

# Микроволновые устройства термообработки стержневых диэлектрических материалов

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований в области высокоэффективных микроволновых технологий термообработки стержневых материалов с малой теплопроводностью. Стержни из полимерных композитных материалов используются в качестве арматуры в строительной индустрии. Предложен микроволновый метод равномерного нагрева диэлектрического стержня по всему объёму и снимает внутренние термические напряжения в процессе реакции полимеризации. Объемный характер нагрева диэлектрических стержней приводит к полноте полимеризации и высокому качеству получаемых изделий. В качестве модели микроволнового устройства с обрабатываемым материалом используется нагруженная длинная линия с заданными граничными условиями. Для высокоэффективной термообработки диэлектрических стержней различных диаметров предложено микроволновое устройство, состоящее из двух разных по конструкции секций электродинамических систем, имеющих взаимодополняющее распределение температуры по поперечному сечению стержня. Первая электродинамическая система (крутлый волновод) обеспечивает максимальную температуру вдоль оси диэлектрического стержня и ее спад по радиусу к внешней поверхности стержня. Вторая электродинамическая система (замедляющая система типа диафрагмированный волновод) обеспечивает максимальную температуру на внешней поверхности стержня и ее спад по радиусу к оси диэлектрического стержня. Результирующее распределение температуры по сечению стержня от двух секций микроволнового устройства должно обеспечить распределение температуры по поперечному сечению стержня, удовлетворяющее требованиям технологического процесса. Экспериментальные исследования проведены на частоте колебаний электромагнитного поля 2450 МГц при диаметре стержня 40 мм. Расхождение теоретических и экспериментальных значений температуры по поперечному сечению стержня не превышало 6%, а отклонение температуры в материале стержня от номинального значения температуры не превышало 8%. Теплопроводность полимерных композитных материалов очень мала и их термообработка газом или другими известными способами не приводит к равномерности нагрева по всему объёму, что ведёт к различным дефектам в готовой продукции при производстве.

**Ключевые слова:** СВЧ-устройство, распределение температуры, диэлектрический материал, волновод, замедляющая система.

## Мамонтов А.В.,

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ), доцент, a.mamontov@hse.ru

## Нефедов В.Н.,

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ), профессор, 6034348@mail.ru

## Симонов В.П.,

Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики" (МИЭМ НИУ ВШЭ), профессор, vsimonov@hse.ru

Изучение процессов полимеризации композитных диэлектрических материалов в поле сверхвысоких частот является актуальной научно-технической задачей, которая стоит во многих отраслях промышленности. В частности, в области строительных материалов, стержни из композитных материалов используются в качестве стеклопластиковой арматуры. Теплопроводность таких материалов очень мала и их термообработка газом или другими известными способами не приводит к равномерности нагрева по всему объёму и, следовательно, при таких технологических процессах, как полимеризация, возникают различные дефекты.

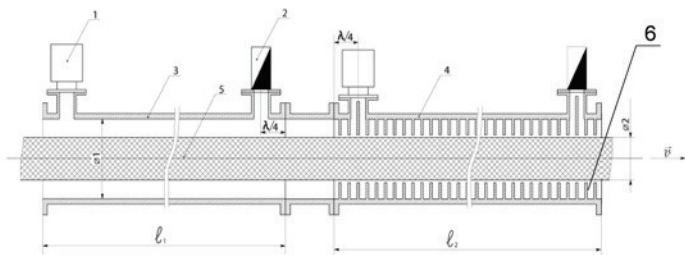
Микроволновый метод позволяет реализовать равномерный нагрев диэлектрического стержня во всем объёме и снимает внутренние термические напряжения. Объемный характер нагрева диэлектрических стержней приводит к полноте протекания реакции полимеризации и высокому

качеству получаемых изделий. Для высокоэффективного нагрева диэлектрических стержней используются микроволновые устройства с продольным взаимодействием [1-2].

Микроволновое устройство [3-4], состоит из двух последовательно соединенных разных по конструкции и параметрам секций электродинамических систем, имеющих взаимодополняющее распределение температуры по поперечному сечению обрабатываемого материала. В качестве первой электродинамической системы используется круглый волновод, который обеспечивает максимальную температуру в центре диэлектрического стержня и ее спад по радиусу к внешней поверхности стержня. В качестве второй секции электродинамической системы используется замедляющая система типа диафрагмированный волновод и обеспечивает максимальную температуру на внешней поверхности стержня и ее спад по радиусу к оси диэлектрического стержня. Результирующее распределение температуры по поперечному сечению диэлектрического стержня от двух секций микроволнового устройства должно удовлетворять требованиям технологического процесса.

Секции электродинамических систем микроволнового устройства расположены друг за другом в направлении распространения энергии электромагнитного поля. Каждая секция электродинамической системы с одной стороны согласована с источником СВЧ-энергии, а с другой стороны согласована с водяной нагрузкой, в которой имеется датчик прохождения неиспользованной мощности для контроля технологического процесса. Между секциями электродинамических систем расположен элемент, который снимает взаимное влияние секций друг на друга. Диэлектрический стержень движется с определенной скоростью последовательно через обе секции по направлению движения энергии электромагнитного поля.

На рис. 1 представлен общий вид СВЧ - устройства для равномерного нагрева по поперечному сечению стержневых материалов.



**Рис. 1.** СВЧ-устройство термообработки стержневых диэлектрических материалов: 1 – источник СВЧ энергии; 2 – согласованная нагрузка; 3 – круглый волновод; 4 – диафрагмированный волновод; 5 – диэлектрический стержневой материал; 6 – развязка между секциями;  $\Phi 1$  – диаметр круглого волновода;  $\Phi 2$  – диаметр диэлектрического стержня;  $l_1$  – длина секции круглого волновода;  $l_2$  – длина секции диафрагмированного волновода;  $\vec{G}$  – скорость движения диэлектрического стержня

Круглый волновод работает на основном типе волны  $E_{01}$  и распределение напряженности электрического поля в поперечном сечении стержня описывается функцией Бесселя нулевого порядка, имеющей максимум в центре волновода и спадающей по радиусу к краям волновода [1-2].

$$T(r) = T(0) \cdot [J_0(\gamma_1 \cdot r)]^2, \quad (1)$$

где  $T(r)$  – распределение мощности тепловых потерь по радиусу стержня в круглом волноводе;  $T(0)$  – значение мощности тепловых потерь на оси круглого волновода и стержневого материала;  $J_0(\gamma_1 \cdot r)$  – функция Бесселя нулевого порядка первого рода.

Значение  $\gamma_1$  определяется выражением [1]

$$\gamma_1^2 = \varepsilon' \cdot k^2 - \beta^2, \quad (2)$$

где  $\varepsilon'$  – действительная часть относительной диэлектрической проницаемости стержня,  $\beta$  – постоянная распространения в осевом направлении,  $k$  – волновое число свободного пространства:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны источника СВЧ-энергии,

Для волны типа  $E_{01}$  в круглом волноводе справедливо соотношение:

$$\beta^2 = k^2 \cdot \varepsilon' - \left(\frac{v_{01}}{R}\right)^2, \quad (4)$$

где  $R$  – радиус круглого волновода,  $v_{01}$  – корень функции Бесселя.

Диафрагмированный волновод представляет собой замедляющую систему, степень концентрации напряженности электрического поля к поверхности замедляющей системы определяется коэффициентом замедления.

Распределение величины мощности по радиусу  $T(r)$  диэлектрического стержня в замедляющей системе типа диафрагмированный волновод описывается выражением:

$$T(r) \approx T(r_{cm}) \cdot e^{-2 \cdot \alpha \cdot r}, \quad (5)$$

где  $T(r_{cm})$  – мощность тепловых потерь на поверхности стержня;  $r_{cm}$  – радиус стержня;  $\alpha$  – постоянная затухания амплитуды напряженности электрического поля в материале в радиальном направлении.

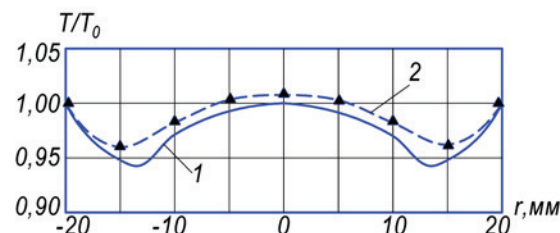
В первом приближении, распределение мощности в стержне от поверхности замедляющей системы к оси стержня спадает по экспоненциальному закону [4].

$$T(r) = T(0) \cdot e^{-2 \cdot k \cdot k_{зам} \cdot \sqrt{1 - \frac{\varepsilon'}{k_{зам}^2}} \cdot r}, \quad (6)$$

где  $k_{зам}$  – коэффициент замедления.

В качестве модели для расчета распределения температуры в материале в волноводной секции и секции в виде замедляющей системы используется нагруженная длинная линия с заданными граничными условиями. Модель учитывает изменение диэлектрических параметров материала от температуры в направлении распространения энергии электромагнитного поля и радиуса.

На рис. 2 приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения температуры по поперечному сечению диэлектрического стержня, диаметром 40 мм.



**Рис. 2.** Теоретические (1) и экспериментальные (2) характеристики распределения температуры по поперечному сечению диэлектрического стержня после прохождения двух секций СВЧ-устройства

Основные параметры устройства СВЧ-нагрева и обрабатываемого материала:

– рабочая частота колебаний электромагнитного поля, МГц	2450
– коэффициент стоячей волны для каждой секции в полосе частот 100 МГц, не более	1,5
– коэффициент стоячей волны на рабочей частоте в волноводной секции	1,15
– внутренний диаметр волновода $\Phi_1$ , мм	100
– коэффициент стоячей волны на рабочей частоте для секции замедляющей системы	1,25
– диаметр стержня $\Phi_2$ , мм	40
– длина волноводной секции $l_1$ , мм	1200
– длина секции замедляющей системы $l_2$ , мм	450
– скорость движения стержня в СВЧ-установке $G$ , м/мин	0,6
– коэффициент замедления $k_{зам}$	3,0
– температура нагрева материала $T_k$ , °C	180
– начальная температура материала $T_n$ , °C	20
– значение фактора потерь материала при начальной температуре, $\varepsilon_n''$	1,12
– значение фактора потерь материала	

при конечной температуре, $\varepsilon_k''$	1,18
– значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости материала при начальной температуре, $\varepsilon_n'$	4,0
– значение действительной части относительной диэлектрической проницаемости материала при конечной температуре, $\varepsilon_k'$	4,5
– теплоемкость материала $c_d, Дж/(г \cdot ^\circ C)$	1,2
– плотность материала $\rho_d, г/см^3$	1,6

Расхождение теоретических и экспериментальных значений температуры по поперечному сечению стержня не превышало 6%, а отклонение температуры в материале стержня от номинального значения температуры не превышало 8%.

Теплопроводность полимерных композитных материалов очень мала и их термообработка газом или другими известными способами не приводит к равномерности нагрева по всему объему, что ведёт к различным дефектам в готовой продукции при производстве.

Для снижения уровня излучения на входе и выходе обрабатываемого материала используются специальные конструкции фильтров, препятствующие выходу микроволнового излучения из работающей установки. Конструкция этих фильтров защищена патентом РФ [5] и состоит из ребристой структуры, между ребрами которой расположены трубки, выполненные из радиопрозрачного материала и заполнен-

ные водой для поглощения возможного излучения из микроволновой установки.

Экспериментальными исследованиями установлено, что уровень побочных излучений от микроволновой установки, благодаря принятым мерам, не превышал 10 мкВт/см<sup>2</sup>, что ниже допустимых пределов для излучения из установок такого рода.

### Литература

1. Девяткин И.И., Иванов М.А., Кирюшин В.П. Замедляющие системы для СВЧ нагрева диэлектрических стержней // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ, №5, 1972. – С. 106-111.
2. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. Издательство Саратовского университета, 1983, 140 с.
3. Лоик Д.А., Мамонтов А.В., Нефедов В.Н., Черкасов А.С. Использование СВЧ энергии для полимеризации стержневых материалов // Труды IX межвузовской научной школы молодых специалистов "Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине", МГУ, 2008. – С. 63-66.
4. Мамонтов А.В., Нефедов В.Н., Назаров И.В., Потапова Т.А. Микроволновые технологии. – ГНУ НИИ ПМТ МИЭМ(ТУ), 2008, 326 с.
5. Патент РФ № 2060600 от 2.11.1993 на изобретение «СВЧ – печь конвейерного типа (варианты)». Авторы: Нефедов В.Н., Валеев Г.Г., Корнеев С.В., Карпенко Ю.В. // Оpubл. 20.05.1996. Бюл. № 5.

### Microwave devices of heat treatment rod dielectric materials

Mamontov A.V., Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE), professor, a.mamontov@hse.ru  
 Nefedov V.N., Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE), professor, 6034348@mail.ru  
 Simonov V.P., Moscow Institute of Electronics and Mathematics, Higher School of Economics (MIEM HSE), professor, vsimonov@hse.ru

#### Abstract

Theoretical and experimental research results in the field of highly effective rod materials with low thermal conductivity microwave heat treatment technologies are presented. Rods made of polymeric composite materials are used as reinforcement in construction industry. Proposed microwave throughout the volume uniform heating method of the dielectric rod removes the internal thermal stresses in the process of polymerization reactions. Volumetric heating of the dielectric rods leads to fullness of polymerization and high quality of products. A loaded long line with given boundary conditions was used as a model of microwave device with the processed material. Microwave device, consisting of two different in design electrodynamic system sections with complementary temperature distribution over the cross section of a rod, was proposed for a highly efficient dielectric rods' with different diameters heat treatment. The first electrodynamic system (round waveguide) provides the maximum temperature along the axis of the dielectric rod and its decline along the radius to the outer surface of the rod. The second electrodynamic system (diaphragmatic waveguide slow-wave structure) provides the maximum temperature on the outer surface of the rod, and its decline along the radius to the axis of the dielectric rod. The resulting temperature distribution over the cross section of a rod from the two sections of the microwave device should provide the temperature distribution over the cross section of a rod, which satisfies the technological process requirements. Experimental studies were carried out on the electromagnetic field frequency oscillations of 2450 MHz with a rod of 40 mm in diameter. Divergence of the theoretical and experimental cross-section temperature values of the rod does not exceed 6%, and the temperature deviation in the material rod does not exceed 8% from the nominal temperature value. Polymer composite materials' thermal conductivity is very small and their heat treatment with gas or other known methods does not lead to the entire volume uniformity of heating, which leads to various flaws in the finished products during production.

**Keywords:** microwave device, temperature distribution, dielectric material, waveguide, slow-wave structure.

#### References

1. Deviatkin I.I., Ivanov M.A., Kiryushin V.P. Slowing down the system for microwave heating of dielectric rods / Electron-ion technology. Series 1. Microwave Electronics, No5, 1972. pp. 106-111.
2. Archangelsky Yu.S., Deviatkin I.I. Microwave heating devices for intensification of technological processes. Saratov University Publishing, 1983, 140 pp.
3. Loic D.A., Mamontov A.V., Nefedov V.N., Cherkasov A.S. The use of microwave energy for the polymerization of rod materials / Proceedings of the IX Inter-University Research School of young specialists-sheets "concentrated energy flows in space technology, electronics, ecology and medicine", Moscow State University, 2008. pp. 63-66.
4. Mamontov A.V., Nefedov V.N., Nazarov I.V., Potapova T.A. Microwave technology. GNU NII PMT MIEM (TU), 2008, 326 p.
5. RF patent number 2,060,600 on 02/11/1993 for the invention of "microwave – oven conveyor type (options)." Authors: Nefedov V.N., Valeev G.G., Korneeve S.V., Karpenko Y. / Publ. 20.05.1996. Bull. Number 5.