

## Особенности нагрева графитсодержащих формовочных смесей и тел СВЧ-излучением

*В камере СВЧ-печи пучки мощности излучения распределены циклично и геометрически совпадают с пучностями стоячей волны. Интенсивность нагрева графитсодержащих смесей и тел зависит от их размеров, места и ориентации в камере СВЧ-печи, а также содержания в них графита. Явление электрического разряда в графитсодержащей смеси, находящейся в СВЧ-излучении мощностью 700 Вт, возникает при величине соотношения массы кварца пылевидного к массе серебристого графита менее 6,5. Ил. 4.*

**Ключевые слова:** графит, нагрев, СВЧ-печь, вещество-диэлектрик, вещество-проводник, частота, длина волны

*In the chamber of microwave oven the beams of radiant power are cyclical distributed and geometrically coincide with antinodes of stationary wave. Heating rate of graphitiferous mixtures and bodies depends on their size, place and orientation in the chamber of microwave oven, and also graphite in it. Electrical discharge phenomena in the graphitiferous mixture, which is in microwave radiation with capacity of 700 W, arises at the value of correlation of mass of dusty silica to the mass of Lube-Kote not less than 6,5.*

**Keywords:** silica, heating, microwave oven, dielectric material, conductor material, frequency, length of wave

### Постановка проблемы и состояние вопроса

Нагрев электромагнитным сверхвысокочастотным (СВЧ) излучением известен и используется в различных отраслях промышленности с середины XX века. В отечественном производстве литейных форм данный способ нагрева используется весьма ограниченно, что, в частности, обусловлено особенностями данного вида переноса энергии и фрагментарностью соответствующей информации.

По сравнению с традиционными способами, нагрев СВЧ-излучением отличается не только волновым характером распределения энергии в рабочем пространстве СВЧ-печи, но и неуклонным повышением температуры нагреваемого материала (смеси, тела), поглощающего электромагнитное излучение, вплоть до температуры его испарения. Неравномерность нагрева в СВЧ-печах обусловлена природой электромагнитных колебаний, которые имеют вид стоячей волны.

Стоячая волна возникает после отражения от преград и неоднородностей падающей волны в результате наложения на нее встречной отраженной волны и характеризуется наличием пространственных максимумов (пучностей) и минимумов (узлов) амплитуды, то есть неравномерностью пространственного распределения мощности. Как результат, в зависимости от положения в камере СВЧ-печи, объекты малых размеров, поглощающие электромагнитное излучение, могут, как оставаться холодными, так и нагреваться. В то же время, процесс нагрева

аналогичных крупных объектов характеризуется их температурной анизотропией.

В связи с изложенным выше, а также тем, что в настоящее время данные о равномерности нагрева графитсодержащих (ГС) смесей и тел носят фрагментарный характер, работа, посвященная изучению данного вопроса, является актуальной.

### Задача исследований

Задача исследований – оценка вида распределения пучков мощности излучения в камере СВЧ-печи и определение факторов, влияющих на нагрев ГС смесей и тел.

### Основные результаты

В исследованиях использовали следующие материалы: пенополистирол (пенопласт) листовой строительный с кажущейся плотностью 10 кг/м<sup>3</sup>, графит литейный кристаллический (серебристый) марки ГЛ-1 (ГОСТ 5279-74), кварц молотый пылевидный марки ПК-1 (ГОСТ 9077-82), пудра алюминиевая марки ПАП-2 (ГОСТ 5494-95), смесь, состоящая из (по массе) 95 % кварцевого песка 2K<sub>2</sub>O<sub>1</sub>O<sub>2</sub> (удельная поверхность 9,3 м<sup>2</sup>/кг) и 5 % порошка пульвербакелита марки СФП-011Л, стержни графитовые (карандашные) твердостью НВ, стержни алундовые Ø6×250.

Микроволновой нагрев осуществляли в СВЧ-печи Candy марки СМВ 7017 MG (частота излучения – 2,45 ГГц, мощность магнетона – 700 Вт, частота вращения стола вокруг вертикальной

оси – 3 об/мин, размеры рабочего пространства камеры ~ 280×280×195 мм).

Исследования проводили в два этапа. На первом этапе оценивали однородность распределения мощности излучения в горизонтальной плоскости камеры используемой СВЧ-печи. Для проведения этой оценки разработали методики, основанные на известных данных и допущениях, согласно которым в камере СВЧ-печи:

- местоположение пучков мощности микроволнового излучения совпадает с местоположением пучностей стоячей волны;
- поглощение СВЧ-излучения ГС материалом сопровождается его нагревом;
- степень нагрева ГС материала и материала контактирующего с ним прямо пропорциональна мощности СВЧ-излучения, воздействующего на него.

Допустив, что глубина оплавления, какого либо, легкоплавкого материала прямо пропорциональна температуре его нагрева, для реализации одной из разработанных методик использовали плиту (270×270×100 мм), вырезанную из листового пенопласта. Для исследований, на верхнюю (рабочую) поверхность плиты насыпали слой серебристого графита толщиной  $3 \pm 0,3$  мм и устанавливали ее в камеру СВЧ-печи, в соответствии со схемой, представленной на рис. 1 (расстояние графитового слоя от дна камеры – 110 мм).

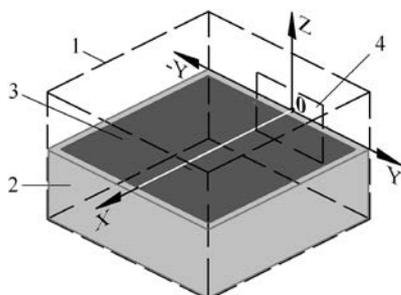


Рис. 1. Схема размещения пенопластовой плиты в камере СВЧ-печи:

- 1 – контуры камеры; 2 – плита пенопластовая;
- 3 – слой серебристого графита; 4 – волновод

Данное расположение плиты в камере обеспечивало ей неподвижное горизонтальное положение во время работы СВЧ-печи. Тепловую обработку плиты проводили путем четырехразового включения СВЧ-печи на 1 с, с интервалом в 3-4 с. После обработки и удаления с рабочей поверхности плиты порошка серебристого графита делали гипсовый оттиск рабочей поверхности и проводили его реконструкцию (очистку, ремонт). Результаты реконструкции, представлены на рис. 2а.

Во второй серии экспериментов, согласно разработанной методики, на цилиндриче-

скую поверхность алундового стержня наносили слой графита толщиной ~ 10 мкм, после чего стержень засыпали песчано-смоляной смесью и устанавливали в камеру СВЧ-печи вдоль оси 0-X (расстояние стержня от дна камеры – 70 мм). Вид стержня после выдержки в СВЧ-излучении в течение 40 с представлен на рис. 2б.

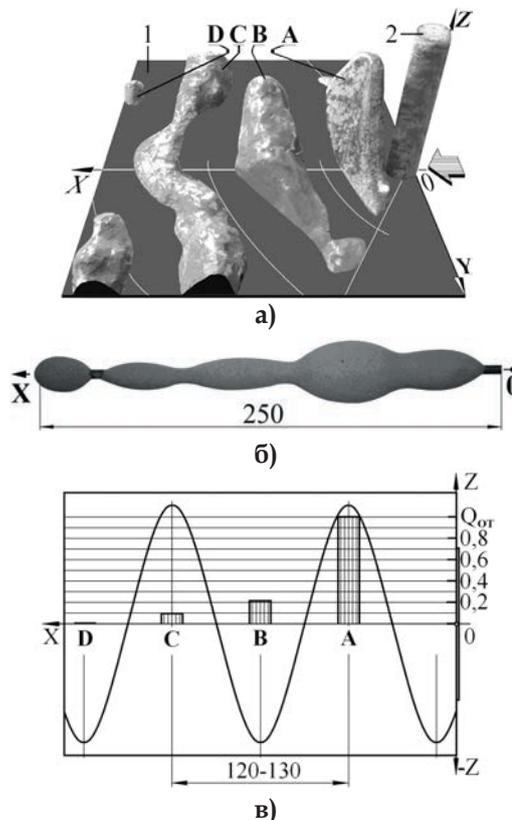


Рис. 2. Реконструированная поверхность пучков мощности (а), вид алундового стержня после обработки СВЧ-излучением (б), схематичное изображение стоячей волны вдоль оси 0-X камеры СВЧ-печи, гистограмма относительного уровня мощности СВЧ-излучения (в)

Анализ изображений на рис. 2а, б показывает, что в камере СВЧ-печи пучки мощности излучения распределены циклично и, по-видимому, геометрически совпадают с пучностями стоячей волны. В соответствии с видом распределения пучков мощности на реконструированном оттиске, стоячая волна в камере СВЧ-печи распространяется от выхода из волновода в радиальном направлении и имеет период порядка 12-13 см, что соответствует периоду стоячих волн в СВЧ-печах бытового назначения, рассчитываемого по известной формуле:

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{2,998 \cdot 10^8}{2,45 \cdot 10^9} = 0,1224 \text{ м,}$$

где  $C$  – скорость света в окружающей среде или скорость распространения электромагнитных волн ( $C = 2,998 \cdot 10^8$  м/сек);  $f$  – частота излучения, Гц.

Если предположить, что высота «волны» на гипсовом оттиске прямо пропорциональна ее мощности, то из рис. 2в следует, что с удалением от волновода относительная мощность ( $Q_{от}$ ) волн А, В, С, D уменьшается по степенному закону.

Из числа выявленных пучков мощности, наибольшей мощностью обладает пучок, обозначенный цифрой 2 на рис. 2а. Возникновение этого пучка в СВЧ-печи, по-видимому, вызвано действием бегущих электромагнитных волн, появление которых обусловлено конфигурацией и размерами стенок камеры используемой СВЧ-печи.

Как известно, графит является материалом, поглощающим электромагнитную энергию и преобразующим ее в тепловую энергию. Это преобразование происходит в результате наведения в частицах графита вихревых (рассеянных) токов. При определенных условиях, данное явление может сопровождаться искрением в ГС материале (электрическим разрядом). За счет резкого точечного выброса световой (тепловой) энергии в окружающее пространство искрение оказывает существенное влияние на равномерность нагреваемого объекта (смеси, тела). Поэтому, скорость (степень) нагреваемого объекта будет зависеть не только от его размеров, места положения, ориентации в камере СВЧ-печи, но и возникновения электрических разрядов.

Исходя из изложенного, на втором этапе исследовали влияние на равномерность нагрева:

- размеров, места и ориентации в камере СВЧ-печи ГС тела;
- содержания графита в ГС смеси на равномерность ее нагрева.

В первой серии экспериментов исследовали влияние размеров проводника электрического тока на интенсивность его нагрева в СВЧ-печи. Для этого использовали графитовые стержни диаметром 0,7 мм и длиной 32-60 мм, которые горизонтально укладывали на пенопластовую плиту и помещали в рабочую камеру СВЧ-печи

в соответствии со схемой, представленной на рис. 3а.

В исследованиях графитовые стержни располагали как вдоль, так и поперек направления распространения стоячей волны в камере СВЧ-печи, как в ее геометрическом центре (положение А на рис. 3а), так и на некотором удалении от центра (положение В на рис. 3а). Интенсивность нагрева графитовых стержней оценивали глубиной (а) раковины оплавления пенопласта под ними, что схематично представлено на рис. 3б. Нагрев всех испытуемых стержней проводили в течение 5 с на максимальной мощности в СВЧ-печи.

Установлено, что стержни, расположенные перпендикулярно распространению волны, не вызывают оплавления пенопласта и, практически, не нагреваются не зависимо от их длины. В тоже время нагреву подвержены стержни, расположенные параллельно распространению волны (вдоль оси 0-X), длина которых  $l > \frac{1}{3}\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны СВЧ-излучения, что следует из зависимостей, представленных на рис. 3в.

Во второй серии экспериментов в качестве проводника электрического тока использовали графитовые стержни диаметром 2 мм и длиной  $l \approx 10$  мм ( $l \ll \frac{1}{3}\lambda$ ). Для испытаний стержни укладывали на пенопластовую плиту встык, что схематично представлено на рис. 4а, вдоль оси 0-X камеры СВЧ-печи (общая длина цепочки стержней ~ 250 мм, расстояние от днища камеры – 110 мм). Продолжительность нагрева в СВЧ-печи – 5 с.

Установлено, что наибольшая глубина проникновения графитовых стержней в тело пенопластовой плиты (а = 18 мм) совпадает с пространственными максимумами амплитуды стоячей волны, что схематично представлено на рис. 4б. При этом нагрев стержней на этих участках прекращался после потери контакта между ними, что в отдельных случаях сопровождалось искрением на торцах стержней, наиболее близко расположенных к оси 0-Z.

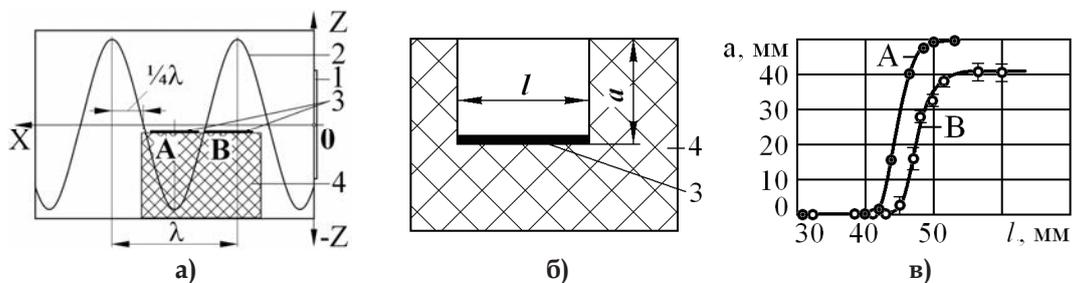


Рис. 3. Схема размещения графитового стержня в рабочем пространстве СВЧ-печи (а), замера глубины проникновения графитового стержня в пенопластовую плиту (б), зависимость глубины раковины оплавленного пенопласта от длины графитового стержня:

- 1 – волновод; 2 – схема стоячей волны в камере СВЧ-печи;
- 3 – графитовый стержень; 4 – пенопластовая плита

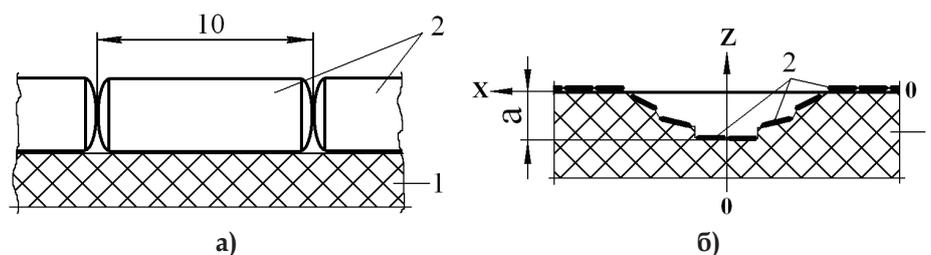


Рис. 4. Схема стыковки графитовых стержней до обработки СВЧ-излучением (а), схема расположения графитовых стержней в теле пенопластовой плиты после обработки СВЧ-полем (б):

1 – пенопластовая плита; 2 – графитовые стержни

Возникновение явления искрения зависит от ряда факторов, в число которых входит величина содержания вещества-диэлектрика в графите. Для определения предельного количества (по массе) вещества-диэлектрика (пылевидного кварца) в серебристом графите при котором в смеси СВЧ-излучение не вызывает искрение готовили смеси, у которых отношение массы пылевидного кварца к массе серебристого графита ( $K_{д/г}$ ) изменялось от 0 до 9. Испытуемую смесь засыпали в трубку из кварцевого стекла длиной 270 мм и внутренним диаметром 8 мм, уплотняли встряхиванием и с обоих торцов трубки фиксировали бумажными пробками. После этого трубку помещали в центральную часть камеры СВЧ-печи вдоль направления 0-X. Выдержку испытуемой смеси под воздействием СВЧ-излучения осуществляли до тех пор, пока нагрев смеси в трубке не начинал сопровождаться искрением, выявляемым визуально, но не более 2 минут.

В результате проведенных испытаний установлено, что искрение ГС смеси под воздействием СВЧ-излучения мощностью 700 Вт, располо-

женной вдоль направления 0-X, начинает проявляться при  $K_{д/г} \leq 6,5$ .

#### Выводы

В камере СВЧ-печи пучки мощности микроволнового излучения распределены циклично и геометрически совпадают с пучностями стоячей волны в камере. Интенсивность нагрева графитсодержащих смесей и тел зависит от их размеров, места и ориентации в камере СВЧ-печи, а также содержания в них графита, что следует учитывать при обработке графитсодержащих литейных форм и стержней СВЧ-излучением. Нагреву СВЧ-излучения подвержены графитсодержащие объекты, расположенные параллельно распространению волны (вдоль оси 0-X), длина которых  $l > \frac{1}{3} \lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны СВЧ-излучения. Явление искрения (электрического разряда) графитсодержащей смеси, под воздействием СВЧ-излучения мощностью 700 Вт, расположенной в направлении 0-X, возникает при  $K_{д/г} \leq 6,5$ .

Поступила 21.08.2014

ЗАКАЗ  
ЭЛЕКТРОННОЙ ВЕРСИИ ЖУРНАЛА

[www.metaljournal.com.ua](http://www.metaljournal.com.ua)

контактный телефон, факс: 0562-46-12-95