

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ СТЕРЖНЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Д.А. Лоик, А.В. Мамонтов, В.Н. Нефедов, А.С. Черкасов
Московский государственный институт электроники и математики
E-mail: lmis@miem.ru

Methods of the even temperature distribution creation over the cross section of dielectric rods crossing in series two sections of the heating microwave device are considered. The first section of this microwave device is realized as a circular waveguide working on the E_{01} mode shape, the second section of this microwave device is realized as a septate waveguide. Temperature superposition from each of these sections results in the even temperature distribution over the cross section of the rod. Temperature field dispersion over the cross section of the rod of 40mm in diameter at the 2450MHz frequency averages less than 10%.

В настоящей статье рассмотрен микроволновый метод создания равномерного распределения температурного поля в стержневых диэлектрических материалах с малой теплопроводностью для производства стеклопластиковой арматуры.

Микроволновый метод осуществляет равномерный нагрев диэлектрического стержня во всем объеме и снимает внутренние термические напряжения в процессе реакции полимеризации. Объемный характер нагрева диэлектрических стержней приводит к полноте реакции полимеризации и высоким прочностным характеристикам получаемых изделий.

Для диэлектрических стержней большого поперечного сечения предложена концепция построения СВЧ устройств, состоящих из двух секций, имеющих взаимодополняющее распределение температурного поля по поперечному сечению обрабатываемого материала. Первая электродинамическая система (круглый волновод) обеспечивает максимальную температуру в центре диэлектрического стержня и ее спад по радиусу к внешней поверхности стержня, а вторая электродинамическая система (диафрагмированный волновод) обеспечивает максимальную температуру на внешней поверхности стержня и ее спад по радиусу к оси стержня. Результирующее распределение температурного поля по сечению диэлектрического стержня от двух секций СВЧ устройства должно обеспечить распределение температуры по поперечному сечению стержня удовлетворяющее требованиям технологического процесса.

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.

Диафрагмированный волновод представляет собой замедляющую систему, степень концентрации напряженности электрического поля к поверхности замедляющей системы определяется коэффициентом замедления ($k_{зам} = 2,5$).

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

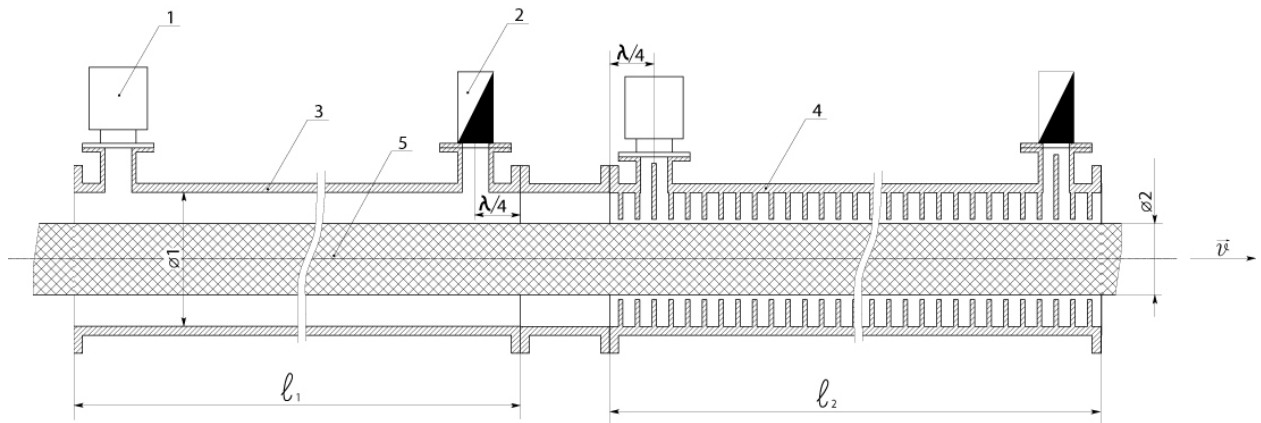


Рис. 1. СВЧ устройство для термообработки диэлектрических материалов круглого поперечного сечения:

1 – источник СВЧ энергии; 2 – согласованная нагрузка; 3 – круглый волновод; 4 – диафрагмированный волновод; 5 – диэлектрический стержневой материал; $\Phi 1$ – диаметр круглого волновода ($\Phi 1 = 100\text{мм}$); $\Phi 2$ – диаметр диэлектрического стержня и диафрагмированного волновода ($\Phi 2 = 40\text{мм}$); l_1 – длина секции круглого волновода; l_2 – длина секции диафрагмированного волновода; \vec{v} – скорость движения диэлектрического стержня.

В качестве модели каждой секции СВЧ устройства, работающей в режиме бегущей волны, использована нагруженная длинная линия, показанная на рис. 2.

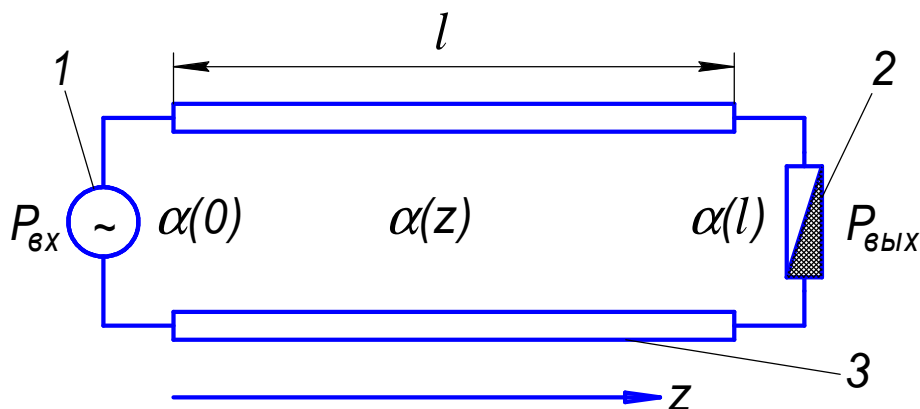


Рис. 2. Модель секции СВЧ устройства типа бегущей волны в виде нагруженной длинной линии: 1 – источник СВЧ энергии; 2 – согласованная нагрузка;

3 – обрабатываемый материал в электродинамической системе; $\alpha(0)$ – постоянная затухания при $z=0$; $\alpha(l)$ – постоянная затухания при $z=l$; z – направление движения энергии электромагнитного поля.

Распределение температурного поля по радиусу диэлектрического стержня в круглом волноводе в заданном поперечном сечении диэлектрического стержня описывается выражением [1, 2]:

$$T_z(r) \sim T_z(0) \cdot [J_0(\gamma \cdot r)]^2, \quad (1)$$

где

$$\gamma = \sqrt{k^2 \cdot \varepsilon' - \beta^2} \quad (2)$$

ε' - действительная часть относительной диэлектрической проницаемости материала стержня;

β - фазовая постоянная распространения:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{волн}}} \quad (3)$$

$\lambda_{\text{волн}}$ - длина волны в волноводе;

k - волновое число свободного пространства:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

λ - длина волны источника СВЧ энергии.

Распределение температурного поля по радиусу диэлектрического стержня в диафрагмированном волноводе в заданном поперечном сечении диэлектрического стержня описывается выражением [1, 2]:

$$T(r) \sim T(0) \cdot e^{-2 \cdot k \cdot k_{\text{зам}} \cdot \sqrt{1 - \frac{\varepsilon'}{k_{\text{зам}}^2}} \cdot r}, \quad (5)$$

$T(0)$ - температура на поверхности стержня в диафрагмированном волноводе.

На рис. 3 представлены рассчитанные и экспериментальные характеристики распределения температурного поля по поперечному сечению стержня в стационарном режиме в круглом волноводе.

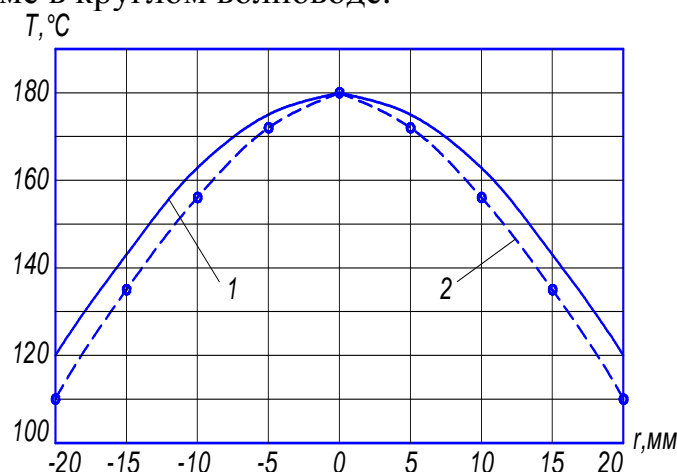


Рис. 3. Рассчитанные (1) и экспериментальные (2) характеристики распределения температурного поля по поперечному сечению диэлектрического стержня в круглом волноводе (стационарный режим).

На рис. 4 представлены рассчитанные и экспериментальные характеристики распределения температуры по поперечному сечению диэлектрического стержня в стационарном режиме в диафрагмированном волноводе.

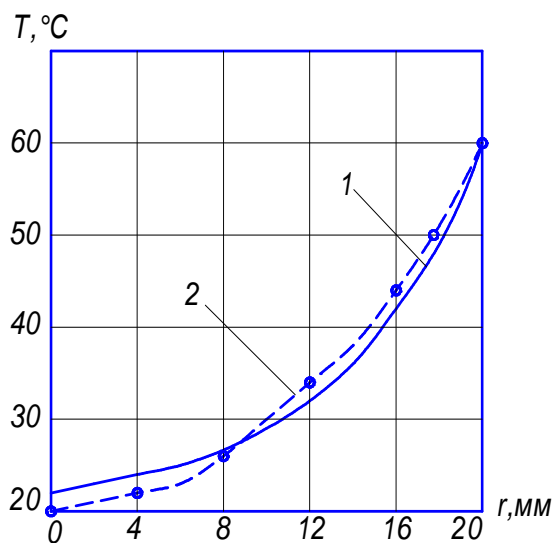


Рис. 4. Рассчитанные (1) и экспериментальные (2) характеристики распределения температурного поля по поперечному сечению диэлектрического стержня в диафрагмированном волноводе (стационарный режим).

На рис. 5 представлены рассчитанные и экспериментальные характеристики распределения температуры по поперечному сечению диэлектрического стержня, полученного от последовательной суперпозиции распределения температуры двух секций СВЧ устройств в стационарном режиме.

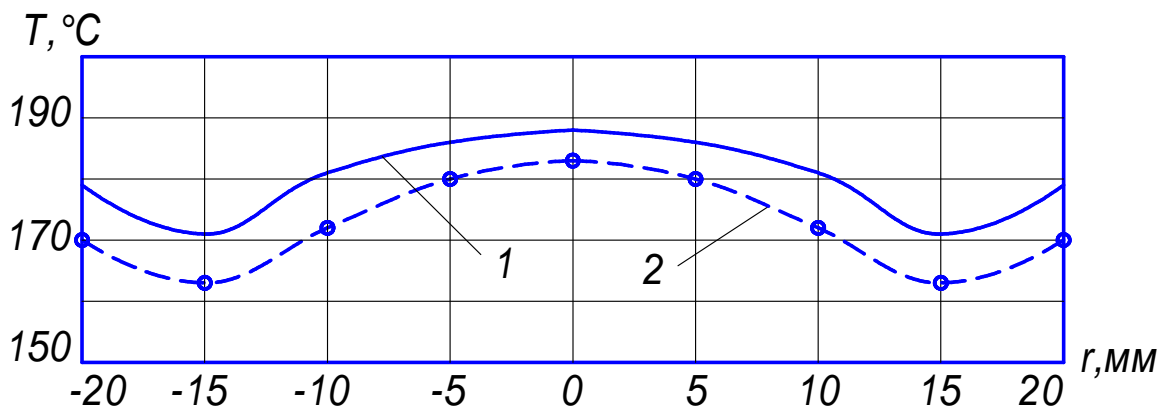


Рис. 5. Рассчитанные (1) и экспериментальные (2) характеристики распределения температуры по поперечному сечению диэлектрического стержня в СВЧ устройств, полученные суперпозицией от двух различных по конструкции секций круглого и диафрагмированного волновода (стационарный режим).

Разброс температурного поля в диэлектрическом стержне при нагреве от 20°C до 180°C не превышает 18°C. Расхождение рассчитанных и измеренных характеристик распределения температурного поля в диэлектрическом стержне не превышает 8%.

1. И.В. Назаров, М.В. Нефедов, В.Н. Нефедов, Т.А. Потапова, А.В. Мамонтов “Измерение распределения температурного поля по сечению материалов в поле бегущей СВЧ волны” Метрология, № 3, 2006, стр.9-20.
2. Архангельский Ю.С., Девяткин И.И. Сверхвысокочастотные нагревательные установки для интенсификации технологических процессов. – Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1983.