

Журнал включен в перечень периодических научных изданий, рекомендуемый ВАК Минобразования России для публикации научных работ, отражающих основное научное содержание кандидатских и докторских диссертаций.

Учредитель
ООО "Издательский дом Медиа Паблишер"

Главный редактор
Тихвинский Валерий Олегович

Издатель
Дымкова Светлана Сергеевна
ds@media-publisher.ru

Редакционная коллегия

Аджемов Артём Сергеевич
(д.т.н., профессор МТУСИ), Россия

Бугаев Александр Степанович
(академик РАН), Россия

Буслаев Александр Павлович
(д.ф.-м.н., профессор МТУСИ), Россия

Вааль Альберт
(д.т.н., старший научный сотрудник Ганноверского университета им. Лейбница на кафедре коммуникационной техники), Германия

Головачев Юлиус
(управляющий консультант Detecon International GmbH), Германия

Дулкейтс Эрик
(д.т.н., старший исполнительный директор корпорации Detecon), Силиконовая долина, США

Елизаров Андрей Альбертович
(д.т.н., профессор МИЭМ, НИУ ВШЭ), Россия

Зубарев Юрий Борисович
(д.т.н., член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки РФ), Россия

Кирхгесснер Юрий
(д.т.н., Директор IncotelogyLtd.), Великобритания

Корбетт Ровэлл
(д.т.н., директор по исследованиям в научно-исследовательском центре China Mobile Research Institute, профессор университета Назарбаева), Гон-Конг (Китай), США

Кузовкова Татьяна Алексеевна
(д.э.н., декан экономического факультета МТУСИ), Россия

Кюркчан Александр Гаврилович
(д.ф.-м.н., профессор МТУСИ), Россия

Сеилов Шахмаран Журсинбекович
(д.э.н., Президент Казахской академии инфокоммуникаций), Казахстан

Сысоев Николай Николаевич
(д.ф.-м.н., декан физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова), Россия

Шарп Майкл
(д.э.н., вице-президент европейского института стандартизации – ETSI), Великобритания

Яшина Марина Викторовна
(д.т.н., профессор, МТУСИ), Россия

СОДЕРЖАНИЕ

СВЯЗЬ

Деарт В.Ю., Фатхулин Т.Д.

Анализ современного состояния транспортных сетей с целью внедрения технологии программно-конфигурируемых сетей (SDN)

4

Степанова И.В., Мохаммед Омар А.А.

Использование перспективных технологий для развития распределенных корпоративных сетей связи

10

**Докучаев В.А., Кальфа А.А.,
Мытенков С.С., Шведов А.В.**

Анализ технических решений по организации современных центров обработки данных

16

Ворожищев И.В., Бочечка Г.С.

Исследование устойчивости технологии многочастотной передачи с универсальной фильтрацией UFMC к частотным сдвигам в канале

25

Итоги выставки "НАВИТЕХ-2017".

9-я международная выставка навигационных систем, технологий и услуг

44

Итоги работы Четвёртого Крымского транспортного форума

64

ПУБЛИКАЦИИ НА АНГЛИЙСКОМ ЯЗЫКЕ

СВЯЗЬ

Гольдштейн А.Б.

Эволюция моделей управления сетями NGN/IMS и пост-NGN

46

Кубанков А.Н., Кубанков Ю.А.

Повышение качества подготовки кадров в информационной сфере как условие технологического прорыва

51

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

**Абрамов В.А., Попов О.Б.,
Борисов А.А., Черников К.В.**

Статистика звукового сигнала, представленного комплексными модулирующими функциями

29

Кузовков Д.В.

Применение экспертно-квалиметрического метода для обоснования выбора оптимального варианта построения систем спутниковой связи

55

**Нефедов В.Н., Сайгин И.А.,
Хохлов М.Е., Рябикина И.Г.**

Перспективы применения научноёмких микроволновых технологий

33

ЭЛЕКТРОНИКА. РАДИОТЕХНИКА

Богачков И.В.

Исследования спектра рассеяния Мандельштама – Бриллюэна в оптическом волокне, легированном эрбием

59

Мозговой Ю.Д., Хриткин С.А.

Самовозбуждение микроволнового генератора на потоках электронных осцилляторов при центробежной электростатической фокусировке

38

CONTENT

COMMUNICATIONS

Dear V.Yu., Fatkhulin T.D.

Analysis of current state of transport networks with the purpose of introducing software defined networks (SDN) technology

Stepanova I.V., Mohammed Omar A.A.

Use of advanced technologies for development distributed corporate communication networks

4

Goldstein A.B.
Evolution of NGN/IMS and post-NGN network management models

46

Dokuchaev V.A., Kalfa A.A., Mytenkov S.S., Shvedov A.V.

Technical solutions analysis for the modern Data Centers

10

Kubankov A.N., Kubankov Yu.A.
Improvement of cyberspace personnel training quality as an essential for technological breakthrough

16

Kuzovkov D.V.
Application of the expert-qualimetric method for the selection of the optimal variant for the construction of satellite communication systems justification

55

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

ELECTRONICS. RADIO ENGINEERING

Abramov V.A., Popov O.B., Borisov A.A., Chernikov K.V.

Sound signal statistics submitted to the occurrence of complex functions

29

Nefedov V.N., Saygin I.A., Khokhlov M.E., Ryabikina I.G.

Prospects of application of high microwave technologies

33

Mozgovoi Yu.D., Khratkin S.A.

Radiation of multibeam microwave generator on flows of nonlinear electron oscillators

38

PUBLICATIONS IN ENGLISH

COMMUNICATIONS

T•Com m

Telecommunications and transport

Volum 11. №6-2017

The journal is included in the list of scientific publications, recommended Higher Attestation Commission Russian Ministry of Education for the publication of scientific works, which reflect the basic scientific content of candidate and doctoral theses.

Founder

"Media Publisher", Ltd.

Publisher

Dymkova Svetlana Sergeevna
ds@media-publisher.ru

Editor in Chief

Dr. Valery Tikhvinskii

Editorial board

Adzhemov Artem S.

Doctor of sciences., Professor MTUCI, Russia

Bugaev Alexander S.

Academician of the RAS, Russia

Buslaev Alexander P.

Doctor of sciences., Professor MTUCI, Russia

Corbett Rowell

Full Professor: Electronic & Electrical Engineering Nazarbayev University, Hong Kong (China), USA

Golovachyov Julius

Managing Consultant Detecon International GmbH, Germany

Dulkeyts Eric

Ph.D., chief executive officer of the corporation Detecon, USA

Kirhgessner Yuri

Ph.D., Director IncotologyLtd., United Kingdom

Kuzovkova Tatyana A.

PhD, Dean of the Faculty of Economics MTUCI, Russia

Kyurkchan Alexander G.

Doctor of sciences., Professor MTUCI, Russia

59

Seilov Shakhmaran Zh.

PhD, President of the Kazakh Academy of Infocomm, Kazakhstan

Sharpe Michael

PhD, vice-president of the European Standards Institute – ETSI, United Kingdom

Sysoev Nikolai N.

Doctor of sciences., Dean of the Faculty of Physics of Moscow State University. Lomonosov, Russia

Waal Albert

Ph.D., Senior Research Fellow University of Hanover. Leibniz at the Department of Communications Technology, Germany

Yashina Marina V.

Doctor of sciences., Professor MTUCI, Russia

Yelizarov Andrey A.

Doctor of sciences., Professor MIEM, HSE, Russia

Zubarev Yuri B.

Ph.D., corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Honored Scientist of Russia, Russia

All articles and illustrations are copyright. All rights reserved. No reproduction is permitted in whole or part without the express consent of Media Publisher Joint-Stock Company

© "Media Publisher", 2017

www.media-publisher.ru

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАУКОЁМКИХ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Нефедов Владимир Николаевич,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"
(НИУ ВШЭ), Москва, Россия, 6034348@mail.ru

Сайгин Илья Александрович,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"
(НИУ ВШЭ), Москва, Россия, sayginya95@mail.ru

Хохлов Михаил Евгеньевич,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"
(НИУ ВШЭ), Москва, Россия, mekhokhlov@gmail.com

Рябикина Ирина Геннадьевна,

Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики"
(НИУ ВШЭ), Москва, Россия, ryabikina.irina2012@gmail.com

Ключевые слова: микроволновая технология, электродинамическая система, источник микроволновой энергии, распределение температуры, полимерный композиционный материал.

Рассмотрены перспективы применения научно-исследовательских микроволновых технологий в процессах отверждения полимерных композиционных материалов на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон. Применение энергии микроволнового излучения в качестве источника тепла позволяет реализовать качественно новый уровень производства композиционных материалов, характеризующийся экологической чистотой, энергетической эффективностью и высокой скоростью технологических процессов. Экспериментальные исследования отверждения полимерных композиционных материалов проведены в микроволновых установках на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Конструкции электродинамических систем микроволновых установок позволяют формировать равномерное распределение температуры по объему обрабатываемого материала и получать более высокие технические характеристики выпускаемых изделий. Влияние микроволнового излучения на полимерное связующее композиционных материалов, например, эпоксидные смолы, приводит к изменению внутренней структуры материала, которая становится более плотной и прочной.

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов отверждения изделий в виде стержней, диаметром 40 мм, из стеклопластиковой арматуры. Энергетические затраты технологического процесса с использованием микроволнового излучения снижались в несколько раз по сравнению с традиционными методами тепловой обработки. Приведены результаты теоретических исследований по ускоренному отверждению полимерных композиционных труб, диаметром 2000 мм и толщиной 36мм, а также результаты экспериментальных исследований по технологическому процессу плавления базальта. Энергетические затраты на плавление базальта с использованием микроволнового излучения составили 0,8кВт час/кг, что в 9 раз меньше, по сравнению с традиционным электродуговым методом плавления базальта. Приведены результаты экспериментальных исследований сушки утеплителя в виде картона из базальтового волокна с использованием микроволнового излучения и показано, что энергетические затраты уменьшаются на 45% по сравнению с сушкой утеплителя по традиционной технологии и повышается качество получаемой продукции. Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований в области высокоеффективных микроволновых технологий термообработки листовых полимерных композиционных материалов, толщиной 3 мм и шириной 400 мм, а также приведены основные параметры микроволновой установки лучевого типа для термообработки параболической антенны из углеродного волокна с эпоксидным связующим, диаметром 1200 мм, толщиной 3 мм. Уровень побочных излучений от микроволновых установок не превышал 10мкВт/см², что не нарушило работу рядом стоящего радиотехнического оборудования и обеспечивало безопасную работу обслуживающего персонала. Приоритетное развитие научно-исследовательских микроволновых технологий позволит получить улучшение технических характеристик получаемых композиционных материалов.

Информация об авторах:

Нефедов Владимир Николаевич, Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ), профессор, д.т.н., Москва, Россия

Сайгин Илья Александрович, Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ), студент, Москва, Россия

Хохлов Михаил Евгеньевич, Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ), студент, Москва, Россия

Рябикина Ирина Геннадьевна, Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики" (НИУ ВШЭ), магистрант, Москва, Россия

Для цитирования:

Нефедов В.Н., Сайгин И.А., Хохлов М.Е., Рябикина И.Г. Перспективы применения научно-исследовательских микроволновых технологий // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Том 11. №6. С. 33-37.

For citation:

Nefedov V.N., Saygin I.A., Khokhlov M.E., Ryabikina I.G. (2017). Prospects of application of high microwave technologies. T-Comm, vol. 11, no.6, pp. 33-37. (in Russian)

I. Введение

Результаты анализа современных направлений применения полимерных композиционных материалов в различных отраслях промышленности свидетельствуют о необходимости модернизации технологических процессов их производства. Основные требования, которые предъявляются к современным технологическим процессам производства полимерных композиционных материалов с одной стороны должны обеспечить снижение уровня энергетических затрат и повышение скорости отверждения полимерных связующих, повышение коэффициента полезного действия используемого оборудования, обеспечение экологической чистоты производства и комфортных условий труда обслуживающего персонала, а с другой стороны эти требования связаны с улучшением технических характеристик полимерных композиционных материалов, в частности, повышение прочности и долговечности получаемых изделий.

Полимерные композиционные материалы обладают высокой прочностью, низкой теплопроводностью, малым удельным весом, стойкостью к химическим воздействиям. Такие материалы широко используются в различных отраслях промышленности: строительство, судостроение, дорожное строительство, нефтегазовый комплекс, самолетостроение, автомобилестроение и ракетостроение.

Традиционные технологии тепловой обработки полимерных композиционных материалов основаны на конвективном, радиационном или контактном теплообмене между обрабатываемым материалом и теплоносителем. Однако, обрабатываемые материалы обладают низкой теплопроводностью и возникающие градиенты температуры в материале делают технологический процесс тепловой обработки весьма длительным с большими затратами электроэнергии.

В современных отечественных и зарубежных научных публикациях отражены результаты поиска новых альтернативных методов тепловой обработки полимерных композиционных материалов, которые по сравнению с традиционными методами тепловой обработки, обладают рядом существенных преимуществ как с точки зрения снижения затрат электроэнергии, экологии, повышения скорости технологических процессов отверждения полимерных связующих, так и повышения долговечности и прочности получаемых изделий. Такие современные технологии связаны с использованием в качестве источника тепла, энергии микроволнового излучения [1].

II. Основные преимущества микроволновых технологий

В настоящей статье рассмотрены перспективы применения микроволновых технологий в процессах отверждения полимерных композиционных материалов на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон. Применение энергии микроволнового излучения в качестве источника тепла позволяет реализовать качественно новый уровень производства композиционных материалов, характеризующийся экологической чистотой, энергетической эффективностью и высокой скоростью технологических процессов.

Основное преимущество предлагаемого технологического процесса отверждения полимерного связующего обусловлено тем, что энергия микроволнового излучения мгновенно проникает вглубь обрабатываемого материала независимо от его теплопроводности. Благодаря объёмному характеру

микроволнового нагрева, можно с использованием специальных конструкций электродинамических систем сформировать для заданной конфигурации обрабатываемого материала равномерное распределение температуры и избавиться от градиентов температуры, которые имеют место в традиционных методах нагрева. Это преимущество микроволнового метода нагрева позволяет существенно сократить энергетические затраты обрабатываемого материала, получить однородную структуру материала ввиду отсутствия внутренних напряжений и увеличить скорость технологического процесса [1].

Важно отметить и другое преимущество использования микроволновых технологий обработки полимерных композиционных материалов, которое состоит в том, что окружающий воздух и металлические конструкции используемого оборудования не нагреваются. В микроволновых технологических процессах обрабатываемое изделие расположено в оправке из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями, например, фторопласта, в течение времени, необходимого для отверждения полимерного связующего, что позволяет избавиться от учёта отдачи тепла в окружающее пространство и снизить энергетические затраты.

Микроволновый метод нагрева не обладает инерцией, что позволяет с необходимой точностью осуществлять контроль и автоматизировать технологий процесс отверждения полимерного композиционного материала [1].

В научных публикациях, посвященных вопросам исследования характеристик полимерных композиционных материалов с использованием микроволнового излучения, показано, что полимерное связующее, в частности, эпоксидная смола, приобретает более высокую плотность и прочность получаемых изделий [2-3], а также позволяет в десятки раз ускорять многие химические реакции, в частности, реакции полимеризации [3].

В работах [3-4] представлены результаты воздействия микроволнового излучения на изменение свойств эпоксидных смол, в частности, показано, что изменяется внутренняя структура, повышается плотность, прочность и теплостойкость эпоксидных смол по сравнению с традиционными методами отверждения и при этом увеличивается скорость отверждения в несколько раз.

В многочисленных научных публикациях рассмотрены перспективы применения наукоёмких микроволновых технологий в процессах отверждения полимерных композиционных материалов на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон. Следует отметить то обстоятельство, что использование микроволнового излучения для отверждения полимерных связующих практически ограничивается лабораторными экспериментальными установками.

III. Результаты теоретических и экспериментальных исследований

Результаты экспериментальных исследований отверждения полимерных композиционных материалов получены с использованием микроволновых установок, работающих на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Конструкции использованных электродинамических систем микроволновых установок позволяют формировать равномерное распределение температуры по объёму обрабатываемого материала.

В строительной индустрии широкое распространение получила стеклопластиковая арматура, которая обладает малым удельным весом, высокой химической стойкостью и прочностью, не подвержена коррозии и имеет низкую теплопроводность. В работе [5] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов отверждения изделий в виде стержней, диаметром 40мм в качестве стеклопластиковой арматуры. Предложена конструкция и метод расчёта микроволновой установки типа бегущей волны, которая формирует равномерное распределение температуры по поперечному сечению материала стержня. Для формирования равномерного распределения температуры полимерных композиционных материалов в виде стержней используется микроволновая установка с продольным взаимодействием. Микроволновая установка состоит из двух последовательно расположенных конструкций микроволновых устройств. Первое микроволновое устройство в качестве электродинамической системы использует круглый волновод, диаметром 100 мм, работающий на основном типе волны E_{01} и обеспечивает максимальное значение температуры в центре материала стержня и спад температуры по радиусу к внешней поверхности стержня, а вторая конструкция микроволнового устройства в качестве электродинамической системы использует замедляющую систему в виде диафрагмированного волновода, которая обеспечивает максимальное значение температуры на поверхности стержня и её спад по радиусу к оси материала стержня. Суперпозиция распределений температуры в материале стержня от двух конструкций электродинамических систем должна удовлетворять требованиям технологического процесса.

Расхождение рассчитанного и измеренного распределения температуры по поперечному сечению стержня из полимерного композиционного материала при нагреве до номинального значения температуры $+180^{\circ}\text{C}$ не превышало 6°C , а отклонение экспериментального распределения температуры материала стержня по поперечному сечению от номинального значения температуры стержня не превышало 8°C . Энергетические затраты технологического процесса с использованием микроволнового излучения снижались в несколько раз по сравнению с традиционными методами тепловой обработки. Кроме того, нагрев стержня, расположенного в трубке из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями позволил существенно сократить затраты энергии для отверждения стержня ввиду отсутствия теплоотдачи в окружающую среду.

В России и в развитых странах широкое распространение получило применение композиционных полимерных труб для систем водоснабжения, коммунальном и сельском хозяйстве, нефтяном и дорожном строительстве. Эти трубы обладают высокой химической стойкостью, низкой теплопроводностью, выдерживают большое давление, а экологические и санитарно-гигиенические свойства позволяют их использование для питьевой воды. В работе [6] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований по ускоренному отверждению полимерных композиционных труб диаметром 2000 мм и толщиной 36 мм в микроволновой установке лучевого типа. Микроволновая установка позволяет сократить энергетические затраты на технологический процесс ускоренного отверждения трубы из полимерного композиционного материала, увеличить производительность и

улучшить условия труда обслуживающего персонала. Отклонение температуры от номинального значения температуры $+200^{\circ}\text{C}$ по внешней поверхности трубы отсутствовало, а по толщине трубы не превышало 5°C . Термическая обработка трубы, расположенной между трубами из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями позволила существенно сократить затраты энергии из-за отсутствия отдачи тепла в окружающее воздушное пространство.

В работе [7] представлены результаты экспериментальных исследований по технологическому процессу плавления базальта с использованием микроволнового излучения. Экспериментальным исследованиям подвергся образец базальта весом 700 г при объёме в 400 cm^3 . Образец нагревался в камере лучевого типа, питаемой одним источником микроволновой энергии, выходной мощностью 600 Вт. Время нагрева образца базальта до температуры 1500°C составило 30 минут. Полученные данные позволили оценить энергетические затраты, приведённые как к объёму нагреваемого материала, которые составили $1,5 \text{ MBt/m}^3$, так и к массе нагреваемого материала, которые составили $0,8 \text{ kBt\cdot\text{час}/kg}$. Лучшие зарубежные индукционные установки плавления базальта имеют средние энергетические затраты $2,2 \text{ kBt\cdot\text{час}/kg}$, а электродуговые печи $7,08 \text{ kBt\cdot\text{час}/kg}$. Таким образом, энергетические затраты при микроволновых технологиях в несколько раз меньше, чем в традиционных технологиях плавления базальта. Предлагаемая технология плавления базальта будет обладать несомненными преимуществами: быстрый запуск процесса плавления; отсутствие сгораемого топлива и, как следствие, резкое снижение вредных выбросов в атмосферу.

В настоящее время широкое распространение в области теплоизоляционных материалов получил базальтовый картон. Базальтовый картон обладает превосходными свойствами: отсутствие токсичных веществ и канцерогенов, высокая термостойкость и негорючесть, долговечность, повышенная химическая стойкость, высокие звукоизолирующие свойства, не разрушается при температурных перепадах и термических ударах, характеризуется крайне низкой гигроскопичностью, то есть не впитывает влагу из воздуха, устойчив к грызунам, микроорганизмам, вибрациям, не крошится, не поддается гниению и термическому окислительному старению. В работе [7] приведены результаты экспериментальных исследований сушки утеплителя в виде картона из базальтового волокна с использованием микроволнового излучения и показано, что энергетические затраты уменьшаются на 45% по сравнению с сушкой утеплителя по традиционной технологии и повышается качество получаемой продукции. Применение микроволнового излучения для сушки картона из базальтового волокна является наиболее перспективным технологическим направлением для практического применения.

Широкое применение нашли листовые полимерные композиционные материалы в авиационной и ракетно-космической технике, автомобилестроении и судостроении, где используются такие их свойства, как высокая удельная прочность и стойкость к воздействию высоких температур, стойкость к вибрационным нагрузкам, малый удельный вес. В работах [8-9] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований в области высокоэффективных микроволновых технологий термообработки листовых полимерных композиционных материалов, толщиной

3мм и шириной 400 мм. Расхождение теоретических и экспериментальных характеристик распределения температуры в материале превышало 4%, а отклонение температуры в материале от номинального значения температуры +200°C не превышало 7%. Отверждение полимерных композиционных листовых материалов было проведено с использованием микроволновых установок, как на основе двумерно-периодических замедляющих систем, так и в микроволновых установках волноводного типа.

В связи с потребностью использования телекоммуникационных спутниковых систем и спутников ретрансляторов все более возрастает интерес к антенным рефлекторам, работающих в условиях открытого космоса. Основными требованиями, предъявляемыми к таким конструкциям антенн, помимо радиотехнических, являются: высокая точность изготовления антennы, термическая стабильность конструкции антennы, стабильность термомеханических и теплофизических свойств материала, малая масса при высокой жёсткости и прочности её конструкции. Сочетание вышеперечисленных характеристик в наибольшей степени обеспечивает применение для изготовления антennы полимерного композиционного материала на основе углеродного волокна и эпоксидного термостойкого связующего. В работе [10] приведены основные параметры микроволновой установки лучевого типа для термообработки параболической антennы из углеродного волокна с эпоксидным связующим, диаметром 1200 мм, толщиной 3 мм. Длительность нагрева антennы от температуры +20°C до температуры +200°C, весом 5,4 кг, составляло 160 с. Отклонение температуры от номинального значения температуры по поверхности антennы отсутствовало, а по толщине антennы не превышало 2°C.

В работе [4] представлены подходы к осуществлению технологии отверждения полимерного связующего в заготовках крупногабаритных деталей из органопластика с использованием микроволнового излучения в камерах лучевого типа. Показано, что по сравнению с традиционными технологиями отверждения в различных конструкциях электрических печей, микроволновая технология позволяет сократить время отверждения в 5-10 раз, уменьшить затраты электроэнергии в 4-5 раз, повысить однородность структуры полимерного композиционного материала, снизить пористость в 5-7 раз, повысить прочностные характеристики материала, например, повысить модуль упругости на изгиб 30% и предел прочности на растяжение на 20%.

В микроволновых установках были приняты специальные меры по предотвращению выхода микроволнового излучения за пределы работающей установки. Экспериментальными исследованиями установлено, что уровень побочных излучений от микроволновой установки, благодаря принятym мерам, не превышал 10 мкВт/см², что не нарушило работу рядом стоящего радиотехнического оборудования и обеспечивало безопасную работу обслуживающего персонала.

Дальнейшее развитие научноёмких микроволновых технологий позволит обеспечить улучшение технических характеристик получаемых полимерных композиционных материалов на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон.

IV. Заключение

Показаны основные преимущества микроволновых технологических процессов отверждения полимерных компо-

зионных материалов к которым относятся: снижение энергетических затрат, экологическая чистота, отсутствие инерционных свойств нагрева, повышение скорости технологических процессов, высокий коэффициент полезного действия используемого оборудования, улучшение технических характеристик получаемых изделий, создание комфортных условий труда для обслуживающего персонала.

Микроволновые технологии обладают объёмным характером нагрева материалов не зависимо от их теплопроводности. Это свойство позволяет равномерно нагревать материал по всему объёму, что ведёт к отсутствию внутренних напряжений. Некоторые свойства полимерных композиционных материалов, к которым приводит их взаимодействие с микроволновым излучением, такие как, долговечность, еще в недостаточной мере изучены. Однако, такие характеристики материалов, как повышение однородности структуры, плотности и прочности, – подтверждены результатами экспериментальных исследований.

Экспериментальными исследованиями установлено, что уровень побочных излучений от микроволновой установки, благодаря принятym мерам, не превышал 10мкВт/см², что ниже допустимых пределов для излучения из установок такого рода.

Таким образом, развитие научноёмких микроволновых технологий позволит реализовать в практическом плане улучшение технических характеристик получаемых полимерных композиционных материалов.

Литература

1. Мамонтов А.В., Нефедов 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.
2. Babatunde Bolasodun, Alan Nesbitt, Arthur Wilkinson, Richard Day Effect of curing method on physical and mechanical properties of araldite DLS 772/4 4 DDs epoxy system // International journal of scientific & Technology research volume 2, issue 2, february 2013, pp. 12-18.
3. 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.
4. Гузева Т.А. Совершенствование технологических режимов отверждения заготовок деталей из органопластиков под действием СВЧ излучения // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва 2014.
5. Мамонтов А.В., Нефедов В.Н., Симонов В.П. Микроволновые устройства термообработки стержневых диэлектрических материалов // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 10. С. 53-55.
6. Нефедов В.Н., Мамонтов А.В., Афанасьев В.В. Микроволновый метод отверждения труб из полимерных композиционных материалов // В кн.: Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2016. Материалы Международной научно-технической конференции. 22-23 сентября, 2016 Т. 2. Саратов: Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А., 2016. С. 463-468.
7. Нефедов В.Н., Мамонтов А.В., Симонов В.П., Чебыкин А.Е. Оценка применимости микроволнового излучения для термообработки базальта и изделий из него // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Т. 9. № 10. С. 70-73.
8. Мамонтов А.В., Нефедов В.Н., Симонов В.П. Микроволновые устройства для термообработки листовых материалов с малыми диэлектрическими потерями // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 10. С. 56-59.
9. Mamontov A.V., Nefedov V.N., Simonov V.P. Measurement of the Temperature of Sheet Materials in Microwave Traveling-Wave Structures // Measurement Techniques. 2015. Vol. 58, Issue 10. Pp. 1156-1159.
10. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Simonov V.P., Chebykin A.E., Saygin I.A. Thermal hardening of parabolic polymer composite antennas with the use of microwave radiation // T-Comm. 2017. Vol.11. No.2. Pp. 52-55.

PROSPECTS OF APPLICATION OF HIGH MICROWAVE TECHNOLOGIES

Vladimir N. Nefedov, National research University "Higher school of Economics" (HSE), Moscow, Russia, 034348@mail.ru
Il'ya A. Saygin, National research University "Higher school of Economics" (HSE), Moscow, Russia, sayginya95@mail.ru
Mikhail E. Khokhlov, National research University "Higher school of Economics" (HSE), Moscow, Russia, mekhokhlov@gmail.com
Irina G. Ryabikina, National research University "Higher school of Economics" (HSE), Moscow, Russia, ryabikina.irina2012@gmail.com

Abstract

In the article the prospects of application of high microwave technology in the process of curing of polymer composite materials based on carbon, basalt and glass fibers. The use of the energy of microwave radiation as a heat source allows to realize qualitatively new level of production of composite materials, characterized by environmental friendliness, energy efficiency and high-speed manufacturing processes. Experimental study of curing of polymer composites conducted in the microwave installations on the oscillation frequency 2450 MHz electromagnetic field. Design of electrodynamic systems of microwave devices generate a uniform temperature distribution by volume of the processed material and to obtain higher performance of products. The influence of microwave radiation on the polymer binder of composite materials such as epoxy, leads to a change of the internal structure of the material, which becomes more dense and durable. The results of theoretical and experimental studies of the processes of curing products in the form of rods with a diameter of 40mm, of fiberglass reinforcement. The energy costs of the technological process with the use of microwave radiation was reduced several times in comparison with traditional methods of thermal processing. The results of theoretical studies on the accelerated curing of polymer composite pipes with a diameter of 2000 mm and a thickness of 36 mm, as well as results of experimental investigations on technological process of melting of basalt. The energy cost of melting basalt using microwave radiation was 0.8 kW h/kg, which is 9 times smaller compared to the traditional electric arc method of melting of basalt. The results of experimental studies of drying of insulation in the form of cardboard from basalt fibers with using of microwave radiation and it is shown that the energy costs are reduced by 45% compared with the drying of insulation according to traditional methods and improves the quality of the products. The results of theoretical and experimental research in the field of high-performance microwave technology for the heat treatment of sheet of polymeric composite materials with a thickness of 3mm and a width of 400 mm and gives the basic parameters of microwave installation radiation type of heat treatment of a parabolic antenna of carbon fiber with epoxy binder, with a diameter of 1200 mm, a thickness of 3mm.

The spurious radiation from microwave devices does not exceed 10 microwatt/cm² that does not violate the work of the nearby radio equipment and provide safe work of the staff. Priority development of knowledge-based microwave technologies will allow to improve the technical characteristics of the resulting composite materials.

Keywords: microwave technology, electrodynamic system, the source of microwave energy, the temperature distribution of composite material; polymer composite material.

References

1. Mamontov A.V., Nefedov V.N., Nazarov I.V., Potapova T.A. (2008). *Microwave Technologies*. Res. Inst. Adv. Mater. and Technol. of MIEM, Moscow. (in Russian)
2. Babatunde Bolasodun, Alan Nesbitt, Arthur Wilkinson, Richard Day (2013). Effect of curing method on physical and mechanical properties of araldite DLS 772/4 4 DDs epoxy system. *International journal of scientific & Technology research*, vol. 2, issue 2, february 2013, pp. 12-18.
3. Lavrent'ev V.A., Kalganova S.G. (2005). Application of microwave energy electromagnetic waves to influence the curing process of epoxy resins. *Elektro- and thermal technological processes and installations: collection of scientific works*. Saratov: Saratovskii state technical University, vol. 2, pp. 67-70. (in Russian)
4. Guzева T.A. (2014). Improvement of technological modes of curing of billets of organic plastics under the action of microwave radiation. *Abstract of thesis on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences*. MGTU im. N. Uh. Bauman, Moscow. (in Russian)
5. Mamontov A.V., Nefedov V.N., Simonov V.P. (2014). Microwave devices of heat treatment rod dielectric materials. *T-Comm*, vol.8, no.10, pp. 53-55. (in Russian)
6. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Afanasyev V.V. (2016). Microwave method of polymeric composite pipes curing. *2016 International conference on Actual problems of electron devices engineering (APEDE 2016)*. September 22-23. 2016, Saratov. Saratovskii state technical University, vol. 2, pp. 463-468. (in Russian)
7. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Simonov V.P., Chebykin A.E. (2015). Evaluation of microwave radiation applicability for the heat treatment of basalt and its products materials. *T-Comm*, vol. 9, no.6, pp. 70-73. (in Russian)
8. Mamontov A.V., Nefedov V.N., Simonov V.P. (2014). Microwave devices of heat treatment of sheet materials with small dielectric losses. *T-Comm*, vol. 8, no. 10, pp. 56-59. (in Russian)
9. Mamontov A. V., Nefedov V. N., Simonov V. P. (2015). Measurement of the Temperature of Sheet Materials in Microwave Traveling-Wave Structures. *Measurement Techniques*, vol. 58, issue 10, pp. 1156-1159.
10. Nefedov V.N., Mamontov A.V., Simonov V.P., Chebykin A.E., Saygin I.A. (2017). Thermal hardening of parabolic polymer composite antennas with the use of microwave radiation. *T-Comm*, vol. 11, no. 2, pp. 52-55.

Information about authors:

Vladimir N. Nefedov, National research University "Higher school of Economics" (HSE), professor, Moscow, Russia

Il'ya A. Saygin, National research University "Higher school of Economics" (HSE), student, Moscow, Russia

Mikhail E. Khokhlov, National research University "Higher school of Economics" (HSE), student, Moscow, Russia

Irina G. Ryabikina, National research University "Higher school of Economics" (HSE), 1st year master student, Moscow, Russia