

УДК 621.365.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИСПЫТАНИЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ КЕРАМИКИ

С.В. Тригорлый, В.Ю. Кожевников, В.В. Захаров

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

Приведены результаты моделирования и испытаний СВЧ-установки с камерой безуцельной волны на нерегулярном прямоугольном волноводе для высокотемпературной термообработки керамики. Предложена математическая модель процесса СВЧ термообработки керамики, основанная на взаимосвязанных уравнениях электродинамики и теплопроводности. Математическое моделирование осуществлялось в трехмерной постановке с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics. Для определения наилучшего согласования СВЧ-генератора с рабочей камерой проводились холодные испытания, в результате которых определено оптимальное расположение керамической заготовки в рабочей камере. Проведенные испытания нагрева керамики в СВЧ-установке показали качественную сходимость результатов моделирования с результатами натурного эксперимента.

Ключевые слова: керамика, высокотемпературная обработка, спекание, СВЧ-нагрев, электротехнологическая установка.

В настоящее время значительное число наукоемких технологий сконцентрировано в области разработки инновационных материалов и технологий их получения. Большой интерес представляют технологии получения керамик, для которых характерны следующие свойства: прочность и твердость одновременно с легкостью, термическая и химическая стойкость, плотность, теплоизолирующие свойства.

Типовыми технологическими операциями термообработки керамики являются сушка и спекание. При сушке заготовка выдерживается при относительно низкой температуре, как правило, не превышающей 300 °С. Сушка необходима для удаления влаги, газов и органических прекурсоров из заготовки, наличие которых при спекании может привести к механическим деформациям и разрушению спекаемого изделия. Спекание является высокотемпературным процессом, при котором температура достигает значений порядка 1000–1600 °С. Одним из основных технологических требований при сушке и спекании, позволяющим получать керамику однородной структуры, является равномерность нагрева, которую трудно обеспечить традиционными способами нагрева (кондуктивным и конвективным) из-за низкой теплопроводности керамических заготовок.

Применение энергии сверхвысоких частот (СВЧ) позволяет интенсифицировать процесс термообработки керамики, обеспечить однородность структуры изделия, что в итоге обеспечивает повышение качества готовой продукции, производительности и энергоэффективности электротехнологических установок.

Сергей Викторович Тригорлый (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология».

Вячеслав Юрьевич Кожевников (к.т.н.), доцент кафедры «Электроснабжение и электротехнология».

Вадим Валерьевич Захаров, аспирант.

Кроме того, ряд авторов [1–3] приводят сведения о том, что СВЧ-спекание керамики может протекать при более низких температурах и за более короткое время по сравнению с традиционными методами термообработки. В этой связи разработка СВЧ-установок для реализации технологических процессов термообработки керамики является актуальной задачей.

Целью данной работы является математическое моделирование и испытания СВЧ-установки с камерой бегущей волны на нерегулярном прямоугольном волноводе для высокотемпературной обработки керамических изделий.

Для обеспечения требуемой равномерности нагрева керамических изделий предлагается использовать СВЧ рабочую камеру бегущей волны, состоящую из двух нерегулярных прямоугольных волноводов сечением 45×90 мм, частично заполненных обрабатываемым материалом. В таких волноводах ширина узкой стенки изменяется вдоль распространения электромагнитной волны. Закон изменения и длина волновода рассчитываются, исходя из условий наилучшего согласования камеры с СВЧ-генератором, при этом обеспечивается максимально равномерное распределение температуры в обрабатываемом изделии. Схематичное изображение продольного разреза СВЧ камеры приведено на рис. 1.

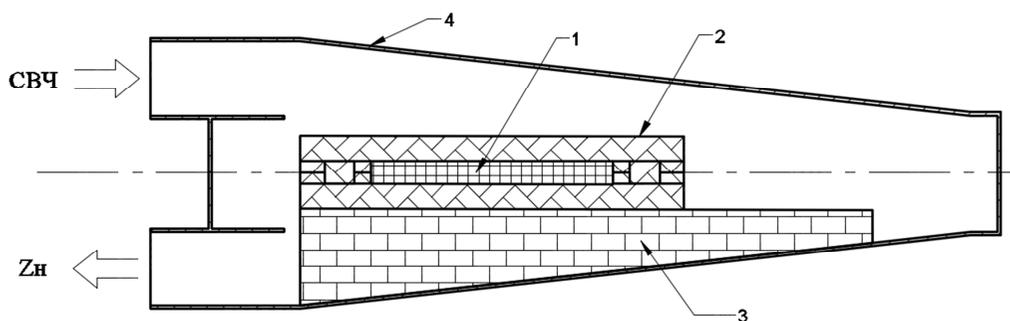


Рис. 1. Схематичное изображение СВЧ рабочей камеры:

1 – керамическая заготовка; 2 – огнеупорная форма; 3 – теплоизоляция;
4 – корпус камеры; СВЧ – ввод СВЧ энергии; Z_n – балластная нагрузка

Выбор типа камеры, работающей преимущественно на основном типе волны H_{10} , обусловлен относительно простым техническим воплощением. Применение двух волноводных секций позволяет подключать балластную нагрузку при неполном поглощении СВЧ-энергии в процессе нагрева изделия.

Керамическая заготовка, которая представляет собой параллелепипед с геометрическими размерами 145×20×14 мм, помещается в разъемную огнеупорную форму (см. рис. 1).

Для предохранения конструктивных элементов рабочей камеры от перегрева предусмотрена ее теплоизоляция (см. рис. 1).

После разработки эскиза рабочей камеры решалась задача численного моделирования процесса высокотемпературной термообработки керамической заготовки. Математическая модель, описывающая процесс СВЧ-нагрева диэлектрика, представляет собой самосогласованную задачу электродинамики и теплопроводности [4].

Задача электродинамики описывается уравнениями Максвелла. Для описания волновых процессов используется их преобразование к виду уравнений Гельмгольца для векторов напряженности электрического и магнитного поля [5].

Волновое уравнение для вектора напряженности электрического поля \mathbf{E} записывается в виде

$$\nabla \times \left(\frac{-1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_0^2 \left(\varepsilon'_r - \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0} \right) \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость;

$k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ – волновое число;

ε'_r – относительная диэлектрическая проницаемость (действительная часть);

$\sigma = \omega\varepsilon_0\varepsilon''_r$ – электрическая проводимость;

ω – угловая частота;

ε_0 – электрическая постоянная;

ε''_r – фактор потерь (мнимая часть диэлектрической проницаемости).

На внутренних металлических границах рабочей камеры задается граничное условие, характеризующее неидеальное отражение электромагнитной волны от поверхностей (тангенциальная составляющая вектора \mathbf{E} близка к нулю, но не равна нулю):

$$\sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\varepsilon_0\varepsilon_r - j\sigma/\omega}} \mathbf{n} \times \mathbf{H} + \mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})\mathbf{n} = 0,$$

где μ_0 – магнитная постоянная;

\mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности;

\mathbf{H} – вектор напряженности магнитного поля.

Между всеми контактирующими областями расчетной модели рабочей камеры (воздух – огнеупорная форма, огнеупорная форма – заготовка, огнеупорная форма – теплоизоляция, воздух – теплоизоляция, воздух – заготовка) имеют место граничные условия сопряжения:

$$[\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1, \mathbf{n}] = 0, [\mathbf{n}, \mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1] = 0, \mathbf{n}(\mathbf{D}_2 - \mathbf{D}_1) = 0, \mathbf{n}(\mathbf{B}_2 - \mathbf{B}_1) = 0,$$

где $\mathbf{H}_2, \mathbf{H}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_1$ – векторы напряженности магнитного и электрического поля;

$\mathbf{D}_2, \mathbf{D}_1, \mathbf{B}_2, \mathbf{B}_1$ – векторы электрической и магнитной индукции для сред 2 и 1 соответственно;

\mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности, направленный из среды 1 в среду 2.

Балластная нагрузка имитируется граничным условием рассеивания электромагнитной волны.

Задача теплопроводности для каждого из элементов конструкции СВЧ-камеры описывается уравнением

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_v,$$

где ρ – плотность;

C_p – удельная теплоемкость;

T – температура;

t – время;

k – коэффициент теплопроводности;

Q_v – мощность внутренних источников теплоты.

На наружных поверхностях рабочей камеры задано граничное условие конвективного теплообмена:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = h(T_{ext} - T_I),$$

где \mathbf{n} – вектор нормали к поверхности рабочей камеры (знак «минус» означает отвод тепла от стенок камеры);

\mathbf{q} – конвективный тепловой поток;

h – коэффициент теплоотдачи с поверхности рабочей камеры;

T_{ext} – температура окружающей среды;

T_I – температура поверхности рабочей камеры.

Для внешних поверхностей огнеупорной формы и теплоизоляции, нагреваемых до высоких температур, задано граничное условие радиационного теплообмена:

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = \varepsilon \sigma \left(T_{amb}^4 - T_I^4 \right),$$

где \mathbf{n} – вектор нормали к излучающей поверхности (знак «минус» означает отвод тепла от стенок излучающей поверхности);

\mathbf{q} – радиационный тепловой поток;

ε – коэффициент излучения;

σ – постоянная Стефана – Больцмана;

T_{amb} – температура среды;

T_I – температура излучающей поверхности.

На границе контакта твердых поверхностей (керамическая заготовка – огнеупорная форма, огнеупорная форма – теплоизоляция, теплоизоляция – стенка камеры) заданы граничные условия сопряжения:

$$T_1 = T_2, k_1 \left(\frac{\partial T_1}{\partial \mathbf{n}} \right)_S = k_2 \left(\frac{\partial T_2}{\partial \mathbf{n}} \right)_S,$$

где T_1, T_2 – температуры контактирующих поверхностей областей 1 и 2;

k_1, k_2 – коэффициенты теплопроводности областей 1 и 2;

\mathbf{n} – вектор нормали к поверхности раздела S .

Связь задач электродинамики и теплопроводности осуществляется через соотношение, получаемое из теоремы Пойнтинга:

$$Q_v = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \cdot |\mathbf{E}|^2. \quad (2)$$

Напряженность E подставляется в уравнение (2) из уравнения (1) на каждом временном шаге.

Математическое моделирование сформулированной выше задачи для СВЧ-термообработки керамики осуществлялось в трехмерной постановке с использованием программного обеспечения COMSOL Multiphysics.

В качестве исходных данных использовались тепло- и электрофизические свойства материалов заготовки и конструктивных элементов камеры. Свойства материалов $\varepsilon_r(T)$, $\rho(T)$, $C_p(T)$, $k(T)$ задавались с учетом температурных зависимостей. В расчетах принимались следующие параметры СВЧ-генератора: частота – 2,45 ГГц, мощность СВЧ-излучения изменялась от 1,4 кВт до момента времени 50 мин, после чего увеличивалась до 2,2 кВт.

Результаты математического моделирования представлены в виде изотерм в вертикальном продольном сечении в середине СВЧ-камеры (рис. 2), в зонах максимального нагрева в продольном горизонтальном сечении (рис. 3а) и в поперечном вертикальном сечении СВЧ камеры (рис. 3б) для момента времени 60 мин. На рис. 4 представлены распределения температуры по длине керамической заготовки для различных моментов времени.

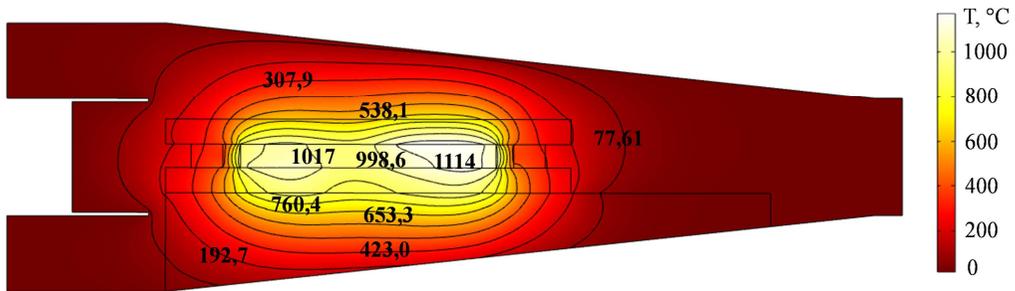
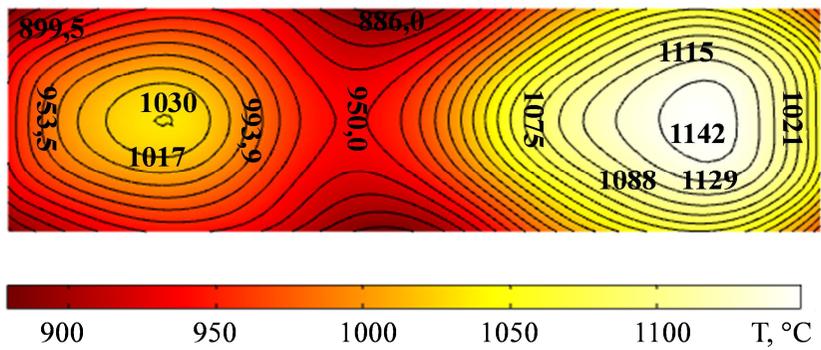
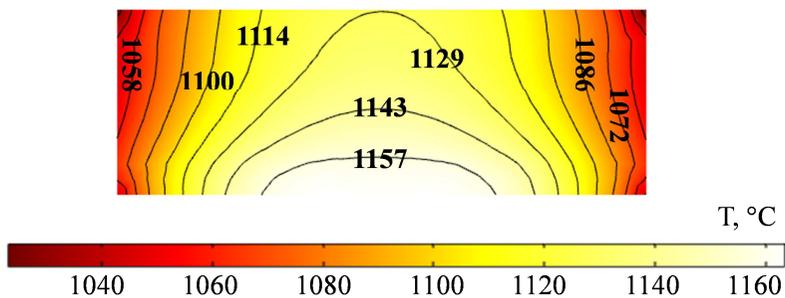


Рис. 2. Изотермы в вертикальном продольном сечении через центр СВЧ-камеры для момента времени 60 мин



а)



б)

Рис. 3. Изотермы в зонах максимального нагрева керамической заготовки для момента времени 60 мин:
а – в продольном горизонтальном сечении; б – в поперечном сечении

На рис. 2, 3а и 4 видны два максимума температурного поля, что свидетельствует о наличии неравномерности нагрева вдоль длины заготовки. В то же время вблизи одного максимума имеется площадь поверхности заготовки, занимающая около 40 % от общей поверхности, где равномерность нагрева достаточно высока (разность температур составляет не более 5 %). Вблизи второго температурного максимума имеется поверхность площадью около 20 % с разностью температур около 7 %. Из рис. 3б видно, что температура заготовки имеет максимум в ее нижней части, поперечная неравномерность нагрева составляет около 14 %. Приведенные выше данные могут использоваться для оценки возможности СВЧ-термообработки различных типоразмеров изделий, для которых будет достигаться требуемая равномерность нагрева.

На основе моделирования установлено, что выход на стационарный температурный режим происходит после 50 мин нагрева изделия.

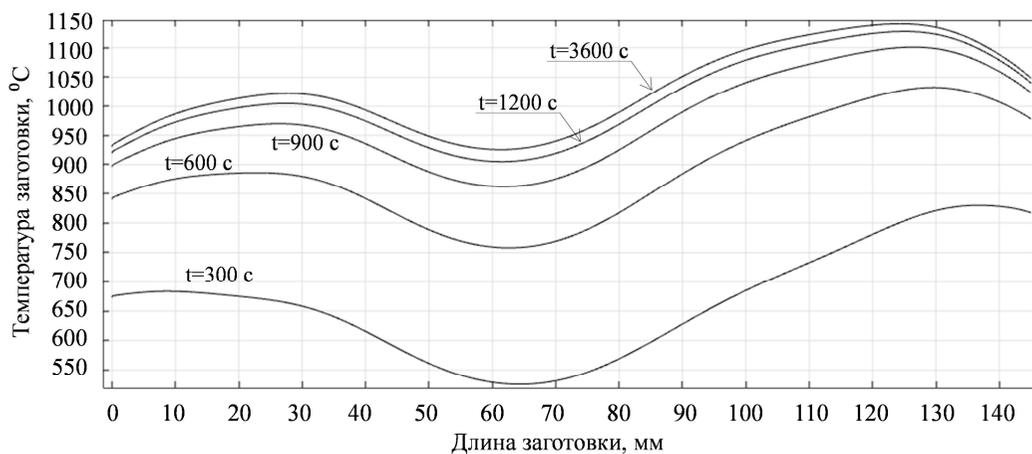


Рис. 4. Распределение температуры по длине керамической заготовки для различных моментов времени

На основе полученных результатов моделирования в части требуемой СВЧ-мощности и времени нагрева были проведены экспериментальные исследования термообработки керамической заготовки в СВЧ-камере. Предварительно для определения наилучшего согласования СВЧ-генератора с рабочей камерой проводились холодные испытания, в результате которых определено оптимальное расположение керамической заготовки в рабочей камере [6]. Испытания проводились на специальной лабораторной установке, основными элементами которой являлись индикатор КСВН Я2Р-67, генератор качающейся частоты ГКЧ-53, детекторные головки.

По результатам холодных испытаний установлено, что наилучшее согласование СВЧ-генератора с рабочей камерой наблюдается при расположении формы с заготовкой у задней стенки камеры. Кроме того, подтверждена целесообразность использования балластной нагрузки, при этом значение коэффициента стоячей волны по напряжению составило 1,9.

Горячие испытания рабочей камеры проводились с использованием установки, структурная схема которой показана на рис. 5.

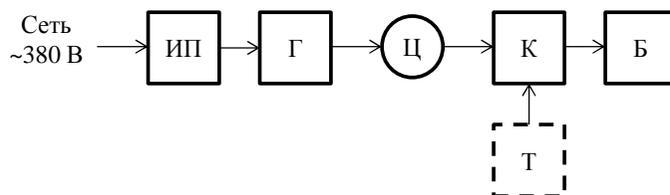


Рис. 5. Структурная схема СВЧ-установки:
 ИП – источник питания; Г – СВЧ генератор; Ц – циркулятор;
 К – рабочая камера; Б – балластная нагрузка; Т – термометр

В качестве линий передачи от СВЧ-генератора к нагрузке использовался прямоугольный волновод 45×90 мм. Источник питания позволяет регулировать мощность СВЧ-генератора от 0 до 2,2 кВт.

В процессе эксперимента на временном интервале 0–50 мин нагрев производился при СВЧ-мощности 1,4 кВт, затем мощность увеличивалась до 2,2 кВт, как и в рассмотренном выше математическом эксперименте. В процессе нагрева керамической заготовки с интервалом 15 мин контролировалась ее температура. Измерения температуры проводились с помощью высокотемпературного пирометра через открываемую торцевую крышку камеры при отключении установки. Продолжительность каждого отключения установки для измерения температуры составляла 1–3 мин. По прошествии 30 мин температура достигла $800\text{ }^{\circ}\text{C}$. На временном интервале от 50 до 60 мин заготовка нагрелась до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

После извлечения заготовки по визуальным признакам (свечение) и с помощью измерений было установлено, что по длине заготовки имеют место два температурных максимума, что согласуется с результатами моделирования. Максимальная температура поверхности камеры составила $230\text{ }^{\circ}\text{C}$, что также соответствует расчетным данным.

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы.

1. Предложенная математическая модель термообработки керамики в СВЧ-установках с камерами бегущей волны на нерегулярном прямоугольном волноводе может быть использована на стадии их разработки для оптимизации конструкции камер с целью получения требуемой равномерности и темпа нагрева изделий.

2. Температурное поле в процессе СВЧ-нагрева имеет максимум в центре заготовки и спадает к периферии, что на начальной стадии термообработки позволит интенсифицировать процесс удаления влаги и органических прекурсоров из внутренних областей заготовки к наружной поверхности.

3. Выявлена качественная сходимость результатов математического моделирования и результатов натурального эксперимента. Расхождения главным образом связаны с методической погрешностью измерения температуры из-за необходимости отключения СВЧ-мощности при проведении измерений.

4. Полученные экспериментальным путем температуры керамической заготовки (до $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) показали возможность проведения спекания в данной установке отдельных видов керамик. Для повышения температуры заготовки необходимо увеличение мощности источника питания и оснащение внешней поверхности рабочей камеры теплоизоляцией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Argawal D.* Microwave Sintering of Ceramics, Composites and Metallic Materials, and Melting of Glasses // Transactions of The Indian Ceramic Society. – 2006. – Vol. 65(3). – P. 129–144.
2. *Давлетбаков Р.Р.* Влияние дисперсности частиц и СВЧ излучения на прочность кремнеземистой керамики // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: Материалы Всероссийской научно-методической конференции. – Оренбург: Университет, 2014. – С. 1331–1335.
3. *Быков Ю.В., Рыбаков К.И., Семенов В.Е.* Микроволновая высокотемпературная обработка материалов // Вакуумная СВЧ электроника: сборник обзоров. – 2002. – С. 26–33.
4. *Архангельский Ю.С.* СВЧ электротермия. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 1998. – 408 с.
5. *Вайнштейн Л.А.* Электромагнитные волны. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
6. *Тригорлый С.В., Кожевников В.Ю., Захаров В.В.* Разработка энергоэффективных СВЧ рабочих камер для термообработки керамики // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2016. – С. 355–359.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2017 г.

MODELING AND TESTING OF MICROWAVE ELECTROTECHNOLOGICAL INSTALLATION FOR A HIGH-TEMPERATURE HEAT TREATMENT OF CERAMICS

S.V. Trigorly, V.Yu. Kozhevnikov, V.V. Zakharov

Yuri Gagarin Saratov State Technical University
77, Politechnicheskaya st., Saratov, 410054, Russian Federation

The results of modeling and testing of a microwave installation with a traveling-wave camera on an irregular rectangular waveguide for high-temperature thermal treatment of ceramics are presented. A mathematical model is proposed for the microwave heat treatment of ceramics, based on the coupled equations of electrodynamics and heat conductivity. Mathematical modeling was carried out in a three-dimensional setting using the COMSOL Multiphysics software. To determine the best matching of the microwave generator with the working chamber, cold tests were performed, as a result of which the optimal arrangement of the ceramic preform in the working chamber was determined. The tests of heating the ceramic in the microwave installation showed the qualitative convergence of the results of the simulation with the results of the field experiment.

Keywords: *ceramics, high-temperature processing, sintering, microwave heating, electrotechnological installation.*

*Sergey V. Trigorly (Ph. D.(Techn.)), Associate professor
Vyacheslav Yu. Kozhevnikov (Ph. D.(Techn.)), Associate professor
Vadim V. Zakharov, Postgraduate.*