УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868
DOI: 10.35211/1990-5297-2020-3-238-18-20

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

**ВЛИЯНИЕ ВРЕМЕННОГО ФАКТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ
ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ В СВЧ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ
ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОТВЕРЖДЕННЫХ УГЛЕПЛАСТИКОВ***

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 выдержки в течение 1,5 лет в закрытом помещении производственного типа. Установлено, что в исследованных пределах временной фактор не приводит к снижению прочностных характеристик обработанных отвержденных углепластиков. Для контрольных образцов отмечено снижение на 10,6 %. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения СВЧ технологии в качестве финишной операции в производстве изделий машиностроения из конструкционных углепластиков.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, СВЧ электромагнитное поле, изгибные напряжения, прочность, углепластики, временной фактор.

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

**INFLUENCE OF THE TIME FACTOR ON THE EFFECTIVENESS
OF THE TECHNOLOGY OF HARDENING IN THE MICROWAVE ELECTROMAGNETIC
FIELD OF STRUCTURAL ELEMENTS MADE OF CARBON FIBER REINFORCED PLASTICS**

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 exposure for 1.5 years in a closed room of the production type. It was found that the time factor does not lead to a decrease in the strength characteristics of the treated cured carbon plastics within the studied limits. For control samples, a decrease of 10.6% was observed. The results obtained confirm the feasibility of using microwave technology as a finishing operation in the production of engineering products made of structural carbon plastics.

Keywords: polymer composite materials, the microwave electromagnetic field, bending stresses, tensile strength, carbon-reinforced plastic, the time factor.

Применение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в производстве изделий различного назначения постоянно расширяется [1]. Однако, композиционные материалы характеризуются анизотропией физико-механических характеристик, что требует постоянного совершенствования технологий производства ПКМ, а также схем их армирования, что представляет собой весьма сложную и затратную задачу [2, 3]. Анализ материалов отечественных и зарубежных научных публикаций [12, 15] показывает, что эффективным методом локального управляющего воздействия на структуру и прочностные свойства трехмерного или двумерного объекта из неметаллических материалов является обработка в СВЧ электромагнитном поле. Установлено, что обработка в СВЧ электромагнитном поле в течение 1–2 минут обеспечивает увеличение предельных напряжений среза

в среднем на 40 %, изгиба на 7–13 %, межслоевого сдвига – 14–16 % [16–19]. Однако, эти показатели были получены на образцах непосредственно после воздействия на них СВЧ электромагнитного поля, без учета влияния временного фактора.

Изучали влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на изгибную прочность углепластика с учетом временного фактора.

Использовали образцы на связующем ЭД-20 со схемой армирования (0-90) в виде плоскопараллельных пластин размерами 70×10×2 мм. Образцы разделяли на две группы. В первую группу включали по пять контрольных образцов и образцов, подвергнутых обработке в СВЧ электромагнитном поле (опытных), направляемых на испытания непосредственно после изготовления. Во вторую группу включали контрольные и опытные образцы, направляемые на

© 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 временных факторов на проявление и сохранение эффектов микроволнового модифицирующего квазиструктурирования отвержденных полимерных композиционных материалов на примере угле- и стеклопластиков».

испытания после выдержки в течение 1,5 лет в производственном подвальном помещении при температурах 17–25 °С и относительной влажности 60–80 %. СВЧ обработку осуществляли на установке «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭко-Тех», г. Обнинск) на частоте 2,45 ГГц с плотностью потока энергии $(17-18) \times 10^4$ мкВт/см² в течение 2 минут. Испытания на трехточечный изгиб 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. Средние расчетные значения предельных напряже-

ний изгиба приведены в таблице. Сопоставление средних расчетных значений предельных напряжений изгиба, представленное таблице, показывает, что процесс старения углепластика путем выдержки в течение 1,5 лет в указанных условиях приводит к существенному снижению прочностных характеристик (более 10 %). Для опытных образцов констатируется мало значимое изменение (менее 2 %), что не выходит за пределы погрешности измерительной аппаратуры и процесса измерений. Анализ областей повреждения образцов выявил образование трещин в плоскости, перпендикулярной приложенной изгибающей нагрузке, и расслоения в плоскости ее действия.

Рис. 1. Типичные графики нагружения контрольных образцов:

a – образец после изготовления; *б* – образец после выдержки в производственном помещении в течение 1,5 лет

Рис. 2. Типичные графики нагружения опытных образцов из углепластика:

a – образец после изготовления; *б* – образец после выдержки в производственном помещении в течение 1,5 лет

Влияние СВЧ электромагнитного поля на предельные напряжения изгиба σ_F (МПа) углепластика с учетом временного фактора

Условия испытаний	После изготовления	После старения	Изменение параметра
Контрольный образец	146,9	131,4	Снижение на 10,6 %
Опытный образец	176,8	173,5	Снижение на 1,9 %
Изменение параметра	Увеличение на 20,3 %	Увеличение на 32,0 %	—

Для контрольных образцов характерен отрыв слоев углепластика в области растягивающих напряжений, для опытных образцов – расслоение в среднем сечении образца, что позволяет сохранить некоторую несущую способность за счет целых внешних слоев. Механизм установленного влияния СВЧ обработки отвержденного углепластика нуждается в дополнительном изучении.

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

5. Menéndez, J. A. Microwave heating processes involving carbon materials / J.A. Menéndez, A. Arenillas, B. Fidalgo, Y. Fernández, L. Zubizarreta, E.G. Calvo, J.M. Bermúdez // Fuel Processing Technology, 2010, 91 (1), 1-34.

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