



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2025. Т. 25, вып. 2. С. 230–241

Izvestiya of Saratov University. Physics, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 230–241

<https://fizika.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-2-230-241>, EDN: FYLSEA

Научная статья

УДК 621.365.5:620.172



Эффективность влияния СВЧ-излучения и конвекционного нагрева на релаксацию внутренних напряжений в отвержденных полимерных композиционных материалах

И. В. Злобина^{1,2}, Н. В. Бекренев^{1✉}, Д. О. Чуриков¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А., Россия, 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²НИЦ «Курчатовский институт», Россия, 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Злобина Ирина Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и мехатроники, ²научный сотрудник лаборатории специального органического синтеза отдела тонких органических технологий, zlobinaiv@sstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2331-7444>, AuthorID: 686083

Бекренев Николай Валерьевич, доктор технических наук, ¹профессор кафедры технической механики и мехатроники, nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-1020>, AuthorID: 271817

Чуриков Данила Олегович, аспирант кафедры технологии машиностроения, danielachurikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7389-9419>, AuthorID: 1221702

Аннотация. Исследован процесс релаксации внутренних напряжений в прессованных угле- и стеклопластиках под действием изгибающих нагрузок после модификации путем конвекционного нагрева в термокамере и воздействия сверхвысокочастотного электромагнитного поля. Установлено, что нагрев полимерных композиционных материалов в термокамере и сверхвысокочастотном электромагнитном поле способствует повышению степени релаксации при одновременном уменьшении скорости процесса. При этом сверхвысокочастотное воздействие на угле- и стеклопластик способствует релаксации напряжений соответственно на (5.1–7.2)% и на (6.5–9.8)% в зависимости от величины внешней нагрузки. После нагрева в термокамере отмечена релаксация напряжений на (4.4–6.8)% и (5.2–9.0)%. Для контрольных образцов степень релаксации составляет (4.3–6.5)% и (4.9–8.55)%, процесс останавливается практически в 3 раза раньше, чем у опытных образцов. В среднем степень релаксации напряжений в образцах после воздействия на них сверхвысокочастотного электромагнитного поля выше на 18.5% и 12.8% для углепластика и стеклопластика, соответственно, по сравнению с нагревом в термокамере, что свидетельствует о большей эффективности данного метода термической обработки с целью стабилизации свойств полимерных композиционных материалов. При этом скорость релаксации напряжений в опытных образцах снижается относительно контрольных в 1.5–2 раза. В качестве основного механизма влияния сверхвысокочастотного воздействия на степень и скорость релаксации предложено уменьшение количества и размеров микротрещин в объеме матрицы и в области контакта «матрица-волокно», что определяется большей связанностью наполнителя и связующего за счет роста количества точек контакта во время его временного перехода в область размягчения.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, внешняя нагрузка, внутренние напряжения, релаксация, сверхвысокочастотное электромагнитное поле, нагрев в термокамере

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-79-00039 «Обоснование методологии комплексного модифицирования композиционных материалов для экстремальных условий эксплуатации на основе изучения фазово-структурных превращений под влиянием электрофизических воздействий различного частотного диапазона», <https://rscf.ru/project/23-79-00039/>).

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-2-230-241>, EDN: FYLSEA

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

The effectiveness of the effect of microwave radiation and convection heating on the relaxation of internal stresses in cured polymer composite materials

I. V. Zlobina^{1,2}, N. V. Bekrenev^{1✉}, D. O. Churikov¹

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Polytekhnicheskaya St., Saratov 410054, Russia

²National Research Centre "Kurchatov Institute", 1 Academician Kurchatov Square, Moscow 123182, Russia

© Злобина И. В., Бекренев Н. В., Чуриков Д. О., 2025



Irina V. Zlobina, irinka_7_@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2331-7444>, AuthorID: 686083

Nikolaj V. Bekrenev, nikolaj.bekrenev@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7457-1020>, AuthorID: 271817

Danila O. Churikov, danilachurikov@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0002-7389-9419>, AuthorID: 1221702

Abstract. Background and Objectives: The relaxation of internal stresses in pressed carbon and fiberglass plastics under the action of bending loads after modification by heating in a thermal chamber and exposure to a microwave electromagnetic field has been studied. It is shown that for pressed carbon and fiberglass plastics under the influence of bending loads, relaxation processes of internal stresses are characteristic, the intensity of which is determined by the initial state of the material. **Materials and Methods:** In the experiment, three groups of carbon and fiberglass samples produced by Eurocomplant LLC in Kaluga were used in the form of plane-parallel plates with dimensions of 75x10x5 mm, cut from a panel with dimensions of 500x500x5 mm in the state of delivery. Experiments with the first group of samples were carried out using a special microwave technological installation assembled on the basis of the Zhuk-2-02 radiator (NPP Agroecotech LLC, Obninsk, Kaluga region, Russia) with a horn-type radiator. The time of microwave exposure was recorded upon reaching the set surface temperature determined by the Flir E-40 thermal imager (FLIR, USA). The second group of samples was heated in an artificial light-weather chamber Solarbox 522 model 1500e RH (COFOMEGRA SRL, Italy). The study of internal stress relaxation was carried out according to the three-point bending scheme on a laboratory computer installation with LabVIEW software (IP Mayorov, Orel, Russia). **Results:** Microwave exposure to carbon and fiberglass contributes to stress relaxation by (5.1–7.2)% and (6.5–9.8)%, respectively, depending on the magnitude of the external load. After heating in the thermal chamber, stress relaxation was noted by (4.4–6.8)% and (5.2–9.0)%. For control samples, the degree of relaxation is (4.3–6.5)% and (4.9–8.55)%, the process stops almost 3 times earlier than for experimental samples. On average, the degree of stress relaxation in samples after exposure to a microwave electromagnetic field is 18.5% and 12.8% higher for carbon fiber and fiberglass, respectively, compared with heating in a thermal chamber. **Conclusion:** This indicates a greater effectiveness of the microwave method of heat treatment in order to stabilize the properties of PCM. **Keywords:** polymer composite materials, external load, internal stresses, relaxation, microwave electromagnetic field, heating in a thermal chamber

Acknowledgments: The work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-79-00039 “Substantiation of the methodology of complex modification of composite materials for extreme operating conditions based on the study of phase-structural transformations under the influence of electrophysical influences of various frequency ranges”).

For citation: Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Churikov D. O. The effectiveness of the effect of microwave radiation and convection heating on the relaxation of internal stresses in cured polymer composite materials. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2025, vol. 25, iss. 2, pp. 230–241 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2025-25-2-230-241>, EDN: FYLSEA

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В настоящее время расширяются как области применения, так и объемы производства полимерных композиционных материалов (ПКМ) в различных отраслях промышленности. Это определяется прежде всего высокой удельной прочностью ПКМ по сравнению с металлами и сплавами, а также возможностью формировать заданные (с учетом условий эксплуатации) свойства одновременно с получением формы изделия [1–2]. При этом преимущественное применение сохраняется за термореактивными полимерами, в частности – эпоксидными связующими. Это связано с тем, что они по отношению к большинству наполнителей характеризуются небольшой усадкой и достаточной термической стабильностью, а также обеспечивают высокое качество их пропитки [3]. Все перечисленное обуславливает использование таких материалов в объектах с повышенными требованиями к прочности и устойчивости их конструктивных элементов к деструктивным внешним факторам.

В тоже время ПКМ (в том числе на эпоксидном связующем) имеют существенные недостатки. В частности, усадка, сопровождающая процесс отверждения, приводит к образованию мик-

родефектов в объеме материала и формированию остаточных напряжений вследствие значительно отличающихся теплофизических характеристик компонентов, что приводит к снижению физико-механических свойств [4–6]. По некоторым данным [7] на компенсацию негативного влияния остаточных внутренних напряжений в ПКМ приходится до (45–60)% запаса прочности. Соответственно, разработки в направлении создания методов, снижающих их уровень, являются актуальным для науки и практики.

Постановка задачи

В работах [8–17] отмечается, что при нагреве полимерных композиционных материалов, в том числе на эпоксидных связующих, наблюдаются эффекты релаксации внутренних напряжений, что способствует значительному нивелированию «старения» композитов и даже к определенному возврату в исходное состояние – «омоложению» [13–15]. Повышение качества ПКМ достигается также различными методами химической и физической модификации. Одним из перспективных направлений физической модификации изделий из ПКМ в России и за рубежом является обработка в сверхвысокочастотном



(СВЧ) электромагнитном поле [18–20]. Большая часть исследований касалась воздействия СВЧ на компоненты ПКМ и процессы их смешивания, в том числе на стадии отверждения. Воздействие на отвержденные системы проводилось в основном в контексте изучения кинетики нагрева материалов, состоящих из разнородных по электрофизическим свойствам компонентов [21–23]. Работ по изучению влияния СВЧ воздействия на отвержденные композиционные структуры с целью повышения их физико-механических свойств относительно немного. В СГТУ имени Гагарина Ю. А. в 2015–2024 гг. выполнены экспериментальные исследования по определению влияния СВЧ обработки при частоте излучения 2450 МГц на прочностные характеристики отвержденных угле-, стекло- и органопластиков при статическом и динамическом нагружении, а также на изменение их микроструктуры [24, 25]. Возможность получения определенных эффектов при СВЧ воздействии на отвержденные ПКМ отмечается в исследованиях зарубежных ученых [26, 27].

Авторами ранее было установлено [28], что механизм упрочняющего воздействия СВЧ электромагнитного поля на отвержденные ПКМ заключается во временном размягчении связующего, что способствует образованию большего числа областей контакта «матрица – волокно», увеличению площади межслоевого взаимодействия, некоторому снижению пористости. Зафиксированные интегральные по поверхности образцов температуры, при которых наблюдается наибольший упрочняющий эффект, удовлетворительно соответствуют установленным температурным диапазонам α -перехода (70...170°C), сопровождающегося уменьшением динамического модуля сдвига [10, 13, 15] и переходом эпоксидного связующего из стеклообразного в пластичное состояние (40...80°C) [3]. Указанные эффекты, как отмечено выше, способствуют частичной релаксации внутренних напряжений и «омоложению» ПКМ. В свете изложенного представляет интерес сравнение эффектов релаксации напряжений

в ПКМ, вызванных конвекционным нагревом и нагревом в СВЧ электромагнитном поле.

Целью исследований явилось изучение особенностей релаксации образцов из угле- и стеклопластиков под нагрузкой после воздействия СВЧ электромагнитного поля и нагрева в термокамере.

Методика исследований

В эксперименте было использовано по три группы образцов из угле- и стеклопластика производства ООО «Еврокомплект» (г. Калуга, Россия) в виде плоскопараллельных пластин размерами 75×10×5 мм, вырезанных из панели размерами 500×500×5 мм в состоянии поставки. В качестве наполнителя использованы ткани плотного плетения, в качестве связующего – эпоксидная смола марки ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамин (ПЭПА), введенным в количестве 10% по объему. Соотношение наполнителя и связующего составляло 60/40%. Метод изготовления панелей – прессование из препрегов тканей. Образцы нагревались до относительно одинакового значения интегральной по поверхности температуры (табл. 1) и далее выдерживались до повторного отверждения.

Эксперименты с первой группой образцов проводили с использованием специальной СВЧ технологической установки, собранной на основе излучателя «Жук-2-02» (ООО НПП «АгроЭкоТех», г. Обнинск Калужской обл.) с излучателем рупорного типа.

Частота электромагнитного поля составляла 2450 МГц, потребляемая мощность магнетрона – 1200 Вт. СВЧ обработка проводилась при следующих значениях плотности потока энергии (ППЭ): (17–18)×10⁴ мкВт/см² (углепластик) и (40–50)×10⁴ мкВт/см² (стеклопластик). Режимы и температура нагрева выбраны в соответствии с [28], поскольку, как установлено авторами, при указанных условиях обеспечивается максимальное повышение физико-механических свойств ПКМ. Время СВЧ воздействия фиксировалось

Таблица 1 / Table 1

Интегральная температура поверхности образцов, °C
Integral surface temperature of samples, °C

Материал / Material	Углепластик / Carbon plastic	Стеклопластик / Fiberglass
Нагрев в камере / Heating in camera	60–65	42–43
Нагрев в СВЧ электромагнитном поле / Heating in microwave electromagnetic field	60–72	36–40



по достижении заданной температуры поверхности, определяемой тепловизором Flir E-40 (FLIR, США).

Вторая группа образцов нагревалась в камере искусственной светопогоды Solarbox 522 модель 1500e RH (COFOMEGRA SRL, Италия) в Центре коллективного пользования научным оборудованием НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва. Температура образцов, нагреваемых в камере, обеспечивалась встроенной системой управления и контроля.

Третью группу составляли контрольные образцы, не подвергавшиеся воздействиям названных выше факторов. При одинаковых условиях обрабатывали и испытывали по 3 образца.

Исследование релаксации внутренних напряжений проводили по схеме трехточечного изгиба (ГОСТ Р 56805-2015, ГОСТ Р 57866-2017) на лабораторной компьютеризированной установке с программным обеспечением LabView (ИП «Майоров», г. Орел) по методике, аналогичной изложенной в [16]. Образцы нагружали до трех уровней деформации, при которых фиксируются максимальные, средние и минимальные напряжения. После завершения нагружения механизм стопорился, что стабилизировало деформацию. Особенности механизма установки позволяют устанавливать и фиксировать нагрузку на образцах в единицах момента силы (Нм), значения которого отображаются на экране монитора по вертикальной оси. Время испытаний – 30 минут, что с учетом цены деления горизонтальной оси установки 0.1 с соответствует значению 18000. Определяли скорость и степень релаксации напряжений в контрольных и опытных образцах. При этом графики (рис. 1) разбивали на участки с шагом 200 с в интервале значений по горизонтальной оси 200–1800 с и с шагом 40 с в интервале 0–200 с. Каждый из участков графика для упрощения расчетов заменяли прямой линией. Скорость релаксации вычислялась по выражению:

$$V_{\sigma} = (\sigma_i - \sigma_{i+1}) / (\tau_{i+1} - \tau_i), \quad (1)$$

где σ_i – значение напряжения в момент времени τ_i ; σ_{i+1} – значение напряжения в последующий момент времени τ_{i+1} .

Значения напряжений вычисляли по известной из сопротивления материалов зависимости для случая изгибных деформаций:

$$\sigma = T / W, \quad (2)$$

где T – изгибающий момент, Нм; W – момент сопротивления поперечного сечения испытываемого образца, м³.

Степень релаксации вычислялась по выражению:

$$\Delta\sigma = [(\sigma_{\text{нач}} - \sigma_{\text{кон}}) / \sigma_{\text{нач}}] \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{нач}}$ – начальное (максимальное) напряжение, $\sigma_{\text{кон}}$ – напряжение в момент окончания испытаний (через 30 минут после нагружения).

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний представлены на рис. 1, 2 и в табл. 2 и 3. Отмечается, что наклон графиков, показывающих снижение силового воздействия на измерительную систему установки со стороны опытных образцов, оказывается более значительным, чем со стороны контрольных.

При этом примерно с 10-й мин испытаний вид графика для контрольных образцов (рис. 1, а) стабилизируется и становится практически параллельным горизонтальной оси, что свидетельствует о прекращении процесса релаксации. В тоже время в начальный момент после нагружения спад значения силы происходит весьма интенсивно. Для образцов, прошедших нагрев в термокамере, как и для образцов после СВЧ обработки, характерен непрерывный спад значения силы вплоть до завершения испытаний, однако интенсивность спада значительно менее выражена. После определения значений внутренних напряжений с учетом фактических размеров поперечного сечения образцов полученные экспериментальные зависимости с точностью 0.95–0.97, аппроксимированы логарифмическими функциями (табл. 2). Использование степенных и экспоненциальных функций оказалось при этом нецелесообразным вследствие меньшей точности аппроксимации: 0.7–0.75 и 0.85–0.9 соответственно.

Отмечается, что на всех уровнях начальных напряжений коэффициент при $\ln(x)$, имеющий знак «–», в аппроксимирующей функции (табл. 2) для образцов, нагреваемых в термокамере, оказывается на (13–15)% для углепластика и на (9–11)% для стеклопластика меньше, чем для аналогичных образцов, подвергнутых воздействию СВЧ электромагнитного поля. Это является отражением экспериментального результата о более интенсивном снижении значений напряжений в образцах после СВЧ воздействия.

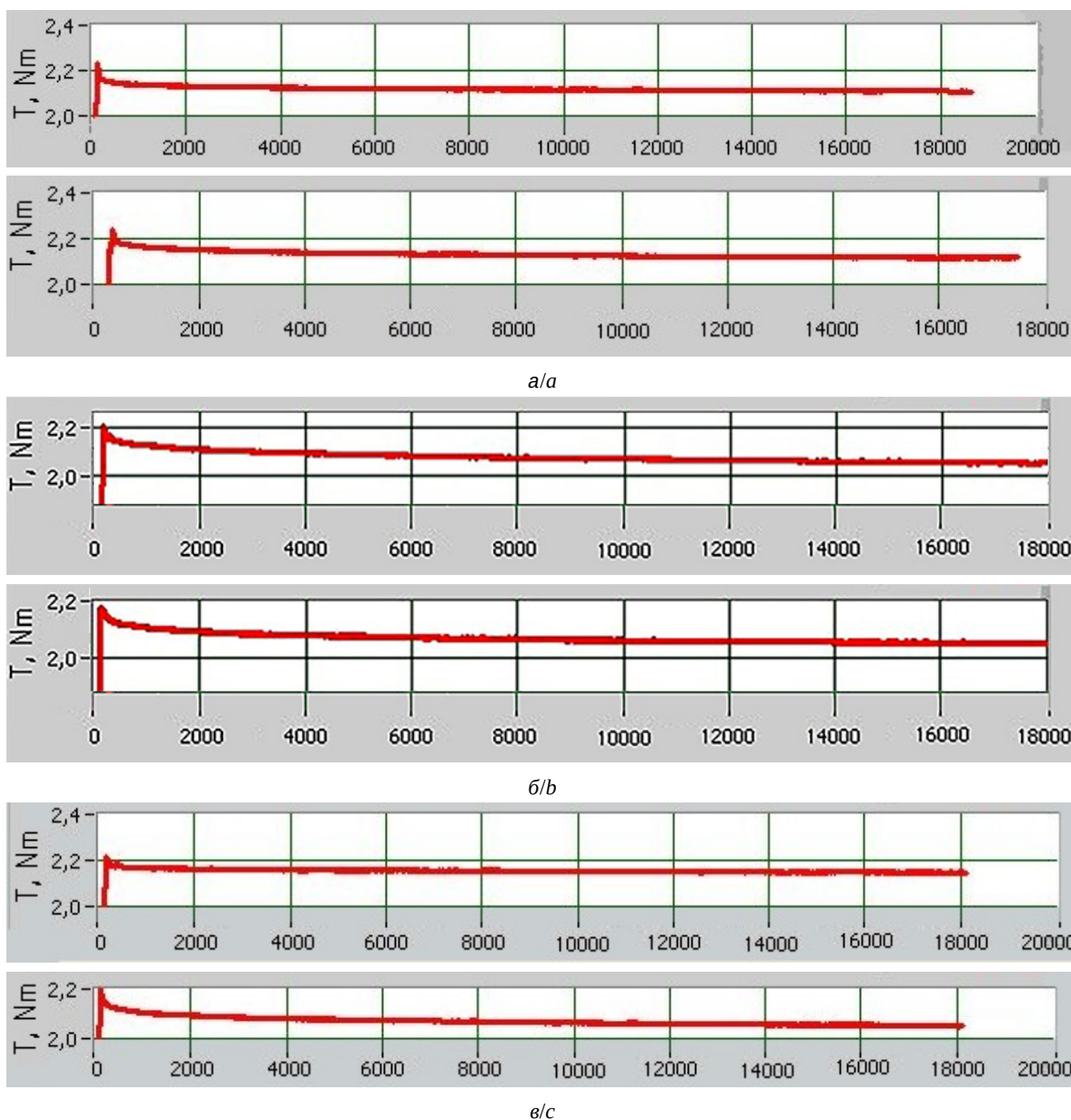


Рис. 1. Скрин-шоты экрана лабораторной установки на завершающем этапе испытаний углепластика (верхний ряд) и стеклопластика (нижний ряд) при средней величине нагрузки (по вертикальной оси – изгибающий момент T , Нм; по горизонтальной оси – время в миллисекундах): a – контрольные образцы, b – образцы после СВЧ обработки, $в$ – образцы после нагрева в термокамере

Fig. 1. Screen shots of the laboratory installation screen at the final stage of testing carbon fiber (upper row) and fiberglass (lower row) at an average load value (vertical axis – bending moment T , Nm; horizontal axis – time in milliseconds): a – control samples; b – samples after microwave treatment, c – samples after heating in a thermal chamber

Меньшие различия, отмеченные для стеклопластика, очевидно, связаны с меньшими температурами его нагрева в СВЧ электромагнитном поле, что объясняется меньшим значением тангенса угла диэлектрических потерь для данного материала по сравнению с углепластиком и отсутствием скин-эффекта, характерного для последнего и вызывающего дополнительный

нагрев в области межфазного слоя «матрица-волокно».

Из анализа зависимостей (табл. 2), графиков изменения скорости релаксации (рис. 2) и данных обобщающей табл. 3 следует, что для контрольных образцов угле- и стеклопластика наряду с большими значениями начальных внутренних напряжений характерен быстрый их спад

Зависимости кинетики релаксации напряжений в контрольных и опытных образцах ПКМ

Dependences of stress relaxation kinetics in control and experimental samples of PCM

Материал / Material	Начальный уровень напряжений / Initial stress level	Вид образца / Type of sample		
		Контрольный / Control	Опытный, СВЧ обработка / Experimental, microwave processing	Опытный, нагрев в термокамере / Experimental, heating in a thermal chamber
Углепластик / Carbon plastic	Максимальный / Maximum	$y = -0.265 \ln(x) + 31.75$	$y = -0.341 \ln(x) + 32.18$	$y = -0.292 \ln(x) + 25.25$
	Средний / Average	$y = -0.184 \ln(x) + 17.45$	$y = -0.221 \ln(x) + 17.57$	$y = -0.192 \ln(x) + 14.27$
	Минимальный / Minimum	$y = -0.057 \ln(x) + 8.014$	$y = -0.073 \ln(x) + 7.96$	$y = -0.062 \ln(x) + 6.7$
Стеклопластик / Fiberglass	Максимальный / Maximum	$y = -0.301 \ln(x) + 21.43$	$y = -0.364 \ln(x) + 24.12$	$y = -0.33 \ln(x) + 21.54$
	Средний / Average	$y = -0.143 \ln(x) + 13.63$	$y = -0.161 \ln(x) + 13.24$	$y = -0.146 \ln(x) + 12.08$
	Минимальный / Minimum	$y = -0.048 \ln(x) + 6.49$	$y = -0.062 \ln(x) + 6.38$	$y = -0.055 \ln(x) + 6.52$

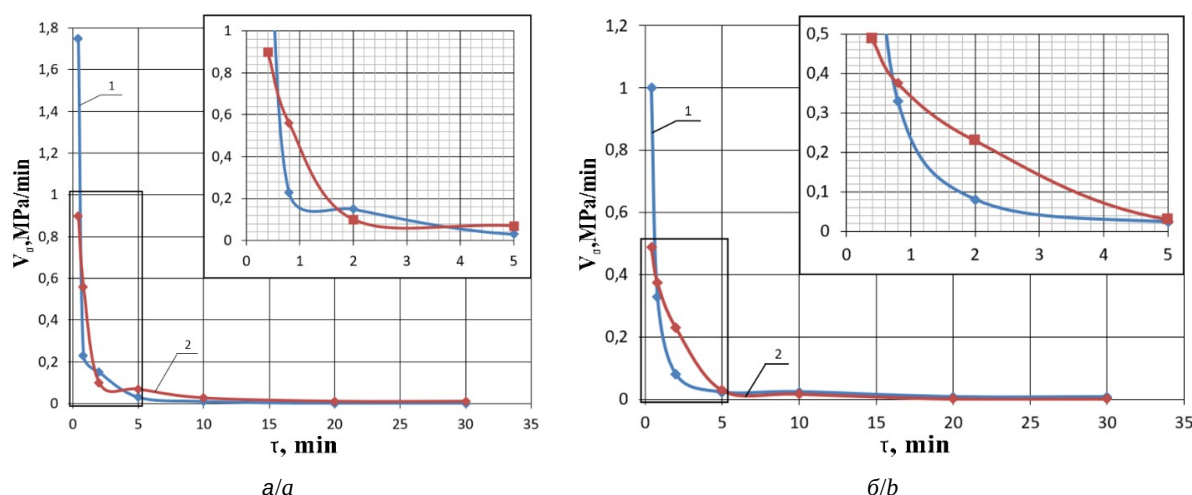


Рис. 2. Изменение скорости релаксации напряжений в контрольных (1) и после СВЧ модификации (2) образцах угле- (а) и стеклопластика (б) в процессе выдержки под средней нагрузкой по схеме трехточечного изгиба (цвет онлайн)

Fig. 2. Changes in the stress relaxation rate in the control (1) and after microwave modification (2) samples of carbon (a) and glassplasty (b) during exposure under medium load according to the three-point bending scheme (color online)

с высокой скоростью – от 1.5 до 2 раз большей, чем отмечен для образцов после СВЧ обработки. Однако угле- и стеклопластик после СВЧ воздействия продолжают релаксировать в течение всех 30 мин испытаний, что определяет большую конечную степень релаксации, поскольку в контрольных образцах этот процесс останавливается в первые 5–10 мин. По степени и скорости релаксации опытные образцы, нагреваемые в термокамере, оказываются ближе по данным параметрам к контрольным образцам, чем к обработанным в СВЧ электромагнитном

поле. Изменения параметров процесса релаксации при этом значительно менее выражены при всех принятых значениях внешних нагрузок. В среднем изменение степени релаксации в образцах, нагретых в термокамере и подвергнутых СВЧ воздействию, в сравнении с контрольными составляют, соответственно, 6% и 25.6% для углепластика и 9% и 23% для стеклопластика, то есть после воздействия СВЧ излучения наблюдается увеличение степени релаксации по сравнению с нагревом в термокамере: на 18.5% для углепластика и на 12.8% для стеклопластика.



Таблица 3 / Table 3

Скорость (МПа/мин) и степень (%) релаксации напряжений в контрольных и опытных образцах ПКМ (после СВЧ модификации и нагрева в термокамере) при нагружении по схеме трехточечного изгиба

The rate (MPa/min) and degree (%) of stress relaxation in control and experimental samples of PCM (after microwave modification and heating in a thermal chamber) under loading according to the three-point bending scheme

Материал / Material	Начальный уровень напряжений / Initial stress level	Параметр / Parameter	Вид образца / Type of sample		
			Контрольный / Control	Опытный, СВЧ обработка / Experimental, microwave processing	Опытный, нагрев в термокамере / Experimental, heating in a thermal chamber
Углепластик / Carbon plastic	Максимальный / Maximum	Скорость / Speed	1.88...0	1.15...0.02	1.65...0
		Степень / Degree	4.4	6.8	4.9
	Средний / Average	Скорость / Speed	1.75...0	0.9...0.007	1.5...0
		Степень / Degree	6.5	7.2	6.8
	Минимальный / Minimum	Скорость / Speed	0.4...0	0.28...0.002	0.47...0
		Степень / Degree	4.3	5.1	4.4
Стеклопластик / Fiberglass	Максимальный / Maximum	Скорость / Speed	2.95...0.017	1.8...0.013	2.3...0.017
		Степень / Degree	8.55	9.8	9.0
	Средний / Average	Скорость / Speed	1.0...0.008	0.375...0.002	1.2...0.006
		Степень / Degree	6.4	8.13	7.47
	Минимальный / Minimum	Скорость / Speed	0.5...0.001	0.45...0.001	0.5...0.001
		Степень / Degree	4.9	6.53	5.2

Следует отметить, что характер зависимостей и установленные значения скоростей релаксации в целом соответствуют полученным другими авторами [16] и не противоречат современным положениям теории релаксационных процессов в полимерных композитах под внешней нагрузкой.

Полученные результаты могут быть объяснены на основе изучения РЭМ микрофотографий матрицы и области ее контактного взаимодействия с армирующим наполнителем (рис. 3, 4). Поле зрения на всех микрофотографиях составляет 1.653 мкм. Наиболее характерные фрагменты дополнительно увеличены программным способом.

Считается [16, 17], что процессы релаксации в структуре полимерных материалов происходят за счет взаимодействия и диффузии своеобраз-

ных структурных единиц – релаксаторов. При этом релаксаторы рассматриваются на двух уровнях – микроуровне (атомные группы, повторяющиеся звенья молекул, сегменты макромолекул) и мезоуровне (трещины, микрорасслоения, микрополости).

Если рассматривать процесс релаксации на мезоуровне, то, очевидно, ключевым его проявлением будет процесс образования микротрещин в матрице; в них будет происходить сброс энергии внутренних напряжений. Соответственно, чем больше микротрещин будет образовываться в матрице в единицу времени, чем интенсивнее они будут сливаться или, чем больше будут их начальные размеры, тем быстрее будет протекать релаксационный процесс.

В тоже время единовременное образование больших по размерам релаксаторов будет ослаб-

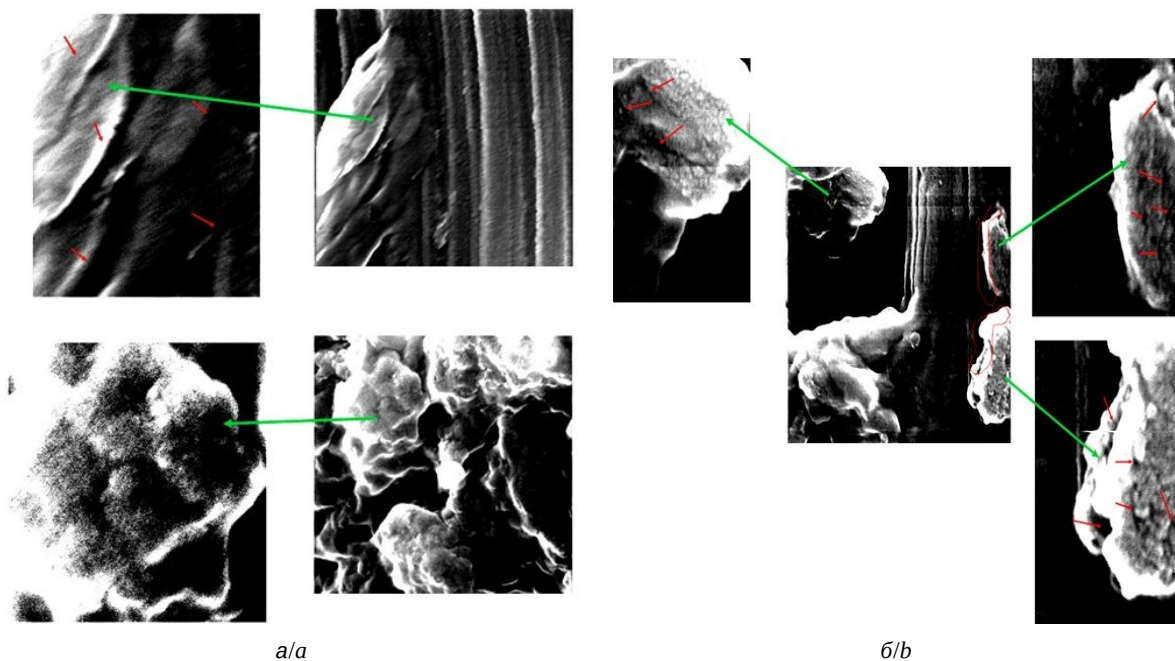


Рис. 3. Типичные элементы матрицы контрольного (а) и опытного (б) образцов углепластика в области контакта.
ППЭ = $(17-18) \times 10^4$ мкВт/см², время – 2 мин

Fig. 3. Typical matrix elements of the control (a) and experimental (b) carbon fiber samples in the contact area.
PPE = $(17-18) \times 10^4$ MW/cm², time is 2 minutes

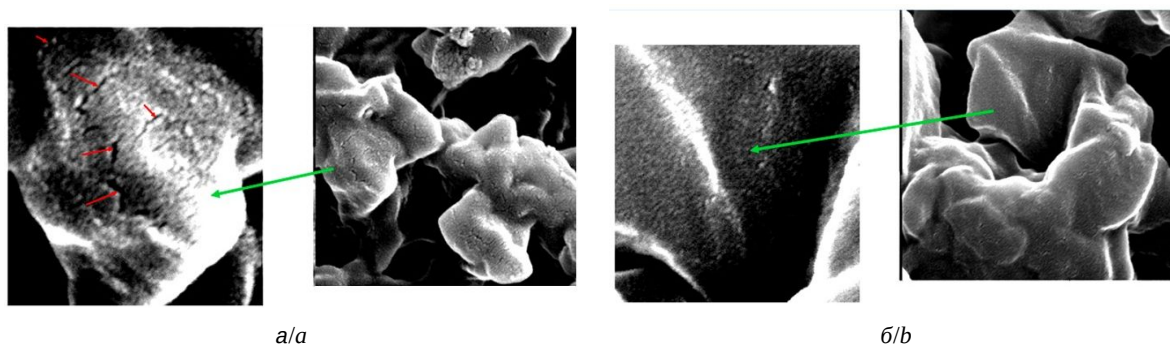


Рис. 4. Типичные элементы матрицы контрольного (а) и опытного (б) образцов стеклопластика в области контакта.
ППЭ = $(45-50) \times 10^4$ мкВт/см², время 5 мин

Fig. 4. Typical matrix elements of the control (a) and experimental (b) fiberglass samples in the contact area. PPE = $(45-50) \times 10^4$ mW/cm², time is 5 minutes

лять структуру ПКМ, уменьшать связанность армирующего компонента в единое целое. Поэтому для образцов материала, в котором будут постепенно (не скачкообразно) возникать более мелкие трещины, но в большем количестве, и постоянно двигаться по структуре, следует ожидать как меньшего уровня начальных внутренних напряжений, так и большей степени релаксации. С этих позиций рассмотрим фрагменты матрицы в области контакта с углеродным (см. рис. 3) и стеклянным (см. рис. 4) волокном. Характерные особенности проявляются при увеличении $\times 100000$. Отмечаются сохранившиеся

на поверхности волокон после расслоения образцов фрагменты матрицы. Можно выделить следующие особенности структуры сохранившихся элементов связующего в области контакта с волокном контрольных и опытных образцов исследованных ПКМ. В контрольных образцах углепластика фрагменты матрицы представлены округлыми хаотично расположенными образованиями с зернистой структурой (размеры 10–20 нм) или образованиями с относительно ровной поверхностью, имеющей характер сколов с отслоениями от поверхности волокна. Выявлены широкие и протяженные трещины размерами



около 100 нм и полости 20×200 и 100×100 нм (см. рис. 3, а). В опытных образцах отмечаются короткие и узкие трещины (ширина в 2–4 раза меньше, чем в контрольных образцах). Часть фрагментов матрицы представлена ориентированными под углом к волокну вытянутыми образованиями с мелкозернистой поверхностью (см. рис. 3, б верхнее фото). Также встречаются округлые хаотично расположенные образования (см. рис. 3, б нижнее фото).

Фрагменты связующего контрольных образцов стеклопластика отличаются существенно большей дефектностью. Поверхность образований также зернистая, но более рельефная. На фрагментах матрицы отмечаются трещины размерами 200–300 нм, встречаются трещины протяженностью свыше 500 нм, а также широкие зигзагообразные трещины размерами около 200 нм (см. рис. 4, а). На указанных фрагментах выявлены множественные трещины размерами 50–100 нм и отслоение от поверхности волокна. В целом отмеченные особенности области контакта могут характеризовать его невысокую прочность и подтверждают факт быстрой релаксации напряжений за счет образования большого количества крупноразмерных релаксаторов. Для опытных образцов стеклопластика характерно наличие узких зигзагообразных трещин протяженностью не более 200 нм. Примерно в 50% случаев на поверхности фрагментов матрицы зафиксированы волнообразные образования с шагом около 150–200 нм (см. рис. 4, б).

Изучение структуры матрицы и области ее контакта с волокном показывает, что отмеченное снижение скорости релаксации в опытных образцах после СВЧ воздействия определяется уменьшением количества в единицу времени появляющихся релаксаторов в виде микротрещин, а также уменьшением их размеров, что может быть вызвано повышением прочности контакта «волокно-матрица» и увеличением точек контакта жесткой и более хрупкой матрицы с упругими волокнами, что предотвращает появление повреждений в материале. Повышение степени релаксации определяется ускоренной миграцией мелких релаксаторов в объеме матрицы при сохранении большого количества точек ее контакта с волокном, которое можно считать направляющим элементом для данной миграции, в процессе которой происходит сброс избыточной энергии внутренних напряжений.

Сравнение релаксационных процессов после СВЧ воздействия и нагрева в термокамере

показало значительно большее влияние на них СВЧ электромагнитного поля. Как уже отмечалось выше, при СВЧ нагреве ПКМ до значений температур, начала α -перехода, при которых начинается размягчение связующего, повышается вероятность конформационных вращений крайних звеньев макромолекул и происходит релаксация остаточных напряжений (О. В. Старцев, Е. Н. Каблов, А. Ю. Махоньков, Н. С. Канаева, Д. Ф. Низин, Т. А. Низина, G. M. Odegard, A. Bandyopadhyay) [10–17]. Это обеспечивает относительную подвижность надмолекулярных образований, что способствует формированию новых областей контактного взаимодействия «матрица-волокно» при повторном отверждении связующего. Описанные выше процессы в структуре ПКМ, вызванные воздействием СВЧ электромагнитного поля, можно считать основным механизмом структурных изменений в отвержденных ПКМ, приводящих к их упрочнению.

В тоже время следует отметить, что степень релаксации напряжений в опытных образцах углепластика находится в диапазоне (5–7)%, в то время как уменьшение значений разрушающих напряжений при трехточечном изгибе образцов после СВЧ воздействия достигает [28] (14–18)%. Сходная, но менее выраженная картина наблюдается и для стеклопластика. Следовательно, эффект СВЧ воздействия, приводящий к релаксации внутренних напряжений в ПКМ, можно считать только одним из факторов, но не основным механизмом повышения физико-механических свойств отвержденных ПКМ. Эффективность СВЧ модификации ПКМ определяется в первую очередь усилением физико-механического взаимодействия в межфазном слое (МФС) и увеличением количества областей контакта «матрица-волокно», что способствует росту адгезионной прочности и связанности структуры композита.

Заключение

Установлено, что нагрев ПКМ в термокамере и СВЧ электромагнитном поле способствует повышению степени релаксации внутренних напряжений под внешней нагрузкой при одновременном уменьшении скорости процесса. При этом СВЧ воздействие на угле- и стеклопластик способствует релаксации напряжений соответственно на (5.1–7.2)% и на (6.5–9.8)%. Для контрольных образцов степень релаксации составляет (4.3–6.5)% и (4.9–8.55)%, процесс останавливается практически в 3 раза быстрее, чем



у опытных образцов. При этом скорость релаксации напряжений в опытных образцах снижается относительно контрольных в 1.5–2 раза. Степень релаксации в образцах, подвергнутых СВЧ воздействию выше на 18.5% и 12.8% для углепластика и стеклопластика, соответственно, по сравнению с нагревом в термокамере.

Основным механизмом влияния СВЧ воздействия на степень и скорость релаксации является уменьшение количества и размеров микротрещин в объеме матрицы и в области контакта «матрица-волокно», что определяется большей связанностью наполнителя и связующего за счет роста количества точек контакта во время его временного перехода в размягченное состояние.

Показано путем сравнения релаксационных процессов в образцах, нагретых в термокамере и подвергнутых СВЧ воздействию, что воздействие СВЧ излучения является более эффективным методом для термообработки ПКМ с целью повышения их физико-механических свойств.

Список литературы

1. Колобков А. С. Полимерные композиционные материалы для различных конструкций авиационной техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 6–7. С. 38–44. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44>
2. Клименко О. Н., Валуева М. И., Рыбникова А. Н. Полимерные и полимерно-композиционные материалы в спорте (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 10. С. 81–89. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-10-81-89>
3. Razali N., Sultan M. T. H., Mustapha F., Yidris N., Ishak M. R. Impact damage on composite structures – A review // The International Journal of Engineering and Science (IJES). 2014. Vol. 3, iss. 7. P. 8–20.
4. Мошинский Л. Я. Эпоксидные смолы и отвердители. Структура, свойства, химия и топология отверждения. Тель-Авив : Аркадия пресс Лтд, 1995. 371 с.
5. Корольков В. И., Некравцев Е. Н., Сафонов К. С., Огурцов П. С., Оганесов В. А., Попов И. С., Самохвалов В. В. Исследование процессов устранения коробления авиационных изделий из полимерных композиционных материалов, полученных методом высокотемпературного формования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2021. № 10. С. 84–94. <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-84-94>
6. Карташова Е. Д., Музейменек А. Ю. Технологические дефекты слоистых полимерных композиционных материалов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2017. № 2 (42), С. 79–89
7. Дементьев И. И., Устинов А. Н. Метод снижения остаточных напряжений в композитных элементах конструкций космических аппаратов // Альманах современной науки и образования. Технические науки. 2017. № 6 (119). С. 27–31.
8. Перминов А. А., Сарварова Т. М., Шестакова Н. К., Ажеганов А. С. Исследование процесса релаксации напряжений в деформированном композите с эпоксидной матрицей // Вестник Пермского университета. Физика. 2019. № 2. С. 55–62. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2019-2-55-62>
9. Батрак В.Е., Бобряшов В. В. Влияние длительных процессов на ползучесть и релаксацию конструкционного стеклопластика // Вестник НИЦ «Строительство». 2018. № 3 (18). С. 5–11.
10. Старцев О. В., Каблов Е. Н., Махоньков А. Ю. Закономерности α -перехода эпоксидных связующих композиционных материалов по данным динамического механического анализа // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2011. № S2. С. 104–113.
11. Ажеганов А. С., Бегиев В. П., Горинов Д. А., Лысенко С. Н., Шардаков И. Н. Развитие и релаксация внутренних напряжений в зернистых композитах с эпоксидной матрицей // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47, № 4. С. 104–114.
12. Каблов Е. Н., Лаптев А. Б., Прокопенко А. Н., Гуляев А. И. Релаксация полимерных композиционных материалов под длительным действием статической нагрузки и климата (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2021. № 4 (65). С. 70–80. <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80>
13. Жаворонок Е. С., Сенчихин И. Н., Ролдугин В. И. Физическое старение и релаксационные процессы в эпоксидных системах // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2017. Т. 59, № 2. С. 113–149. <https://doi.org/10.7868/S2308112017020110>
14. Dao B., Hodgkin J., Krstina J., Mardel J., Tian W. Accelerated ageing versus realistic ageing in aerospace composite materials. I. The chemistry of thermal ageing in a low-temperature-cure epoxy composite // Journal of Applied Polymer Science. 2006. Vol. 102, iss. 5. P. 4291–4303. <https://doi.org/10.1002/app.27104>
15. Odegard G. M., Bandyopadhyay A. Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites // J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys. 2011. Vol. 49, № 24. P. 1695–1716. <https://doi.org/10.1002/polb.22384>
16. Канаева Н. С., Низин Д. Ф., Низина Т. А. Релаксационные свойства полимерных материалов на основе эпоксидных связующих // Эксперт: теория и практика. 2022. № 3 (18). С. 42–46. https://doi.org/10.51608/26867818_2022_3_42
17. Железняков А. С., Шеронова И. А., Старкова Г. П. Моделирование релаксации напряжения композиционных материалов при постоянной деформации // Фундаментальные исследования. 2014. № 11. С. 2360–2364.
18. Brovko A. V., Murphy E. K., Rother M. Waveguide microwave imaging: Spherical inclusion in a dielectric sample // IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett. 2008. Vol. 18, № 9. P. 647–649.



19. Еренков О. Ю., Исаев С. П., Шевчук К. А. Электрофизическое модифицирование связующих в технологии композитов. Хабаровск : Издательство Тихоокеанского государственного университета, 2020. 229 с.
20. Архангельский Ю. С. Справочная книга по СВЧ-электротермии. Саратов : Научная книга, 2011. 560 с.
21. Абуталипова Е. М., Александров А. А., Лусин Ю. В., Павлова И. В., Шулаев Н. С. Математическое моделирование кинетики нагрева системы полимерный материал-металл трубопровода при СВЧ-обработке // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2017. № 2 (71). С. 118–128. <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-2-118-128>
22. Жерносек С. В., Ольшанский В. И. Модификация структуры композиционных текстильных материалов в условиях воздействия СВЧ-излучения // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2020. № 6 (390). С. 41–43.
23. Мамонтов А. В., Нефедов В. Н., Хриткин С. А. Исследование распределения температуры стержней из полимерных композитных материалов при их термообработке с использованием микроволнового излучения // Измерительная техника. 2019. № 4. С. 57–61. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-4-57-61>
24. 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. 237–340. <https://doi.org/10.21883/JTF.2023.02.54498.201-22>
25. Злобина И. В., Бекренев Н. В., Игнатьев М. А. Анализ особенностей микроструктуры полимерной матрицы в составе ПКМ, сформированных под влиянием электрофизических воздействий // Пластические массы. 2024. № 2. С. 12–16. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-02-12-16>
26. Kim T., Lee J., Lee K.-H. Microwave heating of carbon-based solid materials // Carbon Letters. 2014. Vol. 15, № 1. P. 15–24. <https://doi.org/10.5714/CL.2014.15.1.015>
27. Kwak M. Microwave curing of carbon-epoxy composites: Process development and material evaluation. A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy. Imperial College London, 2016. 150 p. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.007>
28. 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, вып. 2. С. 158–169. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-2-158-169>
2. Klimenko O. N., Valueva M. I., Rybnikova A. N. Polymer and polymer-composite materials in sports (review). *Proceedings of VIAM*, 2020, no. 10, pp. 81–89 (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-10-81-89>
3. Razali N., Sultan M. T. H., Mustapha F., Yidris N., Ishak M. R. Impact damage on composite structures – A review. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2014, vol. 3, iss. 7, pp. 8–20.
4. Moshinsky L. Ya. *Epoxy Resins and Hardeners. Structure, Properties, Chemistry and Topology of Curing*. Tel Aviv, Arcadia Press Ltd., 1995. 371 p. (in Russian).
5. Korolkov V. I., Nektavtsev E. N., Safonov K. S., Ogurtsov P. S., Oganezov V. A., Pppov I. S., Samokhvalov V. V. Research of the processes of eliminating warpage of aviation products made of polymer-composite materials obtained by high-temperature molding. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 10, pp. 84–94 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2021-10-84-94>
6. Kartashova E. D., Muyzemnek A. Yu. Technological defects of polymeric layered composite material. *University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*, 2017, no. 2 (42), pp. 79–89.
7. Dementiev I. I., Ustinov A. N. Method of reducing residual stresses in composite elements of spacecraft structures. *Almanac of Modern Science and Education. Technical Sciences*, 2017, no. 6 (119), pp. 27–31 (in Russian).
8. Perminov A. A., Sarvarova T. M., Shestakova N. K., Azheganov A. S. Stress relaxation processes survey in straincomposite with an epoxy matrix. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2019, no. 2, pp. 55–62. <https://doi.org/10.17072/1994-3598-2019-2-55-62>
9. Batrak V. E., Bobryashov V. I. The influence of long-term processes on the creep and relaxation of structural fiberglass. *Vestnik NITS Stroitel'stvo*, 2018, no. 3 (18), pp. 5–11.
10. Startsev O. V., Kablov E. N., Makhonkov A. Yu. Regularities of transition of epoxy binding composites according to data from dynamical mechanical analysis. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Mechanical Engineering*, 2011, no. S2, pp. 104–113 (in Russian).
11. Azheganov A. S., Begishev V. P., Gorinov D. A., Lysenko S. N., Shardakov I. N. Development and relaxation of internal stresses in granular composites with an epoxy matrix. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2006, vol. 47, no. 4, pp. 104–114 (in Russian).
12. Kablov E. N., Laptev A. B., Prokopenko A. N., Gulyaev A. I. Relaxation of polymer composite materials under the prolonged action of static load and climate (review). Part 1. Binders. *Aviation Materials and Technologies*, 2021, no. 4 (65), pp. 70–80 (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2021-0-4-70-80>
13. Zhavoronok E. S., Senchikhin I. N., Roldugin V. I. Physical aging and relaxation processes in epoxy systems. *Polymer Science. Series A*, 2017, vol. 59, no. 2, pp. 113–149 (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S0965545X17020109>
1. Kolobkov A. S. Polymer composite materials for various aircraft structures (review). *Proceedings of VIAM*, 2020, no. 6–7, pp. 38–44 (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-67-38-44>

References



14. Dao B., Hodgkin J., Krstina J., Mardel J., Tian W. Accelerated ageing versus realistic ageing in aerospace composite materials. I. The chemistry of thermal ageing in a low-temperature-cure epoxy composite. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, vol. 102, iss. 5, pp. 4291–4303. <https://doi.org/10.1002/app.27104>
15. Odegard G. M., Bandyopadhyay A. Physical Aging of Epoxy Polymers and Their Composites. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, 2011, vol. 49, no. 2, pp. 1695–1716. <https://doi.org/10.1002/polb.22384>
16. Kanaeva N. S., Nizin D. F., Nizina T. A. Relaxation properties of polymer materials based on epoxy binders. *Expert: Theory and Practice*, 2022, no. 3 (18), pp. 42–46 (in Russian). https://doi.org/10.51608/26867818_2022_3_42
17. Zheleznyakov A. S., Sheromova I. A., Starkova G. P. Modeling tension relaxation of composite materials at constant deformation. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2014, no. 1, pp. 2360–2364 (in Russian).
18. Brovko A. V., Murphy E. K., Rother M. Waveguide microwave imaging: Spherical inclusion in a dielectric sample. *IEEE Microwave and Wireless Comp. Lett.*, 2008, vol. 18, no. 9, pp. 647–649.
19. Erenkov O. Yu., Isaev S. P., Shevchuk K. A. *Elektrofizicheskoe modifitsirovanie svyazuyushchikh v tekhnologii kompositov* [Electrophysical modification of binders in composite technology]. Khabarovsk, PNU Publ., 2020. 229 p.
20. Arkhangelsky Yu. S. *Spravochnaya kniga po SVCh-elektrotermii* [Reference book on microwave electrothermy]. Saratov, Nauchnaya kniga, 2011. 560 p. (in Russian).
21. Abutalipova E. M., Aleksandrov A. A., Lisin Yu. V., Pavlova I. V., Shulaev N. S. Mathematical modeling of heating kinetics in polymeric coating pipeline metal system at microwave processing. *Herald of Bauman Moscow State Technical University. Natural Sciences Series*, 2017, no. 2 (71), pp. 118–128 (in Russian). <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2017-2-118-128>
22. Zhernosek S. V., Olshansky V. I. Modification of the structure of composite textile materials under the influence of microwave radiation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedei. Tekhnologiya tekstil'noi promyshlennosti*, 2020, no. 6 (390), pp. 41–43.
23. Mamontov A. V., Nefedov V. N., Khritkin S. A. A study of the temperature distribution in a polymer-composite rod when heat-treated with microradiation. *Measurement Techniques*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 365–370. <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01631-z>
24. Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Egorov A. S., Kuznetsov D. I. Influence of microwave electromagnetic field on interlayer strength in cured polymer composite materials. *Technical Physics*, 2023, vol. 68, iss. 2, pp. 224–226. <https://doi.org/10.21883/TP.2023.02.55476.201-22>
25. Zlobina I. V., Bekrenev N. V., Ignatiev M. A. Analysis of peculiarities of polymer matrix microstructure in PCMs formed under the influence of electrophysical effects. *Plasticheskie massy*, 2024, no. 2, pp. 12–16 (in Russian). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2024-02-12-16>
26. Kim T., Lee J., Lee K.-H. Microwave heating of carbon-based solid materials. *Carbon Letters*, 2014, vol. 15, no. 1, pp. 15–24. <https://doi.org/10.5714/CL.2014.15.1.015>
27. Kwak M. *Microwave curing of carbon-epoxy composites: Process development and material evaluation*. A thesis submitted to Imperial College London for the degree of Doctor of Philosophy. Imperial College London, 2016. 150 p. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.007>
28. Zlobina I. V., Bekrenev N. V. On the mechanism of increasing the mechanical characteristics of cured polymer composite materials under the action of a microwave electromagnetic field. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2022, vol. 22, iss. 2, pp. 158–169 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2022-22-258-169>

Поступила в редакцию 11.12.2024; одобрена после рецензирования 19.02.2025;
принята к публикации 11.04.2025; опубликована 30.06.2025

The article was submitted 11.12.2024; approved after reviewing 19.02.2025;
accepted for publication 11.04.2025; published 30.06.2025