

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868
DOI: 10.31040/2222-8349-2020-0-4-12-18

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СХЕМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТВЕРДОСТЬ ОТВЕРЖДЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА С НАНЕСЕННОЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ МОЛНИЕЗАЩИТНОЙ СЕТКОЙ

© И.В. Злобина

В настоящее время для конструктивных элементов перспективного воздушного транспорта и ветрогенераторов перспективно применение армированных волокнами полимерных композиционных материалов (ПКМ), в частности, угле- и стеклопластиков. С целью повышения стойкости указанных материалов к статическому электричеству и разрядам молний при прохождении грозовых фронтов в структуру ПКМ включаются различные молниезащитные покрытия (МЗП). Наиболее распространены МЗП в виде медных сеток. Оперение и плоскости летательных аппаратов, а также крупногабаритные лопасти ветрогенераторов подвержены воздействию циклических высокоамплитудных и низкочастотных изгибающих нагрузок, а также вибраций. Возможны столкновения с твердыми предметами. Одной из важных характеристик ПКМ, определяющих их эксплуатационные свойства, является твердость. Прочность и выносливость изделий из ПКМ может быть повышена путем кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля. Наличие встроенной металлической структуры вносит дополнительную неопределенность в восприятие анизотропными ПКМ эксплуатационных нагрузок, а также в процесс взаимодействия с электромагнитным полем сверхвысокой частоты.

Выполнены исследования твердости углепластиков со встроенным МЗП при различных схемах воздействия СВЧ электромагнитного поля: со стороны МЗП, со стороны, противоположной МЗП, последовательная обработка с обеих сторон. Установлено, что кратковременная обработка в СВЧ электромагнитном поле с плотностью потока энергии $(17-18) \times 10^4$ мкВт/см² не приводит к изменению исходной твердости поверхности образцов. Однако равномерность распределения твердости по поверхности образца повышается на (35.8–70)%, что обеспечивает более адекватное восприятие нагрузок различного характера. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий финишной обработки изделий из ПКМ для повышения устойчивости последних к динамическим нагрузкам.

Ключевые слова: твердое тело, твердость, поверхность, полимерные композиционные материалы, молниезащитное покрытие, СВЧ электромагнитное поле.

Введение. Для изделий современной авиационной техники и ветроэнергетики характерно широкое применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) [1 – 4]. Молниезащита конструктивных элементов современных летательных аппаратов и лопастей ветрогенераторов, выполненных из полимерных композиционных материалов, являющихся диэлектриками, представляет собой одну из важнейших задач обеспечения надежности этого вида технических систем при эксплуатации в сложных метеоусловиях грозовых фронтов и активной циклонической деятельности. Это связано как с поражением разрядами молний, так и накоплением статического электричества. В особенности сказанное относится к стекло- и органола-

стикам. В то же время углепластики, являясь полупроводниками, при поражении разрядами атмосферного электричества получают повреждения, не обеспечивающие безопасности дальнейшей эксплуатации объекта [5, 6].

Наличие встроенных металлических структур МЗП вносит дополнительные факторы, влияющие на восприятие 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. Изложенное свидетельствует о необходимости исследований и разработки методов повышения эксплуатационных характеристик конструктивных элемен-

тов из ПКМ различных технических систем с учетом наличия в их составе равномерно распределенных металлических элементов.

Постановка задачи. Для несущих конструкций и обшивки крыльев и оперения летательных аппаратов, а также крупногабаритных лопастей винтов ветрогенераторов особое значение имеет так называемая «малоцикловая усталость» – сопротивление усталостному разрушению при высокоамплитудных низкочастотных нагрузках [3, 4]. Весьма важно также адекватное восприятие ударных (динамических) нагрузок, в т.ч. ударных нагрузок скоростными твердыми телами: птицы, град и др. Для сохранения целостности изделия в таких условиях приобретает значение также не только прочность, но и твердость поверхности, препятствующая проникновению твердого тела и повреждению внутренних объемов конструкции. При действии ударных нагрузок проявляются отрицательные особенности волокнистых композиционных материалов, заключающиеся в анизотропии по отношению к направлению нагрузки относительно схемы армирования, пониженной вязкости разрушения. Это требует проведения различных конструкторско-технологических упрочняющих мероприятий.

Одним из перспективных технологических методов повышения прочности ПКМ является модифицирование структуры в процессе кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля, о чем свидетельствуют полученные различными исследователями результаты [7–10]. Нами установлен положительный эффект упрочнения угле- и стеклопластиков при воздействии на них СВЧ электромагнитного поля в отвержденном состоянии на финишной стадии технологического цикла [11–14]. Однако полученные положительные результаты касались прочности стекло- и углепластиков при испытаниях на изгиб и межслоевой сдвиг и не затрагивали вопросов изменения твердости материала под действием СВЧ электромагнитного поля. В случае снижения твердости возможно ослабление сопротивления проникновению твердых предметов при ударном воздействии, что понизит достигнутый эффект упрочнения изделия. Также наличие встроенной мелкоячеистой металлической сетки может создать экранирующий эффект и уменьшить воздействие СВЧ электромагнитного поля на расположенные за ней структуры.

Целью исследований явилось изучение влияния различных схем воздействия СВЧ электромагнитного поля на твердость образцов из от-

вержденного армированного углеродными волокнами ПКМ с МЗП в виде встроенной в поверхностный слой металлической медной сетки.

Методика исследований. В экспериментах использовали образцы в виде пластин сечением 35×7 мм и длиной 70 мм из отвержденного композита на эпоксидной матрице ЭД-20 с отвердителем ПЭПА (соотношение 10:1), армированной углеродными волокнами производства ООО «Балаково карбон продакшн» (г. Балаково Саратовской обл.) с коэффициентом заполнения 70%. На одну из поверхностей образца нанесено молниезащитное покрытие из медной луженой сетки производства завода «Текстильмаш» с предварительной термообработкой. Просвет ячеек сетки 1.0 мм. МЗП внедрено в слой эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА толщиной 1–1.5 мм. Образцы обрабатывали на экспериментальной установке, созданной на базе микроволнового излучателя «Жук-2-02» производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск Калужской обл.). Использовали по 5 контрольных образцов и подвергнутых воздействию в течение 2 минут СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц с плотностью потока энергии (ППЭ) 17×10^4 мкВт/см². При данных режимах, согласно выполненным нами ранее исследованиям [11–14], обеспечивается максимальное повышение прочности ПКМ при действии статических нагрузок.

Обработку осуществляли по следующим схемам: воздействие СВЧ электромагнитного поля со стороны поверхности, несущей МЗП; воздействие СВЧ электромагнитного поля на поверхность, противоположную поверхности с МЗП; последовательное воздействие в течение равного промежутка времени на поверхность с МЗП и затем – на противоположную поверхность.

Определяли твердость поверхности с МЗП и противоположной поверхности до обработки и после обработки в 15 точках, отстоящих друг от друга на расстояние не менее 10 мм. Точки измерений располагали в три ряда (вблизи краев образца и в средней плоскости) по 5 точек. Для измерений использовали цифровой твердомер по Шору-Д NOVOTEST ТШ-Ц (рис. 1). Результаты измерений усредняли и рассчитывали дисперсию значений. Также определяли разницу твердости поверхности до и после обработки, как отношение $[(H_{обр} - H_{контр}) / H_{контр}]100\%$, где $H_{обр}$ и $H_{контр}$ – средняя твердость поверхности в единицах Шора после и до обработки соответственно.



а



б

Рис. 1. Цифровой твердомер по Шору-Д NOVOTEST ТШ-Ц. Общий вид прибора на штативе с устройством нагружения (а). Момент измерений (б)

Т а б л и ц а 1

Изменение твердости поверхности отвержденного углепластика после обработки в СВЧ электромагнитном поле

Схема обработки образца	Измерения	До обработки		После обработки	
		Среднее	Дисперсия	Среднее	Дисперсия
Обработанный со стороны сетки	Со стороны сетки	87.1	2.93	93.2	1.49
	С противоположной стороны	96.5	0.28	95.5	0.367
Обработанный с противоположной стороны	Со стороны сетки	85.5	4.3	92.5	2.37
	С противоположной стороны	93.3	1.73	96.9	1.11
Обработанный со стороны сетки и затем с противоположной стороны	Со стороны сетки	87.2	3.06	93	2.85
	С противоположной стороны	94.2	1.24	95	0.367

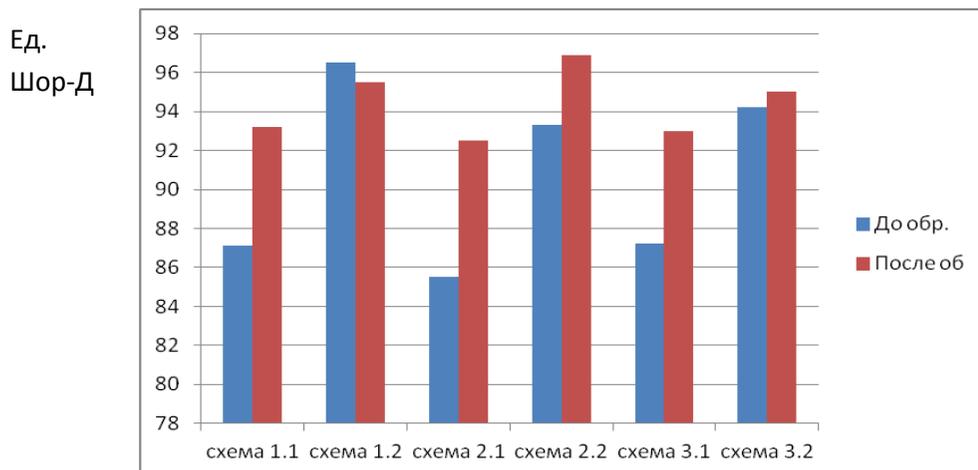


Рис. 2. Твердость поверхности образцов до обработки и обработанных со стороны сетки МЗП (1.1, 2.1, 3.1) и с противоположной стороны (1.2, 2.2, 3.2)

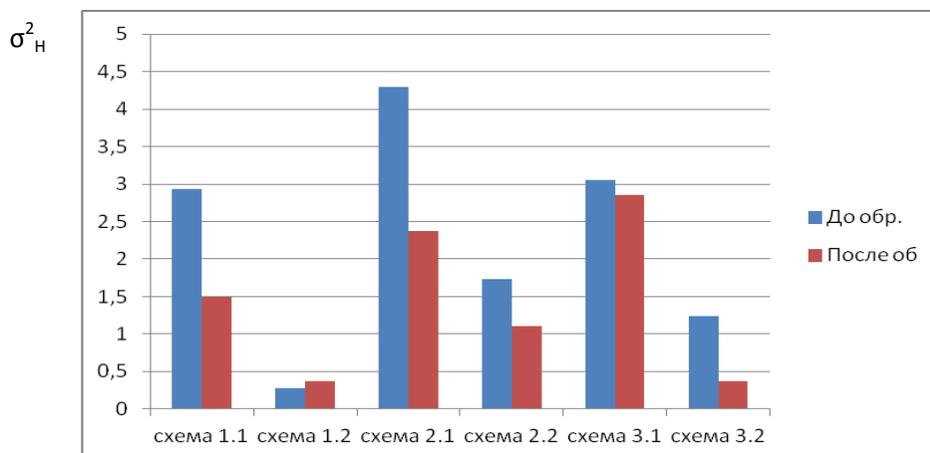


Рис. 3. Дисперсия твердости поверхности образцов до обработки и обработанных со стороны сетки МЗП (1.1, 2.1, 3.1) и с противоположной стороны (1.2, 2.2, 3.2)

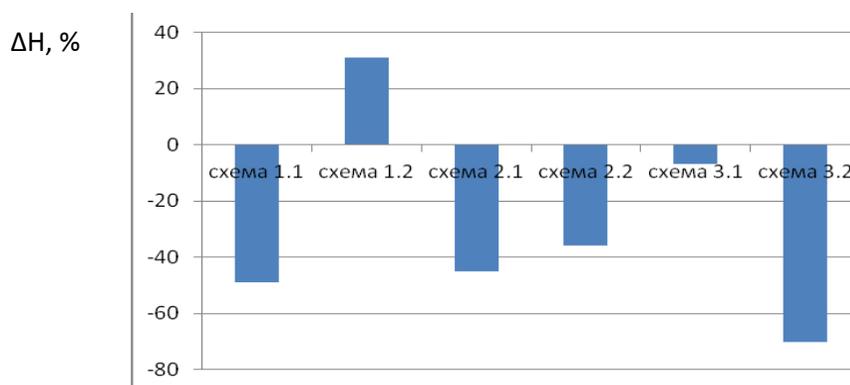


Рис. 4. Изменение дисперсии твердости поверхности образцов, обработанных со стороны сетки МЗП (1.1, 2.1, 3.1) и с противоположной стороны (1.2, 2.2, 3.2), по сравнению с исходной

Результаты и обсуждение. Результаты выполненных исследований представлены в табл. 1 и на рис. 2–4. Видно, что твердость поверхности образцов после обработки в СВЧ электромагнитном поле практически не изменилась. В целом происходит малозначимое нестабильное изменение твердости противоположной относительно МЗП поверхности углепластика после обработки в СВЧ электромагнитном поле. Отмечается увеличение твердости на 1–4% или снижение на 0.8–1%.

Наибольшие изменения – увеличение на 6–8% – касаются поверхности внешнего слоя эпоксидной смолы, покрывающей МЗП. Однако и эти значения не выходят за пределы статистической погрешности и точности прибора.

На основании полученных результатов можно заключить, что обработка в СВЧ электромагнитном поле не оказывает значимого воздействия на твердость отвержденного углепластика на эпоксидной матрице с МЗП на одной из поверхностей.

Следует отметить значительное (практически в 1.5 раза) снижение дисперсий твердости поверхности с МЗП после воздействия СВЧ электромагнитного поля. При этом изменение схемы воздействия существенно влияет на дисперсию твердости поверхности, противоположной МЗП: при воздействии со стороны сетки дисперсия твердости исследованной поверхности увеличивается более чем на 30% относительно исходной; при воздействии СВЧ электромагнитного поля на поверхность, противоположную поверхности с МЗП, дисперсия напротив, снижается на 35.8%; при двухсторонней обработке дисперсия твердости поверхности с МЗП снижается незначительно (на 7%), снижение дисперсии твердости противоположной поверхности доходит до 70%. Такой противоречивый характер изменений дисперсий твердости может быть связан со сложным переотражением электромагнитной волны от металлической структуры МЗП и углеродных волокон армирующего каркаса ПКМ, приводящих к различ-

ной степени модифицирования структуры эпоксидного внешнего слоя, покрывающего МЗП и эпоксидной матрицы основного объема материала.

Механизм повышения равномерности распределения твердости поверхности отвержденных образцов ПКМ с металлическими элементами после СВЧ обработки может быть предложен следующий. Как нами ранее установлено [14], воздействие СВЧ электромагнитного поля приводит к уменьшению размеров агломератов и пор, увеличению количества агломератов и росту фрактальной размерности их поверхности, что обеспечивает повышение количества точек контактного взаимодействия матрицы и волокон. Это способствует повышению монолитности ПКМ, равномерному перераспределению границ агломератов и пор. В результате индентор измерительного устройства оказывается чаще взаимодействующим с агломератами, чем с их границами или порами. Это приводит к выравниванию измеренной твердости материала. Относительно меньшее количество пластичной матрицы в основном объеме ПКМ приводит к меньшим изменениям структуры и соответственно к менее выраженным изменениям как абсолютных значений твердости, так и ее равномерности на поверхности без МЗП. Интенсивное выделение джоулевой теплоты в области расположения металлических элементов сеток МЗП приводит к интенсификации диффузионных процессов в контактной зоне с объемом ПКМ, некоторому размягчению матрицы. Это способствует ее более плотному контакту с данными структурами, что повышает связанность всей конструкции и ее прочность и жесткость, а также твердость и ее равномерность.

Заключение. Установлено, что обработка в СВЧ электромагнитном поле отвержденных армированных углеродными волокнами ПКМ со встроенными в поверхностный слой металлическими структурами типа сеток МЗП не вызывает изменений исходной твердости материала и соответственно не приведет к ухудшению некоторых его характеристик при упрочняющем модифицировании структуры.

Показано, что воздействие СВЧ электромагнитного поля способствует выравниванию значений твердости поверхности материала как со стороны сетки МЗП, так и с противоположной стороны. Дисперсия твердости по поверхности образца снижается в зависимости от схе-

мы обработки на 35.8–70%. Наилучшие результаты по критериям сохранения (повышения) твердости поверхности и уменьшения ее дисперсии обеспечиваются при двухсторонней обработке образцов с МЗП на одной из поверхностей, поскольку позволяют получить максимальное выравнивание значений твердости основного материала (со стороны, противоположной МЗП) и максимальное увеличение твердости. Менее значительное снижение дисперсии твердости поверхности с МЗП по сравнению с полученным с использованием других исследованных схем можно не принимать во внимание, поскольку в данном случае рассматривается твердость защищающего сетку МЗП слоя, не являющегося основным для механических характеристик конструкции.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологий финишной обработки изделий из ПКМ для повышения устойчивости последних к ударным нагрузкам.

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. Кошкин Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420> (дата обращения 03.03.2019 г.).
2. <http://compositeonline.ru/technology/3989/> (дата обращения 03.03.2019 г.).
3. https://vpk.name/news/195774_fpi_sozdat_kom_raktnogo_letayushhego_robota.html (дата обращения 03.03.2019 г.).
4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ 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.
5. Вишняков Л.Р., Зубков О.В., Коханий В.А., Коханая И.Н. Вязано-паяные проволочные сетки для молниезащиты лопастей ветрогенераторов // Технологические системы. 2014. № 1. С. 58–63.

6. Гуняев Г.М. Молниезащитные покрытия для конструкционных углепластиков, содержащие наночастицы // Все материалы: Энциклопедический справочник. 2012. № 3.

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

8. Коломейцев В.А. 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.

9. 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.

10. Inderdeep Singh Feasibility study on microwave joining of 'green' composites / Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajpaia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara // Akademeia (2011) 1(1): ea0101. Pp. 1–6.

11. Злобина И.В. Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструктивных элементов из неметаллических композиционных материалов. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2017. 164 с.

12. 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.

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

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

References

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

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

3. FPI is developing a small flying robot. Available at: https://vpk.name/news/195774_fpi_sozdat_kompaktnog_o_letayushego_robota.html (accessed March 3, 2019).

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Arkhangelsky Yu.S. Guidebook on microwave electrothermy. *Spravochnik. Saratov, Nauchnaya kniga*, 2011. 560 p.

8. Kolomeytsev V.A., Kuzmin Yu.A., Nikuyko D.N., Semenov A.E. Experimental study of the level of uneven heating of dielectric materials and the absorbed power in the microwave resonator-type devices. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2013, vol. 18, no. 12, pp. 25–31.

9. 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, no. 11, p. 33.

10. Inderdeep Singh, Pramendra Kumar Bajpaia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara. Feasibility study on microwave joining of 'green' composites. *Akademeia*, 2011, 1(1): ea0101, pp. 1–6.

11. 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 tekhnicheskii universitet*, 2017. 164 p.

12. 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.

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

14. 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.



**STUDYING THE EFFECT OF THE SCHEME OF EXPOSURE
TO MICROWAVE ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE HARDNESS
OF THE CURED CARBON FIBER-REINFORCED PLASTIC
WITH LIGHTNING-PROTECTION GRID APPLIED ON ITS SURFACE**

© I.V. Zlobina

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

Currently, the use of fiber-reinforced polymer composite materials (PCM), in particular, carbon plastic and fiberglass, is much promising in manufacturing structural elements of aircrafts and wind turbines. In order to increase the resistance of these materials to static electricity and lightning strikes when passing storm fronts, the structure of the PCM includes various lightning protection coatings (LPC). The most common LPC are in the form of copper grids. The fin assembly and planes of aircrafts and also large-sized blades of wind turbines are exposed to cyclic high-amplitude and low-frequency bending loads as well as vibrations. Collisions with solid objects are quite possible. Thus, hardness is one of the key characteristics of PCM that determines their performance properties. Strength and endurance of PCM components can be increased by short-term exposure to a microwave electromagnetic field. The presence of a built-in metallic structure brings additional uncertainty in the tolerance to operating loads by anisotropic PCM, as well as in the process of their interaction with an ultrahigh frequency electromagnetic field.

Research was performed on the hardness of carbon fiber-reinforced plastics with built-in LPC using various exposure schemes to a microwave electromagnetic field: from the side of the LPC, from the side opposite to the LPC and sequential processing from both sides. It was found that short-term processing in a microwave electromagnetic field with energy flux density of $(17-18) \times 104 \text{ mW/cm}^2$ did not lead to any change in the initial hardness of the surface of the samples. However, the uniformity of hardness distribution on the surface of the samples increased by 35.8–70%, thus ensuring a more adequate tolerance to loads of different nature. The obtained results can be used in the development of finishing technologies to post-process PCM components and improve the latter's stability to dynamic loading.

Key words: solid body, hardness, surface, polymer composite materials, lightning protection coating, microwave electromagnetic field.