



САРАТОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ ГАГАРИНА Ю. А.

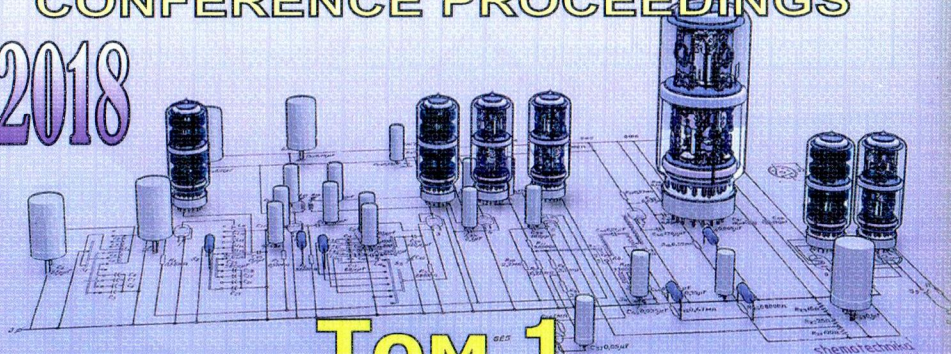


Международная  
научно-техническая конференция  
«Актуальные проблемы  
электронного приборостроения»

# Материалы конференции

## CONFERENCE PROCEEDINGS

2018



# Том 1

2018 INTERNATIONAL CONFERENCE ON  
ACTUAL PROBLEMS OF ELECTRON DEVICES ENGINEERING  
(APEDE'2018)

September, 27-28, 2018, Saratov



ROHDE & SCHWARZ

27-28 сентября 2018 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Саратовский государственный технический университет  
имени Гагарина Ю.А.



**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
АПЭП-2018**

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

ТОМ 1

27-28 сентября 2018 г.

Саратов 2018

УДК 621.385: 621.372: 621.382: 621.317: 621.793: 537.533

В докладах научно-технической конференции нашли отражение результаты теоретических и экспериментальных исследований в области электродинамики и микроволновой техники, микроволновой электроники, наноэлектроники, силовой электроники, полупроводниковой электроники, электроэнергетики, систем измерительной и медицинской техники.

Излагаются результаты исследования резонаторных и замедляющих систем, устройств СВЧ, приборов вакуумной, плазменной и микроэлектроники, технологические вопросы изготовления изделий электронной техники.

Сборник состоит из двух томов и включает три раздела: микроволновая электроника, вакуумная микроэлектроника и наноэлектроника; электродинамика и микроволновая техника; технологии производства электронных приборов, силовая электроника, прикладные аспекты электронного приборостроения.

Для специалистов в области электронной техники, электродинамики и микроволновой техники, энергетики СВЧ, контрольно-измерительной и медицинской техники, а также преподавателей, студентов, магистрантов и аспирантов радиофизических, электронных и энергетических специальностей.

#### Редакционная коллегия:

д.т.н., проф., зав. каф. ЭПУ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Захаров А.А. (отв. редактор); д.т.н., проф. каф. ЭПУ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Царев В.А.; д.т.н., проф. каф. ЭПИ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Артюхов И.И.; д.т.н., проф. каф. ЭПУ СГТУ имени Гагарина Ю.А. Мирошниченко А.Ю. (зам. отв. редактора, секретарь).

Part Number: CFP18521-PRT

ISBN: 978-1-5386-4332-7

Copyright and Reprint Permission: Abstracting is permitted with credit to the source. Libraries are permitted to photocopy beyond the limit of U.S. copyright law for private use of patrons those articles in this volume that carry a code at the bottom of the first page, provided the per-copy fee indicated in the code is paid through Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923. For reprint or republication permission, email to IEEE Copyrights Manager at [pubs-permissions@ieee.org](mailto:pubs-permissions@ieee.org). All rights reserved.

**V.N. Nefedov, V.V. Afanas'ev, I.G. Ryabikina**  
National Research University «Higher School of Economics», Moscow,  
e-mail: 6034348@mail.ru

## **HEAT TREATMENT OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS USING MICROWAVE RADIATION**

The results of the microwave radiation influence of the electromagnetic field oscillation frequency of 2450 MHz on the process of curing thermosetting epoxy resins, which are used as a binder in the production of polymer composite materials based on basalt, glass and carbon fibers, are presented. It is shown that the density of the cured thermosetting epoxy resin using microwave radiation becomes higher compared to traditional methods. The maximum density of thermosetting epoxy resins is achieved by uniform microwave heating.

**В.Н. Нефедов, В.В. Афанасьев, И.Г. Рябикина**  
Национальный исследовательский университет  
«Высшая школа экономики», г. Москва, e-mail: 6034348@mail.ru  
**ТЕРМООБРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МИКРОВОЛНОВОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ**

В настоящее время широкое распространение получили технологии производства полимерных композиционных материалов на основе углеродных, базальтовых и стеклянных волокон. Эти материалы обладают малым удельным весом, высокой химической стойкостью и прочностью, имеют низкую теплопроводность и не подвержены коррозии [1]. Полимерные композиционные материалы находят применение в различных отраслях промышленности.

Традиционные методы отверждения полимерных композиционных материалов характеризуются передачей тепла от нагревателя к нагреваемому материалу за счёт конвекции, теплопроводности или радиационного переноса тепла от внешних слоёв материала к внутренним слоям материала. Такой технологический процесс приводит к возникновению перепада температуры по объёму обрабатываемого материала, который может приводить к внутренним напряжениям и различным дефектам структуры материала [1]. Градиент температуры возникает из-за малой теплопроводности термореактивного эпоксидного связующего.

Энергия микроволнового излучения проникает на всю глубину полимерного композиционного материала, независимо от его теплопроводности и позволяет осуществлять равномерный нагрев по всему объёму материала, что приводит к более высоким физико-механическим характеристикам получаемых изделий. Применение микроволнового излучения позволяет снизить затраты электроэнергии, увеличить скорость технологических процессов, повысить однородность структуры, плотность и прочность получаемых изделий [2-4]. Обработываемый полимерный композиционный материал расположен в оправке из теплоизоляционного материала с малыми диэлектрическими потерями (фторопласта), что позволяет снизить энергопотребление технологического процесса ввиду отсутствия теплоотдачи в окружающее пространство, и играет роль термоса в течение времени, необходимого для отверждения полимерного связующего. При использовании микроволнового излучения окружающий воздух и металлические конструкции используемого оборудования не нагреваются. Микроволновые технологии нагрева не обладают инерцией, что позволяет с необходимой точностью осуществлять контроль и автоматизировать технологический процесс отверждения полимерного композиционного материала.

Возможность прогнозировать физико-механические свойства полимерного композиционного материала имеет важное значение для их практического применения в различных отраслях промышленности. Внутренняя структура термореактивных полимерных связующих при традиционном методе нагрева и с использованием микроволнового излучения различна. В работах [2-3] представлены результаты исследований по плотности и по прочности на изгиб, проведенных на отвержденных образцах термореактивной эпоксидной смолы с использованием традиционных и микроволновых технологий на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц.

В работе [4] представлены результаты экспериментальных исследований по отверждению эпоксидной смолы и отвердителя как традиционным методом, так и с использованием микроволнового излучения на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Образцы помещали в электрическую печь и нагревали со скоростью 2°C/мин до температуры +180°C и далее выдерживали при этой температуре до полного отверждения, а также помещали в микроволновую установку на частоте колебаний электромагнитного поля

2450 МГц. Микроволновая установка для отверждения эпоксидной смолы была выполнена в виде цилиндрического резонатора и работала на основном виде колебаний  $TM_{010}$ . При выбранном виде колебаний в резонаторе максимальная напряженность электрического поля направлена вдоль центральной оси полого резонатора. Температура в обрабатываемом материале была распределена неравномерно. В центре образца температура имела максимальное значение. Значение плотности образца термореактивного полимерного связующего дает нам представление о том, насколько плотно или свободно упакованы молекулы в структуре материала. Результаты экспериментальных исследований показали, что средняя плотность полученных образцов, подготовленных с использованием микроволнового излучения, в 1,1 раза выше, чем при традиционном методе. Показано, что при использовании микроволнового излучения внутренняя структура отвержденных образцов становится более однородной и наблюдается 15%-ное увеличение модуля упругости и прочности на изгиб по сравнению с традиционным методом нагрева [4].

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований по отверждению термореактивного полимерного связующего, как с помощью традиционных технологий, так и при использовании микроволнового излучения на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц. Для проведения экспериментов были изготовлены емкости в виде цилиндров, внутренним диаметром 60 мм и высотой 65 мм. В эти емкости изначально заливали эпоксидную смолу с отвердителем, объемом  $170 \text{ см}^3$  и весом 204 г.

Первый образец был помещен в цилиндр из фторопласта и его отверждение проводилось при естественных условиях при комнатной температуре  $+22^\circ\text{C}$ . Плотность полученного материала соответствовала исходной плотности  $1,20 \text{ г/см}^3$ . Плотность определялась отношением веса к объему обрабатываемого материала.

Второй образец в цилиндре из нержавеющей стали был помещен в термостат, где нагревался до температуры  $+180^\circ\text{C}$  и выдерживался при заданной температуре до полного отверждения. Плотность полученного материала соответствовала значению  $1,23 \text{ г/см}^3$ .

Третий образец был помещен в цилиндр из фторопласта с крышкой. Подготовленная проба помещалась в микроволновую установку лучевого типа. Значение температуры на оси цилиндра составило  $+184^\circ\text{C}$ , а на боковой поверхности пробы составило  $+165^\circ\text{C}$ . Отклонение температуры

на оси пробы и на боковой поверхности составило 19°C. После набора температуры нагрев прекращался и проба выдерживалась до полного отверждения. Плотность полученного материала соответствовала значению 1,38 г/см<sup>3</sup>.

Четвертый образец обрабатываемого материала был помещен в цилиндр из фторопласта с крышкой. Подготовленная проба помещалась в микроволновую установку лучевого типа и нагрев пробы осуществлялся на вращающемся столе для осуществления равномерного нагрева. Значение температуры на оси цилиндра составило +185°C, а на боковой поверхности пробы составило +172°C. Отклонение температуры на оси пробы и на боковой поверхности составило 13°C. После набора температуры нагрев прекращался и проба выдерживалась до полного отверждения. Плотность полученного материала соответствовала значению 1,43 г/см<sup>3</sup>.

В результате проведенных экспериментов показано, что максимальное значение плотности обрабатываемого материала достигается при равномерном микроволновом методе нагреве. Плотность полученного материала выше исходного материала в 1,19 раза.

Таким образом, установлено, что микроволновое излучение позволяет прогнозировать физико-механические характеристики получаемых материалов, в частности, значение плотности. Кроме того, использование микроволнового излучения в технологических процессах производства полимерных композиционных материалов позволяет существенно снизить энергетические затраты, повысить коэффициент полезного действия производственного оборудования, улучшить экологию и условия труда обслуживающего персонала, поскольку микроволновое излучение не создает шума и не нагревает воздух [5].

Микроволновые технологии обладают объёмным характером нагрева материалов независимо от их теплопроводности. Это свойство позволяет равномерно нагревать материал по всему объёму, что ведет к отсутствию внутренних напряжений и к однородности внутренней структуры. Некоторые физико-механические характеристики получаемых материалов с использованием микроволнового излучения, в частности повышение плотности и прочности, - подтверждены результатами экспериментальных исследований [2-4].

Публикация подготовлена в результате проведения исследования (№ проекта 18-01-0024) в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2018 - 2020 гг. и в рамках государственной поддержки ведущих университетов Российской Федерации «5-100».

#### Библиографический список

1. Кербер М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин; под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
2. Лаврентьев В.А. Применение энергии СВЧ электромагнитных колебаний для воздействия на процесс отверждения эпоксидных смол / В.А. Лаврентьев, С.Г. Калганова // Электро- и теплотехнологические процессы и установки : сб. науч. тр. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2005. Т.2. С.67-70.
3. Гузева Т.А. Совершенствование технологических режимов заготовок деталей из органопластиков под действием СВЧ-излучения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / Т.А. Гузева. М., 2014. 16 с.
4. Effect of curing method on physical and mechanical properties of araldite DLS 772/4 4 DDs epoxy system / B. Bolasodun, A. Nesbitt, A. Wikinson, R. Day // International journal of scientific & Technology research. 2013. Vol. 2. № 2. P. 12-18.
5. Микроволновые технологии: монография / А.В. Мамонтов, В.Н. Нефедов, И.В. Назаров, Т.А. Потапова. М.: Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий Московского института электроники и математики (технического университета), 2008. 326 с.

Научное издание

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ  
АПЭП-2018**

МАТЕРИАЛЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

TOM 1

Редактор О.А. Панина  
Компьютерная верстка  
Н.А. Акафьева  
Дизайн Р.Ю. Кузнецов

Подписано в печать 03.09.2018 Формат 60x84 1/16  
Бум. тип. Усл. печ. л. 30,45 (32,75) Уч.-изд. л. 31,0  
Тираж 120 экз. Заказ № 1205-18/06098.

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

Отпечатано в ООО «Амирит»  
410003, г. Саратов, ул. Чернышевского, 88