УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868
DOI: 10.35211/1990-5297-2021-2-249-56-58

И. В. Злобина

**СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ
НА ИЗГИБНУЮ ДЕФОРМАЦИЮ ОТВЕРЖДЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА
ПУТЕМ СВЧ ОБРАБОТКИ***

**Саратовский государственный технический университет
им. Ю. А. Гагарина, Россия, г. Саратов
e-mail: Irinka_7_@mail.ru**

В статье рассматриваются результаты исследования изгибной деформации и ползучести под поперечной нагрузкой отвержденных полимерных композиционных материалов (ПКМ), находившихся в течение 8 месяцев в натуральных условиях внешней среды г. Саратова. Установлено, что нахождение в течение указанного времени под воздействием природных климатических факторов приводит к увеличению изгибной деформации образцов от 13,5 до 25,4 % в зависимости от нагрузки. Обработка в СВЧ электромагнитном поле частотой 2450 МГц с плотностью потока энергии $(17-18) \times 10^4$ мВт/см² в течение 2 минут снижает изгибную деформацию на (9–18) %, а ползучесть – до 4 раз.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углепластики, климатический фактор, влагопоглощение, микроструктура, изгибная деформация, ползучесть, СВЧ электромагнитное поле.

I. V. Zlobina

**REDUCING THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON THE BENDING
DEFORMATION OF CURED CARBON FIBER BY MICROWAVE PROCESSING**

Yuri Gagarin Saratov state technical University, Russia, Saratov

The article discusses the results of a study of bending deformation and creep under transverse load of cured polymer composite materials (PCM), which were located for 8 months in full-scale environmental conditions in Saratov. It was found that being under the influence of natural climatic factors for the specified time leads to an increase in the bending deformation of samples from 13,5 to 25,4%, depending on the load. Processing in a microwave electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz with an energy flux density of $(17-18) \times 10^4$ mW / cm² for 2 minutes reduces bending deformation by (9-18)%, and creep – up to 4 times.

Keywords: Polymer composite materials, carbon fiber, climate factor, moisture absorption, microstructure, bending deformation, creep, microwave electromagnetic field.

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) широко применяются в конструкциях различных технических систем, что определяется их высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью [1, 2]. Однако, при проектировании и эксплуатации изделий из ПКМ необходимо учитывать анизотропию свойств, пониженную ударную вязкость, ползучесть под длительно действующей нагрузкой [3]. Опыт эксплуатации авиационной техники и ветрогенераторных установок показывает, что наиболее значимое влияние на работоспособность их элементов оказывают процессы старения и воздействие накапливающейся в порах влаги, что вызывает снижение прочностных показателей [4]. При этом весьма важно сохранение формы конструкции и ее несущей способности в условиях

длительного силового воздействия. Поэтому актуальна разработка физических методов модифицирования ПКМ для сохранения требуемых свойств при влиянии внешней среды [5].

Исследовали влияние финишной СВЧ обработки образцов из отвержденного углепластика на их деформируемость после экспозиции в течение 8 месяцев (ноябрь 2019–июль 2020 гг.) в натуральных условиях климатической зоны г. Саратова. Использовали образцы в виде плоскопараллельных пластин размерами 70х30х5 мм из углепластика производства ООО «Еврокомплект», г. Калуга. СВЧ обработку осуществляли на установке «Жук-2-02» (ООО НПП «Агро-ЭкоТех», г. Обнинск, Калужской обл.) с камерой лучевого типа при частоте 2450 МГц и плотности потока энергии $(17-18) \times 10^4$ мВт/см²

© Злобина И. В., 2021.

* 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 течение 2 минут. Испытания проводили по стандартной (ГОСТ 32659–2014) схеме межслоевого сдвига. К пуансону прикладывали статическую нагрузку, путем установки тарированных грузов 250, 500 и 840 Н. Под действием каждой нагрузки образцы выдерживали в течение 60 минут, что давало возможность оценить стабильность деформации (ползучесть материала). Величину прогиба фиксировали в момент нагружения и по истечении указанного времени при помощи электронного прибора с индуктивным датчиком модели 214. Использовали шкалу с ценой деления 1 мкм.

Анализ полученных результатов позволяет отметить следующие особенности. Как в начальный момент приложения нагрузки, так и после 60 минут нагружения образцов в исходном состоянии (не подвергавшихся воздействию внешней среды) обработка в СВЧ электромаг-

нитном поле оказывает малозначащее (снижение не более 3 %) влияние на величину изгибной деформации во всем диапазоне нагрузок. Влияние факторов внешней среды проявляется в существенном увеличении изгибной деформации для контрольных образцов в момент нагружения на (7–11,8) %, через 60 минут – на (13,5–25,4) %. При этом для опытных образцов отмечено снижение изгибной деформации относительно контрольных соответственно на (6,7–9) % и на (6,3–18) %. Большой эффект наблюдается при максимальных из использованных значений изгибающей нагрузки. Наибольшее влияние факторы внешней среды и обработка в СВЧ электромагнитном поле оказывают на ползучесть углепластика (рис. 1), которая снижается у опытных образцов в 4 раза.

Механизм отмеченных эффектов предлагается следующий.

П, мм

Н
Н
Н

Рис. 1. Ползучесть контрольных и опытных образцов в зависимости от нагрузки с учетом влияния факторов внешней среды. П_к и П_о – исходные контрольные и опытные образцы, П_{кк} и П_{ок} – образцы после воздействия факторов внешней среды

Вследствие усадки матрицы в процессе отверждения в ее структуре и межфазном слое (МФС) возникают пустоты (поры), которые при нахождении во влажной атмосфере насыщаются влагой, приводящей к развитию коррозионных процессов, образованию гидроксильных групп и ослаблению связей в матрице, что повышает ее пластичность. Вследствие расклинивающего эффекта Ребиндера, нарушающего контактное взаимодействие упругих волокон и менее прочной матрицы, разрываются механические связи в МФС. Это приводит к повышенной деформируемости и ползучести ПКМ под

нагрузкой. Воздействие СВЧ электромагнитного поля приводит к местному повышению температуры в скин-слое углеродного волокна до значений порядка (50–70) °С, при которой согласно [6] происходит размягчение матрицы. Становятся возможными конформационные повороты звеньев больших молекул, стимулированных колебательными вращениями диполей. При повторном отверждении происходит структурообразование новых формаций с заполнением или уменьшением размеров части пустот, что подтверждается микрофотографиями (рис. 2).

Рис. 2. Микроструктура матрицы контрольного (а) и опытного (б) образцов углепластика после выдержки в условиях внешней среды. x5000

Это увеличивает сопротивление проникновению жидкости, а следовательно – способствует снижению отмеченных отрицательных воздействий внешней среды на прочность МФС и структуры матрицы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дориомедов, М. С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) / М. С. Дориомедов // Труды ВИАМ, № 6–7 (89), 2020. – С. 29–37.
2. Каблов, Е. Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники / Е. Н. Каблов // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.
3. Михайлин, Ю. А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. – 2-е изд. / Ю. А. Михайлин. – СПб. : Научные основы и технологии. – 2010. – 822 с.
4. Кириллов, В. Н. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ / В. Н. Кириллов, В. А. Ефимов, А. К. Шведкова [и др.] // Авиационные материалы и технологии, № 4, 2011. – С. 41–45.
5. Черемухина, И. В. Различные способы физической модификации армированных реактопластов / И. В. Черемухина, В. Н. Студенцов, А. Б. Мурадов [и др.] // Пластические массы. – 2007. – № 4. – С. 12–16.
6. Мошинский, Л. Эпоксидные смолы и отвердители / Л. Мошинский. – Тель-Авив : Аркадия-Пресс. ЛТД., 1995. – 371 с.