УДК 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-4-63–71

И.В. Злобина

Влияние СВЧ электромагнитного поля на упругопластические свойства волокнистого углепластика

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.;
Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77; irinka_7_@mail.ru*

В статье основе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований изучено изменение модуля Юнга армированных углеродными волокнами полимерных композиционных материалов (ПКМ) после кратковременного воздействия СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 МГц в отвержденном состоянии. В качестве модели межфазного слоя «матрица-волокно» на основе анализа микрофотографий приняты продольные ребра в элементарной трехмерной ячейке, количество которых изменяется в зависимости от состояния объекта моделирования. По результатам моделирования напряженно-деформированного состояния элементарной ячейки в программной среде Comsol констатировано увеличение модуля Юнга в матрице после воздействия СВЧ электромагнитного поля на 25,8 % и в межфазном слое – на 7,6 %. В ходе проведенных экспериментов выявлено увеличение модуля Юнга в модифицированном в СВЧ электромагнитном поле ПКМ в среднем на 16 %, что позволяет сделать вывод об удовлетворительном совпадении с результатами моделирования. Установлено снижение остаточной деформации после разгрузки модифицированных образцов более чем в 2 раза по сравнению с контрольными.

Ключевые слова: микроструктура, СВЧ электромагнитное поле, матрица, армирующее волокно, межфазный слой, компьютерное моделирование, элементарная ячейка, упругая и пластическая деформация, модуль Юнга, остаточная деформация.

Введение

Анализ тенденций развития наукоемких производств, в частности авиаракетной промышленности и энергетики, а также аналитических обзоров рынка перспективных конструкционных материалов [1, 2], позволяет сделать заключение, что наиболее динамично развиваются производство и применение полимерных композиционных материалов (ПКМ), и потребности высокотехнологичных производств в их применении сохраняются в близкой и отдаленной перспективе. Это связано с высокими прочностными характеристиками ПКМ при значительно меньшем удельном весе по сравнению с металлами и их сплавами, а также с возможностью конструировать структуру материала непосредственно при формировании изделия, в т. ч. создавать «интеллектуальные» материалы, пассивно или активно реагирующие на изменение внешних воздействий, путем конформного встраивания датчиков и изменяющих в соответствии с их информацией напряженно-деформированное состояние ПКМ структур [3, 4].

При этом следует отметить выраженную анизотропию свойств композиционных материалов, вызванную их качественным, количественным составом и структурой, что обуславливает необходимость дополнительных усилений конструкций. Данный факт весьма нежелателен для высокоманевренных и скоростных объектов, к которым относятся летательные аппараты, гоночные болиды и другая подобная техника. В связи с этим актуальными являются повышение требований к механической и термической прочности конструкционных элементов, что особенно важно для тех из них, которые

имеют сложную форму, и поиск альтернативных конструкторско-технологических методов улучшения эксплуатационных характеристик ПКМ.

Постановка задачи

Одним из способов улучшения свойств ПКМ является электрофизическое воздействие на них, осуществляемое на различных стадиях технологического цикла, характеризующееся различной степенью эффективности. В настоящее время для такого воздействия также используется СВЧ электромагнитное поле частотой 915 или 2450 МГц. Применение более высоких частот нецелесообразно ввиду резкого снижения глубины проникновения электромагнитного поля, что уменьшает равномерность воздействия. Применению меньших частот препятствует ограниченная номенклатура источников требуемой небольшой мощности и простоты эксплуатации. Данные отечественных и зарубежных литературных источников [5–7] свидетельствуют о направлении СВЧ обработки материалов для частичного замещения существующих технологий термообработки и с целью улучшения качественных показателей ПКМ на стадии. При этом достигнуты значительные результаты в повышении прочностных свойств неметаллических материалов, в частности компаундов, синтетических волокон и др., в процессе синтеза и отверждения.

Также целесообразно представляется применять СВЧ воздействие на ПКМ в ходе заключительного этапа технологического цикла, что позволит исключить возможное влияние такой обработки на процессы более ранних этапов технологического процесса. В то же время необходимо осуществлять воздействие на окончательно отвержденные композиции в качестве заключительной операции технологического цикла, что исключает негативное влияние последующих обработок на свойства ПКМ, полученные СВЧ обработкой на стадии формирования компонентов материалов. Ранее были выполнены экспериментальные исследования [8–11] влияния СВЧ электромагнитного поля на прочность отвержденных углепластиков. Установлено, что на оптимальных режимах воздействия, не вызывающих нагрев объекта обработки выше 40 ± 5 °С, предельные напряжения изгиба возрастают на 11–16 %, напряжения среза – на 13–21 %, напряжения межслоевого сдвига – на 14–15 %.

Однако для работоспособности конструкций из ПКМ, действующих в условиях динамического нагружения, наиболее важными являются их упругопластические свойства, характеризующие жесткость, способность сопротивляться изгибным и крутильным деформациям. Предварительную оценку изменения данных характеристик после модифицирующего воздействия СВЧ электромагнитного поля можно получить определением модуля упругости (Юнга) в области малых деформаций.

Цели исследований – определение влияния СВЧ электромагнитного поля на упругопроочностные характеристики и формирование гипотезы о механизме воздействия путем компьютерного моделирования.

Методика исследований

Исследовали образцы из отвержденного ПКМ марки КМКУ-1.80.Э0,1 в составе матрицы на основе клеевого связующего марки ВК-51 и наполнителя в виде углеродной ленты ЭЛУР-П-А; объемная доля наполнителя – 70–75 %. Использовали образцы в виде балок сечением 7×7 мм и длиной 75 мм. Обработку образцов осуществляли на СВЧ установке «Жук-2-02» (ООО «АгроЭкоТех» г. Обнинск Калужской обл.) с излучающим рупором размерами 200×250 мм. Частота электромагнитного поля составляла

2450 МГц, мощность магнетрона – 1200 Вт. Обработку осуществляли при плотности потока энергии 17×10^4 мкВт/см² (расстояние от образца до плоскости раскрыва излучающего рупора – 200 мм) и времени воздействия (1 мин), обеспечивающих максимальный упрочняющий эффект [10]. В зоне облучения устанавливали одновременно по 3 образца (рис. 1). Микроструктуру изучали при помощи электронного микроскопа MIRA II LMU (Tescan Ersay Holding, Чехия) в лаборатории материалов специального назначения Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского. Полученные микрофотографии транслировали в компьютерный анализатор изображений микроструктур АГПМ-6М и исследовали в программной среде Metallograph.

Испытания образцов проводили на специальной компьютерной установке с программным обеспечением LabWiev (г. Орел), оснащенной тензометрическим датчиком и механизмом нагружения. В процессе испытаний осуществляли пошаговое нагружение образца поперечной силой до максимальной деформации 0,25 мм с шагом 0,01 мм. Значения нагрузки считывали с экрана монитора установки, соответствующее значение деформации определяли при помощи индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. Схема проведения испытаний и одни из его моментов представлены на рис. 2 и 3.

На основе полученных данных по известным из механики композиционных материалов зависимостям вычисляли модуль упругости образцов.

Моделирование упругопластических свойств ПКМ проводили в программной среде *Comsol* на модели в виде элементарной трехмерной ячейки, включающей цилиндрическое волокно, окруженное матрицей. Межфазный слой представляли в виде продольных ребер, связывающих волокно с матрицей. Количество ребер в контрольном и обработанном образцах принимали на основе изучения микрофотографий структуры с количественным анализом ее изменений при помощи анализатора изображений микроструктур АГПМ-6М.

а

б

Рис. 1. Установка для модифицирования ПКМ в СВЧ электромагнитном поле: общий вид (а), образец в рабочей зоне (б)

Рис. 2 Схема испытаний: 1 – индикатор; 2 – образец; 3 – опора; 4 – тензометрический датчик, через АЦП связанный с ПК; 5 – нагружающий индентор

Рис. 3. Процесс проведения испытаний

Результаты и обсуждение

Анализ микроструктуры образцов позволил установить, что при увеличении $\times 5000$ хорошо заметны различия в межфазном слое (МФС) «матрица–волокно», характеризующие монолитность ПКМ. При увеличении $\times 10000$ выражено изменение пористости МФС обработанного образца, что проявляется в снижении размера пор. В структуре МФС контрольного образца отмечались полости сложной формы и трещины в агломератах, вызванные релаксацией термических напряжений после отверждающей термообработки. Поверхность волокон образцов, прошедших СВЧ обработку, рифленая, с продольными ребрами высотой около $0,1$ мкм, идущими с равномерным шагом, составляющим $\sim 0,5$ мкм. Такие волокна имеют больше областей взаимодействия с матрицей. Рифленая поверхность может способствовать улучшению адгезии с агломератами матрицы. Это способствует увеличению прочности материала при поперечных деформациях, в частности межслоевом сдвиге, предельные напряжения которого являются минимальными для ПКМ. Результаты анализа микрофотографий приведены в табл. 1.

Таблица 1. Изменения в элементах микроструктуры межфазного слоя обработанного образца по сравнению с контрольным

Состояние образца	Пористость, %	Средний размер агломератов, мкм	Количество агломератов в поле зрения 40 x 40 мкм	Дисперсия размеров агломератов, мкм ²
Контрольный	25	2,1	691	6,4
Обработанный	17	1,7	797	4,3
Изменение	-47 %	-23,5 %	+15 %	-49 %

На основе данных табл. 1 определено ожидаемое количество точек контакта агломератов матрицы с волокном с учетом изменения пористости и их количества: 518 для контрольного образца и 662 для обработанного. Для принятых условий эксперимента ожидаемое увеличение адгезионной прочности матрицы составляет 28 %.

На основе составленных физических и феноменологических моделей изменения микроструктуры ПКМ под действием СВЧ электромагнитного поля была выполнена визуализация в виде двумерных и трехмерных компьютерных моделей. При выполнении моделирования принято, что на границе раздела матрицы и волокна ПКМ образуется МФС, имеющий толщину h . Прочностные характеристики ПКМ в плоскости, которая перпендикулярна армированию, зависят от структуры, свойств МФС и матрицы. В качестве рабочей гипотезы предложено увеличение точек контактного взаимодействия компонентов ПКМ за счет изменения формы и размеров агломератов отвержденной матрицы под действием СВЧ электромагнитного поля.

При построении компьютерных моделей в программной среде *Comsol* была рассмотрена элементарная ячейка, в которой принято до обработки 16 точек контакта, а после обработки – 20, т. е. увеличение составило 25 %, что близко к усредненным экспериментальным данным, указанным выше – 28 %.

Трехмерная модель элементарной ячейки (рис. 4) была построена в виде параллелепипеда, заполненного матрицей с размещенным в среднем сечении волокном. Отношение поперечного размера к продольному принято 1:5 и 1:50.

Рис. 4. Модель элементарной ячейки ПКМ с соотношением размеров 1:50 1 – МФС, 2 – волокно, 3 – матрица

В качестве модели МФС приняты ребра прямоугольного сечения, соединяющие матрицу с волокном. Результаты расчетов для ячейки 1:50 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Изменение модуля Юнга в элементарной ячейке ПКМ после воздействия СВЧ электромагнитного поля

Элемент ПКМ	Модуль Юнга, ГПа		
	До обработки	После обработки	Изменение параметра
Матрица	1,47	1,85	+ 25,8 %
Волокно	230	230	0
МФС	1,7	1,83	+ 7,6 %

Таким образом, на основе компьютерного моделирования с учетом допущений, принятых по результатам анализа микрофотографий структуры исследуемого ПКМ, установлено, что наибольший вклад в повышение модуля Юнга вносят изменение структуры матрицы и увеличение адгезионного взаимодействия между ее фрагментами. Влияние межфазного слоя менее выражено, но в то же время может учитываться при оценке работоспособности конструктивных элементов из армированных волокнами ПКМ.

Типичные графики нагружения деформируемых образцов представлены на рис. 5 (а, б), зависимость величины деформации от нагружающей силы – на рис. 6.

Рис. 5. Графики нагружения образцов ПКМ: контрольный (а), обработанный (б)

Выполненные расчеты позволили определить среднее значение модуля Юнга для контрольных образцов – 81 ГПа, для прошедших обработку в СВЧ электромагнитном поле – 94 ГПа. Таким образом, увеличение упругости, характеризующей жесткость образцов после обработки в СВЧ электромагнитном поле, составило 16 %, что удовлетворительно согласуется с полученными в процессе компьютерного моделирования результатами.

При снятии нагрузки установлено значимое снижение остаточной деформации обработанных образцов. Если остаточная деформация контрольных образцов находилась в диапазоне 0,05–0,04 мм, то обработанных – 0,02 мм, то есть обработанные образцы характеризуются меньшей, в 2,25 раза, пластичностью. Соответственно конструкционные элементы из ПКМ после СВЧ модифицирования будут иметь улучшенные характеристики по сохранению формы и расположению поверхностей, что повысит надежность конструкции и точность сопряжений.

Рис. 6. Зависимость упругой деформации δ от нагружающей силы P : 1 – обработанный образец, 2 – контрольный образец

Отмечено снижение на 20–21 % дисперсии нагружающей силы, соответствующей максимальной (0,25 мм) деформации после обработки образцов в СВЧ электромагнитном поле. Данный факт можно считать свидетельством повышения однородности восприятия нагрузок и соответственно повышения прогнозируемости поведения конструкций в условиях эксплуатации.

Заключение

Исследование прочностных характеристик армированных углеродными волокнами ПКМ в области малых упругих деформаций подтвердило установленный ранее нами положительный эффект кратковременного воздействия на их структуру СВЧ электромагнитного поля после окончательного отверждения. Установлено увеличение модуля упругости обработанного ПМ на 16 % при уменьшении остаточной деформации более чем в 2 раза.

Моделирование структуры ПКМ в виде элементарной ячейки с ребрами связи матрицы и волокна с учетом установленного экспериментально увеличения количества возможных точек их контакта выявило увеличение после СВЧ обработки материала модуля упругости матрицы на 25,8 % и межфазного слоя на 7,6 %, что удовлетворительно совпадает с результатами эксперимента.

Учитывая полученные при моделировании результаты, механизм воздействия СВЧ электромагнитного поля на отвержденные ПКМ можно представить следующим

образом. Воздействие поля СВЧ диапазона на диэлектрические материалы вызывает поляризацию их молекул, образующих колеблющиеся диполи, которые стремятся выстроиться вдоль силовых линий и формируют кластеры, увеличивающие площадь контактной поверхности элементов матрицы и в системе «матрица-наполнитель». Влияние на межкомпонентные связи способствует увеличению числа контактных точек, «залечиванию» микродефектов, сформировавшихся при отверждении материала. Приведенный механизм обуславливает возможность варьирования свойств отвержденных ПКМ за счет воздействия СВЧ электромагнитного поля.

Исследования выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-79-00240 «Раскрытие механизма взаимодействия микроволнового излучения с отвержденными полимерными композиционными материалами на основе углеродных волокон в сочетании с внедренными в поверхностный слой связанными металлическими элементами, периодически распределенными в плоскости армирования наполнителем, применительно к конструкционным элементам авиационных робототехнических комплексов».

Литература

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. – 2015. – № 1 (34). – С. 3–33.
2. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 520–530.
3. Интеллектуальные полимерные композиционные материалы (https://viam.ru/intelligent_polymer: дата последнего обращения 10.02.2019 г.).
4. Интеллектуальные материалы (<https://helpiks.org/7-71026.html>: дата последнего обращения 10.02.2019 г.).
5. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник. – Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.
6. Коломейцев В.А., Кузьмин Ю.А., Никуйко Д.Н., Семенов А.Э. Экспериментальные исследования уровня неравномерности нагрева диэлектрических материалов и поглощенной мощности в СВЧ устройствах резонаторного типа // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – Т. 18, № 12. – С. 25–31.
7. Калганова С.Г. Электротехнология нетепловой модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле. дис. ... д. тех. н. – Саратов: Саратов. гос. тех. ун-т, 2009.
8. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The Influence of Microwave Electromagnetic Field on Mechanical Properties of Composite Materials // Наукоемкие технологии. – 2016. – Т. 17, № 2. – С. 25–30.
9. Zlobina I.V., Bekrenev N.V. The influence of electromagnetic field microwave on physical and mechanical characteristics of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) structural // Solid State Phenomena. – 2016. – V. 870. – P. 101–106.
10. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Muldasheva G.K. Increasing of the endurance of polymeric construction materials with the multilevel hierarchical structure in the microwave electromagnetic field // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1783. – P. 020236-1–020236-4.

11. Злобина И.В., Бекренев Н.В. Исследование микроструктуры конструкционных слоистых углепластиков, модифицированных путем электрофизических воздействий // Вестник РГАТУ. – 2017. – № 1 (40). – С. 236–242.

Поступила в редакцию 18 мая 2020 г.

UDC 621-039-419; 620.22-419; 537.868

DOI: 10.21779/2542-0321-2020-35-4-63–71

The Impact of Microwave Electromagnetic Field on the Elastic-plastic Properties of the Fibrous Carbon

I.V. Zlobina

Saratov State technical University named after Yu.A. Gagarin; Russia, 410054, Saratov, Politechnicheskaya sr., 77; irinka_7_@mail.ru

On the basis of computer modeling and experimental studies, the change in Young's modulus of carbon fiber-reinforced polymer composite materials (PCM) after a short-term exposure to microwave electromagnetic field with a frequency of 2450 MHz in the cured state was studied. As a model of the matrix-fiber interfacial layer on the basis of microphotography analysis, longitudinal edges in an elementary three-dimensional cell are taken, the number of which varies depending on the state of the modeling object. According to the results of modeling the stress-strain state of the unit cell in the Comsol software environment, the Young's modulus in the matrix was increased by 25.8 % after exposure to the microwave electromagnetic field and by 7.6 % in the interfacial layer. The experiments revealed an increase in the Young's modulus in the modified microwave electromagnetic field of PCM by an average of 16 %, which leads to a conclusion about a satisfactory agreement with the simulation results. The reduction of residual deformation after unloading of modified samples was found to be more than 2 times compared to the control ones.

Keywords: microstructure, microwave electromagnetic field, matrix, reinforcing fiber, interfacial layer, computer simulation, elementary cell, elastic and plastic deformation, Young's modulus, residual deformation.

Received 18 May 2020