

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN**

**АЛМАТЫ ТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
АЛМАТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ALMATY TECHNOLOGICAL UNIVERSITY**

**ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ТОҢАЗЫТУ АКАДЕМИЯСЫ
МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ ХОЛОДА
INTERNATIONAL ACADEMY OF REFRIGERATION**



**VII ХАЛЫҚАРАЛЫҚ ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ КОНФЕРЕНЦИЯ
«ҚАЗАҚСТАН-ТОҢАЗЫТУ 2017»**

**VII МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
«КАЗАХСТАН-ХОЛОД 2017»**

**VII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL CONFERENCE
«KAZAKHSTAN-REFRIGERATION 2017»**

**Конференция баяндамаларының жинағы
15-16 наурыз, 2017 ж.**

**Сборник докладов конференции
15-16 марта 2017 г.**

**Proceedings of the Conference
March 15-16, 2017**

Алматы, 2017

УДК 621.56/59(063)

ББК 31.392

К14

Сборник докладов подготовлен под редакцией
доктора технических наук, академика **Кулажанова Т.К.**

Редакционная коллегия:

Цой А.П., Бараненко А.В., Кантарбаев Р.А.,
Шлейкин А.Г., Андреева В.И. (ответ.секретарь)

К14 Казахстан-Холод 2017: Сб. докл. межд.науч.-техн. конф. (15-16 марта
2017 г.) – Алматы: АТУ, 2017. – 285 с.

ISBN 978-601-263-389-4

В докладах представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в Казахстане, Германии, России, Японии и Украине по следующим направлениям: холодильная техника и компрессоростроение, теплохладоснабжение, системы кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения, экология в холодильной промышленности, холодильная и пищевая технология. Сборник рассчитан на специалистов и ученых, работающих в областях холодильной, пищевой, химической, нефтеперерабатывающей промышленности, а также на специалистов по системам кондиционирования воздуха и жизнеобеспечения жилых, коммерческих зданий и спортивных комплексов.

УДК 621.56/59(063)

ББК 31.392

ISBN 978-601-263-389-4

© АТУ, 2017

УДК 621.365:519.711.3

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МИКРОВОЛНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ СПЕКАНИЯ КЕРАМИКИ

*Волгушева Н.В., к.т.н., Бошкова И.Л., д.т.н., Колесниченко Н.А., аспирант
Одесская национальная академия пищевых технологий, Украина
E-mail: kolesnychenko.natalia@yandex.ua, n-volgusheva@mail.ru, ira_boshkova@mail.ru*

Методы микроволнового нагрева в настоящее время представляют значительный интерес для научных исследований с перспективой технологического освоения в ближайшем будущем [1]. Потенциал высокотемпературной микроволновой обработки продемонстрирован в таких областях, как спекание и соединение керамических материалов [2], неорганический синтез [3], создание композиционных [4] и функционально-градиентных [5] материалов, порошковая металлургия [6], отжиг имплантированных полупроводниковых структур [7].

Важное преимущество микроволнового нагрева обусловлено объемным поглощением микроволновой энергии в большинстве неметаллических материалов. При поглощении микроволновой энергии в объеме изделия отсутствует необходимость в передаче тепла за счет теплопроводности, как это происходит при нагреве лучевыми или конвективными потоками тепла в традиционных печах. Кроме того, мощность микроволнового источника может практически

полностью использоваться на нагрев только обрабатываемого изделия, без необходимости нагревать массивные конструкции традиционных печей. Поэтому скорость нагрева микроволновым излучением может быть существенно выше, и это является одним из наиболее важных факторов во многих технологических процессах [8].

Высокие скорости нагрева обуславливают не только существенную экономию энергии и сокращение времени процессов, но, что зачастую более важно при создании высококачественных материалов, позволяют получать изделия с более мелкодисперсной и бездефектной микроструктурой и, как следствие, улучшенными функциональными свойствами [9].

Как показал анализ работ, посвященных данному направлению, не установлены области рационального применения МВ нагрева при спекании керамики и не приводятся количественные оценки энергетической эффективности в сравнении с традиционными технологиями. Целью работы являлось определение энергетической эффективности применения микроволнового нагрева при спекании керамики.

Объектом исследования являются процессы переноса теплоты при нагреве плотных материалов, применяемых в производстве технической керамики, в условиях действия микроволнового поля. В качестве исходного материала использовались порошки карбида кремния и оксида алюминия.

На основе оксида алюминия (метод микроволнового нагрева рационален только при добавлении поглощающих порошков) изготавливаются керамические диэлектрики (такие как изоляторы для вакуумных дугогасительных камер, твердые подложки).

Карбид кремния используется для изделий с высокими механическими характеристиками: керамические подшипники (рис.1а), инструмент, к примеру, насадки шлифовальные (рис. 1б), пластины для электронной и оптоэлектронной промышленности (рис. 1в).

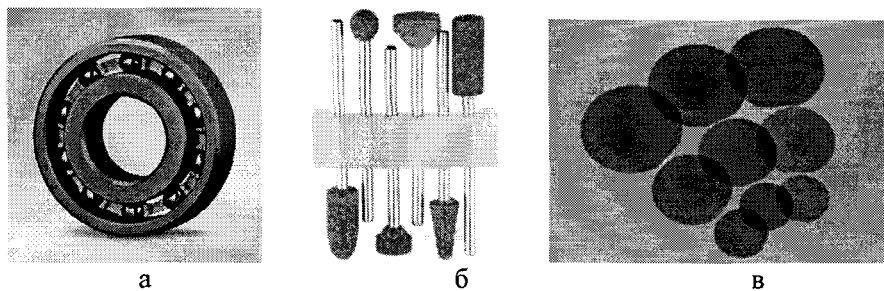


Рисунок 1 – Изделия на основе карбида кремния, а - керамические подшипники, б - насадки шлифовальные, в - пластины для электронной и оптоэлектронной промышленности

В данной работе эффективность микроволнового нагрева при спекании рассматривается на примере изготовления керамических подложек. В качестве исходного сырья используются порошковые материалы: нитрида алюминия, оксида алюминия, нитрида кремния, оксида циркония, карбида кремния и другие. Керамические подложки используются в электронной и электротехнической области промышленности (для производства монолитных интегральных схем, микросборок, термоэлектрических элементов Пельтье и пр.).

Исследования энергетической эффективности микроволнового спекания керамики на примере керамических подложек проведено на основании данных собственных экспериментов и полученных из литературных источников [7-9].

Применение микроволнового нагрева при спекании ограничивается видами изделий из технической керамики, размеры которых относительно невелики и глубина проникновения достаточна, чтобы обеспечивалась равномерность распределения температур по объему.

Максимальные размеры подложек: 165X165 мм, толщина подложек - от 0,25 мм до 3,0 мм. Известно, что глубина проникновения микроволнового поля в керамическую массу на основе SiC составляет $\Delta=9,6$ мм. При такой толщине электромагнитное поле для рассматриваемых изделий будет равномерным. Форма подложек определяется потребителем. Для спекания керамических подложек IViTec предлагает конвейерную печь спекания LTCC серии FastFire II (США). Однако температурный уровень в этой печи не соответствует температуре спекания рассматриваемых порошков (для защиты от деформации рабочая температура ограничена 1150°C): так, для спекания оксида алюминия $T_{сп}=1450$ °C. Известна фирма MARUWA – Integrating Ceramic Technologies, использующая печи камерного типа, в которых температура может достигать 1600 °C.

Максимальная скорость остывания – менее часа от температуры 1100°C до температуры ниже 100°C. Подача холодного воздуха внутрь камеры во время выполнения термического цикла не производится.

Быстрый нагрев: макс. 60°C/мин (1 °C/c), охлаждение от 1000°C до менее 100°C в течение 60 минут, при незагруженной печи.

Основные характеристики печи:

- максимальная длительность обжига – 240 мин.;

- номинальная мощность при загрузке 50 кг – 60 кВт.

В расчете принималось, что толщина изделий $\delta=3 \cdot 10^{-3}$ м.

Сравнительная характеристика кинетики спекания для традиционного нагрева и микроволнового схематично изображена на рис. 3.

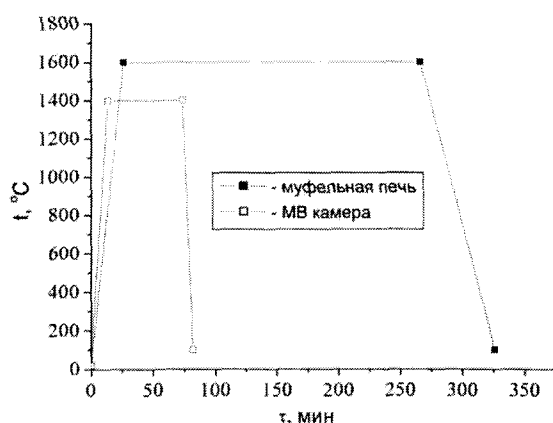


Рисунок 3 – Кинетика спекания керамических подложек при традиционном и микроволновом нагреве

При микроволновом нагреве: темп нагрева 1,7 °C/c, рабочий уровень температур может быть снижен на 200 °C (в соответствии с [8]), а длительность спекания в МВ поле составляет 60 мин [10]. Охлаждение начинается сразу после выключения магнетронов и определяется условиями взаимодействия с окружающей средой. В соответствии с зависимостями для неограниченной пластины [11], при естественной конвекции и для аналогичной загрузки камеры температура от 1000 °C до 100 °C снизится в течение 520 с (8,7 мин), что сокращает длительность технологического процесса на этапе спекания.

Длительность обжига керамических подложек в муфельной печи составляла 326,3 мин., в микроволновой камере – 82,2 мин. Таким образом, интенсивность процесса увеличилась в 4 раза.

Затраты энергии для муфельной печи составляли $Q=0,959$ ГДж, для микроволновой камеры – $Q=0,60$ ГДж. В расчете принималось, что КПД микроволновой камеры составляет $\eta_k=67$ %, КПД магнетрона составляет $\eta_m=66$ %, а муфельная печь является электрической. Тогда затраты энергии при переходе на МВ технологию на этапе обжига при производстве керамических подложек сократятся в 1,6 раза, а энергоэффективность при переходе на микроволновой нагрев выражается в экономии 37% электроэнергии. В расчете учитывалось время нагрева и выдержки изделий, т.е. 266,3 мин для муфельной печи и 73,5 мин для микроволновой камеры.

Интенсивность процесса термообработки пластин карбида кремния при спекании керамических подложек увеличилась в 4 раза при переходе на использование микроволновой энергии. Затраты энергии на этапе МВ обжига снижаются в 1,6 раза, энергоэффективность выражается в экономии 37% электроэнергии при переходе с традиционного электрического нагрева на микроволновой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сапунов, В.В.. Совершенствование технологии изготовления абразивного инструмента на бакелитовой связке с применением микроволнового излучения : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.07. – Ульяновск, 2015. – 221 с. – библиогр. 204-219.
2. Microwave Solutions for Ceramic Engineers [Text] / Edited by D. E. Clark, D. C. Folz, C. E. Folgar, M. M. Mahmoud // New York: Wiley, 2005. - 494 pp.
3. Rao, K. J. Synthesis of inorganic solids using microwaves [Text] / K. J. Rao, B. Vaidhyanathan, M. Ganguli,

- P.A. Ramakrishnan // Chemistry of Materials. 1999. V. 11, No. 4. P. 882-895.
4. Makino, Y. Sintering of Al₂O₃ - ZrO₂ composites using millimeter-wave radiation [Text] / Y.Makino, T. Ohmae, Y.Setsuhara // Key Engineering Materials. 1999. V. 161-163. P. 41-44.
 5. Wil'ert-Porada, M. Microwave sintering of metal-ceramic FGM [Text] / M. Wil'ert-Porada, R. Borchrt // Functionally Graded Materials, edited by I. Shiota and Y. Miyamoto. Amsterdam: Elsevier, 1997. P. 349-354.
 6. Gupta M. Microwaves and Metals [Text] / M.Gupta, E. Wong Wai Leong // Singapore: Wiley, 2007. - 228 pp.
 7. Zhang, S.-L. Rapid thermal processing with microwave heating [Text] / S.-L. Zhang, R. Buchta, D.Sigurd //Thin Solid Films. 1994. V. 246, No. 1/2. P. 151-157.
 8. Lukas, R. Mikrowelleunterstützte Wärmt- und Stoffübertragung beim Trocknen und Entbindern Technischer Keramik [Text] / R. Lukas // Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur. Freiburg, 2005. – 125 p.
 9. Chandrasekaran, S. Microwave Material Processing—A Review [Text] / S. Chandrasekaran, S. Ramanathan, T. Basak // AIChE Journal. 2012. V. 58 P. 330-363.
 10. Ванецев, А. С. Спекание оксидных порошков с использованием микроволнового воздействия [Текст] / А. С. Ванецев.– М.: МГУ, 2011. – 32 с.
 11. Лыков, А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А. В Лыков. – М.: 1967. – 600 с.