

Влияние частоты СВЧ электромагнитного поля на особенности поверхности повреждения в процессе прочностных испытаний углепластиков на термореактивном и термопластичном связующем

Influence of microwave electromagnetic field frequency on the characteristics of the damage surface during strength testing of thermosetting and thermoplastic CFRPs

И.В. ЗЛОБИНА^{1,2}, Н.В. БЕКРЕНЕВ¹, Р.Р. САЙФУТЯРОВ²

I.V. ZLOBINA^{1,2}, N.V. BEKRENEV¹, R.R. SAIFUTYAROV²

¹ Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

² Национальный исследовательский центр Курчатовский институт, Москва, Россия

¹ Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

² National Research Center Kurchatov Institute, Moscow, Russia

irinka_7_@mail.ru

Выполнено сравнительное исследование влияния СВЧ электромагнитного поля частотой 915 и 2450 МГц на изменение структуры поверхности повреждения при испытании на межслоевой сдвиг образцов отвержденного углепластика, сформированных по технологии FDM из композитных филаментов на основе суперконструкционного термопласта РЕЕК и методом вакуумной инфузии на основе термореактивной смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА.

Показано, что, независимо от вида связующего, СВЧ воздействие способствует уменьшению объема пустот, образованных в результате отслоения матрицы от наполнителя в ходе испытаний. При этом наибольший эффект (в 2 и более раз) обеспечивается для эпоксидного связующего на частоте 2450 МГц. Для связующего РЕЕК влияние частоты излучения менее выражено, и в исследованном диапазоне температур его можно считать мало значимым.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, углепластики, СВЧ электромагнитное поле, частота, плотность потока энергии, равномерность параметров, трехточечный изгиб, ударная вязкость, поверхность повреждения, микроструктура

A comparative study of the effect of microwave electromagnetic fields with frequencies of 915 and 2450 MHz on changes in the structure of the damage surface during interlayer shear testing of cured carbon fiber reinforced plastic samples formed using FDM technology from composite filaments based on PEEK superstructural thermoplastic and by the vacuum infusion method based on ED-20 thermosetting resin with PEPA hardener was performed.

It was shown that regardless of the type of binder, microwave exposure helps to reduce the volume of voids formed as a result of delamination of the matrix from the filler during testing. The greatest effect (2 or more times) is achieved for the epoxy binder at a frequency of 2450 MHz. For the PEEK binder, the effect of the radiation frequency is less pronounced and in the studied temperature range it can be considered insignificant.

Keywords: polymer composite materials, carbon fiber reinforced plastics, microwave electromagnetic field, frequency, energy flux density, uniformity of parameters, three-point bending, impact toughness, damage surface, microstructure

DOI: 10.35164/0554-2901-2026-01-6-11

Введение

В настоящее время существует устойчивый рост применения полимерных композиционных материалов (ПКМ) в транспортном и энергетическом машиностроении, прежде всего в авиационно-космической технике. Преимуществом ПКМ является то, что их свойства и структура формируются одновременно с формообразованием детали путем послойной выкладки. Это позволяет конструировать материал непосредственно с учетом технических требований к изделию. Однако в производстве изделий из ПКМ по-прежнему велика доля ручного труда, что создает предпосылки к нестабильности полученных свойств [1–8]. Использование аддитивных технологий (3D печать) изготовления изделий с одновременным армированием слоев непрерывным волокном (аналог – процесс FDM) является важным резервом автоматизации производства конструктивных элементов из ПКМ [9–13]. Однако изделия, полученные этим методом, отличаются невысокой прочностью, особенно на сдвиг и на отрыв одного слоя от другого. Также в настоящее время особенности технологии FDM позволяют обеспечить невысокий коэффициент заполнения изделия армирующим компонентом в пределах 11–30%, в то время как оптимальным считается 60–70%. При этом районы и сферы применения ПКМ постоянно расширяются. В частности, в связи с повышенным вни-

манием многих стран к освоению региона приполярных областей и Арктики возникает потребность использования имеющихся преимуществ ПКМ в указанном регионе нашей планеты. Основной проблемой, с которой сталкиваются эксплуатирующие организации в таких холодных и суровых условиях, является понимание поведения ПКМ и конструкций из них при значительных отрицательных температурах [14–16]. Многочисленные исследования показывают, что экстремальные внешние воздействия являются дополнительным деструктивным фактором, наряду с технологическими дефектами, приводящими к высоким остаточным напряжениям и пониженной вязкости разрушения.

Изложенное стимулирует как расширение исследований в области синтеза новых связующих для ПКМ и аппретов, улучшающих взаимодействие волокон с матрицей, так и разработку конструкторско-технологических методов повышения физико-механических и эксплуатационных свойств изделий из ПКМ на стадии формирования, в том числе аддитивными методами, а также постобработки.

Постановка задачи

Российскими и зарубежными учеными установлено, что одним из эффективных методов повышения физико-механических и эксплуатационных свойств композитов является физическая модифи-

кация путем воздействия на материал СВЧ электромагнитного поля, ультрафиолетового излучения и других процессов воздействия [17–22]. Однако указанные исследования и технические решения относятся к методам обработки компонентов и процессам, протекающим на стадии отверждения ПКМ. Выполнены исследование и разработка новых высокоэффективных СВЧ устройств лучевого типа для термообработки материалов, моделей и методов их расчета, полученные результаты использовались в технологических процессах производства строительных материалов [22]. При этом исследованы процессы поглощения СВЧ энергии объемными материалами с различными диэлектрическими потерями в зависимости от типа облучающих антенн, разработаны методы построения и реализации новых конструкций СВЧ устройств лучевого типа для формирования заданного распределения температуры по объему материалов. Изучено влияние модифицирующего не-теплого воздействия СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства полимерного волокнистого материала на примере поликапроамидных нитей [23]. Исследованы особенности формирования структуры эпоксидных компаундов в процессе СВЧ отверждения, разработаны технологические рекомендации и обоснован выбор параметров управления процессом отверждения [24]. Исследован процесс отражения и поглощения СВЧ излучения полимерными композиционными материалами с учетом ориентации армирующих волокон относительно плоскости E- и H-волны [25]. Исследованы закономерности СВЧ нагрева отвержденных ПКМ [26], показана сложность и многофакторность процесса взаимодействия СВЧ электромагнитного поля с ПКМ на эпоксидном связующем, приводящая, наряду с ускорением процесса отверждения, к возникновению локальных перегревов и даже местным повреждениям волокон [27].

Начиная с 2015 г. в СГТУ имени Ю.А. Гагарина авторами данной статьи развивается направление упрочняющей модификации отвержденных ПКМ, прежде всего, на термореактивных связующих в составе конечного изделия, что, в отличие от большинства разработок в области СВЧ технологии, исключает отрицательное влияние на достигнутые эффекты последующих технологических операций в случае проведения модификации в процессе формирования или отверждения композиции. В ходе ранее выполненных исследований [28–30] авторами установлено, что СВЧ воздействие частотой 2450 МГц на окончательно сформированные (отвержденные) образцы армированного углеродными волокнами полимерного композиционного материала при использовании рациональных режимов обеспечивает увеличение напряжений межслоевого сдвига на 16–18 %, модуля упругости – на 14–20 %. Эти эффекты достигаются при СВЧ нагреве материала до 60–70 °С [31, 32]. Исследования по СВЧ воздействию на отвержденные композиционные системы проведены также рядом зарубежных ученых [33, 34], однако они не затрагивали вопросы упрочняющего модифицирования. Исследована только кинетика нагрева и распределение температурных полей в материале, в том числе с учетом ориентации волокон относительно вектора E-волны [35, 36].

Упомянутые исследования большей частью касались изделий из ПКМ, полученных методом прессования или инфузии. В связи с повышенным вниманием разработчиков к применению в качестве связующих для ПКМ термопластичных высокопрочных и термостойких полимеров, так называемых «суперконструкционных», начаты работы по применению в технологиях FDM композитных филаментов на основе полиэфирэфиркетона (РЕЕК), в том числе по изучению влияния на их свойства микроволнового излучения [37]. Показано, что быстрая (≤ 20 с) постобработка изделий из наполненного углеродным волокном РЕЕК, напечатанных на 3D-принтере с использованием микроволнового излучения, значительно повышает модуль упругости: с 2,3 ГПа до 2,7–3,8 ГПа. При этом на эффект повышения прочности оказывает влияние ориентация изделия в процессе печати и СВЧ воздействия.

В то же время не рассматривалось применение с целью упрочнения ПКМ более низких промышленных частот излучения, например, 915 МГц, которые имеют значительно большую глубину проникновения [21] и, соответственно, могут оказаться более приемлемыми для модификации объектов трехмерной печати, отличающихся объемной конструкцией сложной формы. Не проведено

сопоставление эффективности СВЧ-модификации на различных частотах применительно к термопластичным и термореактивным полимерным связующим.

С учетом устойчивых тенденций использования композитов в аддитивном производстве и их применения в арктическом материальном обеспечении этот вопрос требует отдельного изучения.

Согласно исследованиям авторов данной статьи, основным механизмом влияния СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства отвержденных ПКМ является временный переход матрицы под действием диэлектрического нагрева в пластичное состояние, которое повышает вероятность конформационных переходов звеньев макромолекул полимера, а также усиление физического взаимодействия в области межфазного слоя (МФС) вследствие энергетической активации и конфигурационных изменений микроструктуры. Происходит увеличение числа точек контактного взаимодействия в области «матрица–волокно» и рост площади поверхности с усиленным взаимодействием. Соответственно, основным фактором повышения физико-механических свойств является повышение интегральной температуры вследствие поглощения падающего СВЧ излучения. При этом значения температуры не должны достигать уровня начала деструктивных изменений в термореактивной матрице [31]. Установлено, что изменение температуры СВЧ нагрева ПКМ существенно влияет на эффективность повышения физико-механических свойств материалов. На примере прессованного образца углепластика показано, что данная зависимость носит экстремальный характер для напряжений трехточечного изгиба и, что важно в свете указанного выше главного недостатка объектов 3D-печати, межслоевого сдвига (рис. 1) [38, 39].

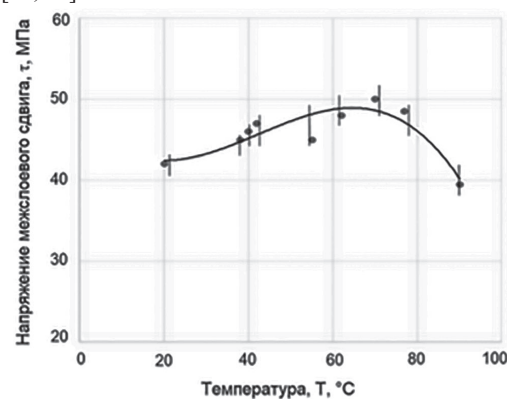


Рис. 1. Зависимость изменения напряжений межслоевого сдвига от температуры СВЧ нагрева для контрольного образца (связующее ЭД-20 + ПЭПА).

Показано, что при превышении определенного уровня температуры возможно снижение эффекта и даже уменьшение прочности относительно контрольных образцов.

При этом оценка проявлений описанного в [31] механизма в приложении к ПКМ на термопластичном связующем с высокой температурой плавления (у РЕЕК от 430 °С до 450 °С) практически не рассматривалась. Данный вопрос является весьма важным, поскольку переход РЕЕК в пластичное состояние возможен при температурах от 300 °С до 320 °С, достижение которых при СВЧ-диэлектрическом нагреве, зависящем прежде всего от уровня поглощенной мощности, определяемой соотношением диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$, возможно либо при значительной падающей мощности излучения, либо при большой длительности воздействия, что может оказаться экономически нецелесообразным на практике.

В конечном итоге изменение прочности при сдвиге будет определяться величиной сил взаимодействия волокон наполнителя и полимера матрицы. В связи со сложностью реализации метода выдергивания волокна (*pull out*), а также его низкой адекватностью реальным процессам в композите при приложении сдвигающих нагрузок, представляется целесообразным оценивать изменение сил взаимодействия полимера и наполнителя по РЭМ микрофотографиям поверхности повреждения, образовавшейся в ходе испытаний. В этом случае площадь поля зрения, занятая матрицей, будет соответствовать матрице, сохранившей связь с наполнителем,

и покажет изменение силы взаимодействия компонентов ПКМ, и соответственно, позволит сделать вывод о проявлении механизма повышения физико-механических свойств ПКМ в результате СВЧ воздействия.

Целью исследований явилось изучение влияния частоты СВЧ-воздействия (2450 и 915 МГц) на микроструктуру области повреждения углепластиков, сформированных по аддитивной технологии и методом вакуумной инфузии, и установление связи её изменений с напряжениями межслоевого сдвига и температурой СВЧ-нагрева.

Методика исследований

Образцы на основе РЕЕК представляли собой плоскопараллельные пластины с размерами согласно ГОСТ 32659-2014 «Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущегося предела прочности при межслойном сдвиге методом испытания короткой балки», полученные путем 3D-печати по технологии FDM из композитного филамента на экспериментальном принтере, обеспечивающем температуру нагрева экструдера от 410°C до 425°C для плавления суперконструкционного термопласта РЕЕК. Композитный филамент формировался непосредственно в экструдере принтера путем одновременной подачи в него нити из углеродных, стеклянных или арамидных волокон и нити РЕЕК. Использованы углеродные волокна производства Microtex Composites и полиэфирэфиркетон РЕЕК гранулированный (ТУ 20.16.40-564-00209349-2018, производства АО «Институт пластмасс», г. Москва). Методом вакуумной инфузии для проведения сравнительных испытаний с образцами из РЕЕК изготовлены пластины размерами 250×250×3 мм, армированные по схеме 0–90 тканями полотняного плетения из непрерывных углеродных волокон и связующего (эпоксидная смола марки ЭД-20, ГОСТ 10587-93, с отвердителем полиэтиленполиамином ПЭПА, ТУ 2413-357-00203447-99), введенным в количестве 10 об.%. После отверждения пластины разрезали на образцы согласно ГОСТ 32659-2014.

СВЧ обработку осуществляли с использованием экспериментальных установок «Жук-2-02» производства ООО НПП «АгроЭкоТех» (г. Обнинск, Калужской обл.) и ГМ-3 (АО «Магратеп», г. Фрязино, Московской обл.). Частота излучения первой установки составляла 2450 МГц при выходной мощности 1000 Вт, второй установки – 915 МГц при выходной мощности 1000, 2000 и 3000 Вт. В качестве граничного условия эксперимента было принято равенство плотности потока энергии (ППЭ) при двух исследуемых частотах. На основе измерения ППЭ электронным измерителем ПЗ-33М установлено значение ППЭ = $32,5 \cdot 10^4$ мкВт/см², которому при частоте 2450 МГц соответствовало расстояние от плоскости раскрыва рупорного излучателя 110 мм (падающая мощность 1000 Вт), при частоте 915 МГц – 330 мм (падающая мощность 3000 Вт). В процессе обработки осуществляли непрерывный мониторинг температуры облучаемой поверхности образцов тепловизором DT-986S. Степень нагрева образцов в процессе СВЧ воздействия регулировали временем облучения в диапазоне от 2,5 до 10 минут при частоте 2450 МГц и от 5 до 30 минут при частоте 915 МГц. Различия во времени связано со значительно меньшим поглощением мощности образцами при понижении частоты СВЧ излучения, что определяется большей глубиной его проникновения и, соответственно, большей долей прошедшей через образец мощности [21].

Поверхности повреждения контрольных и опытных образцов после испытаний на межслоевой сдвиг согласно ГОСТ 32659-2014 исследовали на растровом электронном микроскопе Jeol F7100 (JEOL Ltd., Япония) с применением детекторов вторичных (LED) и обратно отраженных (BED) электронов. Полученные микрофотографии анализировали с использованием программного комплекса Thixomet Lite.

Результаты и обсуждение

Поскольку, как показано выше, температура СВЧ нагрева ПКМ является основным внешним проявлением воздействия излучения, было проведено сравнение максимальной температуры нагрева при разных частотах для предварительной оценки возможного их влияния на свойства материалов. Установлено, что максимальные зафиксированные температуры при использовании частоты 915 МГц практически в 2 раза меньше для исследованных ПКМ, чем при ис-

пользовании частоты 2450 МГц. Этот результат соответствует данным, приведенным в работах [35, 36], посвященным изучению влияния ориентации армирующих углеродных волокон в ПКМ на поглощение и отражение СВЧ излучения различных частот, и согласуется с современными представлениями о механизмах СВЧ-нагрева материалов [40–47].

В этой связи представляло интерес проведение исследований для получения функциональной связи температуры СВЧ нагрева ПКМ с частотой излучения и временем, как основной управляемой переменной данного процесса, для ПКМ на связующих с различными электрофизическими свойствами. Результаты представлены на рис. 2.

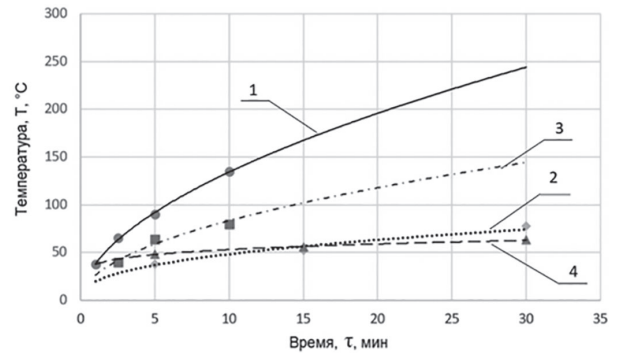


Рис. 2. Зависимость температуры СВЧ нагрева образцов на связующем РЕЕК (1 и 2) и ЭД-20 + ПЭПА (3 и 4) от времени облучения на частоте 2450 МГц (1 и 3) и 915 МГц (2 и 4).

Из графиков (рис. 2) следует, что на частоте 2450 МГц температура образцов на связующем РЕЕК более чем в 1,5 раза превышает температуру образцов на ЭД-20 + ПЭПА во всем исследованном диапазоне времен воздействия. С учетом того, что наполнителем в обеих группах образцов являются углеродные волокна, данный результат показывает существенное влияние на нагрев поглощенной СВЧ мощности, зависящей от коэффициента диэлектрической проницаемости ϵ , влияющего на отражение излучения соотношения $\text{tg} \delta$ и ϵ . Согласно справочным данным [43–45], это соотношение значительно выше для РЕЕК. В то же время на частоте 915 МГц различия в температуре нагрева образцов на РЕЕК и на ЭД-20 + ПЭПА можно считать несущественными. Здесь имеет значение большая глубина проникновения СВЧ электромагнитного поля на более низкой частоте, что при малой толщине образцов (2–3 мм) приводит к очень малой доле поглощения СВЧ мощности и, соответственно, нивелированию влияния диэлектрических свойств связующих. С учетом изложенного можно ожидать большего различия в структуре поверхности повреждения исследуемых групп образцов, обработанных при частоте 2450 МГц, и незначительного различия при частоте 915 МГц.

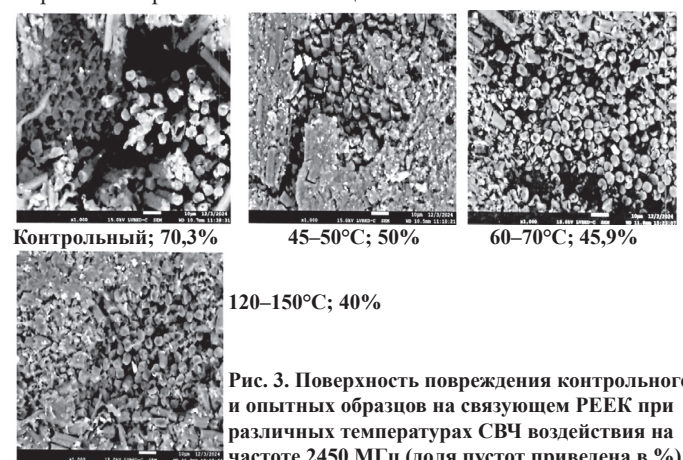


Рис. 3. Поверхность повреждения контрольного и опытных образцов на связующем РЕЕК при различных температурах СВЧ воздействия на частоте 2450 МГц (доля пустот приведена в %).

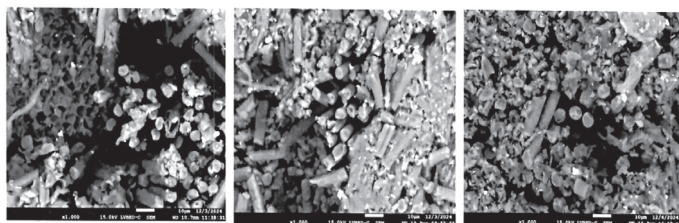
На рис. 3–6 показаны микрофотографии поверхности повреждения образцов, подвергнутых обработке в СВЧ электромагнитном поле на частотах 2450 и 915 МГц при времени воздействия, которое обеспечивало разную температуру нагрева, по сравнению с контрольными образцами. Результаты обработки микрофотографий в программном комплексе Thixomet Lite показаны в виде графиков и аппроксимирующих зависимостей на рис. 7.



Контрольный; 60,5%
36–50°C; 40,3%
48–78°C; 29,1%
68–90°C; 53,8%

Рис. 4. Поверхность повреждения контрольного и опытных образцов на связующем ЭД-20 + ПЭПА при различных температурах СВЧ воздействия на частоте 2450 МГц (доля пустот приведена в %).

Можно отметить, что доля пустот, характеризующих площадь поверхности наполнителя, от которой отделилась матрица в процессе испытаний, больше для углепластика на связующем РЕЕК, чем на ЭД-20 + ПЭПА, как для контрольных, так и для опытных образцов. Это объяснимо отмеченными выше повышенной вязкостью термопласта и худшей смачиваемостью им волокон наполнителя, что приводит к непрочным и меньшей поверхности надежного контактного взаимодействия и, соответственно, в этих дефектных областях преимущественно происходит расслоение композита при сдвиге. Также после СВЧ воздействия доля пустот в композите при использовании связующего РЕЕК снижается после испытаний в 1,75 раза, в то время как для связующего ЭД-20 + ПЭПА это снижение составило более двух раз, что может, на первый взгляд, свидетельствовать о большей эффективности СВЧ обработки применительно к данному термореактивному связующему. Однако следует иметь в виду, что максимально достигнутая температура РЕЕК при СВЧ воздействии практически в 2–2,5 раза ниже температуры его размягчения, что позволяет утверждать об отсутствии условий для реализации в полной мере упрочняющего механизма воздействия СВЧ в области контакта матрицы и волокна. Очевидно, в направлении определения рационального сочетания СВЧ режимов (прежде всего мощности излучения и времени) применительно к отвержденному РЕЕК необходимо продолжение исследований.

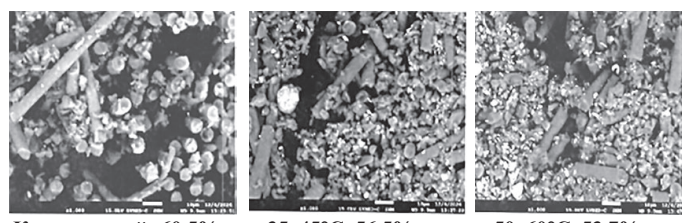


Контрольный; 70,3%
35–40°C; 63%
45–60°C; 47,7%
70–85°C; 44,9%

Рис. 5. Поверхность повреждения контрольного и опытных образцов на связующем РЕЕК при различных температурах СВЧ воздействия с частотой 915 МГц (доля пустот приведена в %).

Обращает на себя внимание тот факт, что если при СВЧ воздействии на углепластик на связующем РЕЕК при частоте 2450 МГц наблюдается плавное уменьшение количества пустот, зафиксированных на поверхности повреждения, с ростом температуры, то для углепластика на связующем ЭД-20 + ПЭПА при температурах от 80°C до 90°C происходит значительное его увеличение (с 30% до 54%). Это объяснимо началом деструктивных изменений в полимере при подходе к данному температурному диапазону, для термопластов характерно постепенное размягчение и плавление.

Отметим, что полученный результат достаточно точно соответствует диапазону температур, при котором наблюдается снижение эффекта СВЧ упрочнения для ПКМ на эпоксидном связующем [31, 32], что свидетельствует о существенном вкладе условий контактного взаимодействия матрицы и наполнителя в обеспечение физико-механических свойств композита.



Контрольный; 60,5%
35–45°C, 56,5%
50–60°C, 53,7%
56–72°C, 50,8%

Рис. 6. Поверхность повреждения контрольного и опытных образцов на связующем ЭД-20 + ПЭПА при различных температурах СВЧ воздействия на частоте 915 МГц.

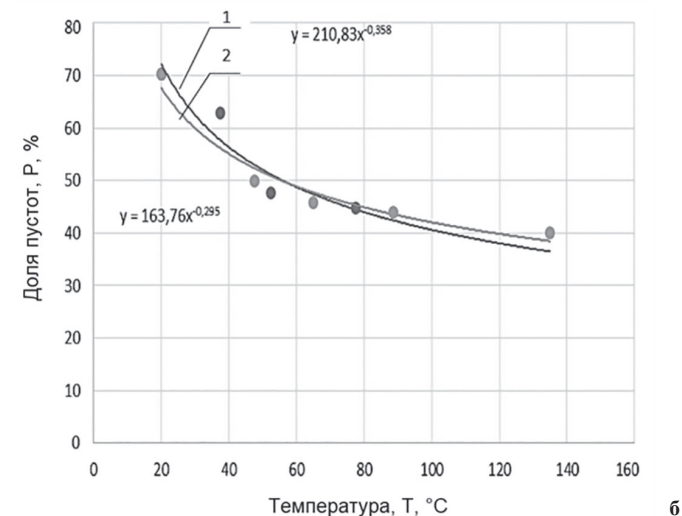
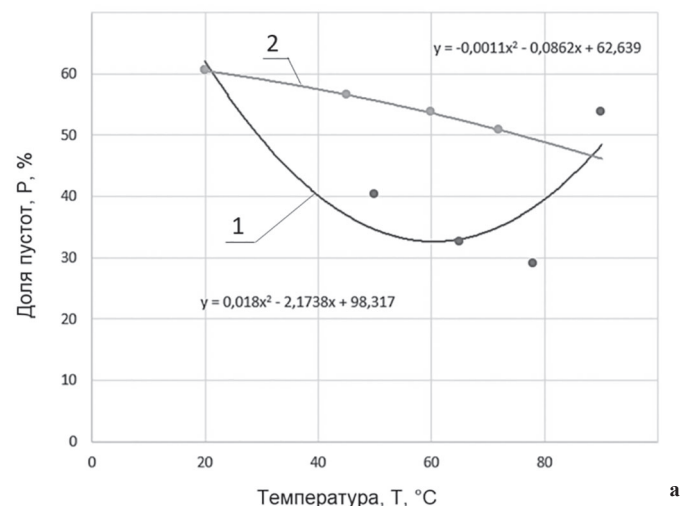


Рис. 7. Содержание пустот на поверхности повреждения образцов на связующем ЭД-20 + ПЭПА (а) и РЕЕК (б) в результате испытаний на межслоевой сдвиг после СВЧ обработки на частоте 2450 МГц (1) и 915 МГц (2) при плотности потока энергии (32–35)·10⁴ мкВт/см².

Как следует из рис. 7а, при частоте воздействия 915 МГц не наблюдается отмеченного выше увеличения доли пустот, вызванных отслоением матрицы от волокон. Это связано с тем, что средняя температура образцов при принятых условиях не превысила 75°C и не достигла уровня начала деструктивных изменений. Следует также отметить значительно меньший эффект: доля пустот снизилась максимально на 17%, в то время как при частоте 2450 МГц, что уже отмечалось выше, происходит двукратное снижение. Данный результат также требует дополнительного исследования, т.к. в области температур, при которых происходит уменьшение доли пустот и, соответственно, прочности контактного взаимодействия компонентов, их значения для двух рассматриваемых частот имеют практически одинаковые значения.

В противоположность изложенным выше результатам, при СВЧ обработке углепластика на связующем РЕЕК не отмечается зна-

чимого различия влияния частоты излучения на изменение доли пустот на поверхности повреждения. В то же время из полученных аппроксимирующих функций следует, что степень влияния температуры СВЧ нагрева на пустотность углепластика на частоте 2450 МГц достаточно значима: на 21% выше, чем на частоте 915 МГц. Это позволяет предполагать получение существенных различий во влиянии частот при дальнейшем повышении температуры.

Заключение

Впервые выполнено сравнительное исследование влияния СВЧ электромагнитного поля частотой 915 и 2450 МГц на изменение структуры поверхности повреждений при испытании на межслоевой сдвиг образцов отвержденного углепластика, сформированных по технологии FDM из композитных филаментов на основе суперконструкционного термопласта РЕЕК и методом вакуумной инфузии на основе терморезактивной смолы ЭД-20 с отвердителем ПЭПА.

Показано, что, независимо от вида связующего, СВЧ-воздействие способствует уменьшению объема пустот, образованных в результате отслоения матрицы от наполнителя в ходе испытаний. При этом наибольший эффект (в 2 и более раз) обеспечивается для эпоксидного связующего на частоте 2450 МГц. Для связующего РЕЕК влияние частоты излучения менее выражено, и в исследованном диапазоне температур его можно считать малозначимым. В то же время, независимо от частоты излучения, для углепластика на связующем РЕЕК отмечается снижение доли пустот в 1,75 раза.

Снижение доли пустот на поверхности повреждения образцов с терморезактивным и термопластичным связующими, предварительно подвергнутыми СВЧ-обработке, свидетельствует о повышении прочности контактного взаимодействия компонентов и общности предложенного механизма упрочнения данным методом ПКМ в отвержденном состоянии, основанного на временном переходе матрицы в пластичное состояние.

Целесообразно продолжение исследований в направлении определения рационального сочетания СВЧ режимов применительно к отвержденным ПКМ на связующем РЕЕК.

Аналитические исследования выполнены с использованием научного оборудования ЦКП «Исследовательский химико-аналитический центр НИЦ «Курчатовский институт».

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ 23-79-00039.

Литература

1. Дориомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. №6–7. С. 29–37. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-29-37.
2. Мировой рынок полимерных композиционных материалов: состояние, тенденции, перспективы. Часть 3 // Полимерные материалы. 2025. №7(314). С. 30–35.
3. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. 822 с. ISBN: 978-5-91703-003-6.
4. Михайлин Ю.А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб.: Научные основы и технологии, 2008. 660 с. ISBN: 978-5-91703-011-1.
5. Каблов Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники. Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82, №6. С. 520–530. EDN: OYQJHJ.
6. Brinkmann S., Menges G., Michaeli W., Schmachtenberg E. International Plastics Handbook: The Resource for Plastics Engineers. 4th ed. Munich: Hanser Publishers, 2006. 720 p. ISBN: 978-1-56990-399-5.
7. Razali N., Sultan M. T. H., Mustapha F., Majid D. L. A review on composite materials for structural applications. The International Journal of Engineering and Science (IJES). 2014. Vol. 3, iss. 7. P. 8–20. ISSN (Online): 2319-1813. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://theijes.com/papers/v3-i7/Version-2/B037208020.pdf> (дата обращения: 27.11.2025).
8. Abrate S. Impact Engineering of Composite Structures. Wien; New York: Springer, 2011. 409 p. (CISM International Centre for Mechanical Sciences; Vol. 526). ISBN 978-3-7091-0523-8.
9. Гибсон И., Розен Д., Стакер Б. Технологии аддитивного производства: трёхмерная печать, быстрое прототипирование и пря-

- мое цифровое производство. Пер. с англ. Под ред. П.А. Сычёва. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 656 с. ISBN: 978-5-94836-447-6.
10. Bikas H., Stavropoulos P., Chryssoulouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 83, iss. 1–4. P. 389–405. DOI:10.1007/s00170-015-7576-2.
11. DelProf. Аналитика рынка 3D-печати. М.: DelProf, 2023. 42 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://delprof.ru/upload/iblock/ced/DelProf_Analitika_Rynok-3D_pechati.pdf (дата обращения: 27.11.2025).
12. Балашов А.В., Маркова М.И. Исследование структуры и свойств изделий, полученных 3D-печатью. Инженерный вестник Дона. 2019. №1(52). С. 66–80. EDN: LSMZMB.
13. Петров В.М., Безпальчук С.Н., Яковлев С.П. О влиянии структуры на прочность изделий из пластиков, получаемых методом 3D-печати. Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9, №4. С. 765–776. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776.
14. Vessey A.F., Hodges K.I., Shaffrey L.C., Day J.J. The composite development and structure of intense synoptic-scale Arctic cyclones. Weather and Climate Dynamics. 2022. Vol. 3, iss. 4. P. 1097–1112. DOI: 10.5194/wcd-3-1097-2022.
15. Buendia L., Torres I., Ornelas A., Castellanos A. Influence of thermal gradients and arctic temperatures on the mechanical properties and fracture behavior of woven carbon and woven Kevlar® composites. ASME Open Journal of Engineering. 2024. Vol. 3, iss. 2. Art. 021001. DOI: 10.1115/1.4065928.
16. Vafaeva K.M., Duklan N., Mohan C., Kumar Y. Comparative analysis of glass-basalt-plastic materials for construction in arctic conditions. BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 86. Art. 01112. DOI: 10.1051/bioconf/20248601112.
17. Кулезнев В.Н., Шершнева В.А. Химия и физика полимеров. Учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по направлению «Химическая технология». 3-е изд., испр. Санкт-Петербург [и др.]: Лань, 2014. 367 с.: ил., табл. ISBN: 978-5-8114-1779-7.
18. Студенцов В.Н. Физическая модификация армированных реактопластов. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 4, №3 (61). С. 209–218. ISSN: 1999-8341. EDN: PVPHCT.
19. Brovko A.V., Murphy E.K., Rother M., Karbstein H.P. Waveguide microwave imaging: spherical inclusion in a dielectric sample. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2008. Vol. 18, no. 9. P. 647–649. DOI: 10.1109/LMWC.2008.2002498.
20. Committee on Microwave Processing of Materials: An Emerging Industrial Technology. Microwave processing of materials. Washington, D.C.: National Academy Press, 1994. 150 p.: ill. (Publication NMAV; 473). ISBN: 978-0-585-16857-9.
21. Архангельский Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии. Саратов: ООО «Научная книга», 2011. 559 с. ISBN: 978-5-9758-1360-2.
22. Нефедов В.Н. Сверхвысокочастотные устройства для высокоэффективной термообработки материалов больших площадей. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва: Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2001. 40 с.
23. Слепцова С.К. Влияние модифицирующего нетеплового воздействия СВЧ-электромагнитных колебаний на физико-механические свойства полимерного волокнистого материала. Дис. ... канд. техн. наук. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. 166 с.: ил.
24. Лаврентьев В.А. Влияние СВЧ-электромагнитного поля на физико-механические свойства эпоксидного компаунда. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2009. 19 с.
25. Zhang L., Li Y., Zhou J. Anisotropic dielectric properties of carbon fiber reinforced polymer composites during microwave curing. Applied Composite Materials. 2018. Vol. 25, iss. 6. P. 1339–1356. DOI: 10.1007/s10443-017-9669-6.
26. Kwak M., Robinson P., Bismarck A., Wise R. Microwave curing of carbon-epoxy composites: penetration depth and material characterisation. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2015. Vol. 75. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.compositesa.2015.04.007
27. Mgbemena C.O., Li D., Lin M.-F., Liddel P.D., Katnam K.B., Thakur Kumar V., Yazdani Nezhad H. Accelerated microwave

- curing of fibre-reinforced thermoset polymer composites for structural applications: a review of scientific challenges. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 114. P. 214–229. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.09.012.
28. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Чуриков Д.О. Эффективность влияния СВЧ-излучения и конвекционного нагрева на релаксацию внутренних напряжений в отвержденных полимерных композиционных материалах // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. 2025. Т. 25, Вып. 2. С. 230–241. DOI: 10.18500/1817-3020-2025-25-2-230-241.
29. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Игнатъев М.А. Анализ особенностей микроструктуры полимерной матрицы в составе ПКМ, сформированных под влиянием электрофизических воздействий // *Пластические массы*. 2024. №1. С. 12–16. DOI: 10.35164/0554-2901-2024-02-12-16.
30. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Егоров А.С. Влияние электрофизических воздействий на микроструктуру торцевой поверхности отвержденного монослоя // *Конструкции из композиционных материалов*. 2024. №1(173). С. 29–35. DOI:10.52190/2073-2562-2024-1-29.
31. Злобина И.В., Бекренев Н.В. О механизме повышения механических характеристик отвержденных полимерных композиционных материалов под действием СВЧ-электромагнитного поля. *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика*. 2022. Т. 22, №2. С. 158–169. DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-2-158-169.
32. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Егоров А.С., Кузнецов Д.И. Влияние сверхвысокочастотного электромагнитного поля на межслоевую прочность в отвержденных полимерных композиционных материалах. *Журнал технической физики*. 2023. Т. 93, вып. 2. С. 237–240. DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54498.201-22.
33. Kim T., Lee J., Lee K.-H. Microwave heating of carbon-based solid materials. *Carbon Letters*. 2014. Vol. 15, N1. P. 15–24. DOI: 10.5714/CL.2014.15.1.015.
34. Kwak M. Microwave curing of carbon-epoxy composites: process development and material evaluation. PhD thesis. London: Imperial College London, Department of Aeronautics, 2016. 150 p. DOI: 10.25560/39284.
35. Zhou J., Li Y., Zhang M., Xu E. Effect of lay-up configuration on the microwave absorption properties of carbon fiber reinforced polymer composite materials. *Materials Today Communications*. 2021. Vol. 26. Art. 101960. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2020.101960.
36. Mikinka E., Siwak M. Recent advances in electromagnetic interference shielding properties of carbon-fibre-reinforced polymer composites — a topical review. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021. Vol. 32, iss. 19. P. 24585–24643. DOI: 10.1007/s10854-021-06900-8.
37. Ai J.-R., Li S., Vogt B. D. Increased strength in carbon-poly(ether ether ketone) composites from material extrusion with rapid microwave post processing. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 60. Art. 103209. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103209.
38. Злобина И.В., Бекренев Н.В., Морозов Б.Б., Насонов Ф.А. Кинетика разрушения при межслоевом сдвиге углепластика ВКУ-30 после воздействия СВЧ-электромагнитного поля. *Конструкции из композиционных материалов*. 2023. №1 (169). С. 28–34. DOI: 10.52190/2073-2562_2023_1_28.
39. Zlobina I.V., Bekrenev N.V., Morozov B.B., Nasonov F.A. Temperature effect of microwave heating of cured structural epoxy carbon filled plastic on interlayer shear stresses. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2024. Vol. 15, N4. P. 1043–1049. DOI: 10.1134/S2075113324700588.
40. Li Y., Li N., Zhou J., Cheng Q. Microwave curing of multidirectional carbon fiber reinforced polymer composites. *Composite Structures*. 2019. Vol. 212. P. 83–93. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.01.027.
41. Zhang J., Duan Y., Wang B., Zhang X. Interfacial enhancement for carbon fibre reinforced electron beam cured polymer composite by microwave irradiation. *Polymer*. 2020. Vol. 192. Art. 122327. DOI: 10.1016/j.polymer.2020.122327.
42. Galos J. Microwave processing of carbon fibre polymer composites: a review. *Polymers and Polymer Composites*. 2021. Vol. 29, N1. P. 1–12. DOI: 10.1177/0967391120903894.
43. Jackson J.D. *Classical Electrodynamics*. 3rd ed. New York: Wiley, 1998. 808 p. ISBN: 978-0-471-30932-1.
44. Thuery J. *Microwave: industrial, scientific, and medical applications*. Boston: Artech House Publishers, 1992. 475 p. ISBN: 0-89006-448-2.
45. Морозов Г.А., Морозов О.Г. Микроволновые технологии для нефтедобывающего комплекса. Труды 12-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (CriMiCo'2002). Севастополь. 2002. С. 28–31. ISBN 966-7968-12-X.
46. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Самигуллин Р.Р., Насыбуллин А.Р., Шакиров А.С. Функционально адаптивные СВЧ-технологии в задачах переработки термопластических полимерных материалов. *Вестник Марийского государственного технического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. 2011. №3 (13). С. 13–24. ISSN: 1997-4655. EDN: OPXLAL.
47. Морозов Г.А., Морозов О.Г., Насыбуллин А.Р., Самигуллин Р.Р. Микроволновая обработка терморезактивных и термопластических полимеров. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2011. Т. 14, №3. С. 114–121. ISSN: 1810-3189. EDN: OFYDFN.