И. В. Злобина, Н. В. Бекренев, И. С. Кацуба

**ВЛИЯНИЕ ОБРАБОТКИ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ
НА ИЗМЕНЕНИЕ ИЗГИБНОЙ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ОТВЕРЖДЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ**

**Саратовский государственный технический университет
им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов**

E-mail: Irinka_7_@mail.ru

Статья посвящена описанию результатов сравнительных испытаний на трехточечный изгиб образцов из углепластика, обработанных в СВЧ электромагнитном поле, после нахождения в течение 3 месяцев под действием факторов внешней среды. Показано, что воздействие внешних климатических факторов приводит к снижению изгибной прочности контрольных и опытных образцов соответственно на 3,7 и 1,4 %. При этом прочность опытных образцов повышается в сравнении с контрольными на 8 %.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, СВЧ электромагнитное поле, изгибные напряжения, прочность, углепластики, воздействие факторов внешней среды.

I. V. Zlobina, N. V. Bekrenev, I. S. Katsuba

**THE TREATMENT EFFECT IN A MICROWAVE ELECTROMAGNETIC
FIELD TO CHANGE THE FLEXURAL STRENGTH OF STRUCTURAL ELEMENTS
OF THE CURED CARBON-FIBER COMPOSITES UNDER THE INFLUENCE
OF ENVIRONMENTAL FACTORS***

Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Russia, Saratov

The article describes the results of comparative tests for three-point bending of carbon fiber samples processed in a microwave electromagnetic field after being exposed to environmental factors for 3 months. It is shown that the influence of external climatic factors leads to a decrease in the bending strength of control and experimental samples by 3.7% and 1.4%, respectively. At the same time, the strength of the test samples increases by 8% in comparison with the control ones.

Keywords: polymer composite materials, microwave electromagnetic field, bending stresses, strength, carbon fiber plastics, impact of environmental factors.

© Злобина И. В., Бекренев Н. В., Кацуба И. С., 2020.

* Исследования выполнены при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-2692.2019.8 «Выявление влияния климатических и временного факторов на проявление и сохранение эффектов микроволнового модифицирующего квазиструктурирования отвержденных полимерных композиционных материалов на примере угле- и стеклопластиков».

В настоящее время происходит рост объема потребления полимерных композиционных материалов (ПКМ) в производстве элементов различных изделий машиностроения. К ПКМ, в частности, угле- и стеклопластикам, используемым в производстве авиационной техники предъявляются повышенные требования к теплостойкости, водо- и атмосферостойкости, прочности при растяжении-сжатии вдоль волокон, трансверсальной (поперек волокон) прочности, межслоевому сдвигу, ударной вязкости [1–3]. Наиболее значимое влияние на работоспособность элементов авиационной техники оказывают процессы старения и воздействие влаги, накапливающейся в пористой структуре ПКМ. Развитие по данной причине физико-химических процессов в зонах контактного взаимодействия «матрица-волокно» и с крепежными металлическими элементами вызывает изменение эксплуатационных и, в частности, прочностных показателей конструкций из данных материалов [4]. Нами установлено, что обработка отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле обеспечивает увеличение предельных напряжений среза в среднем на 40 %, изгиба на 7–13 %, межслоевого сдвига – 14–16 % [5]. Однако, приведенные показатели были получены без учета возможных изменений под действием временно-го и климатических факторов.

Проведены сравнительные натурные испытания образцов углепластика для изучения влияния СВЧ электромагнитного поля на изменение их изгибной прочности. Использовали образцы в виде плоскопараллельных пластин размерами 80×10×5 мм. Материал образцов – углепластик и стеклопластик производства ООО «Еврокомплект, г. Калуга. Образцы разделяли на конт-

рольную и опытную группы. СВЧ обработку осуществляли на установке «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск) с камерой лучевого типа с неограниченным объемом (излучение в открытое пространство) при частоте 2,45 ГГц и плотности потока энергии 17×10^4 мкВт/см² в течение 2 минут. Контрольные и опытные образцы находились под действием факторов внешней среды в условиях г. Саратова в период с 02.11.2019 г. по 02.02.2020 г. Средняя температура в указанный период составила – 1,7 °С, влажность воздуха 82 %, атмосферное давление – 750 мм. рт. ст. Испытания на трехточечный изгиб образцов до и после воздействия факторов внешней среды проводили на компьютерной лабораторной установке, оснащенной тензометрическими датчиками усилий, с программным обеспечением LabWiev (ИП «Майоров», г. Орел).

Кинетика нагружения контрольных и опытных образцов, представлена на рис. 1 и 2. Сопоставление средних расчетных значений предельных напряжений изгиба, представленных в таблице, показывает, что в результате воздействия факторов внешней среды в течение указанного времени происходит снижение прочностных характеристик контрольных образцов на 3,7 %. Прочность опытных образцов снижается в значительно меньшей степени – на 1,4 %, что соответствует повышению данного параметра по сравнению с контрольными образцами на 8 %, что является значимой величиной. Предположительно механизм выявленных изменений заключается в уменьшении накопленного в пористой структуре опытных образцов объема воды, взаимодействие которой с материалами матрицы и волокна приводит к ослаблению связей в межфазном слое.

Рис. 1. Типичные графики нагружения контрольных образцов:

а – образец после изготовления; б – образец, после климатических испытаний в натурных условиях

Рис. 2. Типичные графики нагружения опытных образцов из углепластика:
 а – образец после изготовления; б – образец после климатических испытаний в натуральных условиях

Влияние СВЧ электромагнитного поля на предельные напряжения изгиба σ_F (МПа) углепластика после климатических испытаний в натуральных условиях

Условия испытаний	Исходный	После действия внешних факторов	Изменение параметра
Контрольный образец	112,3	108,2	0,963
Опытный образец	118,7	117,0	0,986
Изменение параметра	1,05	1,08	–

Снижение объема воды происходит вследствие установленного нами уменьшения размеров макропор и снижения открытой пористости матрицы [5], что вызывает увеличение гидравлического сопротивления, в устье пор и затрудняет проникновение в них воды. Таким образом, СВЧ обработка изделий из углепластика способствует снижению отрицательного воздействия климатических факторов внешней среды на их прочностные характеристики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. – 2-е изд. – СПб. : Научные основы и технологии. – 2010. – 822 с.

3. Гуняев, Г. М. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов / Г. М. Гуняев, В. В. Кривонос, А. Ф. Румянцев [и др.] // Конверсия и машиностроение. – 2004. – № 4. – URL: [www: viam.ru/public](http://www.viam.ru/public).

4. Славин, А. В. Свойства авиационных стеклопластиков и углепластиков на ранней стадии климатического воздействия / А. В. Славин, О. В. Старцев // Труды ВИАМ. – 2018. – № 9 (69). – С. 71–81.

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