

Совершенствование методики измерений распределения температуры полимерных композитных листовых материалов при нагреве микроволновым излучением

Александр Владимирович Мамонтов¹, Владимир Николаевич Нефёдов^{2✉}, Сергей Анатольевич Хриткин³

^{1, 3} Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

¹niipmt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4229-0734>

²6034348@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9753-7389>

³s.khritkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6941-4725>

Аннотация. Рассмотрена актуальная задача снижения энергетических затрат и ускорения технологического процесса тепловой обработки листового полимерного композитного материала. Показано, что для решения поставленной задачи целесообразно использовать микроволновое излучение в качестве источника тепловой энергии. Описаны основные преимущества микроволнового метода тепловой обработки листового полимерного композитного материала по сравнению с традиционными методами. Разработана конструкция микроволновой установки непрерывного действия, в которой энергия электромагнитного поля распространяется перпендикулярно направлению движения материала. Предложенная установка формирует равномерное распределение температуры в объёме листового композитного материала, что позволяет получать изделия с более высокими физико-механическими характеристиками. Для расчёта распределения температуры по толщине листового материала использован метод теории электромагнитного поля, а для распределения температуры материала по длине – метод нагруженных длинных линий, учитывающий изменение диэлектрических параметров композитного материала от температуры. Предложена методика измерения распределения температуры листового полимерного материала. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения температуры по ширине и толщине листового полимерного материала шириной 500 мм, толщиной 30 мм и плотностью 2400 кг/м³ на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Показана высокая эффективность применения микроволнового излучения для технологических процессов тепловой обработки листового полимерного композитного материала. Технологии на основе микроволнового излучения будут полезны при тепловой обработке изделий из бетона, пенобетона, а также полимерных композитных материалов на основе углеродных или базальтовых нитей со связующим – термореактивными эпоксидными смолами.

Ключевые слова: микроволновая установка, распределение температуры, полимерный композитный материал, волновод, замедляющая система, источник микроволнового излучения

Финансирование: работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках государственного задания FNER-2022-0002.

Для цитирования: Мамонтов А. В., Нефёдов В. Н., Хриткин С. А. Совершенствование методики измерений распределения температуры полимерных композитных листовых материалов при нагреве микроволновым излучением // Измерительная техника. 2022. № 6. С. 46–51. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-6-46-51>

Improvement of the method of measuring the temperature distribution of polymer composite sheet materials when heated by microwave radiation

Alexandr V. Mamontov¹, Vladimir N. Nefedov^{2✉}, Sergey A. Khritkin³

^{1, 3} Research Institute of Advanced Materials and Technology, Moscow, Russia

² National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

¹niipmt@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4229-0734>

²6034348@mail.ru[✉], <https://orcid.org/0000-0001-9753-7389>

³s.khritkin@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6941-4725>

Abstract. The actual problem of accelerating and reducing the energy costs of the sheet polymer composite material heat treatment technological process is considered. It is shown that to solve this problem, it is advisable to use the microwave radiation energy as a heating source. The main advantages of the microwave method of the sheet polymer composite

material heat treatment in comparison with traditional methods are considered. The design of a continuous-acting microwave installation with transverse interaction has been developed, which forms a uniform temperature distribution in the volume of sheet composite material, which makes it possible to obtain products with higher physical and mechanical characteristics. To calculate the temperature distributions over the width and thickness of the sheet material, the model and the method of loaded long lines are used, respectively, taking into account the change in the dielectric parameters of the composite material from temperature, and the theory of the electromagnetic field. A method for measuring the temperature distribution of a sheet polymer material is proposed. The results of theoretical and experimental studies of the temperature distribution over the width and thickness of a sheet polymer material with a width of 500 mm and a thickness of 30 mm, a density of 2400 kg/m³ at the frequency of electromagnetic field oscillations of 2450 MHz are presented. The obtained experimental results showed a high efficiency of microwave radiation usage for technological processes of the sheet polymer composite material heat treatment. Technologies that use microwave radiation can be applied for heat treatment of products made of concrete, foam concrete, as well as polymer composite materials based on carbon or basalt filaments, and thermosetting epoxy resins as a binder.

Keywords: microwave installation, temperature distribution, polymer composite material, waveguide, slowing system, microwave radiation source

Financial Support: the work was supported by the Russian Ministry of Education and Science, the state task FNER-2022-0002.

Введение. В различных отраслях промышленности, таких как судо-, ракето-, автомобиле- и самолётостроение, а также в строительной индустрии широко применяются листовые полимерные композитные материалы. Основу листовых полимерных композитных материалов составляют стеклянные, базальтовые или углеродные волокна, которые связаны между собой термореактивными эпоксидными смолами. Листовые полимерные композитные материалы не подвержены коррозии, а также обладают малым удельным весом, высокой прочностью и не подвержены коррозии [1–3]. Основная проблема производства листовых полимерных композитных материалов связана со снижением энергетических затрат технологического процесса и повышением прочностных характеристик получаемых изделий.

Традиционные методы тепловой обработки листовых полимерных композитных материалов включают два основных этапа технологического процесса [4–6]:

нагрев листового полимерного композитного материала с использованием различных электронагревательных установок до оптимального значения температуры 180 °С;

поддержание оптимального значения температуры листового полимерного композитного материала в течение времени, необходимого для полного отверждения полимерного связующего.

Листовой полимерный композитный материал обладает низкой теплопроводностью. Традиционные методы нагрева до оптимального значения температуры сопровождаются большими затратами энергии и времени. Перепад температуры между внешними и внутренними слоями материала не позволяет реализовать высокую скорость технологического процесса, а возникающие внутренние напряжения между внешними и внутренними слоями нагреваемого материала приводят к различным дефектам внутренней структуры и уменьшают прочностные характеристики получаемых изделий [2–4].

Один из альтернативных методов тепловой обработки полимерных композитных материалов связан с использованием микроволнового излучения в качестве источника тепловой энергии [7–10]. Микроволновый метод позволяет снизить затраты электроэнергии, увеличить скорость технологического процесса, повысить однородность структуры

обрабатываемого материала, плотность и прочность получаемых изделий [11–14]. Обрабатываемый листовый материал располагают в коробе из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями, например фторопласта, что позволяет снизить энергопотребление технологического процесса ввиду отсутствия теплоотдачи в окружающее пространство. Кроме того, диэлектрический короб играет роль термоса в течение времени, необходимого для отверждения полимерного связующего.

В научных публикациях [11, 12, 14] представлены результаты воздействия микроволнового излучения на свойства эпоксидных смол. Под воздействием микроволнового излучения повышаются однородность, плотность, прочностные характеристики полимерного композитного материала (модуль упругости на изгиб и предел прочности на растяжение) по сравнению с отверждением традиционными методами [13]. Результаты экспериментальных исследований отверждения полимерных композитных материалов получены на микроволновых установках с частотой колебаний электромагнитного поля 2450 МГц [13].

Цель исследования – разработка конструкции микроволновой установки, обеспечивающей равномерное распределение температуры по объёму листового композитного материала, и методики измерения распределения температуры.

Описание конструкции микроволновой установки. В [15] рассмотрена конструкция сверхвысокочастотного устройства для равномерного нагрева листовых материалов, приведены расчётные и экспериментальные результаты распределения температуры по толщине обрабатываемого материала. Авторами настоящей статьи предложена конструкция микроволновой установки непрерывного действия, принципиально отличающейся от описанной в [15]. Установка мощностью 4,8 кВт на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц предназначена для тепловой обработки полимерных композитных листовых материалов на основе стеклянных волокон толщиной 30 мм и шириной 500 мм. Оптимальное значение температуры отверждения композитного материала 180 °С. Основное конструктивное отличие предлагаемой установки состоит в изменении ширины узкой стенки волноводов по определённому закону

для более равномерного нагрева обрабатываемого материала. Для повышения эффективности работы микроволновой установки полимерный композитный материал помещён в теплоизоляционный радиопрозрачный материал. С целью обеспечения безопасной работы обслуживающего персонала предложенная микроволновая установка на входе и выходе снабжена специальными устройствами (шлюзами), которые препятствуют выходу микроволнового излучения.

Микроволновая установка состоит из двух модулей, а модули – из одинаковых по конструкции и параметрам секций, в которых энергия электромагнитного поля распространяется перпендикулярно направлению движения листового материала. Каждая секция содержит электродинамическую систему, которая с одной стороны согласована с источником микроволнового излучения, а с другой – с водяной нагрузкой с датчиком регистрации проходящей мощности, установленным для контроля технологического процесса.

Электродинамические системы первого и второго модулей установки создают взаимодополняющие распределения температуры по ширине и толщине листового материала (по направлению движения материала), за счёт чего достигается равномерное распределение температуры по объёму материала на выходе микроволновой установки.

На рис. 1 схематически представлено продольное сечение микроволновой установки. Первый модуль образован двумя секциями, в качестве электродинамических систем используются прямоугольные волноводы, работающие на

основном типе волны H_{10} , что обеспечивает максимальное значение температуры в центре листового материала и её уменьшение на поверхности материала. Ширина узких стенок прямоугольных волноводов изменяется в направлении распространения энергии электромагнитного поля для поддержания постоянства мощности, выделяемой в единицу объёма обрабатываемого материала. Такое техническое решение позволяет обеспечить постоянное распределение температуры по ширине обрабатываемого листового материала [16].

Второй модуль состоит из четырёх секций на основе замедляющих систем и обеспечивает максимальное значение температуры на поверхности листового материала и минимальное в его центре. В направлении распространения энергии микроволнового излучения температура листового материала изменяется по экспоненциальному закону. Сложение экспоненциальных зависимостей распределения температуры по ширине листового материала в направлении распространения энергии электромагнитного поля удовлетворяет требованиям технологического процесса.

Принцип работы микроволновой установки. Микроволновая установка работает следующим образом. Сформированный листовый полимерный композитный материал 1 (см. рис. 1) поступает в короб 2, расположенный вдоль рабочей области микроволновой установки и выполненный из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями, например фторопласта.

На входе и выходе микроволновой установки размещаются шлюзовые камеры, шлюзы 3 которых предотвращают выход микроволнового излучения наружу. Конструкция применяемых в устройстве шлюзов защищена патентом РФ [17].

Листовой материал в коробе, пройдя входную шлюзовую камеру, поступает через середины широких стенок прямоугольных волноводов 4 и четыре секции на основе замедляющих систем 5, где подвергается термической обработке под воздействием микроволнового излучения. Затем листовый материал через выходную шлюзовую камеру направляется к выходу микроволновой установки.

Каркас внутри шлюзовой камеры, на который намотана заполненная водой трубка 6 из материала с малыми диэлектрическими потерями (например, полихлорвинила), необходим для поглощения микроволнового излучения. Между трубкой и внешней поверхностью шлюзовой камеры расположены металлические пластины 7. Микроволновое излучение, попадая между металлическими пластинами, испытывает многократные отражения и поглощается циркулирующей в трубке водой [17].

На рис. 1 обозначены скорость v движения материала, толщина d и ширина l листового материала, ширина a широкой стенки волновода.

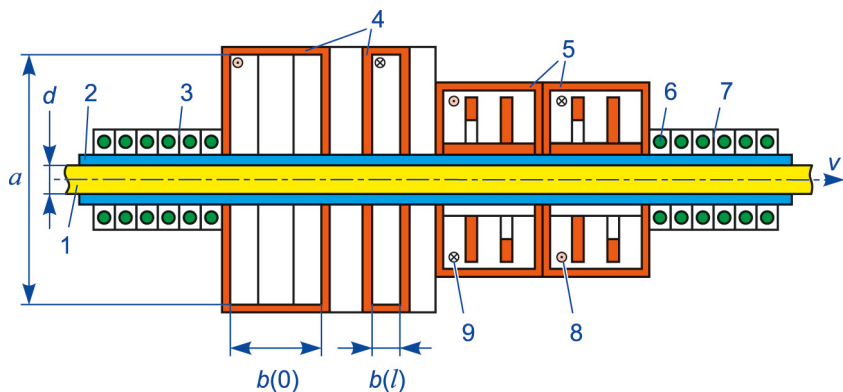


Рис. 1. Продольное сечение микроволновой установки для равномерного нагрева листовых полимерных композитных материалов:

1 – листовый материал; 2 – короб; 3 – шлюзы; 4 – прямоугольный волновод с изменяющейся шириной узкой стенки от $b(0)$ на входе до $b(l)$ на выходе волновода; 5 – замедляющая система; 6 – трубка с водой из материала с малыми диэлектрическими потерями; 7 – металлические пластины; 8, 9 – направления распространения энергии электромагнитного поля в секциях микроволновой установки

Fig. 1. Longitudinal section of a microwave installation for the uniform sheet polymer composite materials heating:

1 – formed sheet material; 2 – a box made of a heat-insulating material with low dielectric losses; 3 – gateways that prevent the leakage of microwave radiation from the installation to the surrounding space; 4 – a rectangular waveguide with a variable narrow wall width from $b(0)$ at the input to $b(l)$ at the output of the waveguide; 5 – slow-wave structure; 6 – a water tube made of a material with low dielectric losses; 7 – metal plates; 8, 9 – the direction of the electromagnetic field energy propagation in the sections of the microwave installation

Модель и метод расчёта температуры листового материала. В качестве эквивалентной модели каждой секции микроволновой установки использована нагруженная длинная линия с граничными условиями [16, 18]. Граничное условие для каждой секции заключается в том, что энергия источника микроволнового излучения практически полностью поглощается на ширине l листового полимерного композитного материала. Поскольку отсутствуют тепловое излучение в окружающее пространство и перепад температуры в объёме листового материала, можно не учитывать уравнения тепломассопереноса. Для расчёта распределения температуры по ширине листового материала можно использовать метод нагруженных длинных линий [16, 18]. Метод расчёта распределения температуры по ширине листового материала учитывает линейную зависимость мнимой части относительной диэлектрической проницаемости листового материала от температуры на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц [16].

Распределение температуры по толщине листового материала $T(y)$ определяли согласно теории электромагнитного поля. Для электродинамической системы в виде прямоугольного волновода на основном типе колебаний H_{10} распределение в первом приближении имеет вид [19]:

$$T(y) \sim T(0) \sin^2(\pi y/a),$$

где $T(0)$ – температура материала в центре прямоугольного волновода; y – координата в направлении широкой стенки волновода.

Выражение для распределения температуры по толщине листового материала для каждой секции замедляющей системы в первом приближении запишем как [19]:

$$T(y) = T(d/2) \exp[-2kk_3 \sqrt{1 - \varepsilon'/k_3^2} y],$$

где $T(d/2)$ – температура листового материала на поверхности замедляющей системы; ε' – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости листового материала; $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число свободного пространства; $k_3 = 2\pi/\lambda_3$ – коэффициент замедления; λ, λ_3 – длины волн соответственно в свободном пространстве и замедляющей системе.

Методика и результаты эксперимента. Методика измерения распределения температуры по ширине обрабатываемого материала включала следующие действия:

обработку (нагрев до необходимой температуры) листового композитного материала в микроволновой установке;
отключение энергии источников микроволнового излучения и прекращение движения материала после его выхода из установки;

выполнение в нагретом до оптимальной температуры листовом материале отверстий на равных расстояниях по ширине материала на глубину $d/2$ через каждые 50 мм;

размещение чувствительных элементов термометра в виде термопары в проделанных отверстиях;

измерение температуры в отверстиях материала для получения данных о распределении температуры по ширине материала.

Методика измерения распределения температуры по толщине листового материала включала следующие действия:

обработку (нагрев до необходимой температуры) листового композитного материала в микроволновой установке при его перемещении вдоль микроволновой установки;

отключение энергии источников микроволнового излучения после появления материала на выходе микроволновой установки;

выполнение в нагретом до оптимальной температуры листовом материале отверстий на равных расстояниях при фиксированном значении ширины материала $l/2$ на разную глубину через каждые 5 мм в направлении движения материала;

размещение чувствительных элементов термометра в виде термопары в проделанных отверстиях;

измерение температуры по толщине материала.

На рис. 2, а представлены рассчитанные (1) и измеренные (2) распределения температуры по ширине листового материала, подвергнувшегося микроволновой термической обработке. Их расхождение не превысило 5 °С. Отклонение рассчитанного и измеренного значения температуры от номинального значения температуры по ширине листового материала составило не более 10 °С.

На рис. 2, б представлены рассчитанные (1) и измеренные (2) распределения температуры по толщине листового материала после термической обработки в микроволновой установке; расхождение не превысило 6 °С. Отклонение рассчитанных и измеренных значений температуры от номинального значения температуры по толщине листового материала составило не более 10 °С.

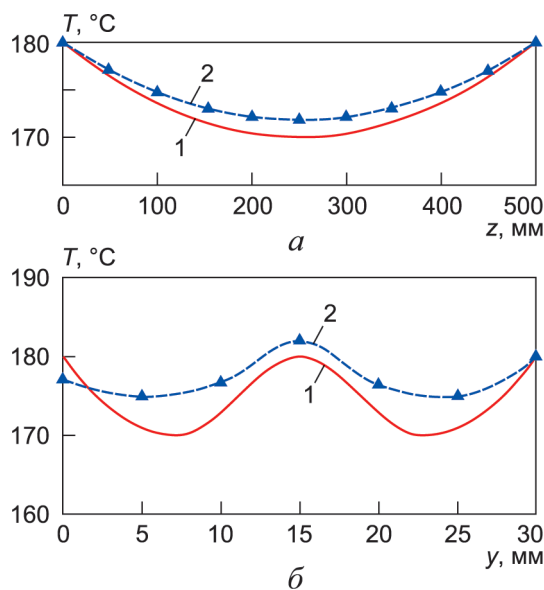


Рис. 2. Рассчитанные (1) и измеренные (2) характеристики распределения температуры по ширине (а) и толщине (б) листового полимерного композитного материала после термической обработки на выходе из микроволновой установки

Fig. 2. Calculated (1) and measured (2) characteristics of the temperature distribution over the width (a) and thickness (b) of the polymer composite sheet material at the output of the microwave installation

Параметры микроволновой установки определяются размерами и характеристиками листового полимерного композитного материала. Проведенные расчёты показали, что для нагрева от 20 °С до 180 °С листового материала толщиной 30 мм, шириной 500 мм, плотностью 2400 кг/м³ и теплоёмкостью 0,8 Дж/(г·°С) необходима мощность микроволновой установки 4,8 кВт при скорости движения материала 1 м/мин на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц.

Параметры микроволновой установки
и обрабатываемого материала

Мощность источников микроволнового излучения	4,8 кВт
Рабочая частота колебаний электромагнитного поля	2450 МГц
Ширина широкой стенки волновода	90 мм
Ширина узкой стенки волновода:	
входе	45 мм
на выходе	21 мм
Толщина листового материала	30 мм
Длина электродинамической системы l	500 мм
Скорость движения листового материала	
в микроволновой установке v	1,0 м/мин
Коэффициент замедления	5,0
Температура листового материала:	
начальная	20 °С
конечная	180 °С
Теплоёмкость листового материала	0,8 Дж/(г·°С)
Плотность листового материала	2400 кг/м ³
Коэффициент теплопроводности материала	0,35 Вт/(м·°С)
Относительная диэлектрическая проницаемость	
материала при начальной температуре:	
мнимая часть ϵ''	0,18
действительная часть ϵ'	3,7
Относительная диэлектрическая проницаемость	
материала при конечной температуре:	
мнимая часть ϵ''	0,22
действительная часть ϵ'	4,2

Экспериментально установили, что уровень побочных излучений микроволновой установки на расстоянии 0,5 м от любой точки микроволновой установки не превышал 10 мкВт/см². Это обеспечивало безопасную работу обслуживающего персонала и не нарушало работу рядом стоящего радиотехнического оборудования.

Заключение. Описанный микроволновый метод позволяет снизить энергетические затраты на технологический процесс термической обработки листового полимерного композитного материала по сравнению с традиционными методами нагрева.

Предложенная конструкция микроволновой установки на основе сочетания систем в виде прямоугольных волноводов с изменяющейся шириной узких стенок и замедляющих систем даёт возможность реализовать равномерный нагрев полимерного композитного листового материала и тем самым обеспечить высокие физико-механические характеристики получаемых изделий.

Список источников

1. Кербер М. Л., Виноградов В. М., Головкин Г. С. и др. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: Учебное пособие / Под ред. акад. А. А. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
2. Перепёлкин К. Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты: монография. СПб: Научные основы и технологии, 2009. 380 с.
3. Михайлин Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы. СПб: Научные основы и технологии, 2009. 658 с.
4. Петров М. Г. Анализ прочности и долговечности одностороннего стеклопластика с позиций кинетической концепции разрушения // Механика композиционных материалов и конструкций. 2003. Т. 9, № 3. С. 376–397.
5. Михайлин Ю. А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб.: Профессия, 2006. 624 с.
6. Колосова А. С., Сокольская М. К., Виткалова И. А., Торлова А. С., Пикалов Е. С. Современные полимерные композиционные материалы и их применение // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2018. № 5-1. С. 245–256.
7. Резник С. В., Румянцев С. А. Математическое моделирование температурного состояния цилиндрических заготовок из полимерных композиционных материалов при СВЧ нагреве // Наука и образование. 2014. № 1. С. 6–21. <https://doi.org/10.7463/0114.0658448>
8. Михайловский К. В., Резник С. В. Прогнозирование температурных режимов процесса отверждения связующего при получении деталей из полимерных композиционных материалов с помощью микроволнового излучения // Тепловые процессы в технике. 2014. Т. 6. № 8. С. 378–384.
9. Дворко И. М. Получение полимерных материалов и изделий отверждением термореактивных композиций под действием электрических полей // Пластические массы. 1998. № 8. С. 16–21.
10. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (проблемы и реализации) / Под ред. Г. А. Морозова и Ю. Е. Седельникова. М.: Радиотехника, 2003. 112 с.
11. Bolasodun B., Nesbitt A., Wikinson A., Day R., Effect Of Curing Method On Physical And Mechanical Properties Of Araldite DLS 772 / 4 4 DDS Epoxy System, *International journal of scientific and Technology research*, 2013, vol. 2, iss. 2, pp. 12–18.
12. Лаврентьев В. А., Калганова С. Г. Применение энергии СВЧ электромагнитных колебаний для воздействия на процесс отверждения эпоксидных смол // Электро- и теплотехнологические процессы и установки: сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. Т. 2. С. 67–70.
13. Гузева Т. А. Совершенствование технологических режимов отверждения заготовок деталей из органоластиков под действием СВЧ излучения / Автореф. дис. канд. техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, 2014).
14. 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.

15. Пат. № 83380 РФ / Д. А. Лоик, А. В. Мамонтов, В. Н. Неведов, М. В. Неведов // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 15.

16. Мамонтов А. В., Неведов В. Н., Назаров И. В., Потапова Т. А. Микроволновые технологии: Монография. М.: Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского института электроники и математики (технического университета), 2008, 308 с.

17. Пат. № 2060600 РФ / В. Н. Неведов, Г. Г. Валеев, С. В. Корнеев, Ю. В. Карпенко // Изобретения. Полезные модели. 1996. № 5.

18. Архангельский Ю. С. Установки сверхвысокочастотного диэлектрического нагрева: учебник. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2010. 279 с.

19. Григорьев А. Д. Электродинамика и микроволновая техника. М.: Лань, 2007. 704 с.

References

1. Kerber M. L., Vinogradov V. M., Golovkin G. S., *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoistva, tekhnologiya* [Polymer composite materials: structure, properties, technology], ed. A. A. Berlin, St. Petersburg, Professija Publ., 2008, 560 p. (In Russ.)

2. Perepelkin K. E., *Armiruyushchie volokna i voloknistye polimernye kompozity: monografiya* [Reinforcing fibers and fibrous polymer composites: monograph], St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2009, 380 p. (In Russ.)

3. Mikhailin Yu. A., *Spetsial'nye polimernye kompozitsionnye materialy* [Special polymer composite materials], St. Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2009, 658 p. (In Russ.)

4. Petrov M. G., Study of strength and durability of uni-directional fiberglass plastics by using the kinetic concept of fracture, *Mechanics of composite materials and structures*, 2003, vol. 9, no. 3, pp. 376–397. (In Russ.)

5. Mikhailin Yu. A., *Termoustoichivye polimery i polimernye materialy* [Heat-resistant polymers and polymer materials], St. Petersburg, Professija Publ., 2006, 624 p. (In Russ.)

6. Kolosova A. S., Sokol'skaya M. K., Vitkalova I. A., Torlova A. S., Pikalov E. S., Modern polymer composite materials and their application, *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2018, no. 5-1, pp. 245–256. (In Russ.)

7. Reznik S. V., Rumyantsev S. A., A heat mathematical model of polymer composite cylinder during microwave treatment, *Nauka i obrazovanie*, 2014, no. 1, pp. 6–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.7463/0114.0658448>

8. Mikhailovskii K. V., Reznik S. V., Prediction of the Thermal Regimes of Binder Cure Process for Reception of Parts from Polymeric

Composite Materials Using Microwave Radiation, *Thermal processes in Engineering*, 2014, vol. 6, no. 8, pp. 378–384. (In Russ.)

9. Dvorko I. M., Poluchenie polimernykh materialov i izdelii otverzhdeniem termoreaktivnykh kompozitsii pod deistviem ehlektricheskikh polei [Obtaining polymeric materials and products by curing thermosetting compositions under the influence of electric fields], *Plasticheskie massy*, 1998, no. 8, pp. 16–21. (In Russ.)

10. *Nizkointensivnye SVCH-tekhnologii (problemy i realizatsii)* [Low-intensity microwave technologies (Problems and realizations)], ed. G. A. Morozov, Yu. E. Sedel'nikov, Moscow, Radio-tekhnika Publ., 2003, 112 p. (In Russ.)

11. Bolasodun B., Nesbitt A., Wikinson A., Day R., Effect Of Curing Method On Physical And Mechanical Properties Of Araldite DLS 772 / 4 4 DDS Epoxy System, *International journal of scientific and technology research*, 2013, vol. 2, iss. 2, pp. 12–18.

12. Lavrent'ev V. A., Kalganova S. G., Primenenie ehnergii SVCH ehlektromagnitnykh kolebaniy dlya vozdeistviya na protsess otverzhdeniya ehpoksidnykh smol [Application of microwave energy of electromagnetic waves to influence the curing process of epoxy resins], *Ehlekto- i teplotekhnologicheskies protsessy i ustanovki*, Saratov, Sarat. gos. tekhn. Un. Publ., 2005, vol. 2, pp. 67–70. (In Russ.)

13. Guzeva T. A., Improvement of technological modes of curing blanks of parts made of organoplastics under the action of microwave radiation, Extended abstract of candidate's dissertation in Technical Sciences (Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 2014). (In Russ.)

14. Kalganova S. G., Vliyanie SVCH vozdeistviya ehlektromagnitnogo polya na kinetiku otverzhdeniya ehpoksidnoi smoly [Influence of microwave exposure to an electromagnetic field on the kinetics of epoxy resin curing], *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 90–95. (In Russ.)

15. Loik D. A., Mamontov A. V., Nefedov V. N., Nefedov M. V., RF Patent no. 83380, *Inventions. Utility Models*, no. 15 (2009).

16. Mamontov A. V., Nefedov V. N., Nazarov I. V., Potapova T. A., *Mikrovolnovye tekhnologii, Monografiya* [Microwave technology], Moscow, Nauchno-issledovatel'skii institut perspektivnykh materialov i tekhnologii Moskovskogo instituta ehlektroniki i matematiki (tekhnicheskogo universiteta) Publ., 2008, 308 p. (In Russ.)

17. Nefedov V. N., Valeev G. G., Korneev S. V., Karpenko Yu. V., RF Patent no. 2060600, *Byull. Izobret.*, no. 5 (1996).

18. Arkhangel'skii Yu. S., *Ustanovki sverkhvysokochastotnogo dielektricheskogo nagreva* [Microwave Dielectric Heating Units], Saratov, Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2010, 279 p. (In Russ.)

19. Grigor'ev A. D., *Ehlektrodinamika i mikrovolnovaya tekhnika* [Electrodynamics and microwave technology], Moscow, Lan' Publ., 2007, 704 p. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 24.06.2021; одобрена после рецензирования 01.07.2021; принята к публикации 07.07.2021.
The article was submitted 24.06.2021; approved after 01.07.2021; accepted for publication 07.07.2021.