

Для цитирования: Злобина И.В. Влияние микроволнового излучения на прочность отвержденных полимерных композиционных материалов с молниезащитным сетчатым покрытием малоцикловом нагружении // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (4): 42-51. DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-42-51

For citation: Zlobina I.V. Effect of microwave radiation on strength capped polymer composition materials with lightning protective retained coating low-cycle loading. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2018; 45 (4): 42-51 (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2018-45-4-42-51

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI: 10.21822/2073-6185-2018-45-4-42-51

ВЛИЯНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ОТВЕРЖДЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С МОЛНИЕЗАЩИТНЫМ СЕТЧАТЫМ ПОКРЫТИЕМ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Злобина И.В.

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая 77, Россия,
e-mail: irinka_7_@mail.ru

Резюме. Цель. Проведен анализ особенностей применения армированных волокнами различной природы полимерных композиционных материалов (ПКМ) в конструктивных элементах авиационной техники и методов повышения прочности изделий из них. Указано на положительное влияние на прочность по напряжениям изгиба и межслоевого сдвига финишной обработки отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле. Отмечено, что особенностью элементов обшивки из ПКМ является наличие в поверхностном слое встроенной металлической сетки, или молниезащитного покрытия (МЗП), необходимого для обеспечения устойчивости конструктивных элементов к воздействию разрядов атмосферного электричества. **Результат.** Проведены испытания контрольных и прошедших обработку в СВЧ электромагнитном поле образцов из ПКМ с МЗП на малоцикловую усталость при числе циклов нагружения – 60 и амплитудах деформации – 10 мм. Установлено, что в контрольных образцах с сеткой МЭУ первичная трещина появляется уже через 6 циклов. После СВЧ обработки образцы сохраняют целостность, но при этом нагрузка, вызывающая установленную деформацию, снижается на 14% уже на 35 цикле. **Вывод.** Долговечность образцов с термообработанной сеткой «Текстильмаш» и с сеткой без термообработки после воздействия СВЧ электромагнитного поля повышается соответственно на 59,5% и 71%. При этом образцы сохраняют целостность спустя 60 циклов нагружения, а максимальные напряжения снижаются по сравнению со статическими испытаниями соответственно на 13,7% и 5,8%. Предел малоцикловой усталости увеличивается после СВЧ обработки от 37 до 210%.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углеродные волокна, молниезащитное покрытие, сетка, СВЧ электромагнитное поле, малоцикловая усталость, циклические испытания.

POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING

EFFECT OF MICROWAVE RADIATION ON STRENGTH CAPPED POLYMER COMPOSITION MATERIALS WITH LIGHTNESS PROTECTIVE RETAINED COATING LOW-CYCLE LOADING

Irina V. Zlobina

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov,
77 Politehnicheskaya Str., Saratov 410054, Russia,
e-mail: irinka_7_@mail.ru

Abstract Objectives The analysis of the features of application of fiber-reinforced polymer composite materials (PCM) of different nature in the structural elements of aviation technology and methods of increasing the strength of their products. **Method** It is indicated on the positive effect on the strength of the bending stress and interlayer shear finish treatment of cured PCM in the microwave electromagnetic field. It is noted that the peculiarity of the elements of the skin of PCM is the presence in the surface layer of the built-in metal mesh, or lightning-proof coating (MFP), necessary to ensure the stability of structural elements to the effects of atmospheric electricity discharges. **Result.** The tests of the control and processed in the microwave electromagnetic field samples from PCM with MSP on low-cycle fatigue at the number of loading cycles-60 and strain amplitudes-10 mm. It was Found that in the control samples with the grid MEU primary crack appears after 6 cycles. After microwave processing, the samples retain their integrity, but the load causing the set deformation is reduced by 14% already on the 35th cycle. **Conclusion** Durability of samples with the heat-treated grid "Tekstilmash" and with a grid without heat treatment after influence of microwave electromagnetic field increases respectively by 59,5% and 71%. At the same time, the samples retain their integrity after 60 loading cycles, and the maximum stresses are reduced by 13.7% and 5.8%, respectively, compared to static tests. The limit of low-cycle fatigue increases after microwave treatment from 37 to 210%.

Keywords: polymer composite materials, carbon fibers, lightning-proof coating, mesh, microwave electromagnetic field, low-cycle fatigue, cyclic tests.

Введение. Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в производстве изделий различного назначения постоянно расширяется. Экономический эффект от снижения массы изделия за счет применения ПКМ по данным 2006 г. составляет (в долл. на 1 кг массы) для транспортных самолетов - 50÷75; пассажирских самолетов - 100÷200; истребителей 5-го поколения - 150÷200; спутников на околоземной или геосинхронной орбите - 200÷500 [1-5]. Это объясняется низкими удельными энергозатратами на их производство. Преимущества ПКМ, армированных углеродными волокнами, а также стекло- и органопластиков, позволяют прогнозировать устойчивый рост их применения в ближайшей и отдаленной перспективе особенно в аэрокосмической отрасли, ветроэнергетике и строительстве.

Свойства композиционных материалов зависят от состава компонентов, их сочетания, количественного соотношения и прочности связи между ними. Большую роль в обеспечении прочностных характеристик ПКМ играет межфазная зона «волокно-матрица», поскольку именно существенное различие в свойствах компонентов ПКМ способствует нарушению их изотропности, вызывает формирование дефектов и распространение первичных трещин в процессе действия эксплуатационных нагрузок. Чем выше прочность и модуль упругости волокон, тем выше прочность и жесткость композиционного материала, однако, тем меньше однородность физико-механических свойств, которые объективно выше в направлении армирующих волокон и значительно меньше в поперечном направлении. Это связано с тем, что в первом случае «работают» волокна, а во втором – матрица и межфазная зона. Таким образом, прочность ПКМ

при изгибе, межслоевом сдвиге и сжатии, а также сопротивление усталостному разрушению определяют в основном свойства матрицы.

Однако композиционные материалы характеризуются выраженной анизотропией физико-механических характеристик, определяемой видом и ориентацией армирующих компонентов [3, 6-8], что вызывает необходимость дополнительного усиления конструкции в некоторых опасных участках, приводя к увеличению веса. Данный факт весьма нежелателен для высокоманевренных и скоростных летательных аппаратов и требует постоянного совершенствования технологий производства армирующих компонентов и матричных материалов для ПКМ, а также схем их армирования, что представляет собой весьма сложную энергетически и финансово затратную задачу [9, 10].

На основании изложенного изучение механизмов и разработка технологий упрочняющего модифицирования окончательно отвержденных изделий из ПКМ представляет собой актуальную научно-практическую задачу.

Постановка задачи. К ПКМ, используемым в производстве авиационной техники предъявляются следующие требования: теплостойкость, водо- и атмосферостойкость, прочность при растяжении вдоль волокон, прочность при сжатии вдоль волокон, трансверсальная (поперек волокон) прочность, межслоевой сдвиг, ударная вязкость, технологичность [6]. Для несущих конструкций и обшивки крыльев и оперения особое значение имеет так называемая «малоцикловая усталость» - сопротивление усталостному разрушению при высокоамплитудных нагрузках, возникающих при турбулентности, прохождении атмосферных фронтов, выполнении фигур высшего пилотажа.

Для локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объекта из неметаллических материалов в качестве наиболее эффективного метода представляется применение микроволнового (СВЧ электромагнитного) поля, воздействие которого позволяет либо резко интенсифицировать протекание термических процессов отверждения, либо формировать на поверхности и в объеме материала уникальную совокупность свойств. Проведенный анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [11-15] показывает, что наибольшее внимание в развитии исследований в области сверхвысокочастотной обработки материалов уделяется применению микроволновых технологий 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.

Эффекты, возникающие при воздействии СВЧ электромагнитного поля на сформированные и отвержденные изделия из армированных углеродными волокнами ПКМ, изучены недостаточно, а механизмы их вызывающие не выявлены.

Нами выполнены исследования возможности повышения эксплуатационных характеристик заготовок и деталей из композиционных угле- и стеклопластиков воздействием на окончательно отвержденные ПКМ СВЧ электромагнитным полем частотой 2450 МГц в течение 2-3 минут. Установлено, что такая обработка обеспечивает при однократном статическом нагружении увеличение предельных напряжений среза в среднем на 40%, изгиба на 7-13%, межслоевого сдвига – 14-16% [16-19]. Влияние обработки ПКМ в СВЧ электромагнитном поле на сопротивление изделий малоцикловой усталости при этом не исследовалось.

Значительный объем обладающих большой площадью конструктивных элементов обшивки фюзеляжа, консолей крыла и оперения из ПКМ в современной авиационной технике содержит в поверхностном слое молниезащитное покрытие (МЗП) в виде регулярно распределенных металлических структур, например, мелкоячеистой сетки. Наличие сетки необходимо для обеспечения устойчивости к электрическим разрядам при прохождении грозовых фронтов и для стекания статического электричества, возникающего при движении летательного аппарата в атмосфере.

Известно, что металлические структуры являются эффективным экраном, отражающим электромагнитное излучение, что может привести к ослаблению отмеченных выше упрочняю-

щих эффектов при технологическом воздействии СВЧ электромагнитного поля на ПКМ, а также привести к нестабильности работы магнетрона при попадании в волновод отраженной волны. Поэтому применение СВЧ обработки ПКМ, содержащих в своей структуре встроенные металлические конструкции, в частности – сетки, нуждается в дополнительном изучении.

Целью исследований явилось изучение влияния СВЧ электромагнитного поля на циклическую изгибную прочность образцов из армированного углеродными волокнами ПКМ с МЗП, в виде встроенной в поверхностный слой металлической сетки при малом числе высокоамплитудных циклов нагружения.

Методы исследования. Использовали образцы в виде пластин длиной 70 мм, толщиной 1,8 – 1,6 мм, шириной 10,1 – 10,3 мм. Материал образцов – углепластик типа ВКУ с молниезащитным покрытием трех видов: медная луженая сетка производства «Текстильмаш» с предварительной термообработкой, медная луженая сетка производства «Текстильмаш» нетермообработанная, сетка МЭУ (Украина). Сетка снаружи покрыта одним слоем стеклопластика.

Осуществляли СВЧ обработку при частоте 2450 МГц и дистанции от поверхности образца до плоскости раскрытия излучающего рупора, равной 150 мм в течение 2 минут. Ранее при данных условиях были получены лучшие результаты по повышению прочности углепластиков по напряжениям изгиба и межслоевого сдвига [16-19].

Одновременно обрабатывали по три образца на установке «Жук-2-02» (ООО «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.).

Оборудование и стадии проведения испытаний представлены на рис. 1.

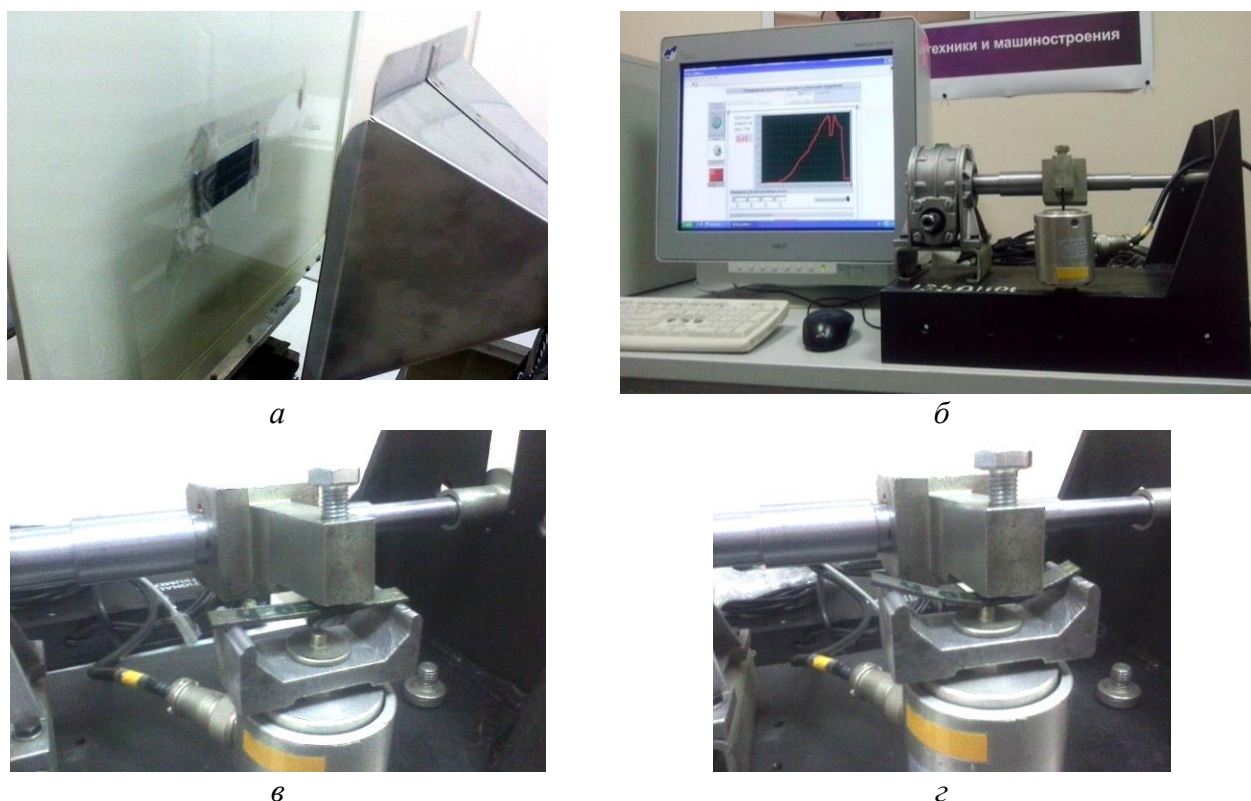


Рис. 1. Проведение экспериментальных исследований: образцы на трехкоординатном столе под излучающим рупором установки «Жук-2-02» (а); экспериментальная установка для проведения испытаний (б); начальная (в) и конечная (г) стадии циклического нагружения образца

Fig. 1. Conducting experimental studies: samples on a three-coordinate table under the radiating horn of the installation "Beetle-2-02" (a); experimental setup for testing (b); the initial (c) and final (g) stages of cyclic loading of the sample

Испытания проводили на компьютерной лабораторной установке, оснащенной тензометрическими датчиками усилий (рис. 1б).

Образец устанавливали на тензометрическом датчике на опорах специального оснащения и циклически нагружали при помощи червячного привода воздействием регулируемого упора со сферической вершиной (рис. 1 в и з).

Текущее значение сигнала датчика поступало в аналогово-цифровой преобразователь, а оттуда – в компьютер, где обрабатывалось в программной среде LabWiev (г. Орел). График нагружения выводился на экран монитора. Частота нагружений составляла 70 1/мин, амплитуда – 10 мм. Максимальное число циклов нагружений приняли равным 60 с учетом значительной стрелы прогиба (амплитуды деформации).

С целью удобства считывания информации с графика и ее анализа осуществляли нагружение по 30 циклов с отдельной записью графика каждой серии. В случае разрушения образца испытания прекращали и фиксировали число циклов, предшествовавших его разрушению.

Ввиду различий в размерах поперечного сечения образцов напряжения изгиба определяли путем вычислений и затем усредняли.

Обсуждение результатов. Кинетика нагружения контрольных образцов и образцов, подвергнутых воздействию СВЧ электромагнитного поля, представлена на рис. 2-4.

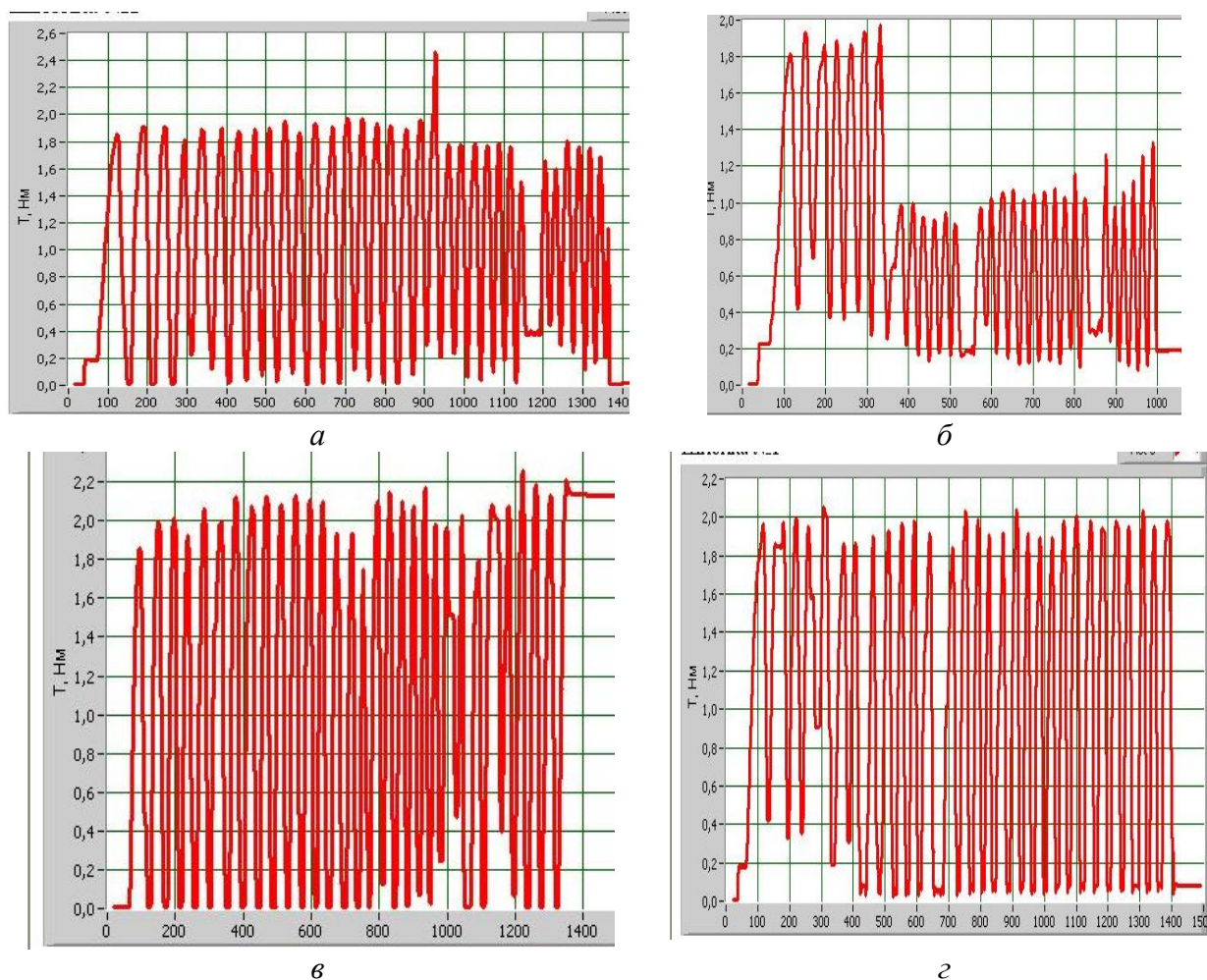


Рис. 2 Графики циклического нагружения контрольного (а, б) и обработанного (в, з) образцов из пластика ВКУ с термообработанной сеткой «Текстильмаш»

Fig. 2 Charts of cyclic loading of the control (a, b) and processed (c, d) samples from VKU plastic with heat-treated Textilmesh mesh

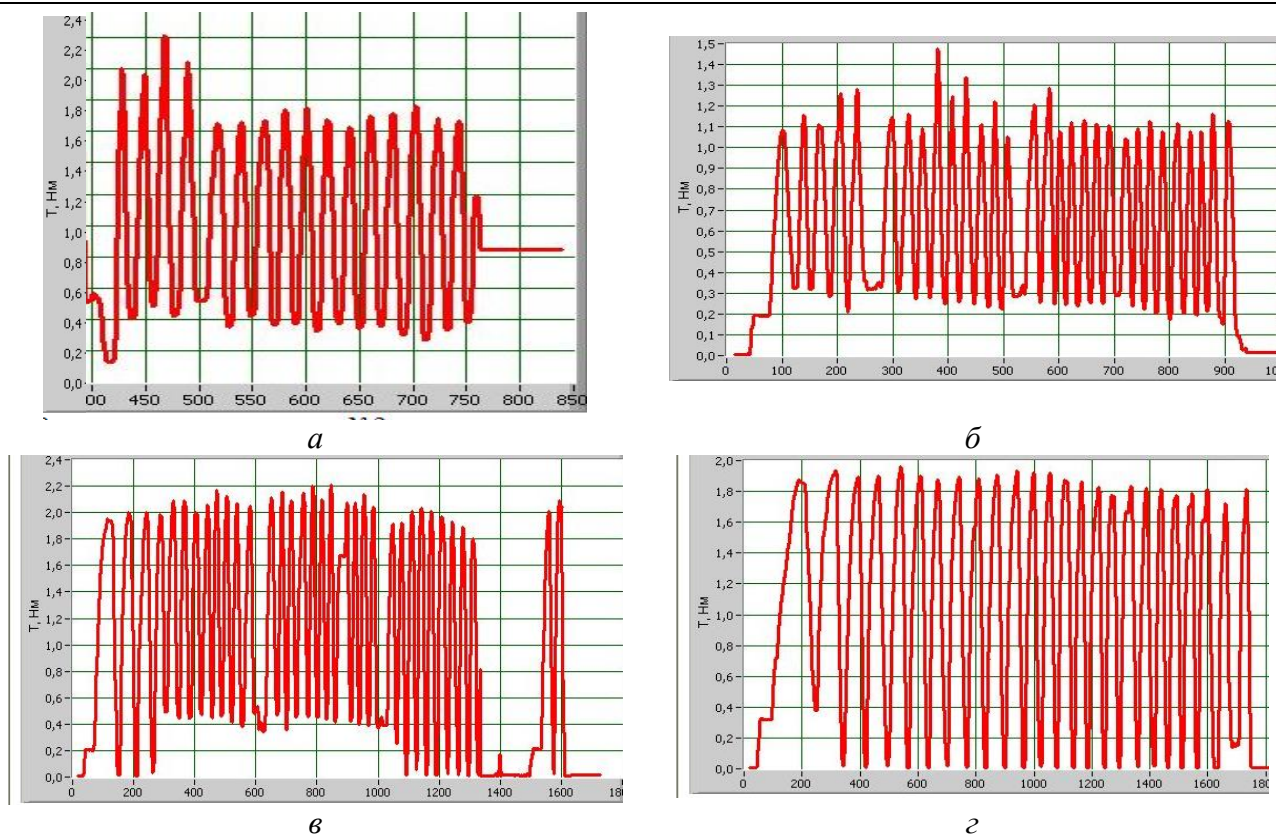


Рис. 3 Графики циклического нагружения контрольного (а, б) и обработанного (в, г) образцов из пластика ВКУ с сеткой МЭУ

Fig. 3 Charts of cyclic loading of the control (a, b) and processed (c, d) samples from VKU plastic with MEU mesh

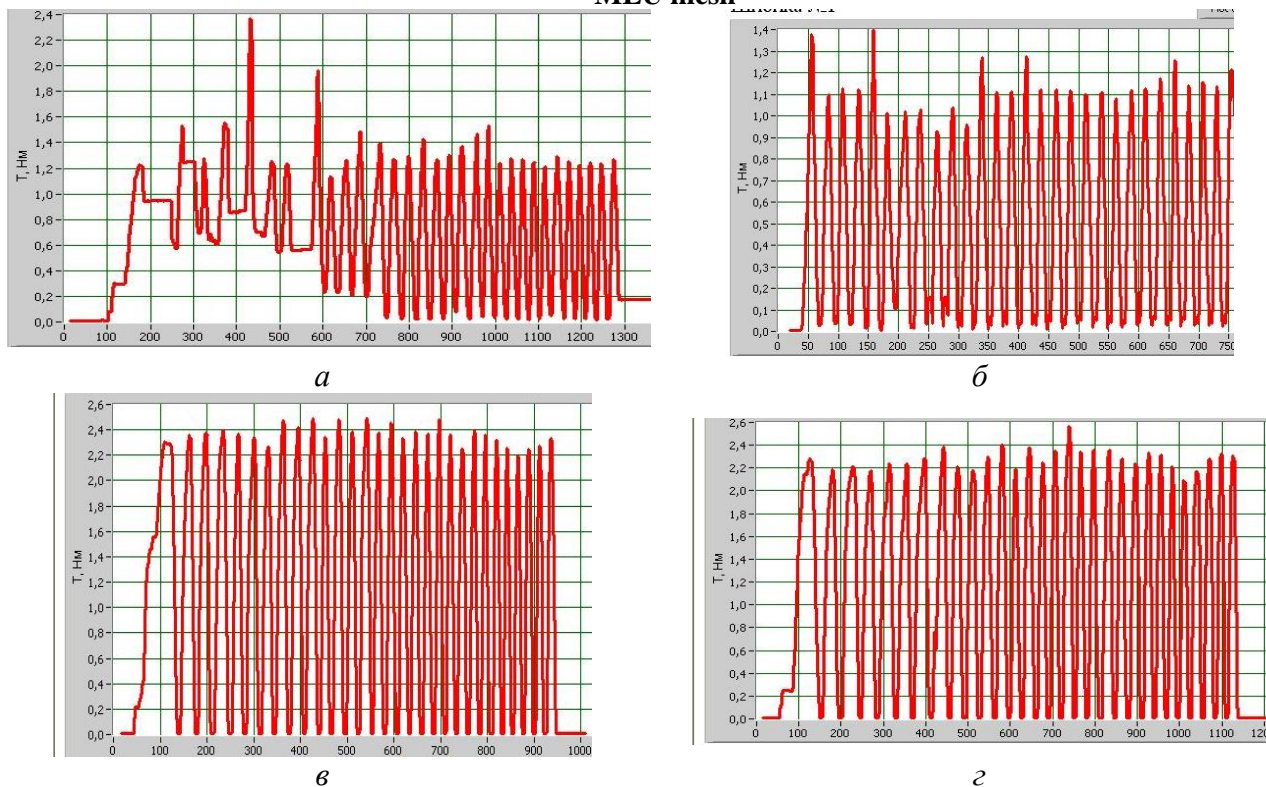


Рис. 4 Графики циклического нагружения контрольного (а, б) и обработанного (в, г) образцов из пластика ВКУ с сеткой «Текстильмаш» без предварительной термообработки

Fig. 4 Charts of cyclic loading of the control (a, b) and processed (c, d) samples from the VKU plastic with the Textilmash grid without prior heat treatment

Результаты обработки полученных графиков сведены в табл. 1.
Таблица 1. Результаты испытаний образцов из углепластика типа ВКУ на малоцикловую усталость

Table 1. The results of testing samples of CFRP type VKU on low-cycle fatigue

Образец Sample	Характеристика Characteristic				Примечание
	Статическая прочность σ_F , Н/мм ²	Циклическая прочность σ_{60} , Н/мм ²	Снижение деформирующей нагрузки, %	Долговечность, циклов	
МЗП «Текстильмаш» термообработанный. Контрольный	143,3	73,5	86	37	Трещина после 37 циклов
МЗП «Текстильмаш» термообработанный. После СВЧ	165,9	154,5	6,9	59	-
МЗП МЭУ Контрольный	155,1	81,1	46,6	6	Трещина после 6 циклов
МЗП МЭУ после СВЧ	176,4	167,5	14,6	59	-
МЗП «Текстильмаш» без термообработки. Контрольный	117,0	107,0	21	35	Трещина на 36 цикле
МЗП «Текстильмаш» без термообработки. После СВЧ	146,6	146,6	6	60	-

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. Воздействие циклического высокоамплитудного нагружения приводит к снижению предела изгибной прочности контрольных образцов на (21-86)% в зависимости от вида МЗП. Снижение прочности происходит за счет образования усталостных трещин в матрице.

При этом имеющий большую статическую прочность материал с МЗП МЭУ, оказывается менее устойчивым к циклическим нагрузкам: первичная трещина образуется в матрице уже после 6 циклов нагружения.

Трещины в материалах с МЗП производства «Текстильмаш» образуются практически после равного числа циклов (35 и 37). При этом менее статически прочный материал с МЗП, не прошедшим предварительную термическую обработку, имеет существенно большую циклическую прочность, превосходя другие материалы из исследованных на 45,6% (термообработанное МЗП «Текстильмаш») и на 32% (МЗП МЭУ). Такой результат может быть объяснен тем, что сетчатое МЗП, встроенное в поверхностный слой, выполняет дополнительную армирующую функцию при изгибной деформации. При этом более пластичная нетермообработанная сетка производства «Текстильмаш», изначально менее прочная, выдерживает большее число деформаций, что способствует увеличению предела циклической прочности образцов с таким МЗП при числе циклов – 60. По видимому, сетка МЭУ обладает высокой прочностью, но при этом имеет повышенную хрупкость, что проявляется в чрезвычайно низкой долговечности материала.

Воздействие на исследуемые материалы СВЧ электромагнитного поля приводит как к увеличению циклической прочности, так и повышению выносливости к знакопеременным нагрузкам. Трещины в матрице не образовывались спустя 60 циклов нагружения. Спустя 150 циклов появление трещин также не было зафиксировано. Снижение усталостной прочности

происходило на 59 цикле, но было незначительным и составляло от 6% до 14,6%. При этом наибольшее снижение характерно для образцов с МЗП МЭУ.

Относительно предельных напряжений, возникающих при статическом нагружении, средние за 60 циклов напряжения в образцах с МЗП из термообработанной сетки «Текстильмаш» снизились на 7,4%, в образцах с МЗП МЭУ – на 5,3%. В образцах с МЗП из нетермообработанной сетки «Текстильмаш» снижения предельных напряжений не зафиксировано. Для всех материалов отмечается увеличение предела циклической прочности: для ВКУ с МЗП из термообработанной сетки – на 210%, для ВКУ с МЗП из сетки МЭУ – на 206%, для ВКУ с МЗП из нетермообработанной сетки – на 37%. Повышение прочности исследованных материалов после обработки в СВЧ электромагнитном поле может быть объяснено увеличением модуля упругости материала матрицы за счет образования дополнительных швов в ее структуре и в межфазном слое. Некоторое снижение циклической прочности после заданного количества циклов может быть связано с появлением микротрещин как в матрице, так и в межфазном слое, не приводящих к катастрофическому разрушению с образованием макротрещин, как в случае контрольных образцов.

Наличие встроенной металлической сетки не оказывает влияния на эффективность упрочнения. Различия в значениях предельных напряжений в исследованных образцах связаны с различными прочностными характеристиками сетки, примененной в качестве основы МЗП.

Вывод. Таким образом, СВЧ обработка ПКМ с встроенным МЗП на основе металлической сетки возможно и обеспечивает значимое увеличение не только статической, но малоцикловой прочности при высокоамплитудном нагружении. По критериям малоцикловой прочности и долговечности наиболее целесообразно применять в изделиях из углепластика типа ВКУ, упрочняемых в СВЧ электромагнитном поле, молниезащитное покрытие на основе сетки производства «Текстильмаш», прошедшей предварительную термическую обработку.

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».

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.
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. Композитный мир 2011 спецвыпуск – Авиация и космос: Издательский дом «Мир композитов», -36 с. www.kompomir.ru.
5. Садовская Т.Г. Проблемы и перспективы реализации политики импортозамещения при формировании производственной кооперации по применению композиционных материалов в отечественном гражданском авиастроении на примере ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» / Т.Г. Садовская, Е.А. Лукина // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 11. С. 1-12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>.
6. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – 2-е изд. – СПб.: Научные основы и технологии. – 2010. – 822 с.
7. Brinkmann S. At al. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers. – Ed. Hanser. – 2006. – 920 p.
8. Гуняев Г.М. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г.М. Гуняев, Кривонос В.В., Румянцев А.Ф. и др. // Конверсия и машиностроение. - № 4, 2004. URL: www.viam.ru/public.
9. Гусева Р.И., Производство изделий из ПКМ в самолетостроении: учеб. пособие / Р.И. Гусева. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2013. 135 с.

10. Крыжановский, В.К. Технология полимерных материалов / А.Ф. Николаев, В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов (и др.) // СПб.: Профессия. – 2008. – 534 с.
11. Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник / Ю. С. Архангельский – Саратов : Научная книга, 2011. - 560 с.
12. 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.;
13. 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.
14. 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.
15. V.N. Studentsov, I.V.Pyataev. Effect of vibration in Processes of structure Formation in Polymers / Russian Journal of Applied Chemistry, 2014 , vol. 87, №3, p-p 352-354.- Pleiades Publishing, Ltd. 2014.
16. 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, p.p. 101-106.
17. Злобина И.В. Прочностные испытания модифицированных в СВЧ электромагнитном поле композиционных материалов / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, С.П. Павлов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. – Сер.: Механика предельного состояния, 2017, № 3 (33). – С. 42-57.
18. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials / Zlobina I.V., Bekrenev N.V. // Научные технологии. 2016. Т. 17. № 2. С. 25-30.
19. Злобина И.В. Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструктивных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография / И.В. Злобина, Н.В. Бекренев. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2017. – 164 с.

References:

1. Koshkin R.P. – Osnovnyye napravleniya razvitiya i sovershenstvovaniya bespilotnykh aviatsionnykh sistem: <http://spmagazine.ru/420>, data poslednego obrashcheniya 28.01.2017 g. [Koshkin R.P. - The main directions of development and improvement of unmanned aircraft systems: <http://spmagazine.ru/420>, the date of the last appeal 01/28/2017(in Russ.)]
2. Mirnyy M. Mirovoy rynek ugleplastikov dostignet otmetki v \$23 mlrd k 2022 godu URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, (data poslednego obrashcheniya 20.09.2016 g.). [Mirny M. The global carbon-fiber market will reach \$ 23 billion by 2022 URL: <https://mplast.by/novosti/2016-04-29-mirovoy-ryinok-ugleplastikov-dostignet-otmetki-v-23-mlrd-k-2022-godu/>, (the date of the last appeal was 20.09.2016). (in Russ.)]
3. Kablov Ye.N. Materialy i khimicheskiye tekhnologii dlya aviatsionnoy tekhniki // Vestnik Rossiyskoy akademii nauk. 2012. T. 82. №6. S. 520–530. [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 Russ.)]
4. Kompozitnyy mir 2011 spetsvypusk – Aviatsiya i kosmos: Izdatel'skiy dom «Mir kompozitov», -36 s. www.kompomir.ru [Composite World 2011 Special Issue - Aviation and Space: World of Composites Publishing House, - 36 p. www.kompomir.ru. (in Russ.)]
5. Sadovskaya T.G. Problemy i perspektivy realizatsii politiki importozameshcheniya pri formirovani proivodstvennoy kooperatsii po primeneniyu kompozitsionnykh materialov v otechestvennom grazhdanskom aviastroeni na primere OAO «Ob'yedinennaya aviastroitel'naya korporatsiya» / T.G. Sadovskaya, Ye.A. Lukina // Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii. 2014. Vyp. 11. S. 1-12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>. [Sadovskaya T.G. 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 example of United Aircraft Building Corporation / T.G. Sadovskaya, E.A. Lukin // Engineering Journal: Science and Innovation. 2014. Vol. 11. P. 1-12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>. (in Russ.)]
6. Mikhaylin, YU.A. Konstruktsionnyye polimernyye kompozitsionnyye materialy. – 2-ye izd. – SPb.: Nauchnyye osnovy i tekhnologii. – 2010. – 822 s. [Mikhaylin, Yu.A. Structural polymer composites. - 2nd ed. - SPb.: Scientific fundamentals and technologies. - 2010. - 822 s. (in Russ.)]
7. Brinkmann S. At al. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers. – Ed. Hanser. – 2006. – 920 p. [Brinkmann S. At al. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers. - Ed. Hanser. - 2006. - 920 p. (in Russ.)]
8. Gunyayev G.M. Polimernyye kompozitsionnyye materialy v konstruktsiyakh letatel'nykh apparatov / G.M. Gunyayev, Krivonos V.V., Rumyantsev A.F. i dr. // Konversiya i mashinostroyeniye. - № 4, 2004. URL: www.viam.ru/public. [Gunyaev G.M. Polymer composite materials in the structures of aircraft / G.M. Gunyaev, Krivonos V.V., Rumyantsev A.F. et al. // Conversion and engineering. - № 4, 2004. URL: www.viam.ru/public. (in Russ.)]

9. Guseva R.I., *Proizvodstvo izdeliy iz PKM v samoletostroyenii: ucheb. posobiye* / R.I. Guseva. Kom-somol'sk-na-Amure: FGBOU VPO «KNAGTU», 2013. 135 s. [Guseva, R.I., *Manufacture of articles from PCM in aircraft construction: studies. manual* / R.I. Gusev. Kom-somolsk-on-Amur: KNAGTU Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education, 2013. 135 p. (in Russ.)]
10. Kryzhanovskiy, V.K. *Tekhnologiya polimernykh materialov* / A.F. Nikolayev, V.K. Kryzhanovskiy, V.V Burlov (i dr.) // SPb.: Professiya. – 2008. – 534 s. [Kryzhanovsky, V.K. *Technology of polymeric materials* / A.F. Nikolaev, V.K. Kryzhanovsky, V.V. Burlov (and others) // SPb.: Profession. - 2008. - 534 s. (in Russ.)]
11. Arkhangel'skiy YU. S. *Spravochnaya kniga po SVCH-elektrotermii: spravochnik* / YU. S. Arkhangel'skiy – Saratov : Nauchnaya kniga, 2011. - 560 s. [Arkhangel'sky Yu. S. *Reference book on microwave electrothermal: a reference book* / Yu. S. Arkhangel'sky - Saratov: Scientific book, 2011. - 560 p. (in Russ.)]
12. Kolomeytsev, V.A. *Eksperimental'nyye issledovaniya urovnya neravnomernosti nagreva dielektriche-skikh materialov i pogloshchennoy moshchnosti v SVCH ustroystvakh rezonatornogo tipa* / V.A. Kolomeytsev, YU.A. Kuz'min, D.N. Nikuyko, A.E. Semenov // *Elektromagnitnyye volny i elektronnyye sistemy*, 2013. – Т. -18.- № 12. – S. 25-31.; [Kolomeitsev, V.A. *Experimental studies of the level of uneven heating of dielectric materials and absorbed power in microwave devices of a resonator type* / V.A. Kolomeitsev, Yu.A. Kuzmin, D.N. Nikuiko, A.E. Semenov // *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, 2013. - Т. -18.- No. 12. - P. 25-31 (in Russ.)]
13. Estel, L. *Microwave assisted polyethylene-terephthalate (PET) bottles* / L. Estel, Ph. Leb-audy, A. Ledoux, C. Bonnet, M. Delmotte // *Proceedings of the Fourth World Congress*. - 2004. - № 11. - R. 33.
14. Komarov, V. V. *Formulirovki matematicheskikh modeley protsessov vzaimodeystviya elektromagnit-nykh voln s dissipativnymi sredami v SVCH- nagrevatel'nykh sistemakh* // *Fizika volnovykh protsessov i ra-diotekhnicheskiye sistemy*. - 2010. - Т. 13. - № 4. - S. 57-63. [Komarov, V. V. *Formulations of mathematical models of the processes of interaction of electromagnetic waves with dissipative media in microwave heating systems* // *Physics of wave processes and radio-engineering systems*. - 2010. - V. 13. - № 4. - P. 57-63. (in Russ.)]
15. V.N. Studentsov, I.V.Pyataev. *The effect of vibration in polymers* / *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2014, vol. 87, No. 3, pp p 352-354.- Pleiades Publishing, Ltd. 2014
16. *Influence of the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and Z.Vlobina, I.V., Bekrenev, N.V.* // *Solid State Phenomena*. 2016. V. 870, p.p. 101-106.
17. Zlobina I.V. *Prochnostnyye ispytaniya modifitsirovannykh v SVCH elektromagnitnom pole kompozi-tsiyonnykh materialov* / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, S.P. Pavlov // *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.YA. Yakovleva*. – Ser.: *Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*, 2017, № 3 (33). – S. 42-57. [Zlobina I.V. *Strength tests of composite materials modified in a microwave electromagnetic field* / I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, S.P. Pavlov // *Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University. AND I. Yakovlev*. - Ser.: *Mechanics of ultimate state*, 2017, No. 3 (33). - pp. 42-57. (in Russ.)]
18. *The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials* / Zlobina I.V., Bekrenev N.V. // *Naukoyemkiye tekhnologii*. 2016. T. 17. № 2. S. 25-30. [*The Influence of Microwave Electromagnetic Field Effects* / Zlobina I.V., Bekrenev N.V. // *High technology*. 2016. V. 17. № 2. P. 25-30. (in Russ.)]
19. . Zlobina I.V. *Novyye konstruktorsko-tekhnologicheskkiye metody povysheniya prochnosti konstruktsi-onnykh elementov iz nemetallicheskikh kompozitsionnykh materialov: monografiya* / I.V. Zlobina, N.V. Bekre-nev. Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t, 2017. – 164 s.
[Zlobina I.V. *New design and technological methods to increase the strength of structural elements from non-metallic composite materials: monograph* / I.V. Zlobina, N.V. Bekrev-nev. Saratov: Sarat. state tech. Univ., 2017. - 164 p. (in Russ.)]

Сведения об авторах.

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

Information about the authors.

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

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию 10.11.2018.

Received 10.11.2018.

Принята в печать 15.12.2018.

Accepted for publication 15.12.2018.