

06;12

## Анализ влияния обработки в сверхвысокочастотном электромагнитном поле на межслоевое взаимодействие отвержденных полимерных композиционных материалов с различными наполнителями

© И.В. Злобина<sup>1,2</sup>, Н.В. Бекренев<sup>1</sup>, Д.О. Чуриков<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Институт химических реактивов и особо чистых химических веществ НИЦ „Курчатовский институт“, Москва, Россия

E-mail: irinka\_7@mail.ru

Поступило в Редакцию 22 августа 2022 г.

В окончательной редакции 5 октября 2022 г.

Принято к публикации 5 октября 2022 г.

Исследовано влияние воздействия сверхвысокочастотного электромагнитного поля на образцы из отвержденного угле-, стекло- и органопластика на эпоксидной матрице на прочность и изменение характера межслоевых повреждений при изгибных деформациях. Установлены увеличение предельных напряжений соответственно на 14,5, 9,1 и 11%, уменьшение размеров области расслоения в процессе деформации в 1,5–2 раза и преимущественная ее локализация во внутреннем объеме композита. В контрольных образцах отмечается выход межслоевых трещин на поверхность материала.

**Ключевые слова:** полимерные композиционные материалы, изгибная прочность, межслоевой сдвиг, повреждения, сверхвысокочастотное электромагнитное поле.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.22.53805.19346

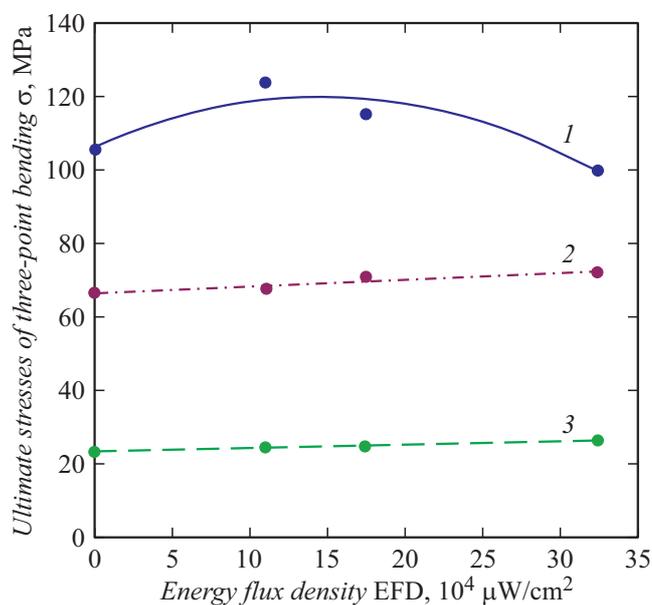
Разработка и внедрение перспективной авиационной техники требуют опережающего создания новых материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками и совершенствования технологий формообразования элементов конструкций, в том числе из полимерных композиционных материалов (ПКМ), для производства и применения которых характерен устойчивый рост [1,2]. В зависимости от функционала конструктивных элементов применяют ПКМ, армированные тканями на основе углеродных, стеклянных и арамидных волокон, — угле-, стекло- и органопластики. Несмотря на преимущества перед металлами и сплавами (прежде всего по удельной прочности), ПКМ характеризуются резким (на один-два порядка) различием значений прочностных параметров в зависимости от ориентации действующих нагрузок относительно изделия и схемы армирования [3]. Наиболее приемлемым подходом к улучшению характеристик ПКМ считается применение физической модификации в процессе реализации технологического цикла. Одним из таких перспективных методов является воздействие сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного поля на исходные компоненты и ПКМ в процессе их формирования и отверждения [4,5]. Авторами и рядом зарубежных ученых проводятся исследования СВЧ-воздействия на окончательно отвержденные ПКМ в составе конечного изделия [6,7]. В этом случае исключается непрогнозируемое влияние на сформированные свойства материала последующих операций технологического цикла. Однако механизм повышения физико-

механических характеристик ПКМ при использовании данного метода остается не до конца выявленным. Целью настоящей работы является исследование изменений предельных напряжений при трехточечном изгибе ПКМ и сопутствующего им характера повреждений на межслоевом уровне взаимодействия в зависимости от энергетических параметров СВЧ электромагнитного поля.

Были проведены испытания образцов ПКМ на трехточечный изгиб в соответствии с ГОСТ Р 57866–2017. Использовались образцы в виде балок размером  $75 \times 10 \times 5$  mm из углепластика и стеклопластика производства ООО „Еврокомплект“ (Калуга) и органопластика производства АО ЦВМ „Армоком“ (Хотьково, Московская обл.). СВЧ-обработка образцов осуществлялась на экспериментальной установке, созданной на базе микроволнового излучателя „Жук-2-02“ производства ООО НПП „АгроЭкоТех“ (Обнинск, Калужская обл.) при частоте 2450 МГц, плотности потока энергии (EPD), равной  $(10–12) \cdot 10^4$ ,  $(17–18) \cdot 10^4$  и  $(30–34) \cdot 10^4$   $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Время обработки составило 5 min. Одновременно было обработано по пять образцов каждого материала. В процессе СВЧ-обработки фиксировалась текущая температура поверхности образцов при помощи тепловизора FLIR E40. Изменения параметра оценивались по его среднему значению для пяти контрольных и опытных образцов каждого материала.

Результаты испытаний контрольных и опытных образцов представлены на рис. 1 и 2.

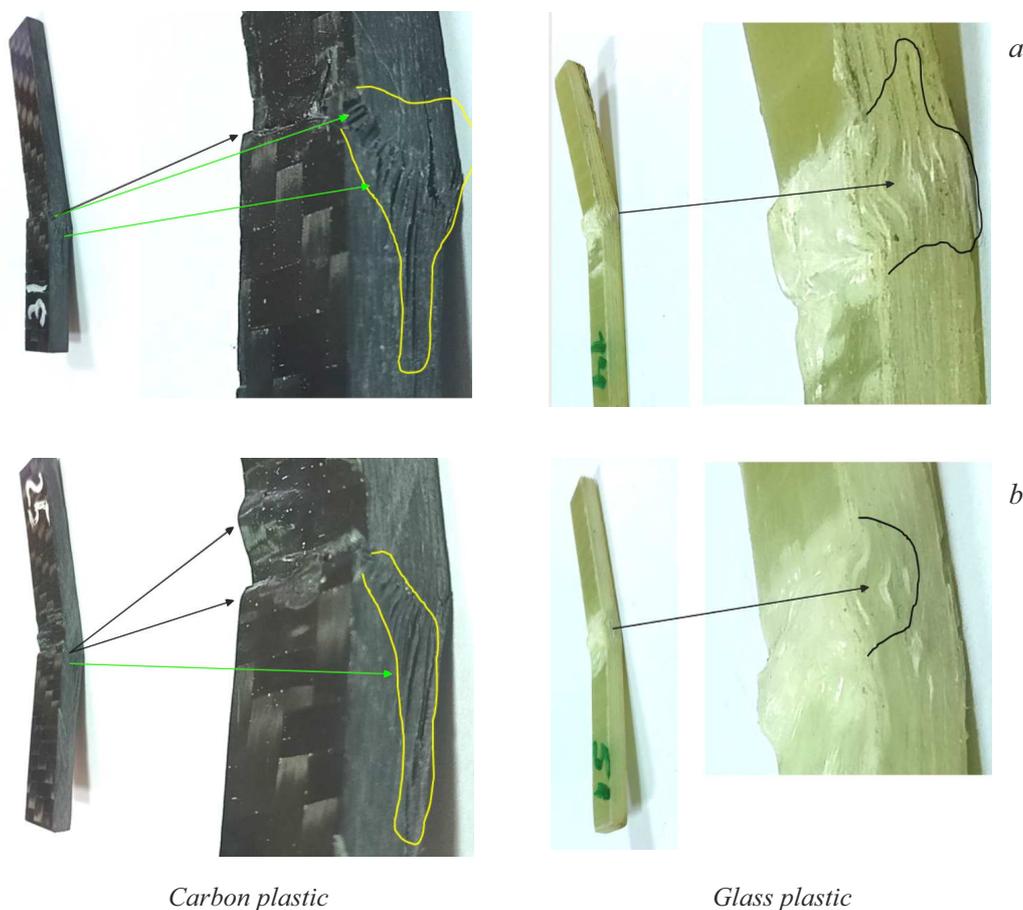
Анализ данных рис. 1 показывает, что для углепластика имеет место экстремальный характер зависимости



**Рис. 1.** Зависимость предельных напряжений трехточечного изгиба угле- (1), стекло- (2) и органо- (3) пластика от плотности потока СВЧ-энергии.

с максимумом напряжений в диапазоне значений EFD, равных  $(10-20) \cdot 10^4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Стекло- и органо-пластик характеризуются монотонно возрастающими зависимостями с увеличением EFD. В исследованном диапазоне EFD СВЧ-обработка ПКМ способствует увеличению предельных напряжений изгиба на 14,5, 9,1 и 11% для угле-, стекло- и органо-пластика соответственно. При этом температура поверхности образцов изменяется от исходной ( $20^\circ\text{C}$ ) до  $110-120$ ,  $35-40$  и  $42-45^\circ\text{C}$  для угле-, стекло- и органо-пластика соответственно. Большая интенсивность нагрева углепластика определяется скин-эффектом в проводящих углеродных волокнах. В области значений EFD, при которых зафиксирован экстремум напряжений углепластика, температура составила  $65-70^\circ\text{C}$ .

Видно, что угле- и стекло-пластик характеризуются значительной остаточной деформацией, обусловленной физико-механическими свойствами наполнителя, которая в большей степени выражена у контрольных образцов. На поверхности образцов из стеклопластика в области, прилегающей к точке приложения нагрузки, отмечаются деформации гофр и складок. Для углепластика этот эффект выражен в меньшей степени, что связано с большей несущей способностью углеродных волокон. Остаточные деформации образцов органо-пластика зна-



**Рис. 2.** Межслоевые повреждения контрольных (a) и опытных (b) образцов.

чимо не проявляются даже после воздействия нагрузки до значений стрелы прогиба 9–10 мм. На боковых поверхностях образцов угле- и стеклопластика отмечаются значительные деформации внутренних слоев в виде складок (больше характерны для стеклопластика) и местных расслоений (выражены у углепластика). При этом область таких повреждений для опытных образцов занимает площадь в 1.5–2 раза меньше, чем для контрольных. В контрольных образцах углепластика они даже выходят на поверхность. В опытных образцах расслоения локализованы преимущественно во внутренних слоях, выход на поверхность не отмечается. В стеклопластике расслоения в виде трещин менее выражены, однако в контрольных образцах появляются отдельные открытые трещины в области растяжения волокон. Органопластик характеризуется протяженными расслоениями в приповерхностных слоях в области сжатия. Указанные повреждения и дефекты могут быть объяснены когезионным механизмом разрушения, описанным в [8], что обусловлено высокоориентированной фибриллярной надмолекулярной структурой арамидных волокон [8]. Фибриллы обладают высокой прочностью и жесткостью, однако именно это приводит к макронеоднородности волокон. В процессе изгибного напряжения соседние фибриллы находятся в разном напряженно-деформированном состоянии, вследствие чего формируются дефекты в виде расщеплений и расслоений волокон на наиболее ослабленных участках. В опытных образцах вследствие увеличения сил когезионного взаимодействия фибриллы получают возможность лучше распределить нагрузку внутри волокна, и повреждения становятся менее выраженными. Таким образом, обработка органопластиков позволяет повысить адгезионную и когезионную прочность, что является значимым, если принять во внимание особенности строения и свойств их армирующих волокон.

Может быть предложено следующее объяснение полученных результатов. Известно [9], 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, как показано выше, матрица и армирующий компонент нагреваются при определенных условиях до значений температур, соответствующих или близких к указанным, что повышает вероятность конформационных вращений звеньев макромолекул и заполнения пустот в структуре межфазного слоя. Формируются новые области контактного взаимодействия матрица–волокно при повторном отверждении. В результате происходят увеличение площади контакта между слоями и соответственно повышение межслоевой прочности и прочности образца из ПКМ в целом.

## Финансирование работы

Работа выполнена с использованием научного оборудования ЦКП НИЦ „Курчатовский институт“ — ИРЕА при финансовой поддержке проекта Российской Федерации в лице Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2022-1157 от 16.08.2022 г.).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] М.С. Дориомедов, Тр. ВИАМ, № 6-7 (89), 29 (2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37
- [2] Е.Н. Каблов, Вестн. РАН, **82** (6), 520 (2012). [E.N. Kablov, Her. Russ. Acad. Sci., **82** (3), 158 (2012). DOI: 10.1134/S1019331612030069].
- [3] Ю.А. Михайлин, *Конструкционные полимерные композиционные материалы*, 2-е изд. (Научные основы и технологии, СПб., 2010).
- [4] Ю.С. Архангельский, *Справочная книга по СВЧ-электротермии* (Науч. книга, Саратов, 2011).
- [5] D. Clark, W. Sutton, *Annu. Rev. Mater. Sci.*, **26**, 299 (1996). DOI: 10.1146/ANNUREV.MS.26.080196.001503
- [6] И.В. Злобина, К.С. Бодягина, С.П. Павлов, Н.В. Бекренев, Вестн. Чуваш. гос. пед. ун-та им. И.Я. Яковлева. Сер. Механика предельного состояния, № 4 (38), 34 (2018).
- [7] T. Kim, J. Lee, K.-H. Lee, *Carbon Lett.*, **15** (1), 15 (2014). DOI: 10.5714/CL.2014.15.1.015
- [8] П.М. Шульдешева, И.С. Деев, Г.Ф. Железина, Тр. ВИАМ, № 2 (38), 94 (2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-11-11
- [9] Л. Мошинский, *Эпоксидные смолы и отвердители* (Аркадия-Пресс Лтд., Тель-Авив, 1995).