

Репах С. И. /д. т. н./, Андреева А. В.  
ИМетАУ

## Оценка равномерности нагрева графитсодержащих формовочных смесей и тел СВЧ-излучением

Исследовано влияние вращения графитсодержащих смесей и тел в СВЧ-печи на равномерность их нагрева. Вращение графитсодержащих смесей и тел в СВЧ-печи увеличивает равномерность их нагрева и тем выше, чем больше в них содержание графита и выше мощность СВЧ-излучения. При содержании (по массе) кварца пылевидного (вещества-диэлектрика) в графитсодержащей смеси до 50 %, равномерность и длительность ее нагрева практически остаются неизменными. Ил. 4.

**Ключевые слова:** графит, нагрев, СВЧ-печь, излучение, диэлектрик, проводник, мощность

*The influence of rotation of graphitiferous mixtures and bodies in microwave oven on the uniformity of their heating is investigated. Rotation of graphitiferous mixtures and bodies in microwave oven improves the uniformity of their heating and it will be the higher the greater graphite content and the higher power of microwave radiation. When content (according to mass) of powder quartz (dielectric) in graphitiferous mixture is up to 50 %, uniformity and heat time are almost unchanged.*

**Keywords:** graphite, heating, microwave oven, radiation, dielectric, conductor, capacity

### Постановка проблемы и состояние вопроса

Равномерность нагрева – одна из основных паспортных характеристик любой печи. С целью достижения равномерности нагрева в печах изменяют: расположение нагревательных элементов, конфигурацию рабочего пространства и т. п. Для повышения равномерности нагрева тел сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением в камере СВЧ-печи увеличивают число видов электромагнитных колебаний близких по параметрам к ее рабочей частоте. При фиксированной частоте излучения магнетрона этого достигают путем увеличения размеров или изменения конфигурации стенок камеры, степени ее загрузки, а также за счет использования специального приспособления – диссектора, либо дополнительного устройства – вращающегося стола.

Диссектор – это металлический диск с разнопрофильными лопастями, располагаемый в камере СВЧ-печи перед выходом из волновода. Вращение диссектора сопровождается отражением СВЧ-излучения от его лопастей. Это приводит к непрерывному изменению направления и, соответственно, пространственному положению пучков мощности излучения в камере СВЧ-печи, что и способствует усреднению температуры нагреваемого тела.

Вращающийся стол – это поддон с вертикальной осью вращения в камере СВЧ-печи, на котором располагают нагреваемое тело. Вращаясь на столе, различные части тела периодически

попадают на участки максимумов и минимумов мощности СВЧ-излучения, что и усредняет его температуру. Дополнительным «усреднителем» температуры тела является его конфигурация и расположение относительно центра вращения стола. В этом случае, тело само по себе выполняет функции диссектора.

Для количественной оценки равномерности нагрева в СВЧ-печи (в соответствии с НВН-100 ГОСТ 19308–80) на дно ее камеры устанавливают 5 одинаковых стеклянных стаканов с водой (масса воды в каждом стакане –  $100 \pm 3$  мл). Четыре стакана располагают на удалении 50 мм от стенок камеры, а один – по центру камеры, в соответствии со схемами на рис. 1.

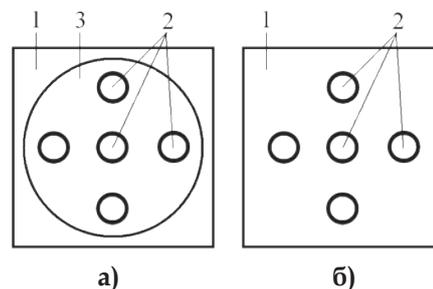


Рис. 1. Схема расположения (в плане) стаканов в камере на вращающемся столе (а) и на дне камеры (б) СВЧ-печи:

1 – камера СВЧ-печи; 2 – стаканы с водой;  
3 – вращающийся стол

Начальная температура воды в стаканах – не более  $+20$  °С. Измерение температуры воды осуществляют термометром с точностью  $0,1$  °С.

После установки стаканов с водой в камеру, включают СВЧ-печь на  $120 \pm 1$  с. По прошествии указанного времени стаканы последовательно извлекают из печи, перемешивают в них градусником воду в течение  $\sim 15$  с и фиксируют ее температуру. В соответствии с данной методикой, коэффициент равномерности нагрева ( $k_{PH}$ ) рассчитывают по формуле:

$$k_{PH} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\Delta t_C - \Delta t_i|}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}, \quad (1)$$

$$\Delta t_C = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}{n}, \quad \Delta t_i = t_{Ki} - t_{Hi},$$

где  $t_{Ki}$ ,  $t_{Hi}$  – конечная и начальная температура воды в  $i$ -том стакане, °C;  $n$  – количество стаканов с водой, используемых в испытании, шт.

В соответствии с данной методикой, равномерность нагрева тел в СВЧ-печи тем выше, чем ближе величина  $k_{PH}$  к 1.

Не смотря на простоту реализации, данная методика не может быть рекомендована для оценки равномерности нагрева сыпучих материалов и твердых тел, что обусловлено отличием физических свойств их материалов от жидкостей. В связи с изложенным выше, а также тем, что в настоящее время такие данные для графитсодержащих (ГС) материалов носят фрагментарный характер, работа, посвященная изучению равномерности нагрева ГС смесей и тел СВЧ-излучением – актуальна.

**Задача исследований**

Оценка равномерности нагрева ГС смесей и тел при их вращении в камере СВЧ-печи.

**Основные результаты**

В исследованиях использовали следующие материалы: пенополистирол (пенопласт) листовой строительный с кажущейся удельной плотностью  $10 \text{ кг/м}^3$ , графит литейный кристаллический (серебристый) марки ГЛ-1 (ГОСТ 5279-74), кварц молотый пылевидный марки ПК-1 (ГОСТ 9077-82, удельная поверхность  $\sim 3600 \text{ см}^2/\text{г}$ ) – вещество-диэлектрик, пудра алюминиевая марки ПАП-2 (ГОСТ 5494-95, удельная поверхность  $\sim 7000 \text{ см}^2/\text{г}$ ) – вещество-проводник электрического тока, смесь из (по массе) 95 % кварцевого песка  $2\text{K}_2\text{O}_1\text{O}_2$  (удельная поверхность  $93 \text{ см}^2/\text{г}$ ) и 5 % порошка пульвербакелита марки СФП-011Л, стержни алундовые  $\varnothing 6 \times 170 \text{ мм}$ .

Размеры замеряли штангенциркулем с точностью 0,01 мм, время определяли по секундомеру с точностью 0,5 с. Микроволновой на-

грев осуществляли в СВЧ-печи Candy марки CMW 7017 MG (частота излучения – 2,45 ГГц, мощность магнетона – 700 Вт, частота вращения стола – 3 об/мин).

Исследования влияния вращения образца ГС смеси на равномерность ее нагрева проводили по следующей методике. На пенопластовом брусе с размерами  $240 \times 60 \times 100$  насыпали дорожку из ГС смеси с размерами  $210 \times 20 \times 3 \text{ мм}$  в соответствии со схемой на рис. 2а.

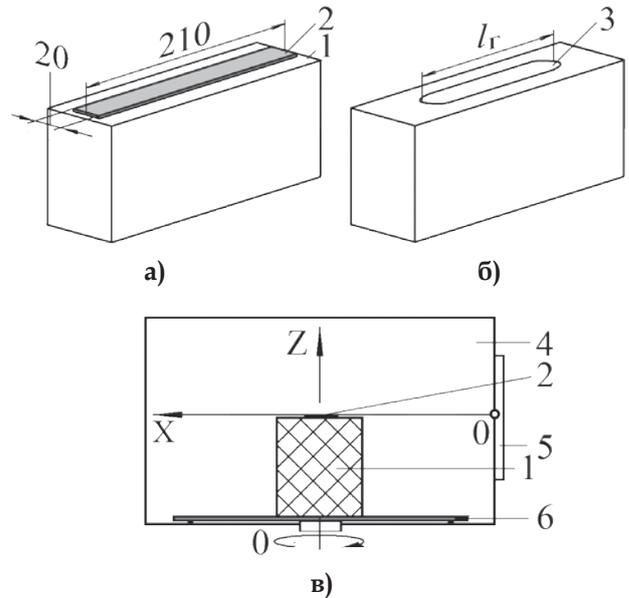


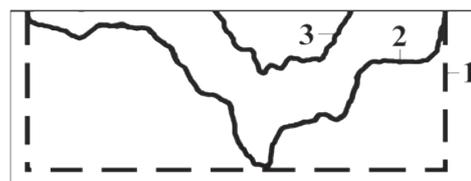
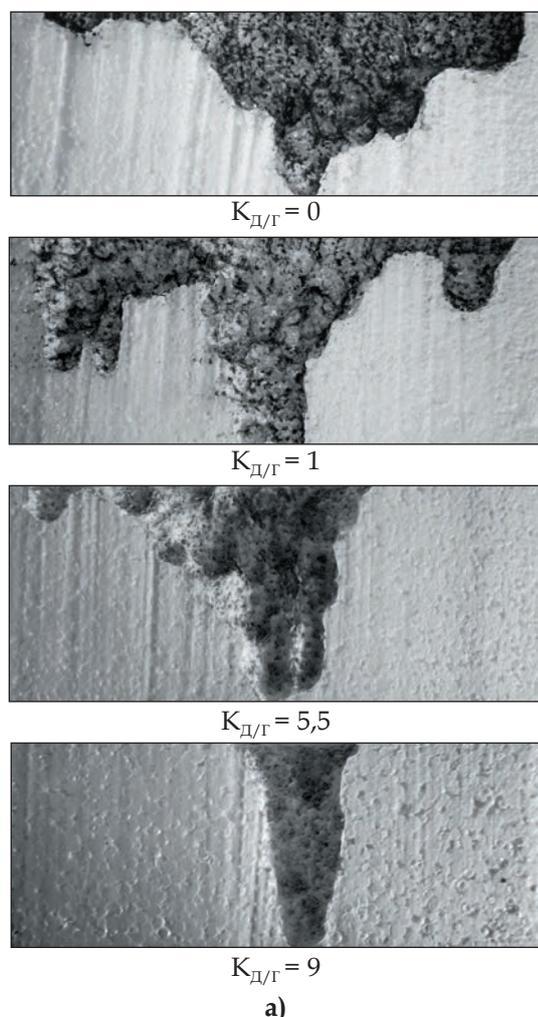
Рис. 2. Схемы размещения слоя ГС смеси на поверхности пенопластового бруса (а), замера длины линии оплавления ( $l_r$ ) в раковине пенопласта (б), исходного положения пенопластового бруса в камере СВЧ-печи (в):

- 1 – пенопластовый брус; 2 – слой ГС смеси;
- 3 – раковина оплавления; 4 – камера СВЧ-печи;
- 5 – волновод; 6 – вращающийся стол

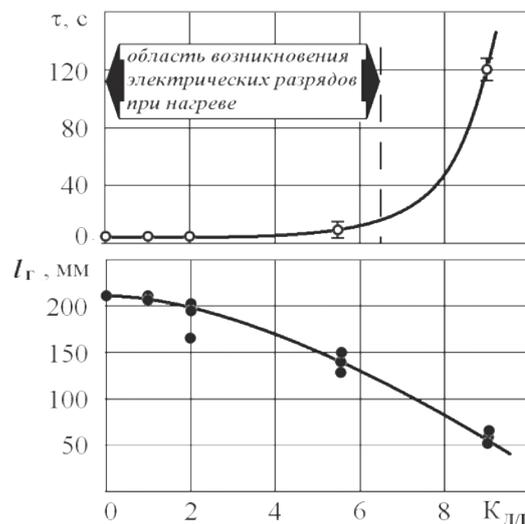
После этого брус помещали в камеру СВЧ-печи перпендикулярно к направлению 0-Х (см. рис. 2в) и включали печь на полную мощность. Выдержку бруса в СВЧ-печи осуществляли в течение времени, за которое ГС смесь хотя бы в одном месте оплавляла пенопластовый брус на глубину 93-98 мм. В качестве критерия равномерности нагрева ГС смеси принимали длину ( $l_r$ ) входного отверстия раковины оплавления пенопласта, измеряемую в соответствии со схемой на рис. 2б.

В испытаниях использовали ГС смеси, у которых отношение массы пылевидного кварца к массе серебристого графита ( $K_{д/г}$ ) составляло от 0 до 9. Нагрев смесей осуществляли при их вращении на столе СВЧ-печи, работающей на максимальной и минимальной мощности.

Результаты исследований нагрева ГС смесей представлены на рис. 3.



б)



в)

**Рис. 3. Вид (в разрезе) раковины оплавления пенопласта (а), контуры раковин оплавления пенопласта (б), зависимость (в) длительности нагрева ( $\tau$ ) в СВЧ-печи и протяженности раковины оплавления пенопластового бруса ( $l_{г}$ ) от соотношения массы пылевидного кварца к массе серебристого графита в смеси ( $K_{д/г}$ ):**

- 1 – контуры раковины оплавления пенопласта при идеально равномерном нагреве ГС смеси;
- 2 – контуры раковины оплавления пенопласта при максимальной мощности СВЧ-излучения ( $K_{д/г} = 0$ );
- 3 – контуры раковины оплавления пенопласта при минимальной мощности СВЧ-излучения ( $K_{д/г} = 0$ )

Из анализа рис. 3 следует, что при вращении в горизонтальной плоскости в камере СВЧ-печи:

- увеличение содержания вещества-диэлектрика (пылевидного кварца) в ГС смеси понижает равномерность ее нагрева и увеличивает длительность обработки;
- при содержании (по массе) пылевидного кварца в смеси до 50 % ( $K_{д/г} \leq 1$ ) равномерность и длительность нагрева ГС смеси практически остаются неизменными;
- в условиях ограниченного времени нагрева уменьшение мощности СВЧ-излучения снижает равномерность нагрева ГС смеси.

Испытаниям также подвергали смеси серебристого графита с алюминиевой пудрой, содержание которой составляло (по массе) до 2,1 % сверх 100 % серебристого графита. Установлено, что при увеличении содержания алюминиевой пудры равномерность нагрева ГС смеси пони-

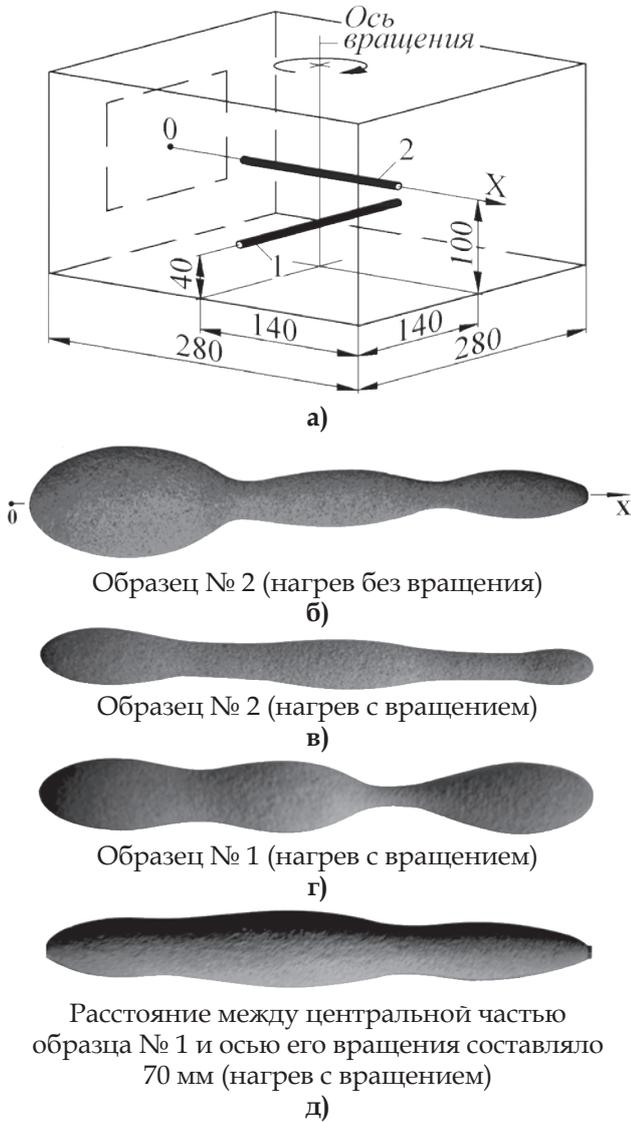
жается от  $l_{г} = 210$  до 190 мм и может быть описана линейной зависимостью.

Данное влияние алюминиевой пудры объясняется способностью металла отражать СВЧ-излучение, что способствует уменьшению коэффициента поглощения СВЧ-излучения ГС смеси и, соответственно, ее теплогенерирующей способности.

В соответствии с принятой методикой, влияние вращения тела на равномерность его нагрева в СВЧ-печи оценивали по равномерности толщины слоя песчано-смоляной смеси (ПСС), затвердевшего на поверхности алундовых стержней покрытых слоем графита. Используя в данной методике алундовые стержни, предполагали, что изменение температуры на каждом конкретном участке стержня прямо пропорционально количеству теплоты, выделившейся в его графитовом покрытии, и, со-

ответственно, прямо пропорционально толщине слоя ПСС, затвердевшей на этом участке поверхности стержня.

Для проведения исследований, на цилиндрическую поверхность алундовых стержней наносили слой графита толщиной ~10 мкм. В последствии, стержни засыпали ПСС и помещали в камеру СВЧ-печи в соответствии со схемой, представленной на рис. 4а.



**Рис. 4. Схема расположения алундовых стержней в камере СВЧ-печи (а) и их вид после обработки СВЧ-излучением в течение 40 с (б):**

1 – образец № 1; 2 – образец № 2

Обработку СВЧ-излучением стержней, засыпанных ПСС, проводили в течение 40 с (2 оборота вокруг вертикальной оси вращения стола СВЧ-печи) при максимальной мощности излучения. Для сравнения, образец № 2 также нагревали в статичном состоянии, расположив его в камере СВЧ-печи вдоль оси 0-Х. По окончании обработки стержни охлаждали в засыпке на воз-

духе в течение 10-12 мин. Вид стержней после их обработки СВЧ-излучением представлен на рис. 4б-д.

Сравнительный анализ вида стержней показывает идентичность в изменениях толщин затвердевших на них слоев ПСС. По сравнению со слоем ПСС на образце № 2 (см. рис. 4б), обработанном в статичном состоянии, толщина слоя ПСС на том же вращающемся образце (см. рис. 4в) существенно меньше, но более равномерна. Толщина слоя ПСС на образце № 1 (см. рис. 4г) не только существенно больше, но и более неравномерна, чем на образце № 2 (см. рис. 4в). Равномерность нагрева вращающегося образца № 1 возрастает при его смещении относительно оси вращения, что следует из рис. 4д.

Для количественной оценки равномерности нагрева цилиндрических образцов использовали соотношение максимальной к минимальной толщине ПСС на образце ( $K_{PH}$ ). В результате проведенных измерений толщин ПСС установлено, что для образца № 2 (нагрев без вращения)  $K_{PH} = 15,5 / 0,4 = 38,7$ , для образца № 2 (нагрев с вращением) -  $K_{PH} = 6,0 / 1,3 = 4,6$ , для образца № 1 (нагрев с вращением) -  $K_{PH} = 10,4 / 0,7 = 14,9$ , для образца № 1 (нагрев с вращением и смещением относительно оси вращения) -  $K_{PH} = 14,5 / 8,2 = 1,8$ .

Анализ полученных данных показывает, что вращение тела при его нагреве в СВЧ-печи уменьшает, но не исключает неравномерности его нагрева. При этом степень неравномерности нагрева вращающегося тела зависит от его положения относительно оси вращения вращающегося стола.

**Выводы**

С увеличением содержания пылевидного кварца или алюминиевой пудры в графитсодержащей смеси равномерность ее нагрева снижается. При содержании (по массе) пылевидного кварца в графитсодержащей смеси до 50 % ( $K_{д/г} \leq 1$ ) равномерность ее нагрева практически остается неизменной. В условиях ограниченного времени нагрева уменьшение мощности СВЧ-излучения снижает равномерность нагрева графитсодержащих смесей. Вращение тела, содержащего теплогенерирующее вещество, в СВЧ-печи уменьшает, но не исключает неравномерности его нагрева. Степень неравномерности нагрева вращающегося тела зависит от его положения относительно оси вращения.

**Поступила 03.12.2014**