

УДК 621.923

DOI:10.30987/2223-4608-2021-4-25-32

И.В. Злобина, к.т.н.

(СГТУ имени Гагарина Ю.А., 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)

E-mail: irinka_7_@mail.ru

Применение СВЧ технологии для уменьшения влияния факторов внешней среды на устойчивость конструкций из полимерных композиционных материалов к действию поперечных нагрузок*

Приведены результаты сравнительных испытаний на трехточечный изгиб контрольных и обработанных в СВЧ электромагнитном поле образцов угле- и стеклопластика после воздействия факторов внешней среды в течение восьми месяцев. Установлено, что модифицирование углепластика в отвержденном состоянии в СВЧ электромагнитном поле уменьшает отрицательное влияние внешней среды по снижению прочности после экспозиции восьми месяцев на 44,3...73 %, стеклопластика – на 6 %. СВЧ обработка предложена в качестве финишной технологической операции при изготовлении конструктивных элементов из полимерных композиционных материалов.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы; изгибная прочность; равномерность; факторы внешней среды; СВЧ электромагнитное поле; аморфная и упорядоченная структура.

I.V. Zlobina, Can. Sc. Tech.

(Gagarin STU of Saratov, 77, Politechnicheskaya, Saratov, 410054)

MWF technology use to reduce environment factor impact upon stability of polymeric composite structures to transverse load effect

The results of three-point bend comparative tests of carbon and glass-fiber samples checked and treated in the MWF electromagnetic field after external environment factor impact in the course of eight months are shown. It is defined that the modification of carbon fiber in a hardened state in the MWF electromagnetic field decreases a negative impact of external environment of strength decrease after eight-month exposure by 44.3...73%, glass-fiber – by 6%. The MWF treatment is offered as a finishing technological operation at manufacturing polymeric composite design elements.

Keywords: polymeric composites; bend strength; uniformity; external environment factors; MWF electromagnetic field; amorphous and ordered structure.

Введение

В современных технических системах, особенно в авиаракетной и космической технике, а также ветроэнергетических установках, ши-

*Исследования выполнены при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых МК-2692.2019.8 «Выявление влияния климатических и временного факторов на проявление и сохранение эффектов микроволнового модифицирующего квазиструктурирования отвержденных полимерных композиционных материалов на примере угле- и стеклопластиков».

рокое распространение получили полимерные композиционные материалы (ПКМ): угле-, стекло- и органопластики. Рост потребления ПКМ различными производствами прогнозируется и в перспективе. Это обосновано их более высокими удельной прочностью и коррозионной стойкостью по сравнению с известными металлами и сплавами и особенно перед однокомпонентными полимерами [1 – 4].

Для эксплуатации транспортных систем различного назначения характерно длительное воздействие разнообразных факторов внешней среды природного и техногенного харак-

тера. Поэтому наряду с обычными требованиями механической прочности к их конструкциям из ПКМ предъявляются такие требования, как тепло- и холодостойкость, водо- и атмосферостойкость [5, 6]. При реализации данных требований материаловедом и конструкторам приходится учитывать некоторые свойства ПКМ, отличающие их от металлических материалов, а именно: анизотропия, зависимость прочности и жесткости от направления действия эксплуатационных нагрузок, пониженная ударная вязкость [3, 6 – 8].

Для уменьшения негативного влияния этих особенностей используются различные конструкторско-технологические методы упрочнения. Изменение конструкции не всегда возможно по функциональным требованиям к изделию, т.к. часто сопряжено с увеличением габаритных размеров и веса. Большинство известных методов повышения прочностных свойств ПКМ путем химической модификации компонентов в настоящее время практически себя исчерпали. Совершенствование существующих технологий изготовления компонентов и формования ПКМ, а также большинства физических методов модифицирования требует значительных инвестиций в техническое перевооружение производства [9, 10].

Изложенное позволяет считать, что проведение исследований и разработка новых эффективных технологических методов физического модифицирования ПКМ для придания им требуемого комплекса свойств с учетом влияния факторов внешней среды являются актуальными научно-производственными задачами.

Постановка задачи

К физическим методам модифицирующего воздействия на структуру и прочностные свойства изделий из неметаллических материалов, в том числе ПКМ, относится воздействие СВЧ электромагнитного поля, которое позволяет интенсифицировать процессы тепломассопереноса и формировать в объеме материала заданную совокупность характеристик в процессе отверждения матрицы [11 – 15].

Большинство исследований и практических применений СВЧ воздействия на диэлектрические материалы касаются предварительного модифицирования исходных компонентов и повышения эффективности стадии отверждения матрицы при формировании ПКМ. Некоторые исследователи считают, что сопутствующее известным методам СВЧ модифицирования негативное влияние на его результаты последующих операций технологического цикла может быть сведено к минимуму при использовании СВЧ модифицирования на фи-

нишной технологической операции при воздействии на окончательно отвержденный ПКМ в составе готового конструктивного элемента.

Выполнены исследования, показавшие зависимость прочностных свойств ПКМ от плотности потока энергии (ППЭ) СВЧ излучения частотой 2450 МГц и времени воздействия, позволившие определить рациональные энергетические параметры СВЧ обработки: для углепластика плотность потока энергии составляет $17...18 \cdot 10^4$ мкВт/см², для стеклопластика – $22...25 \cdot 10^4$ мкВт/см². При этом с увеличением ППЭ выше указанных значений эффективность СВЧ обработки углепластика снижается, стеклопластика снижается незначительно или не изменяется. Экспериментально установлено увеличение прочностных свойств отвержденных угле- и стеклопластиков после СВЧ обработки в течение 1...2 мин: предельные напряжения среза увеличиваются в среднем на 40 %; трехточечный изгиб – на 7...13 %; межслоевой сдвиг – на 14...16 % [16 – 19]. Однако остается не выясненным до конца вопрос о сохранении достигнутых эффектов под влиянием временного фактора и в условиях внешних климатических воздействий окружающей среды, что представляется важным поскольку согласно материалам исследований [20 – 22] наибольшее влияние на работоспособность изделий из ПКМ оказывают именно процессы старения и влага, скапливающаяся в пористой структуре, диффундирующая в матрицу и адсорбирующаяся на поверхности волокон в межфазном слое (МФС). При этом наиболее отрицательное влияние внешняя среда оказывает на конструкционные элементы из стеклопластика ввиду его повышенной гидрофильности по сравнению с углепластиковыми.

Целью исследований являлось подтверждение эффективности технологии СВЧ обработки угле- и стеклопластиков после экспозиции в натуральных условиях климатической зоны г. Саратова с учетом временного фактора в сравнении с контрольными образцами для разработки обоснованных рекомендаций по применению данного метода.

Методика исследований. Оборудование и аппаратура

В экспериментах использовали образцы угле- и стеклопластика производства ООО «Еврокомплект», г. Калуга в виде плоскопараллельных пластин размерами соответственно $70 \times (10,0...10,2) \times (4,85...5,0)$ мм и $70 \times (10,0...10,2) \times (5,3...5,8)$ мм. В качестве матрицы в материалах использована эпоксидная смола ЭД-20 с отвердителем ПЭПА. Об-

разцы разделяли на контрольную и опытную группы.

Сервысокочастотную обработку осуществляли одновременно по 5 образцов на экспериментальном оборудовании, созданном на базе установки «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск, Калужской обл.), с камерой лучевого типа с неограниченным объемом (излучение в открытое пространство) при частоте 2450 МГц и ППЭ в течение 2-х мин. Половина партии контрольных и опытных образцов после СВЧ модифицирования находилась под действием факторов внешней среды в натуральных условиях климатической зоны г. Саратова в период с 02.11.2019 г. по 02.07.2020 г. Средняя температура в период ноябрь – февраль составила $-1,7^{\circ}\text{C}$, влажность воздуха – 82 %, атмосферное давление – 750 мм. рт. ст.. В период март – июль средняя температура составила $+13,6^{\circ}\text{C}$, влажность – 49,4 %, атмосферное давление 744 мм. рт. ст.. Вторую половину партии опытных образцов подвергали СВЧ обработке в исходном состоянии непосредственно перед испытаниями. В каждой партии использовали по 5 контрольных и опытных образцов.

Обе партии контрольных и опытных образцов испытывали по схеме трехточечного изгиба в соответствии с ГОСТ Р 56805-2015 на специальной компьютерной установке с тензометрическими датчиками усилий с программным обеспечением LabView (ИП «Майоров», г. Орел). По результатам испытаний по графикам кинетики нагружения вычислили поперечную нагрузку и изгибающий момент, на основе замеров фактических поперечных размеров образцов вычислили момент сопротивления их сечения, рассчитали текущие значения напряжений изгиба σ_F . Далее определили математическое ожидание значений изгибных напряжений, изменение величины напряжений после экспозиции в натуральных условиях ($\sigma_{FВ} / \sigma_{Fиск}$) и изменение напряжений в опытных образцах $\sigma_{Fоп}$ в сравнении с контрольными $\sigma_{Fк}$ – ($\Delta = \sigma_{Fоп} / \sigma_{Fк}$). Влияние СВЧ модифицирования на равномерность значений изгибных напряжений оценивали путем расчета коэффициента вариации и размаха вариации. Дополнительно оценивали время от начала приложения нагрузки до потери образцом несущей способности или до его разрушения.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные графики кинетики нагружения контрольных и опытных образцов представлена на рис. 1 и 2, результаты их обработки – на рис. 3 и в табл. 1.

Полученные графики как контрольных, так и опытных образцов имеют сходный характер. Экспозиция в условиях внешней среды также не вносит существенных изменений в форму зависимости нагружающего момента от времени. Отмечен несколько более плавный вид графика нагружения опытных образцов в верхней области (перед началом разрушения). Основное отличие заключается в продолжительности периода времени от начала нагружения до разрушения (см. табл. 1).

Видно, что экспозиция в условиях внешней среды контрольных и опытных образцов приводит к увеличению времени до разрушения, которое возрастает с увеличением экспозиции. Предварительное модифицирование образцов в СВЧ электромагнитном поле способствует значительному увеличению периода до разрушения как образцов в исходном состоянии, так и находившихся в натуральных условиях воздействия внешней среды. Однако для стеклопластика данное увеличение менее выражено.

Графики зависимости предельных напряжений изгиба от экспозиции образцов в сравнении с данным параметром исходных (см. рис. 3) построены для математических ожиданий σ_F при стандартной доверительной вероятности $P = 0,95$ и значении критерия Стьюдента $t(n) = 2,78$.

Статистическая обработка результатов показала, что доверительные интервалы значений σ_F опытных образцов в 1,5 – 2 раза меньше, чем контрольных, с увеличением экспозиции величина доверительных интервалов как контрольных, так и опытных образцов расширяется, что может быть связано с повышением дефектности под влиянием факторов внешней среды и, как следствие – неоднородностью структуры и неравномерностью значений исследуемого параметра, приводящего к разбросу значений.

В целом отмечается незначительное снижение предельных напряжений изгиба контрольных и опытных образцов углепластика при относительно малой экспозиции (3 месяца), которое становится для контрольных образцов значимым (10 %) при увеличении экспозиции до 8 месяцев, что необходимо учитывать при проектировании и планировании эксплуатации объектов. Существенно меньшее снижение σ_F опытных образцов (на 44,3 %) при экспозиции 8 месяцев позволяет прогнозировать сохранение их работоспособности при повышенной длительности эксплуатации. Для стеклопластика отмечается сохранение значений предельных напряжений изгиба контрольных и опытных образцов при относительно малой экспозиции (3 месяца) или некоторое увеличение, которое составляет

0,5...1,0% и не выходит за погрешность измерений. При увеличении экспозиции до 8 месяцев предельные напряжения контрольных и опытных образцов снижаются соответственно на 3,7% и 5,5%, что также можно считать незначимым, поскольку оно не выходит за погрешность измерений.

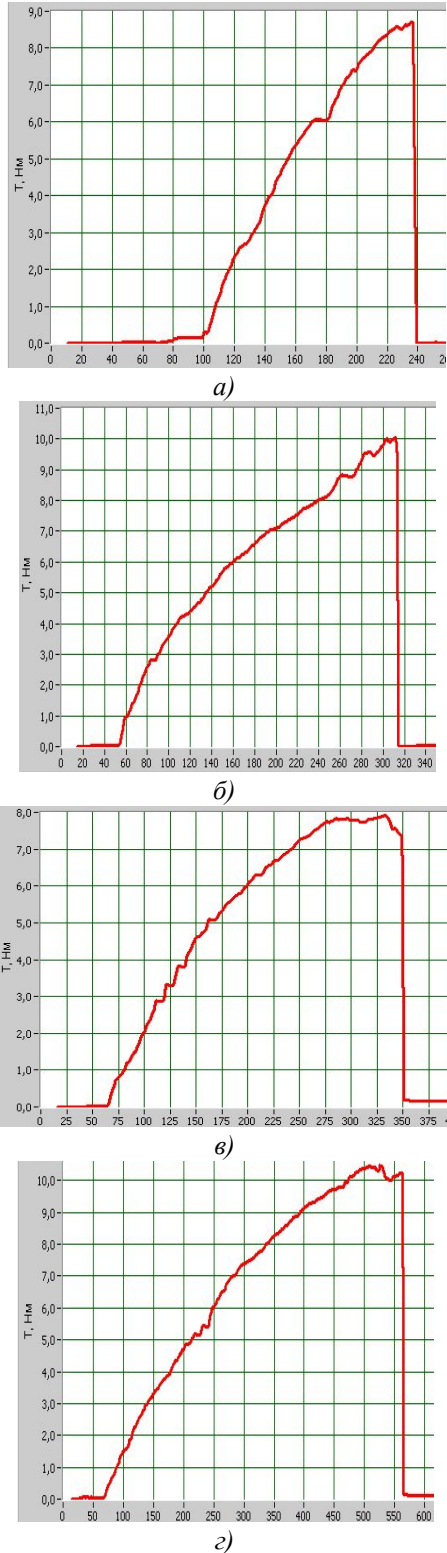


Рис. 1. Типичные графики нагружения контрольных (а, в) и опытных (б, г) образцов углеродистого волокна: а, б – исходные образцы; в, г – после экспозиции 8 месяцев

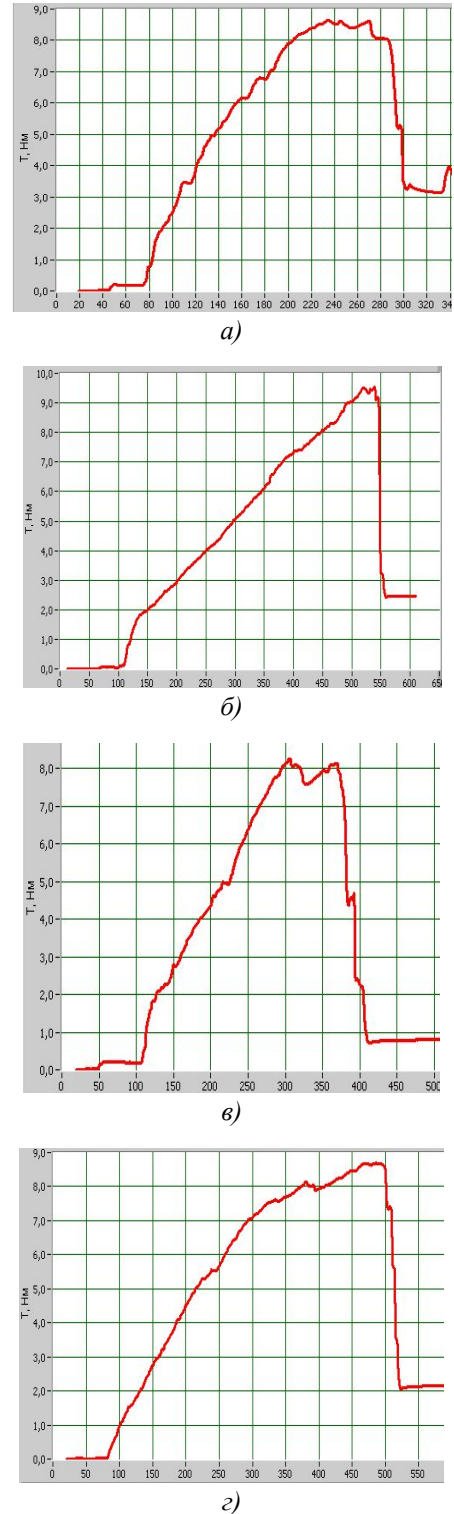


Рис. 2. Типичные графики нагружения контрольных (а, в) и опытных (б, г) образцов стеклопластика: а, б – исходные образцы; в, г – после экспозиции 8 месяцев

С целью прогнозирования изменений изгибной прочности образцов с увеличением экспозиции проведена аппроксимация зависимостей (см. рис. 3) функциями различного вида с определением степени сходимости результатов (табл. 2).

1. Средняя длительность периода времени (мс) от начала нагружения до разрушения контрольных и опытных образцов угле- и стеклопластика с учетом временного и климатического факторов

| Материал образцов | Состояние образцов | Вид образцов | | Изменение |
|-------------------|----------------------------|--------------|---------|-----------|
| | | Контрольные | Опытные | |
| Углепластик | Исходные | 134 | 283 | 2,11 |
| | После экспозиции 8 месяцев | 356 | 562 | 1,58 |
| Стеклопластик | Исходные | 127 | 417 | 3,28 |
| | После экспозиции 8 месяцев | 311 | 362 | 1,16 |

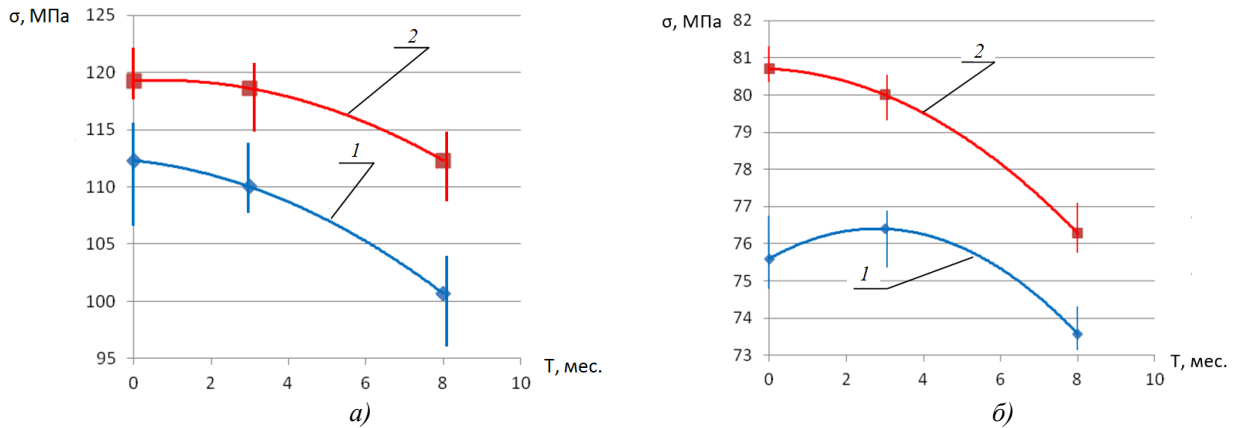


Рис. 3. Зависимость предельных напряжений изгиба контрольных (1) и опытных (2) образцов углепластика (а) и стеклопластика (б) от экспозиции в условиях внешней среды

2. Анализ зависимостей влияния временного и климатического факторов на изгибную прочность

| Материал | Образец | |
|---------------|---|---|
| | Контрольный | Опытный |
| Углепластик | $\sigma_F = -0,19T^2 - 0,7967T + 112,3$ $R^2 = 0,98$ | $\sigma_F = -0,3139T^2 + 0,725T + 119,25$ $R^2 = 0,99$ |
| Стеклопластик | $\sigma_F = -0,1038T^2 + 0,578T + 75,6$ $R^2 = 0,98$ | $\sigma_F = -0,0638T^2 - 0,0418T + 80,7$ $R^2 = 0,98$ |

Проведенный анализ показал, что полученные зависимости с высокой точностью аппроксимируются полиномами 2-й степени. Анализ эмпирических моделей зависимости прочностных характеристик от экспозиции образцов угле- и стеклопластика во внешней среде подтверждает, что воздействие СВЧ электромагнитного поля способствуют значимому снижению отрицательного влияния данного фактора. Прогнозирование изменений изгибной прочности углепластика на основе расчетов по полученным полиномиальным моделям показывает (рис. 4, а), что изгибная прочность контрольных образцов через 15 месяцев экспозиции может понизиться практически в 2 раза. Изгибная прочность опытных образцов за тот же период может понизиться не более, чем на 30 %. Прогнозирование изменений изгибной прочности стеклопластика показывает (рис. 4, б), что спустя 2,5 года от начала воздействия факторов внешней среды контрольные образцы потеряют несущую способность.

Изгибная прочность опытных образцов стеклопластика за тот же период может понизиться практически в 2 раза (с 80 до 37 МПа), но в данном случае еще сохранится целостность образца. Видно, что, хотя в принятых условиях эксперимента значимого эффекта по повышению прочности стеклопластика после СВЧ модифицирования не выявлено, с увеличением экспозиции эффект начинает усиливаться и через 2 года может достичь 75...76 %. С учетом многофакторности и многовариантности как воздействия внешних факторов, так и СВЧ электромагнитного поля, данный теоретический прогноз нуждается в экспериментальном подтверждении на образцах, время экспозиции которых должно быть не менее 1,5 лет для углепластика и 2,5...3 лет для стеклопластика, чтобы получить достоверную зависимость.

Подтверждено, что обработка отвержденных ПКМ в СВЧ электромагнитном поле повышает равномерность прочностных характеристик и после воздействия внешних клима-

тических факторов. Установлено значительное снижение коэффициента вариации значений σ_F опытных образцов как углепластика, так и стеклопластика по сравнению с контрольными, составляющее для углепластика от 70,2 % для исходных образцов до 77,8 % для образцов после экспозиции 8 месяцев, для стеклопластика соответственно 35 % и 33,3 %. В тоже время с увеличением экспозиции в натуральных условиях коэффициент вариации и, соответственно, неравномерность свойств как контрольных, так и опытных образцов увеличивается. При этом с увеличением экспозиции разница в значениях коэффициента вариации опытных и контрольных образцов возрастает, что свидетельствует о повышении сопротивления опытных образцов отрицательному влиянию факторов внешней среды. Размах вариации σ_F опытных образцов углепластика снижается на 66,7...76,4 %, стеклопластика – на 24...29 %.

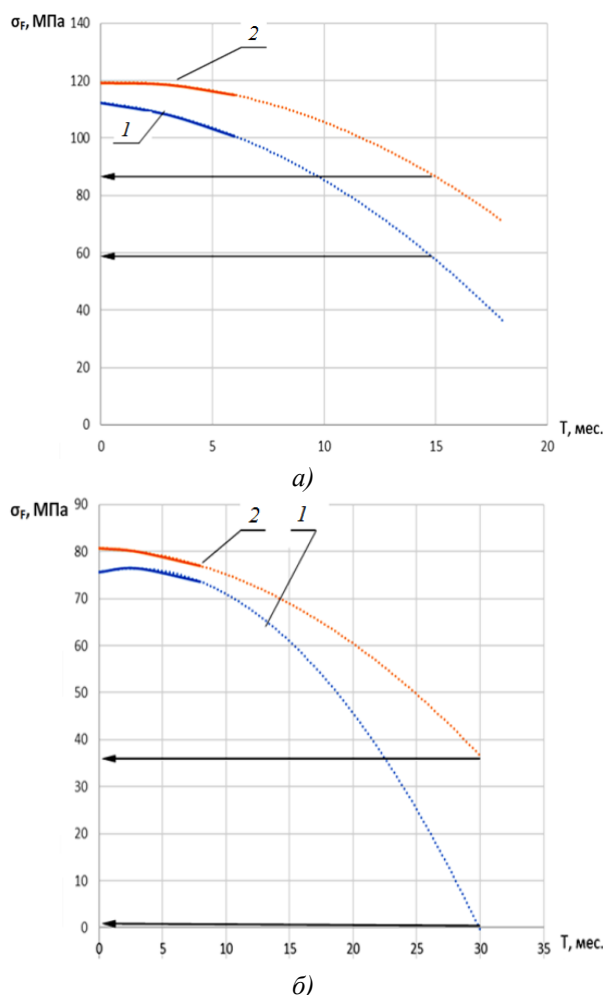


Рис. 4. Прогноз снижения предельных напряжений изгиба контрольных (1) и опытных (2) образцов углепластика (а) и стеклопластика (б) с увеличением экспозиции в натуральных климатических условиях

Может быть предложено следующее обоснование приведенным выше результатам сни-

жения отрицательного влияния факторов внешней среды на образцы ПКМ, подвергнутые СВЧ обработке. Отвержденные ПКМ и углепластики, состоят из двух фаз – аморфной структуры хаотичного характера (основной объем матрицы) и областей упорядоченной структуры, которую некоторые авторы считают кристаллической фазой [24]. Эта фаза располагается преимущественно в межфазном слое (МФС) «матрица-волокно», в котором поверхность волокна выступает в роли инициатора формирования упорядоченных (регулярных) надмолекулярных структур в процессе отверждения материала, и отличается наличием границ между данными надмолекулярными структурами и пустот (пор), образовавшихся вследствие усадки матрицы, имеющей отличающийся от наполнителя коэффициент термического расширения, в процессе отверждения. В результате создается неполный контакт армирующих волокон и матрицы.

Большие размеры пустот, а также малое количество надмолекулярных упорядоченных структур будут вызывать уменьшение прочности контакта волокон и матрицы, ухудшать условия перераспределения нагрузки между волокнами через матрицу при разрушении части волокон. Одним из основных проявлений воздействия факторов внешней среды на ПКМ является насыщение их структуры влагой [20 – 22] по трем независимым механизмам: диффузия в объем матрицы; поверхностная адсорбция на поверхности волокон и заполнение трещин и пустот (пор).

При этом имеет важное значение капиллярный эффект проникновения влаги по трещинам и порам, которая приводит к расклиниванию структуры при продвижении по капилляру (эффект Ребиндера). Развиваются коррозионные процессы, образуются гидроксильные группы, что повышает пластичность матрицы, снижает прочность механических связей в МФС и уменьшает прочность материала. Поэтому, как показывают данные рис. 3, воздействие проникшей в поры влаги вызывает уменьшение напряжений трехточечного изгиба испытываемого угле- и стеклопластика.

Эффект модифицирования в СВЧ электромагнитном поле может заключаться в торможении фазово-структурных изменений в матрице и МФС угле- и стеклопластика, вызванных воздействием факторов внешней среды с учетом времени экспозиции по следующим причинам. Известно [24], что при нагреве эпоксидной смолы до температуры 40...50 °С происходит разрушение упорядоченной фазы и восстановление аморфной структуры. В опытных образцах угле- и стеклопластика в результате СВЧ диэлектрического нагрева и

характерного для углепластика скин-эффекта в МФС «матрица-углеродное волокно» повышается температура в объеме ПКМ и в МФС, зависящая от теплофизических свойств материала, плотности потока энергии и времени.

В принятых условиях эксперимента температура образцов углепластика находилась в диапазоне 50...60 °С, стеклопластика – 32...40 °С, что соответствует указанному выше значению и приводит к частичной пластификации и восстановлению аморфной структуры эпоксидной матрицы. Сверхвысокочастотные волновые процессы стимулируют колебания макромолекул в восстановленной пластифицированной аморфной структуре МФС и их конформационные повороты, активацию аппретированной поверхности волокон, движению дефектов и их выходу на поверхность из структуры. На активированной поверхности волокон формируется большее количество активных макрорадикалов, вступающих во взаимодействие с повернутыми звеньями цепей макромолекул. Поэтому при доотверждении после СВЧ обработки увеличивается процент упорядоченной фазы в МФС, но размеры надмолекулярных образований меньше по причине неизменности исходного объема матрицы. Соответственно увеличивается площадь поверхностей контактного взаимодействия «матрица-волокно» и уменьшаются размеры пустот (пор) в МФС [23], что увеличивает сопротивление проникновению жидкости, а следовательно – способствует снижению отмеченных отрицательных воздействий внешней среды на прочность МФС.

Заключение

Установлено, что воздействие факторов внешней среды приводит к снижению предельных напряжений изгиба углепластика на 3,7...10,4 % в зависимости от экспозиции 3 и 8 месяцев. Влияние внешней среды на прочность стеклопластика проявляется при увеличении экспозиции на срок более 1,5 лет.

Модифицирование угле- и стеклопластика в отвержденном состоянии в СВЧ электромагнитном поле уменьшает отрицательное влияние внешней среды по снижению прочности на 44,3...73 %, при этом существенно возрастает равномерность значений изгибной прочности в партии образцов.

В качестве механизма уменьшения отрицательного влияния факторов внешней среды на прочность ПКМ предложено изменение структуры в межфазном слое, заключающееся в уменьшении размеров пустот (пор), что способствует уменьшению количества адсорбированной влаги, и увеличению количества центров формирования упорядоченной структуры поверхностей контактного взаимодей-

ствия «матрица-волокно», возникающих в процессе конформационных вращений звеньев макромолекул полимера под влиянием волновых процессов, становящихся возможными вследствие частичного размягчения матрицы в процессе СВЧ диэлектрического нагрева. Указанные изменения фиксируются при доотверждении матрицы после снятия СВЧ электромагнитного поля.

Полученные положительные результаты позволяют предложить СВЧ обработку в качестве финишной технологической операции при изготовлении конструктивных элементов из ПКМ для повышения устойчивости изделий к воздействию негативных факторов внешней среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кошкин, Р.П. Основные направления развития и совершенствования беспилотных авиационных систем: <http://spmagazine.ru/420>.
2. Каблов, Е.Н. Материалы и химические технологии для авиационной техники // Вестник Российской академии наук. 2012. Т. 82. №6. С. 520 – 530.
3. Ким, С. Сырье → композиты → углеволокно // The Chemical Journal. 2014. – С. 64 – 73.
4. Дориомедов, М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. – № 6-7 (89). – 2020. – С. 29 – 37.
5. Садовская, Т.Г., Лукина, Е.А. Проблемы и перспективы реализации политики импортозамещения при формировании производственной кооперации по применению композиционных материалов в отечественном гражданском авиастроении на примере ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. Вып. 11. С. 1 – 12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>.
6. Михайлин, Ю.А. Конструкционные полимерные композиционные материалы. 2-е изд. СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 822 с.
7. Brinkmann, S. at al. International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers. – Ed. Hanser. – 2006. – 920 p.
8. Гуняев, Г.М. Кривонос, В.В., Румянцев, А.Ф. Полимерные композиционные материалы в конструкциях летательных аппаратов // Конверсия и машиностроение. – № 4. – 2004. URL: www.viam.ru/public.
9. Суй, Ц., Гусева, Р.И., Вэй, Л., Линьони, Ч., Юй, Г. Анализ состояния поверхности высокопрочных композиционных материалов с углеродным волокном и исследование их механических характеристик // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2011. – Т. 1. – № 8. – С. 4 – 8.
10. Николаев, А.Ф., Крыжановский, В.К., Бурлов, В.В. Технология полимерных материалов. – СПб.: Профессия, 2008. – 534 с.
11. Архангельский, Ю.С. Справочная книга по СВЧ-электротермии: справочник. – Саратов: Научная книга, 2011. – 560 с.
12. 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.
13. Калганова, С.Г. Влияние СВЧ воздействия электромагнитного поля на кинетику отверждения эпоксидной смолы // Вестник саратовского государственного технического университета. 2006. – Т. 1. – № 1. – С. 90 – 95.

14. Singh, I. Feasibility study on microwave joining of 'green' composites / Pramendra Kumar Bajpaia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara // *Akademeia* (2011) 1(1): ea0101. pp. 1-6.

15. Studentsov, V.N., Pyataev, I.V. Effect of vibration in Processes of structure Formation in Polymers // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2014. – vol. 87. – №3. – pp. 352 – 354.

16. 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. – pp. 101 – 106.

17. Злобина, И.В. Бекренев, Н.В., Павлов, С.П. Прочностные испытания модифицированных в СВЧ электромагнитном поле композиционных материалов // *Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева*. Серия: Механика предельного состояния. – 2017. – № 3 (33). – С. 42 – 57.

18. Zlobina, I.V. The effect of processing in a SHF electromagnetic field on the parameters of vibro-wave processes generated by the impact of a solid body in cured polymer composite materials under influence of climate factors JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. P. 42 – 45.

19. Злобина, И.В. Бекренев, Н.В. Новые конструкторско-технологические методы повышения прочности конструктивных элементов из неметаллических композиционных материалов: монография. – Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. – 2017. – 164 с.

20. Злобина, И.В. Повышение адгезионной прочности отвержденного углепластика с молниезащитным покрытием в СВЧ электромагнитном поле // *Научноёмкие технологии в машиностроении*. 2020. – № 7 (109). – С. 35 – 40.

21. Кириллов, В.Н., Ефимов, В.А., Шведкова, А.К. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ // *Авиационные материалы и технологии*. – № 4. – 2011. – С. 41 – 45.

22. Славин, А.В., Старцев, О.В. Свойства авиационных стеклопластиков и углепластиков на ранней стадии климатического воздействия // *Труды ВИАМ*. – № 9 (69). – 2018. – С. 71 – 81.

23. Злобина, И.В., Кацуба, И.С., Бекренев, Н.В. Влияние обработки в СВЧ электромагнитном поле на изменение изгибной прочности конструктивных элементов из отвержденных углепластиков под действием факторов внешней среды // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. – 2020. – № 3 (238). – С. 20 – 22.

24. Мошинский, Л. Эпоксидные смолы и отвердители. – Тель-Авив: Аркадия-Пресс. ЛТД. – 1995. – 371 с.

REFERENCES

1. Koshkin, R.P. *Basic Directions in Drone Development and Improvement*: <http://spmagazine.ru/420>.

2. Kablov, E.N. Materials and chemical technologies for aircraft engineering // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2012. Vol.82. No.6. pp. 520-530.

3. Kim, S. Raw material →composites →carbon fiber // *The Chemical Journal*. 2014. – pp. 64-73.

4. Doriomedov, M. S. Russian and world market of polymer composites (review) / M.S. Do-riomedov // *Proceedings of VIAM*, No. 6-7 (89), 2020. P. 29-37.

5. Sadovskaya, T.G., Lukina, E.A. Problems and outlooks in realization of import substitution at formation of production cooperation for composite application in domestic civil aircraft industry by example of PC "United Aircraft Corporation" // *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2014. Issue 11. pp. 1-12. URL: <http://engjournal.ru/catalog/indust/hidden/1221.html>.

6. Mikhailin Yu.A. Design polymer composites. 2-d Edi

tion. S-Pb.: *Scientific Fundamentals and Technologies*, 2010. – pp. 822.

7. Brinkmann, S. at al. *International Plastics Handbook the Resource for Plastics Engineers*. – Ed. Hanser. – 2006. – 920 p.

8. Gunyaev, G.M. Krivonos, V.V., Rummyantsev, A.F. Polymeric composites in aircraft designs // *Conversion and Mechanical Engineering*. No.4. – 2004. URL: www.viam.ru/public.

9. Syui, Ts., Guseva, R.I., Way, L., Linyuni, Ch., Yui, G. Analysis of surface state in high-strength composites with carbon fiber and research of their mechanical characteristics // *Proceedings of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University*. 2011. – Vol.1. – No.8. – pp. 4-8.

10. Nikolaev, A.F., Kryzhanovskiy, V.K., Burlov, V.V. *Polymer Technology*. – S-Pb.: Profession, 2008. – pp. 534.

11. Arkhangelsky, Yu.S. *Reference Book on MWF electro-terms: reference book*. – Saratov: Scientific Book, 2011. – pp. 560.

12. Kolomeitsev, V.A., Kuzmin, Yu.A., Nikuiko, D.N., Semyonov, A.E. Experimental investigations of heating inequality level in dielectric materials and absorbed power in MWF devices of resonator type // *Electromagnetic Waves and Electronic Systems*. – 2013. – Vol.18. – No.12. – pp. 25-31.

13. Kalganova, S.G. MWF impact of electromagnetic field upon kinetic of epoxy resin condensation // *Bulletin of Saratov State Technical University*. 2006. – Vol.1. – No.1. – pp. 90-95.

14. Singh, I. Feasibility study on microwave joining of 'green' composites / Pramendra Kumar Bajpaia, Deepak Malika, Apurbba Kumar Sharma, Pradeep Kumara // *Akademeia* (2011) 1(1): ea0101. pp. 1-6.

15. Studentsov, V.N., Pyataev, I.V. Effect of vibration in Processes of structure Formation in Polymers // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2014. – vol. 87. – №3. – pp. 352 – 354.

16. 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. – pp. 101 – 106.

17. Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V., Pavlov, S.P. Strength tests of composites modified in MWF electromagnetic field // *Bulletin of Yakovlev State Teacher's Training University of Chuvashia. Series: Mechanics of Limiting State*. – 2017. – No.3(33). – pp. 42-57.

18. Zlobina, I.V. The effect of processing in a SHF electromagnetic field on the parameters of vibro-wave processes generated by the impact of a solid body in cured polymer composite materials under influence of climate factors JOP Conference Series: Metrological Support of Innovative Technologies. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2020. P. 42 – 45.

19. Zlobina, I.V., Bekrenev, N.V. *New Design-Technological Methods for Strength Increase in Design Elements of Nonmetallic Composites*: monograph. – Saratov: Saratov State Technical University. – 2017. – pp. 164.

20. Zlobina, I. V. Improving the adhesive strength of cured carbon fiber with a sunscreen coating in a microwave electromagnetic field // *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2020. – № 7 (109). – Pp. 35-40.

21. Kirillov, V.N., Yefimova, V.A., Shvedkova, A.K. Investigations of climatic factors and mechanical loading impact upon structure and mechanical properties of PCs // *Aircraft Materials and Technologies*. – No.4. – 2011. – pp. 41-45.

22. Slavin, A.V., Startsev, O.V. Properties of aircraft glass-plastic and carbon plastic at early stage of climatic impact // *VIAM Proceedings*. – No.9(69). – 2018. – pp. 71-81.

23. Zlobina, I.V., Katsuba, I.S., Bekrenev, N.V. Treatment impact in MWF electromagnetic field upon bend strength changes in design hardened carbon plastic elements under external environment factors // *Proceedings of Volgograd State Technical University*. – 2020. – No.3(238). – pp. 20-22.

24. Moshinsky, L. *Epoxy Resins and Hardening Agents*. – Tel-Aviv: Arkadia-Press. LTD. – 1995. – pp. 371.

Рецензент д.т.н.

Игорь Владимирович Родионов