their Processing for the Period until 2030». *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33.

6. Kablov E.N. Materials and chemical technologies for aviation. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk*, 2012, vol. 82, no. 6, pp. 520–530.

7. Vishnyakov L.R., Kokhany V.A., Kokhanaya I.N., Andrienko E.M. Mesh development for lightning protection airplane structures from polymer materials. *Materialy XXV Mezhdunarodnoy konferentsii «Kompozitsionnye materialy v promyshlennosti»*. *Ukrainskiy Informatsionnyy Tsentr «Nauka. Tekhnika. Tekhnologiya»*, 2005, 277 p.

8. Vishnyakov L.R., Zubkov O.V., Kokhany V.A., Kokhanaya I.N. Knitted soldered wire meshes for lightning protection of wind unit generator blades. *Tekhnologicheskie sistemy*, 2014, no. 1, pp. 58–63.

9. Gunyaev G.M., Chursova L.V., Raskutin A.E., Nachinkina G.V., Gunyaeva A.G., Kuprienko M.V. Lightning-protection coatings for structural carbon fiber-reinforced plastics containing nanoparticles. *Vse materialy. Entsiklopedicheskiy spravochnik*, no 3, 2012.

10. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. New design technological methods for improving the strength of structural elements made of non-metallic composite materials. *Monografiya*. *Saratov, Saratovskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet*, 2017. 164 p.

11. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The influence of microwave electromagnetic field on mechanical properties of composite materials. *Naukoemkie tekhnologii*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 25–30.

12. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. Study of the microstructure of structural laminated carbon-reinforced plastics modified by electro-physical influences. Vestnik RGATU, 2017, no. 1 (40), pp. 236–242.

13. Zlobina I.V., Bodyagina K.S., Pavlov S.P., Bekrenev N.V. Theoretical and experimental study of

the effect of changes in the parameters of the interphase zone of the cured polymeric composite material under the action of microwave radiation on its strength characteristics. Vestnik ChGPU im. I.Ya. Yakovleva. Seriya: Mekhanika predelnogo sostoyaniya, 2018, no. 4 (38), pp. 34–48.



**THE EFFECT OF MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELD  
ON THE HARDNESS OF CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC  
WITH LIGHTNING PROTECTION GRID DISTRIBUTED IN THE SURFACE LAYER**

© I.V. Zlobina

Yuri Gagarin Saratov State Technical University  
77, Politekhnicheskaya ulitsa, 410054, Saratov, Russian Federation

Based on the analysis of scientific and technical literature and trends in the development of multi-purpose aircrafts, we can see a steady extension of the use of polymer composite materials (PCM) in their design. The importance of lightning protection is noted for aircrafts, the skin of which consists mainly of the PCM, and it is shown that one of the common means is a lightning protection coating (LPC) in the form of a metal grid distributed in the PCM surface layer. Anisotropy of PCM properties and reduced fracture toughness in comparison with metals necessitates the improvement of PCM compositions and technologies of their formation as well as the development of methods for final hardening treatment in the cured state, which can be effectively performed under the effect of microwave electromagnetic field. Consideration is given to the influence of a short-term exposure to microwave electromagnetic field on the stability of carbon fiber-reinforced PCM with PLC against impact loads, as well as on the surface hardness. Our findings show a decrease in the damaged area of the impact zone by 40–60% and the absence of microcracking and delamination as well as an increase in hardness by 7.8%. Particular emphasis is placed on a 3-fold decrease in the spread of hardness values after the microwave exposure, this indicating a significant increase in the uniformity of this important characteristic for the component performance. As a mechanism of these modifications, it is proposed to reduce the pore size and porosity and to increase the number of points of contact interaction between matrix and fiber agglomerates that ensure an increase in the structural density.

Key words: impact, hardness, damage, surface morphology, microwave electromagnetic field.