06

Электромагнитное поле как фактор повышения механических характеристик монослоев полиамида, армированных непрерывным углеродным волокном

© И.В. Злобина,[1,2] Н.В. Бекренев,[1] Д.О. Чуриков,[1] Р.Р. Сайфутяров[2]

[1] Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина,
410054 Саратов, Россия
[2] Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия
e-mail: irinka_7_@mail.ru

Поступило в Редакцию 6 октября 2025 г.
В окончательной редакции 23 января 2026 г.
Принято к публикации 4 февраля 2026 г.

Выполнены экспериментальные исследования воздействия частоты сверхвысокочастотного электромагнитного поля на изменение параметров прочности и жесткости монослоев из полиамида марки Па-6, армированных непрерывным углеродным волокном, полученных по технологии послойного наплавления. Показано, что проявление эффекта сверхвысокочастотного воздействия применительно к монослоям малой толщины существенно зависит при прочих равных условиях от частоты излучения. При частоте 2450 MHz предельные напряжения изгиба повышаются в 1.15 раза, а при 915 MHz — в 1.2 раза. Различия в воздействии высокочастотного излучения с разной частотой на жесткость и микроструктуру монослоев объясняются существенной разницей в интенсивности тепловых процессов. На частоте 915 MHz данный показатель существенно ниже — более чем вдвое — по сравнению с результатами, зафиксированными на повышенной частоте. Это ограничивает подвижность концевых групп и цепей полимеров связующего в момент перехода во временно пластичное состояние. Это затрудняет их вращение и формирование новых связей с волокнами. В то же время наблюдается более однородный характер воздействия.

Ключевые слова: композитные филаменты, термопластичные и термореактивные связующие, аддитивные технологии, прочность и жесткость, СВЧ электромагнитное поле.

DOI: 10.61011/JTF.2026.07.63129.279-25

Введение

Аддитивные технологии (3*D*-печать) относятся к одному из наиболее перспективных направлений совершенствования промышленного производства в условиях перехода к „Индустрии 4.0“. Это связано с тем, что для них характерна предельно возможная для технологического оборудования гибкость при решении задач изготовления изделий любой сложности, в том числе в условиях быстро меняющихся потребностей рынка [1–3].

Наиболее доступной и широко известной в условиях любительского и профессионального технического творчества, а также промышленного производства является аддитивная технология, основанная на методе послойного наплавления (FDM), который предполагает нанесение расплава термопластичного полимера в виде тонкой нити на плоское основание (платформу построения). Эта технология использует термопласты промышленного класса, поэтому изделия обладают механическими, термическими и химическими характеристиками, сопоставимыми с иными технологиями полимерного производства. Разработанные и освоенные в настоящее время технологии позволяют создавать изделия практически любой формы и плотности с размерами от нескольких миллиметров до метров [4–7]. Однако для указанной технологии характерно существенное отличие прочности изделия в различных направлениях (анизотропия), вызванное ориентацией слоев при построении изделия и наличием дефектных границ между отдельными дорожками и слоями.

Сравнительно слабое сцепление между плоскими слоями (межслойная адгезия) вызывает снижение прочности вдоль направления наложения материала. Недостаточная пропитка волокон в процессе экструзии приводит к образованию пустот и понижению механической прочности между волокнами. Кроме того, филамент выкладывается в расплавленном состоянии на существенно более холодное основание и затем охлаждается, уменьшаясь в размерах. Это приводит к остаточным напряжениям, термическим деформациям, растрескиванию и короблению изделия уже в процессе печати, особенно при больших его размерах. В результате при изгибе и растяжении поперек слоев изделие является гораздо менее прочным, чем при сжатии и растяжении вдоль слоев, что может привести к разрыву по границе слоев [8].

Все названное в совокупности обусловливает актуальность разработки новых полимерных материалов и совершенствования аддитивных технологий изготовления изделий из них.

1. Постановка задачи

Среди основных направлений совершенствования технологии FDM выделяется технология и оборудование печати композиционными (наполненными рубленными или непрерывными волокнами) материалами. При этом армирующий наполнитель для максимальной эффективности реализации своих функционально значимых параметров и облегчения прохождения через экструдер печатающей головки принтера представляет собой не моноволокна, которые имеют толщину, как правило, в пределах 0.01−0.02 mm, а жгут из волокон. Наибольшее применение получили две технологии формирования изделий армированными филаментами. Согласно одной из них, волокно и термопластичный полимер подаются в экструдер принтера, где совмещаются и далее выкладываются на подложку, либо на подложку выкладывается слой полимера, а затем волокна и так далее. Однако термопласты отличает плохая совместимость с армирующими материалами, особенно с волокнами, прежде всего — неполная смачиваемость вследствие высокой вязкости и плохой текучести, а также быстрое отверждение. Вследствие этого в процессе печати в структуре слоя возникают различные пустоты, отмечается неполная консолидация волокон в жгуте, что приводит к уменьшению физико-механических свойств конечного изделия, поскольку не на все волокна матрица распределяет действующую внешнюю нагрузку. Реактопласты хорошо пропитывают ткани и жгуты из волокон. Но применение реактопластов в аддитивных технологиях невозможно из-за особенностей технологии FDM, предполагающей расплавление нити (связующего) в процессе печати. Согласно технологии коэкструзии, предложенной компанией Anisoprint, жгут из непрерывных волокон предварительно пропитывают термореактивной смолой, а затем покрывают внешним слоем термопластичного полимера, который в процессе печати обеспечивает консолидацию отдельных нитей в слои, а последних — в изделие. Однако для этой технологии характерен существенный недостаток, заключающийся в разнородности теплофизических и механических свойств термореактивного связующего для жгута и термопластичного для формируемой детали, что снижает адгезию между слоями, а также может привести к возникновению внутренних напряжений в процессе остывания при выходе из фильеры печатающей головки и на платформе построения в составе монослоя вследствие значимо отличающихся коэффициентов термического расширения и деструкции связующего в жгутах при температуре эксплуатации, превышающей термостойкость термореактивного полимера [9–13].

В ходе многочисленных исследований по повышению физико-механических свойств полимерных композиционных материалов (ПКМ), в том числе сформированных при помощи аддитивных технологий, установлено, что одним из эффективных подходов к достижению этой цели является физическая модификация при воздействии на них СВЧ электромагнитного поля [14–18]. Однако известные методы физического преобразования реализуются путем воздействия на компоненты ПКМ на стадии их производства, либо путем воздействия на слои ПКМ на стадии пропитки связующим или отверждения, что вызывает вероятность негативного влияния последующих технологических операций формирования изделий, таких как сварка, механическая обработка, сборка и т. п.

В СГТУ им. Ю.А. Гагарина в 2015−2025 гг. выполнены экспериментальные исследования влияния СВЧ обработки при частоте излучения 2450 MHz на прочностные характеристики отвержденных угле-, стекло- и органопластиков при статическом и динамическом нагружении. Установлено, что влияние СВЧ на окончательно сформированные армированные углеродными волокнами образцы при использовании рациональных режимов повышает напряжения межслоевого сдвига на 16 %−18 %, модуля упругости на 14 %−20 %. При этом отмечается диэлектрический нагрев материала до 50 °C−70 °C [19,20]. Возможность получения определенных эффектов при СВЧ воздействии на отвержденные ПКМ подтверждена исследованиями зарубежных ученых [21,22]. Авторами настоящей работы предложена гипотеза о механизме упрочняющего воздействия СВЧ излучения на отвержденные ПКМ, заключающаяся во временном переходе связующего в состояние пластичности, что увеличивает вероятность конформационных поворотов звеньев макромолекул и, как следствие, возникновения новых областей контактного взаимодействия компонентов в межфазном слое (МФС) [19]. Правомерность приведенной гипотезы подтверждается работами многих исследователей, в которых показано сохранение подвижности крайних звеньев молекул полимера в сшитом состоянии, уменьшения „свободного объема“ вследствие конформаций, а также α- и β-переходов в процессе нагрева до определенных температур, способствующих повышению физико-механических свойств композита [23–29]. Также известно [30], что при указанных выше температурах происходит переход эпоксидного связующего в пластичное состояние.

В то же время осуществленные эксперименты касались исключительно ПКМ на термореактивном или термопластичном связующем. Влияние СВЧ электромагнитного поля на физико-механические свойства и структуру отвержденных ПКМ, включающих совмещенные термореактивные и термопластичные структуры, в том числе формируемые аддитивными методами, не изучалось, и поэтому требует с учетом вышеизложенных устойчивых тенденций применения композитов в аддитивном производстве отдельного изучения. Также мало изучено влияние СВЧ электромагнитного поля различной частоты на физико-механические свойства объектов трехмерной печати, в том числе композиционных.

Целью исследований явилось изучение влияния воздействия СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 и 915 MHz на напряжения трехточечного изгиба и жест-

кость монослоев, сформированных методом трехмерной печати по технологии FDM / коэкструзии.

2. Методика исследований

В исследованиях использованы образцы размерами $70 \times 10 \times 1$ mm, сформированные на 3*D*-принтере Anisoprint Composer A4 из препрега, армированного жгутом из непрерывных углеродных волокон, предварительно пропитанного эпоксидной смолой марки ЭД-20 с отвердителем ПЭПА в соотношении 10 : 1 и покрытого термопластичным полиамидом марки ПА-6. Образцы представлены однонаправленными с углом 45° монослоями, внешний контур которых, согласно технологии FDM, образовывали два уложенных филамента. Изготавливали 3 группы образцов: контрольные и подвергаемые воздействию СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 и 915 MHz. Каждая группа состояла из 30 образцов.

Обработку осуществляли при плотности потока энергии (ППЭ) и времени воздействия, при которых происходит СВЧ нагрев материала до температур порядка 60 °C–80 °C и обеспечивается наибольшая стабильность получения эффекта СВЧ воздействия [19] на экспериментальных СВЧ установках рупорного типа (рис. 1), работающих на частотах 915 и 2450 MHz. Установка для обработки на частоте 2450 MHz имеет определенную мощность излучения 1000 W, на частоте 915 MHz обеспечивает ступенчатую регулировку выходной мощности 1000, 2000 и 3000 W.



Рис. 1. Экспериментальная СВЧ технологическая установка рупорного типа.

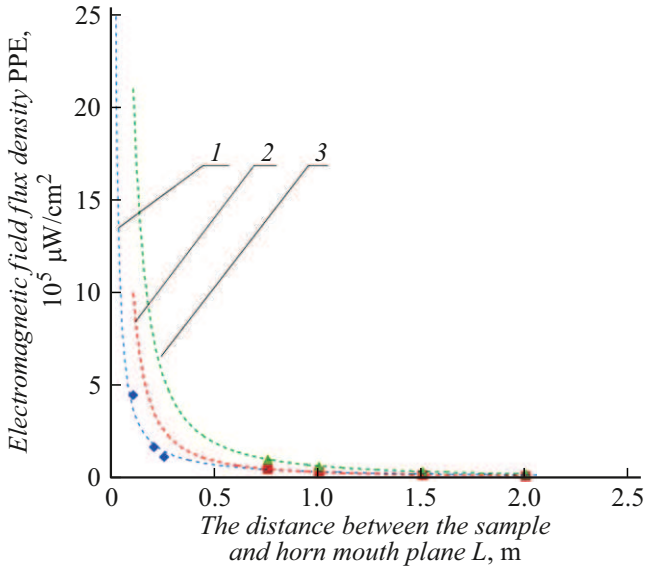


Рис. 2. Плотность потока энергии СВЧ излучения в зависимости от расстояния до плоскости раскрыва рупора: частота 2450 MHz, мощность 1 kW (*1*); 915 MHz, мощность 1 kW (*2*); 915 MHz, мощность 3 kW (*3*).

Для обеспечения одинаковых условий воздействия на образцы при использовании указанных установок определяли распределение ППЭ в зависимости от расстояния между облучаемой поверхностью образцов и плоскостью раскрыва рупорного излучателя при помощи измерителя П3-33М по методике, изложенной в [31]. По полученным экспериментальным точкам определяли аппроксимирующие функции (рис. 2), по которым вычисляли расстояния между образцом и плоскостью раскрыва рупорного излучателя, на которых при различных частотах и мощностях создается одинаковая ППЭ. Время обработки на каждой частоте определяли в процессе постановочных опытов на пробных образцах по критерию достижения указанной выше интегральной температуры поверхности. В процессе обработки контролировали интегральную поверхностную температуру образцов при помощи тепловизора DT-986S.

Испытания на трехточечный изгиб проводили на образцах в соответствии с ГОСТ Р 56805-2015 и ГОСТ Р 57866-2017 с использованием машины испытательной универсальной ИР 5082-100, позволяющей осуществлять запись текущих значений нагрузки и соответствующей деформации. Испытания завершали при прекращении нарастания усилия на измерительном устройстве пресса, что соответствовало потере образцом несущей способности.

Согласно ГОСТ, по результатам испытаний вычисляли максимальные напряжения трехточечного изгиба σ_F и модуль упругости E. Влияние СВЧ воздействия оценивали как отношение параметра опытного образца к

соответствующему параметру контрольного образца. Достоверность полученных результатов оценивали путем вычисления ошибки среднего значения соответствующей величины согласно методикам [32–34]. Дополнительно при помощи электронного микроскопа Jeol F7100 с применением детекторов вторичных (SED) и обратноотраженных (BED) электронов исследовали изменение микроструктуры образцов в области, прилегающей к армирующим волокнам.

3. Результаты исследований и обсуждение

Из анализа зависимостей ППЭ от расстояния между облучаемой поверхностью и плоскостью раскрыва рупора (рис. 2) следует, что при принятых условиях значение ППЭ $= (17-18) \cdot 10^4\,\mu\mathrm{W/cm}^2$ обеспечивается на частоте 2450 MHz и мощности 1000 W на расстоянии 200 mm, на частоте 915 MHz и мощности 1000 W — на расстоянии 329 mm, 3000 W — на расстоянии 500 mm.

В процессе постановочных экспериментов было установлено, что при частоте 915 MHz и падающей мощности 1000 W не удалось достичь необходимой температуры нагрева поверхности образцов за приемлемое для практики время (при времени воздействия 20–30 min зафиксированы температуры не более 40 °C). В соответствии с неудовлетворительными итогами было принято решение повысить значение ППЭ. При мощности 3000 W и ППЭ $= 35.7 \cdot 10^4\,\mu\mathrm{W/cm}^2$ (дистанция — 326.7 mm) достигнута интегральная по поверхности образцов температура (60–61.8) °C при времени воздействия 15 min. На частоте 2450 MHz и при ППЭ $= (34-36) \cdot 10^4\,\mu\mathrm{W/cm}^2$, создаваемой на расстоянии 100 mm от плоскости раскрыва излучающего рупора, аналогичная температура получена при времени воздействия 6 min. Термограммы образцов в конечный момент обработки представлены на рис. 3. В дальнейшем в экспериментах использовали длительность СВЧ воздействия, равную 15 min на частоте 915 MHz и 6 min на частоте 2450 MHz, что обеспечивало похожие по воздействию на образец температуры нагрева.

В то же время стóит отметить неравномерность нагрева поверхности образцов, что вызовет также и неравномерность их параметров прочности и жесткости. При обработке на частоте 2450 MHz температура находится в диапазоне (60.8–25) °C, на частоте 915 MHz эта разница менее существенна, температура образцов составляет (61.8–40) °C. Однако длительность обработки при этом возрастает более чем вдвое.

Результаты испытаний контрольных образцов и двух групп опытных по средним значениям напряжений и модулей упругости представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Поскольку определенное в эксперименте значение критерия Стьюдента превышает стандартное для принятого числа повторных опытов при доверительной

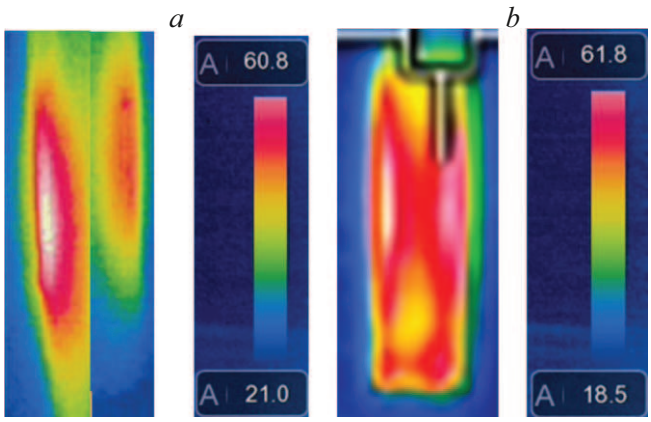


Рис. 3. Температурные поля в образцах монослоя на основе полиамида Па-6 при воздействии СВЧ электромагнитного поля частотой 2450 MHz в течение 6 min (a) и частотой 915 MHz в течение 15 min (b).

вероятности 0.95 ($t_{calc} > t_{table}$), разница между значениями напряжений и модуля упругости при трехточечном изгибе опытных и контрольных образцов является статистически значимой величиной, и эффект СВЧ обработки можно считать значимым.

Анализируя полученные зависимости „деформация-напряжения“ (рис. 4), можно отметить, что для контрольных образцов характерна практически линейная зависимость, что говорит о преимущественно упругом характере деформаций. Для опытных образцов зависимости более сложные. В области малых (менее 0.5 mm) деформаций опытные образцы, обработанные на разных частотах, показывают существенное различие в характере зависимости. Образцы, обработанные на частоте 915 MHz, показывают значительный эффект упрочнения (40 %–45 %), в дальнейшем с ростом деформаций эффект снижается до 8 %.

Для образцов, обработанных на частоте 2450 MHz, при деформациях менее 2 mm напряжения имеют даже меньшие значения, чем в контрольных образцах, и нарастают менее интенсивно. При увеличении деформации наблюдается резкий рост напряжений, и при деформации, равной 3 mm, их величина склоняется к значениям напряжений образцов, обработанных при частоте 915 MHz. Интерполяция полученных зависимостей демонстрирует, что с дальнейшим увеличением деформации при условии сохранения целостности образцов максимальные напряжения в образцах, обработанных на частоте 2450 MHz, превысят напряжения в контрольных образцах на 11 % и во второй группе опытных образцов.

В целом различия во влиянии используемых в эксперименте частот на напряжения трехточечного изгиба не велики. Различия во влиянии частот излучения 915 и 2450 MHz проявляются при рассмотрении модулей упругости при изгибе. На частоте облучения 2450 MHz значение модуля упругости в опытных образцах превышают значения, зафиксированные для контрольных

Таблица 1. Средние значения параметров, характеризующих прочность и жесткость контрольного (К) и опытных (Оп) образцов при трехточечном изгибе

Образец	Максимальные напряжения трехточечного изгиба $\sigma_{F\,\max}$, MPa				Модуль упругости E, MPa			
	Среднее	Ошибка	Критерий Стьюдента		Среднее	Ошибка	Критерий Стьюдента	
			t_{table}	t_{calc}			t_{table}	t_{calc}
Контрольный	74.1	±1.536	1.697	–	1188.3	±44.6	1.697	–
Опытный, СВЧ 2450 MHz	82.4	±0.874	1.697	5.96	1729.3	±43.41	1.697	14.7
Изменение Оп/К	1.11				1.455			
Опытный, СВЧ 915 MHz	80.3	±0.836	1.697	3.85	1416.4	±40.5	1.697	10.6
Изменение Оп/К	1.08				1.19			

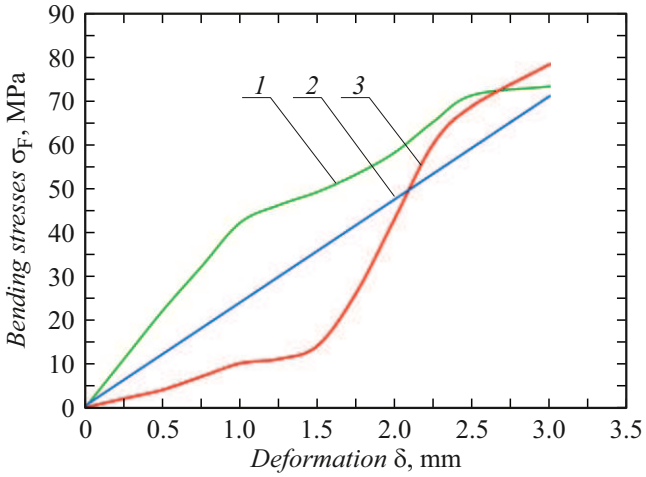


Рис. 4. Зависимости „деформация–напряжение“ для контрольного и опытных образцов монослоя: *1* — опытный 915 MHz, *2* — контрольный образец, *3* — опытный 2450 MHz.

образцов, более чем на 45 %, что свидетельствует о весьма значимом повышении жесткости образцов. При обработке на частоте 915 MHz увеличение модуля упругости составляет 19 %. Можно сделать вывод, что на использованных частотах наблюдается практически равный эффект по повышению прочности монослоев, но по изменению жесткости эффект на частоте 915 MHz существенно (более чем в два раза) меньше.

Достигнутые результаты по влиянию СВЧ электромагнитного поля большей и меньшей частот можно объяснить на основе микрофотографий структуры матрицы контрольных и опытных образцов (рис. 5).

В матрице контрольных образцов отмечаются множественные дефекты в виде несплошностей и микротрещин. При этом несплошности занимают значительную часть поверхности среза матрицы и имеют размеры в несколько десятком μm (рис. 5, *a*). Такая структура, с одной стороны, склонна к расслоению под поперечными и сдвигающими нагрузками, а с другой стороны — несплошности, и трещины ослабляют физическую и механическую связь волокон посредством матрицы, которая в этом случае не в полной мере выполняет свою функцию передачи и распределения нагрузки на упругие волокна, и снижается жесткость. Матрица опытных образцов выглядит более монолитной, микротрещины в ней занимают значительной меньшую поверхность среза (рис. 5, *b*, *c*), что способствует повышению прочности материала и росту максимальных напряжений в процессе деформации. Однако при этом в микроструктуре матрицы образцов, обработанных на частоте 915 MHz, сохраняются значительные по размерам несплошности (рис. 5, *b*), что является причиной отмеченного выше (табл. 1) малозначимого повышения жесткости вследствие ослабления контакта матрицы и армирующих волокон. Особенности микроструктуры образцов, обработанных на частоте 2450 MHz (рис. 5, *c*), заключающиеся в практически сплошном прилегании матрицы к поверхности волокон, способствуют указанному значительному росту жесткости образцов вследствие максимальной монолитности системы „матрица-волокно“.

Замеченное различие в результатах воздействия на ПКМ СВЧ излучения частотой 2450 и 915 MHz при прочих равных условиях может быть объяснено степенью поглощения падающей на поверхность материала мощности СВЧ излучения при большей и меньшей частотах [18]. Чем выше частота электромагнитного поля и соответственно меньше длина волны, тем большая доля потока энергии поглощается материалом и соответственно вызывает его диэлектрический нагрев. При снижении частоты и увеличении длины волны резко возрастает глубина проникновения потока энергии в материал, что повышает равномерность воздействия, в то время как значительно большая его доля проходит через структуру, не поглощаясь. Соответственно наблюдается при прочих равных условиях меньшая степень диэлектрического нагрева.

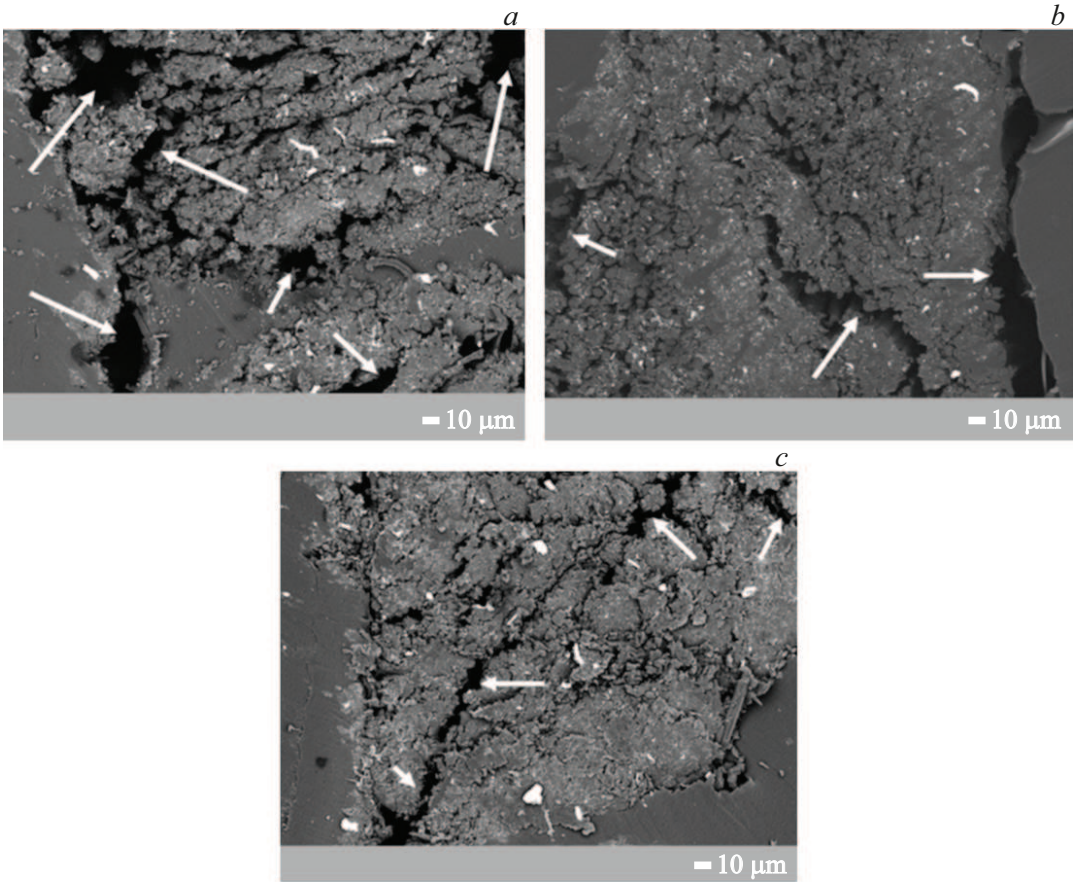


Рис. 5. СЭМ-микрофотографии контрольного образца (*a*) и опытного после СВЧ воздействия на частоте 915 (*b*) и 2450 MHz (*c*).

В данном случае следует рассматривать вторую составляющую СВЧ воздействия, а именно волновую, вызывающую колебания звеньев макромолекул линейных и цепных полимеров. В эксперименте при воздействии СВЧ электромагнитного поля с принятой ППЭ уровень повышения температуры материала находится ниже порога перехода в пластичное и текучее состояние, так как, согласно ГОСТ, полиамид Па-6 сохраняет свойства, необходимые для эксплуатации до температуры 105 °C–110 °C, его теплостойкость по Вика составляет порядка 200 °C. Однако при СВЧ воздействии происходит временный переход термореактивного компонента в пластичное состояние, так как температуры достигают значений, при которых, согласно [23–30], для эпоксидных смол появляется вероятность вращений участков крайних звеньев сшитых макромолекул и подвижность в областях „свободного объема“. Благодаря этому возрастает вероятность сближения части звеньев молекул связующего и поверхности волокон, что приводит к усилению контактных сил [35], соответственно возрастает количество областей (точек) контактного взаимодействия „матрица-волокно“ в армирующих филамент жгутах, что повышает их консолидированность и соответственно жесткость образца. На границе соприкосновения жгута, связанного реактопластом, находящимся временно в пластичном состоянии, и термопластичного материала оболочки композитного филамента, улучшаются условия их механического сцепления и физического взаимодействия. Указанные изменения в связующем способствуют максимальному повышению физико-механических свойств образцов в процессе изгибной деформации, прежде всего — параметров жесткости. Доминирующая роль волновых процессов в микроструктуре при СВЧ воздействии подтверждается результатами исследований влияния нагрева различных ПКМ в термокамере и СВЧ нагрева до аналогичных температур на степень и скорость релаксации внутренних напряжений, из которых следует, что СВЧ обработка характеризуется большей эффективностью [36]. В частности, установлено, что в среднем степень релаксации напряжений в образцах после воздействия на них СВЧ электромагнитного поля выше на 18.5 % и 12.8 % для углепластика и стеклопластика соответственно, по сравнению с нагревом в термокамере, что свидетельствует о преимущественном влиянии волновой составляющей поля на достигнутый эффект. Приведенные результаты получены для образцов на эпоксидном связующем, полученных методом прессования. В дальнейшем были проведены эксперименты по сравнительным испытаниям образцов

Таблица 2. Влияние метода обработки контрольного (К) и опытных (Оп) образцов на напряжения трехточечного изгиба (средние значения по 5 опытам)

Метод нагрева	Материал связующего			
	Полиамид Па-6		Полиэфиэфиркетон ПЭЭК	
	Среднее σ, MPa	Ошибка	Среднее σ, MPa	Ошибка
Контрольный	74.1	$\pm$1.536	320.7	$\pm$9.36
Опытный нагрев в термокамере	78.1	$\pm$1.66	327.9	$\pm$8.83
Изменение Оп/К	1.05		1.02	
Опытный, СВЧ 2450 MHz	82.4	$\pm$0.874	386	$\pm$8.54
Изменение Оп/К	1.11		1.2	

на полиэфирэфиркетоне (ПЭЭК), полученных также по технологии FDM.

В эксперименте использованы две группы образцов на основе Па-6 и на основе ПЭЭК. Образцы нагревались до одного уровня при использовании разных методов нагрева и после охлаждения до температуры 20 °C испытывались по схеме трехточечного изгиба. Первая группа нагревалась в камере искусственной светопогоды Solarbox 522 модель 1500e RH (работа проведена в Центре коллективного пользования научным оборудованием НИЦ „Курчатовский институт“ — ИРЕА, г. Москва). Вторая группа — под воздействием СВЧ электромагнитного поля на режимах, приведенных выше в разд. 2. Время СВЧ воздействия фиксировалось по достижении заданной температуры поверхности, определяемой тепловизором. Температура образцов, нагреваемых в камере, обеспечивалась встроенной системой управления и контроля. Были получены температуры соответственно 60 °C–65 °C и 60 °C–72 °C.

Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Отметим, что нагрев в термокамере ПЭЭК не оказывает влияния на напряжения трехточечного изгиба, что объясняется малой температурой нагрева полимера, имеющего температуру плавления более 400 °C. В то же время нагрев до аналогичной температуры в СВЧ электромагнитном поле обеспечивает повышение напряжений на 20 %. Для образцов на связующем Па-6 нагрев в термокамере также не приводит к значимому изменению прочности, хотя и несколько в большей степени по сравнению с ПЭЭК, что связано со значительно меньшей его температурой размягчения и плавления.

Изложенное подтверждает наше предположение о преимущественном вкладе волновой составляющей в полученные эффекты СВЧ воздействия на ПКМ, сформированные при помощи аддитивных технологий.

Интенсивность любого колебательного и волнового процесса пропорциональна амплитуде смещения и частоте. Поскольку используемые в эксперименте частоты СВЧ излучения различаются более чем в 2.6 раза, отмеченные эффекты проявляются при частоте 2450 MHz в значительно большей степени и ведут к более значительному изменению микроструктуры и повышению жесткости.

С учетом вышеизложенного эффекты в термореактивном связующем, выполняющем функцию аппрета в исследованной системе жгутов углеродных волокон, при уменьшении частоты СВЧ излучения также будут менее выражены, что суммарно обеспечит меньшую эффективность СВЧ электромагнитного поля частотой 915 MHz. Важно заметить целесообразность для практического использования СВЧ обработки применительно к объектам 3*D*-печати, поскольку можно ожидать длительного сохранения полученного эффекта данного воздействия с учетом положительных результатов климатических испытаний угле- и стеклопластиков на эпоксидном связующем, полученных методом прессования [37,38].

Очевидно, можно ожидать повышения эффективности СВЧ воздействия на данной частоте применительно к объектам, толщина которых кратно превышает толщину монослоя, но в этом направлении целесообразны дополнительные исследования.

Заключение

Обнаружено, что обработка микроволновым излучением приводит к уплотнению микроструктуры материала, что проявляется в сокращении микродефектов и снижение объема пустот. Подчеркивается лучшая связанность матрицы с армирующими волокнами, в большей степени проявляющаяся при частоте 2450 MHz.

Показано, что проявление эффекта СВЧ воздействия применительно к монослоям малой толщины значительно зависит при прочих равных условиях от частоты излучения. При частотах 2450 и 915 MHz максимальные напряжения изгиба повышаются соответственно в 1.15 и 1.2 раза.

Центральной причиной различного влияния СВЧ излучения большей и меньшей частоты на параметры жесткости исследованных монослоев, а также измене-

ний в их микроструктуре можно считать более чем двукратно меньшую интенсивность волновых процессов, сопровождающих нагрев материала на частоте 915 MHz, что уменьшает возможности конформации концевых звеньев и цепей макромолекул.

Благодарности

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

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.М. Кручинин. *Стратегические материалы нового поколения и технологии их аддитивного производства* (ВИАМ, М., 2020)
[2] М.А. Керимов, М.М. Ильин. Пласт. массы, **5**–**6**, 44 (2022). DOI: 10.35164/0554-2901-2022-5-6-44-48
[3] М.С. Дориомедов. Тр. ВИАМ, **6**–**7**, 29 (2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-6-7-29-37
[4] Ю.Д. Жилов, Е.Н. Каблов, О.В. Старцев. Авиац. матер. и технол., **3** (60), 3 (2020). DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-3-3-16 [Yu.D. Zhilov, E.N. Kablov, O.V. Startsev. Aviat. Mater. Technol., **3** (60), 3 (2020).]
[5] В.А. Грибков, А.В. Довбищенко, Ю.С. Петровская. Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, **2** (137), 7 (2021). DOI: 10.18698/0236-3941-2021-2-7-22 [V.A. Gribkov, A.V. Dovbishchenko, Yu.S. Petrovskaya. HERALD Bauman MSTU. Ser. Mechanical Engineering, **2** (137), 7 (2021). DOI: 10.18698/0236-3941-2021-2-7-22]
[6] Я. Гибсон, Д. Розен, Б. Стакер. *Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство* (ТЕХНОСФЕРА, М., 2016) [Пер. с англ.: I. Gibson, D.W. Rosen, B.W. Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*, 2nd ed. (Springer, NY., 2015)]
[7] H. Bikas, P. Stavropoulos, G. Chryssolouris. Int. J. Adv. Manuf. Technol., **83**, 389 (2016). DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2
[8] Д.С. Дедов, А.А. Батаев, Т.С. Мусаев. Fundam. Prikl. Nauka, **15** (1), 42 (2021).
[9] А.В. Балашов, М.И. Маркова. Инж. вестн. Дона, **1**, 1 (2019). URL: http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5618
[10] В.М. Петров, С.Н. Безпальчук, С.П. Яковлев. Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С.О. Макарова, **9** (4), 765 (2017). DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776 [V.M. Petrov, S.N. Bezpalychuk, S.P. Yakovlev. Proc. State Univ. Marit. River Fleet Admiral S.O. Makarov, **9** (4), 765 (2017). DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-4-765-776]
[11] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, S. Wang. Compos. Part B, **80**, 369 (2015). DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.06.012
[12] E.A. Polyzos, A. Katalagarianakis, D. Van Hemelrijck, L. Pyl, D. Polyzos. Addit. Manuf., **36**, 101394 (2020). DOI: 10.1016/j.addma.2020.101394
[13] F. Wang, G. Wang, Z. Zhang, F. Ning. Addit. Manuf., **37**, 101661 (2021). DOI: 10.1016/j.addma.2020.101661
[14] Е.В. Багаев, Ю.А. Будберг, С.В. Гаврилов. *Современные методы модификации и обработки полимерных материалов* (Профессия, СПб., 2021)
[15] С.В. Алехин, А.С. Горшков, Е.Е. Потапов. Перспектив. матер., **5**, 36 (2020). DOI: 10.30791/1028-978X-2020-5-36-45
[16] A.V. Brovko, E.K. Murphy, M. Rother. IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett., **18** (9), 647 (2008). DOI: 10.1109/LMWC.2008.2002066
[17] D.A. Jones, T.P. Lelyveld, S.D. Mavrofidis, S.W. Kingman, N.J. Miles. Resour. Conserv. Recycl., **187**, 106620 (2022). DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106620
[18] Ю.С. Архангельский. *Справочная книга по СВЧ-электротермии* (Научная книга, Саратов, 2011)
[19] И.В. Злобина, Н.В. Бекренев. Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика, **22** (2), 158 (2022). DOI: 10.18500/1817-3020-2022-22-2-158-169
[20] И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, А.С. Егоров, Д.И. Кузнецов. ЖТФ, **93** (2), 237 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.02.53958.168-23 [I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, A.S. Egorov, D.I. Kuznetsov. Tech. Phys., **68** (2), 221 (2023). DOI: 10.1134/S1063784223020124]
[21] T. Kim, J. Lee, K.-H. Lee. Carbon Lett., **15** (1), 15 (2014). DOI: 10.5714/CL.2014.15.1.015
[22] M. Kwak. *Автореф. дис. докт. философии* (Imperial College London, 2016)
[23] Б.А. Розенберг, Э.Ф. Олейник. Успехи химии, **53** (2), 273 (1984). [B.A. Rozenberg, E.F. Oleinik. Sov. Russ. Chem. Rev., **53** (2), 181 (1984). DOI: 10.1070/RC1984v053n02ABEH003037]
[24] F.-L. Jin, X. Li, S.-J. Park. J. Ind. Eng. Chem., **105**, 70 (2022). DOI: 10.1016/j.jiec.2021.09.026
[25] G.M. Odegard, A. Bandyopadhyay. J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys., **49**, 1695 (2011). DOI: 10.1002/polb.22355
[26] Е.С. Жаворонок, И.Н. Сенчихин, В.И. Ролдугин. Высокомол. соед. Сер. А, **59** (2), 113 (2017). DOI: 10.1134/S0965545X1702010X
[27] А.С. Ажеганов, В.П. Бегишев, Д.А. Горинов, С.Н. Лысенко, И.Т. Шардаков. ПМТФ, **47** (4), 104 (2006). [A.S. Azheganov, V.P. Begishev, D.A. Gorinov, S.N. Lysenko, I.T. Shardakov. J. Appl. Mech. Tech. Phys., **47** (4), 567 (2006). DOI: 10.1007/s10808-006-0098-5]
[28] Д.С. Лобанов, Е.М. Лунегова, А.И. Мугатаров. Вестн. ПНИПУ. Механика, **1**, 41 (2021). DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.05 [D.S. Lobanov, E.M. Lunegeova, A.I. Mugatarov. Perm. Natl. Res. Polytech. Univ. Mech., **1**, 41 (2021). DOI: 10.15593/perm.mech/2021.1.05]
[29] О.В. Старцев, Е.Н. Каблов, А.Ю. Махоньков. Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение, спец. вып., **104** (2011).
[30] Л.Я. Мошинский. *Эпоксидные смолы и отвердители* (Аркадия, Тель-Авив, 1995)
[31] И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, Д.В. Кондратов. Вопр. электротехнологии, **2** (39), 18 (2023).

[32] ГОСТ Р ИСО 21748-2012 *Руководство по использованию оценок повторяемости, воспроизводимости и правильности при оценке неопределенности измерений* (Стандартинформ, М., 2014)
[33] В.В. Веременюк, Е.А. Крушевский, О.А. Мороз. *Статистическая обработка экспериментальных данных* (БНТУ, Минск, 2015)
[34] Н.А. Спирин, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурыкин. *Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента*: учебн. пособие (ООО „УИНЦ“, Екатеринбург, 2015)
[35] Р. Уинтертон. УФН, **105** (2), 307 (1971). [R.H. Winterton. Sov. Phys. Usp., **14** (2), 248 (1971). DOI: 10.1070/PU1971v014n02ABEH004459]
[36] И.В. Злобина, Н.В. Бекренев, Д.О. Чуриков. Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика, **25** (2), 230 (2025). [I.V. Zlobina, N.V. Bekrenev, D.O. Churikov. Izv. Saratov Univ. (N.S.) Ser. Phys., **25** (2), 230 (2025). DOI: 10.18500/1817-3020-2025-25-2-230-241]
[37] И.В. Злобина, И.С. Кацуба, Н.В. Бекренев. Изв. ВолГТУ, **3** (238), 18 (2020).
[38] И.В. Злобина, И.С. Кацуба, Н.В. Бекренев. Изв. ВолГТУ, **3** (238), 20 (2020).