

06

## Влияние сверхвысокочастотного электромагнитного поля на межслоевую прочность в отвержденных полимерных композиционных материалах

© И.В. Злобина,<sup>1,2</sup> Н.В. Бекренев,<sup>1</sup> А.С. Егоров,<sup>3</sup> Д.И. Кузнецов,<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,  
410054 Саратов, Россия

<sup>2</sup> Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ Национального исследовательского центра „Курчатовский институт“,  
123098 Москва, Россия

<sup>3</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“  
Москва, Россия  
e-mail: irinka\_7@mail.ru

Поступило в Редакцию 10 октября 2022 г.

В окончательной редакции 23 ноября 2022 г.

Принято к публикации 23 ноября 2022 г.

Установлено, что воздействие сверхвысокочастотного электромагнитного поля с рациональной для каждого типа композита (угле-, стекло-, органопластик) плотностью потока энергии способствует увеличению удельной работы расслоения соответственно на 18,6, 12 и на 20%, что удовлетворительно коррелирует с увеличением прочности данных материалов при трехточечном изгибе и межслоевом сдвиге.

**Ключевые слова:** углепластики, стеклопластики, органопластики, расслоение, сверхвысокочастотное электромагнитное поле.

DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54498.201-22

Анализ научно-технической информации свидетельствует об интенсивном развитии производства полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных тканями на основе углеродных, стеклянных, арамидных волокон и их применения в аэрокосмической и оборонной промышленности, ветроэнергетике, а также автомобиле- и судостроении и строительстве. К 2026 году прогнозируется рост рынка качественного углеволокна с 3,9 млрд. долл. в 2019 г. до 8,0 млрд. долл., а ежегодный прирост производства стеклопластиков составляет в настоящее время 8–10% ежегодно и эта тенденция будет усиливаться [1].

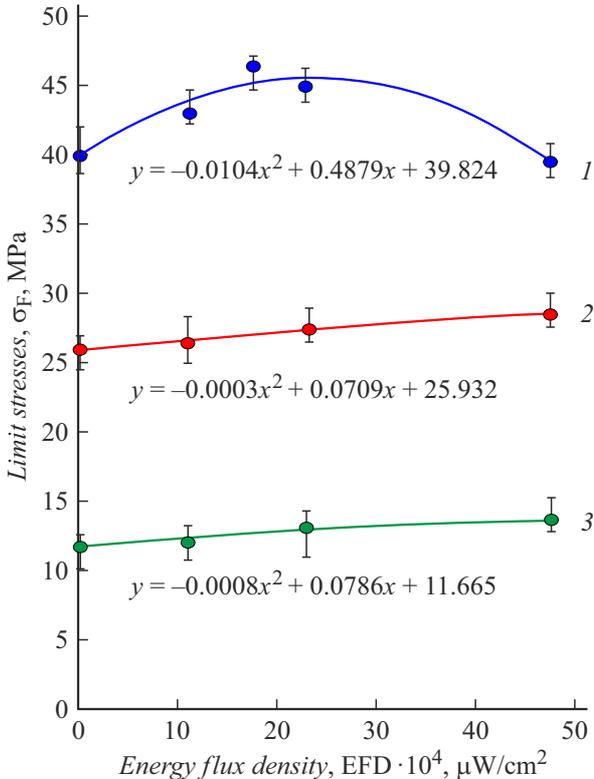
ПКМ характеризуются резким различием значений прочностных параметров в зависимости от ориентации действующих нагрузок относительно изделия и схемы армирования. Наиболее опасными с точки зрения повреждаемости изделий из ПКМ являются напряжения межслоевого сдвига, величина которых для большинства ПКМ на 1–2 порядка ниже, чем напряжений растяжения–сжатия [2,3]. Для повышения физико-механических характеристик ПКМ используются различные химические, физические, механические, электрические методы, а также конструктивные решения. Одним из перспективных методов многие исследователи считают модифицирование ПКМ в процессе отверждения путем воздействия сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля, о чем свидетельствуют результаты исследований отечественных и зарубежных ученых [4–6]. Авторы и ряд зарубежных исследователей [7,8] считают

более целесообразным использование СВЧ воздействия на окончательно отвержденные ПКМ (непосредственно на изделия), поскольку в этом случае становится возможным исключить непрогнозируемое влияние на сформированные свойства материала последующих операций технологического цикла при значимом повышении прочностных характеристик (14–16%) [7,9]. Целью настоящей работы является исследование изменений адгезионного межслоевого взаимодействия в ПКМ, как одной из составляющих механизма влияния СВЧ электромагнитного поля на повышение их физико-механических характеристик.

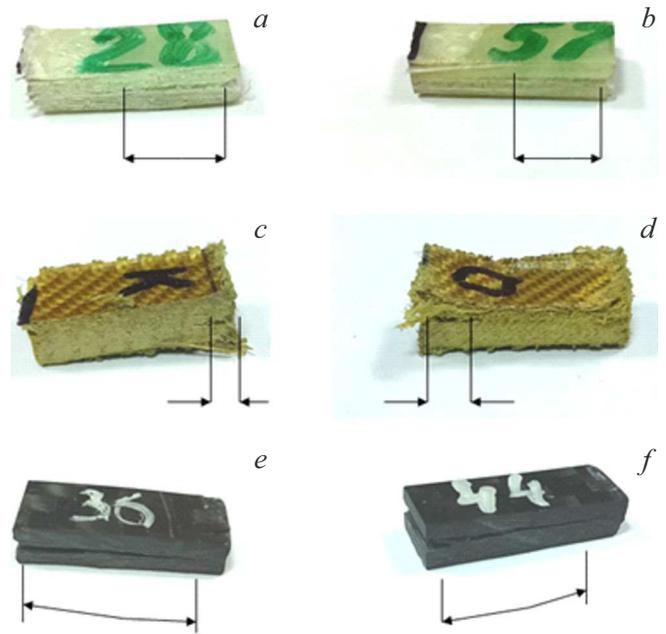
Проводили испытания образцов угле-, стекло- и органопластика на межслоевой сдвиг указанных материалов в соответствии с ГОСТ 32659-2014 и исследование микроструктуры после испытаний на расслоение по ГОСТ Р 56815-2015. Использовали образцы из углепластика и стеклопластика производства ООО „Еврокомплект“, г. Калуга и органопластика производства АО ЦВМ „Армоком“, г. Хотьково, Московской обл. размерами 25 × 10 × 5 mm. СВЧ обработку образцов осуществляли на экспериментальной установке, созданной на базе микроволнового излучателя „Жук-2-02“ производства ООО НПП „АгроЭкоТех“, г. Обнинск Калужской обл. при частоте 2450 MHz, плотности потока энергии (ППЭ) и времени, равных для углепластика (17–18) · 10<sup>4</sup> μW/cm<sup>2</sup> и 2 min, для стекло- и органопластика — (45–50) · 10<sup>4</sup> μW/cm<sup>2</sup> и 5 min. На данных режимах для углепластика характерны температуры нагрева

в диапазоне (65–70)°С, для стекло- и органопластика соответственно (35–40) и (42–45)°С и установлена максимальная эффективность СВЧ воздействия по повышению предельных напряжений трехточечного изгиба и межслоевого сдвига. Влияние СВЧ электромагнитного поля оценивали как отношение параметра опытного образца к соответствующему параметру контрольного образца.

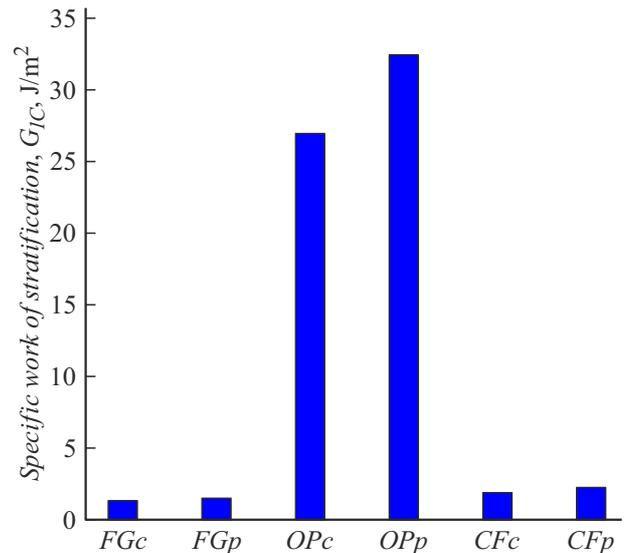
Результаты испытания контрольных и опытных образцов представлены в таблице и на рис. 1–3. Анализ полученных результатов позволяет отметить следующие особенности межслоевой прочности в ПКМ. Воздействие СВЧ электромагнитного поля способствует увеличению предельных напряжений межслоевого сдвига угле- стекло- и органопластика в среднем соответственно на 16,3; 9,6 и 15,2%. Изменение напряжений для углепластика при увеличении ППЭ носит экстремальный характер. Плотность потока энергии влияет на напряжения в углепластике в значительно большей степени, чем это отмечено для других исследованных материалов, что может быть связано с тем, что нагрев углепластика сопровождается скин-эффектом на поверхности проводящих волокон, вызывающем интенсивный рост температуры в межфазном и межслоевом пространстве ПКМ.



**Рис. 1.** Зависимость напряжений межслоевого сдвига угле- (1), стекло- (2) и органопластика (3) от плотности потока энергии СВЧ электромагнитного поля. Время воздействия 2 min. Параметрам контрольного образца соответствует значение ППЭ = 0.



**Рис. 2.** Расслоение контрольных (a, c, e) и опытных (b, d, f) образцов стекло-, органо- и углепластика.



**Рис. 3.** Удельная работа расслоения ПКМ: FG — стеклопластик, OP — органопластик, CF — углепластик. Индекс „с“ относится к контрольным, „р“ — к опытным образцам.

Для контрольных образцов всех исследованных материалов характерен относительно быстрый рост нагрузки, предшествующей повреждению, практически в прямой зависимости от времени и потеря связи между слоями (расслоение, разрушение) в течение 3–7 ms. Это может свидетельствовать об одновременном включении в работу всей находящейся в контакте с армирующим компонентом матрицы и практически одновременном разрыве межслоевых связей. Рост нагрузки в опытных образцах происходит более плавно, зависимость про-

Средние по пяти образцам значения податливости ( $C$ ) расслоения ( $G_{1C}$ )

Образец	Углепластик		Стеклопластик		Органопластик	
	$C$ , mm/N	$G_{1C}$ , J/m <sup>2</sup>	$C$ , mm/N	$G_{1C}$ , J/m <sup>2</sup>	$C$ , mm/N	$G_{1C}$ , J/m <sup>2</sup>
Контрольный	0.00118	1.99	0.00094	1.426	0.005	27.0
Опытный	0.0008	2.36	0.0009	1.608	0.0037	32.36

цесса от времени имеет криволинейный характер с коротким участком относительно быстрого увеличения и дальнейшей постепенно снижающейся интенсивностью.

Потеря связи между слоями, приводящая к расслоению, происходит в течение 30 ms для углепластика и 20–25 ms для органопластика и стеклопластика. При этом удельная работа расслоения не коррелирует с вызывающими его нагрузками и для контрольных, и для опытных образцов. Следует также отметить, что увеличение работы расслоения опытных образцов ПКМ сопровождается уменьшением их податливости, в наибольшей степени (на 32.2%) выраженной у углепластика. Характер повреждений контрольных и опытных образцов ПКМ имеет следующие особенности. Для стекло- и органопластика отмечается быстрое смыкание трещины после прекращения действия нагрузки расслоения, остаточная деформация стеклопластика в области расслоения минимальна. При этом протяженность трещины в контрольном и опытном образцах отличается мало, что, наряду с незначительным ростом нагрузки, приводит к минимальному изменению работы расслоения. Органопластик при этом характеризуется малой длиной трещины и множественными расслоениями образца в области, прилегающей к ее началу. Трещина в образцах углепластика распространяется практически на всю длину образца, расслоение характеризуется значительной остаточной деформацией с широким раскрытием трещины, что может свидетельствовать о высоком уровне внутренних напряжений между слоями композита. В целом полученные результаты, показавшие увеличение удельной работы расслоения на 12, 18.6 и 20% соответственно для стекло-, угле- и органопластика (см. таблицу), можно считать хорошо совпадающими с отмеченным выше увеличением разрушающих напряжений межслоевого сдвига.

Может быть предложено следующее объяснение полученным результатам. Особенностью термореактивной матрицы в ПКМ является необратимый характер изменений в ней при повторном нагревании, что определяет повышенную температурную стойкость данных материалов по сравнению с ПКМ на термопластичной матрице. В то же время известно [10,11], что при нагреве отвержденной эпоксидной матрицы до температуры порядка 50°C повышается ее пластичность без деструктивных изменений, а минимальная плотность достигается при температуре 80°C. При воздействии на ПКМ СВЧ электромагнитного поля матрица и армирующий компонент

нагреваются при определенных условиях до указанных значений температур. Соответственно повышается вероятность конформационных вращений звеньев макромолекул, заполнение пустот в структуре межфазного слоя (МФС), вследствие чего формируются новые области контактного взаимодействия „матрица–волокно“ в МФС при повторном отверждении. В результате происходят увеличение площади контакта в МФС и между слоями.

Полученные результаты могут иметь значение для повышения надежности и живучести элементов конструкций технических систем, выполненных из полимерных композиционных материалов, или позволить значимо снизить массу конструкции.

### Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке НИЦ „Курчатовский институт“. Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП НИЦ „Курчатовский институт“ — ИРЕА при финансовой поддержке проекта Российской Федерацией в лице Минобрнауки России, Соглашение № 075-15-2022-1157 от 16.08.2022.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] М.С. Дориомедов. Труды ВИАМ, **89** (6–7), 29 (2020).
- [2] Ю.А. Михайлин. *Конструкционные полимерные композиционные материалы* (Научные основы и технологии, СПб., 2010), 2-е изд., 822 с.
- [3] Ю.В. Василевич, К.А. Горелый, С.В. Сахоненко, С.Н. Иванов. Теоретическая и прикладная механика: международный научно-технический сборник. **31**, 67 (2016).
- [4] Ю.С. Архангельский. *Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник* (Научная книга, Саратов, 2011), 560 с.
- [5] C. Ogonna Mgbemena, D. Li, M.-F. Lin, P.D. Liddel, K.B. Katnam, V.T. Kumar, Y.H. Nezhad. Accelerated Microwave Curing of Fibre-reinforced Thermoset Polymer Composites for Structural Applications: A Review of Scientific Challenges, Composites: Part A (2018), DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.09.012

- [6] Jing Zhou, Yingguang Li, Mengchen Zhang, Eyan Xu, Tao Yang. *Materials Today Communications*, **26** 101960 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101960>
- [7] И.В. Злобина, К.С. Бодягина, С.П. Павлов, Н.В. Бекренев. *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния*, **38** (4), 34 (2018).
- [8] T. Kim, L. Jaegun, L. Kun-Hong. *Carbon Lett.*, **15** (1), 15 (2014).
- [9] I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, G.K. Muldasheva. *Studies of Microwave Electromagnetic Field Influence on Adhesion Strength of the „Matrix-Fiber“ Contact Zone on the Example of the Elementary Cell of a Certified Polymeric Composite Material Materials Science Forum V. 992. Studies of Microwave Electromagnetic Field*, (2020). p. 317–324. [doi.org /10.4028/](https://doi.org/10.4028/)
- [10] М.А. Гаврилов. *Особо плотные эпоксидные композиты на основе отходов производства: монография* (ПГУАС, Пенза, 2014), 132 с.
- [11] Л.Я. Мошинский. *Эпоксидные смолы и отвердители* (Аркадия-Пресс, ЛТД, Тель-Авив, 1995), 371 с.