

А. А. Бочегов¹ (✉), к. т. н. А. В. Ермаков¹, к. т. н. С. В. Никифоров²,
к. ф.-м. н. И. В. Вандышева³

¹ ЗАО «Уральские инновационные технологии», г. Екатеринбург, Россия

² ООО «Драгоценные металлы Урала», г. Екатеринбург, Россия

³ ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

УДК 666.762.1:66.041.455

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА ИЗГОТОВЛЕНИЯ МУФЕЛЯ ПЕЧИ ДЛЯ ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПОРОШКА МОКС-ТОПЛИВА

Рассмотрена возможность изготовления тонкостенных керамических изделий методом плазменного напыления с обеспечением требований 14-го качества по отклонению размеров и формы без применения механической обработки после обжига.

Ключевые слова: корундовая плазмокерамика, технология плазменного напыления, обжиг тонкостенных изделий, качество по отклонению размеров и формы.

При организации любого технологического процесса одна из главных проблем — подбор конструкционных материалов для технологического оборудования. Основными материалами, используемыми для изготовления коррозионно-стойких узлов оборудования пирохимической технологии переработки отработанного ядерного топлива с использованием солевых расплавов, являются углеродные и керамические композиты [1]. Несмотря на то что углеродные материалы имеют определенные преимущества перед другими в процессах переработки оксидного топлива, в качестве материала муфеля печи для вакуумно-термической обработки гранулированного порошка смешанного уран-плутониевого оксидного топлива были выбраны корундовая керамика и композиты на ее основе. Такое решение было принято после неудачных попыток изготовить муфель из графитовых композитов и тугоплавких металлов (сплавов на основе ниобия и циркония). Только корундовая керамика отвечает всем требованиям, предъявляемым к материалам муфеля:

- жаропрочность и жаростойкость, рабочие температуры до 1400 °С;
- стойкость к термоциклированию, предварительные испытания: не менее 3 теплосмен 20 – 1200 – 20 °С со скоростью не менее 10 °С/мин;
- достаточная вакуумплотность, класс герметичности IV по ПНАЭГ-7-019-89.

Для изготовления муфеля из керамики, эскиз которого представлен на рис. 1, была выбрана технология плазменного напыления, так как, по нашему мнению, это единственная технология, дающая возможность изготовить тонкостенное изделие с обеспечением выполнения требований 14-го качества по отклонению размеров и формы изделия.

Последовательность технологических операций изготовления заготовки изделия:

– на удаляемую оправку, точно повторяющую внутреннюю форму изделия (с учетом усадки керамики при обжиге), покрытую разделительным слоем, напыляется слой керамического материала необходимой толщины. Скорость вращения оправки и перемещения плазматрона вдоль оси оправки подбирается так, чтобы толщина моно-слоя керамики была не более 10–30 мкм;

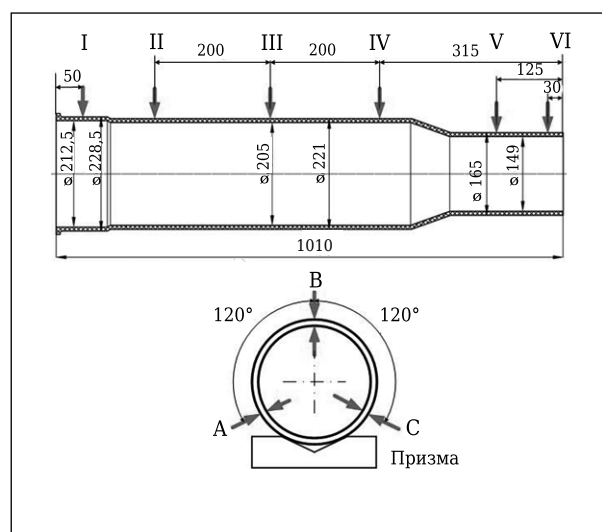


Рис. 1. Эскиз муфеля со схемой контроля геометрических параметров изделия

✉
А. А. Бочегов
E-mail: aleksandr.bochegov@pm-ural.com

– при необходимости возможно армирование керамики — введение в ее толщу одного или нескольких слоев тугоплавких металлов (например, нихрома, никеля и др.). При этом для улучшения когезии выполняются переходные слои с плавным изменением количества металлической фазы от 0 до 100 % перед напылением армирующего слоя и от 100 до 0 % при завершении. Общая толщина армирующего слоя не должна превышать 500 мкм [2];

– после набора необходимой толщины стенки изделия процесс напыления прекращают, изделие на оправке остужают сжатым воздухом до температуры не выше 90–100 °С и снимают с оправки;

– далее проводится механическая обработка изделия: резка, точение, сверление отверстий, шлифовка и полировка. Это становится возможным потому, что в процессе плазменного напыления корунда, как следствие закономерностей процесса, получается изделие из оксида алюминия, находящегося в γ -фазе, отличающейся пониженными плотностью и механической прочностью [3];

– для перевода материала изделий в устойчивую α -фазу и повышения механической прочности изделие подвергается обжигу. Минимальная температура 1200 °С в течение 2 ч, при этом обеспечиваются практически полный переход материала в α -фазу, объемная усадка 3,5–5,3 %, улучшение механических свойств. Пористость плазмокерамики после обжига остается достаточно высокой, не менее 8–12 %.

Для получения керамики с пониженной пористостью температуру обжига изделий без металлического армирующего слоя рекомендуют повысить до 1600–1650 °С, продолжительность процесса увеличить до 10–12 ч. Однако высокотемпературный обжиг, особенно для крупногабаритных тонкостенных изделий, связан с неизбежными поводками и увеличенной усадкой, изменяющими требуемую геометрию изделия. Чтобы избежать проблем, вызванных применением высокотемпературного обжига, но получить требуемую вакуумплотность муфеля при использовании стандартного обжига при 1200 °С, применено армирование керамики жаропрочным никелевым сплавом. Армирующий металлический слой расположили в середине толщины стенки муфеля из плазмокерамики (рис. 2).

Контроль геометрических размеров муфеля до и после обжига, а также после термоциклирования проводили по схеме, приведенной на рис. 1. Замеры выполняли в шести сечениях (I–VI) по трем образующим (А, В, С). Результаты измерений геометрических параметров приведены в табл. 1, 2.

Результаты, приведенные в табл. 1, 2, показывают, что после напыления во всех сечениях муфель имел форму правильного круга, откло-

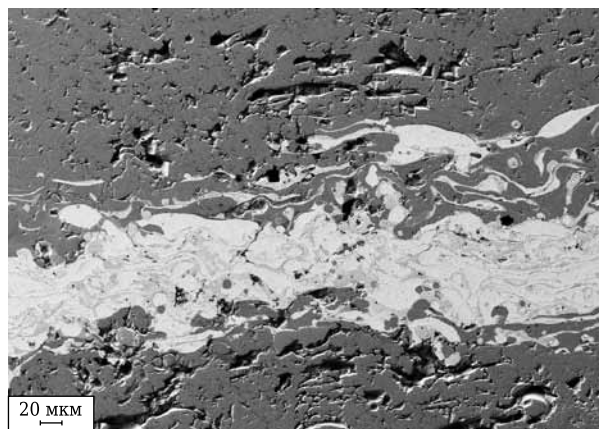


Рис. 2. Микроструктура армированной керамики. $\times 200$

нение величин диаметров по разным образующим (отклонение от круглости) не превышало 0,04 %, или 0,05–0,12 мм. После проведения термообработки, состоящей из штатного обжига и контрольного 4-кратного термоциклирования, отклонение от круглости увеличилось и находится в пределах 0,11–0,21 %, или 0,2–0,57 мм (см. табл. 2), что соответствует числовым значениям допусков 13–14-го квалитетов. Избежать более существенного формоизменения позволило применение специальной схемы размещения изделия в обжиговой печи (рис. 3).

Следует отметить, что опытные образцы муфелей, обжигаемые без применения схемы рис. 3, показали значительное изменение формы, отклонение от круглости достигало 1,2 %, или 0,89–3,35 мм (см. табл. 1), что соответствует числовым значениям допусков только 17-го квалитета. Такая деформация происходила при горизонтальном размещении изделия на поду печи под действием собственной массы при температурах выше 900 °С. Установка дополнительных опор для муфеля позволила перераспределить нагрузку более равномерно и уменьшить деформацию готового изделия. Опоры подбирали из неликвидов производства плазмокорунда, что

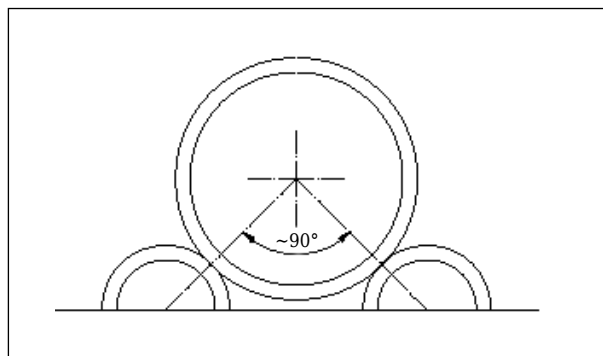


Рис. 3. Схема размещения муфеля в обжиговой печи

Таблица 1. Геометрические размеры муфеля до и после обжига, выполненного без применения оснастки для обжига

Показатели* ¹	Сечение					
	I	II	III	IV	V	VI
До обжига:						
максимальное положительное отклонение, %	0,04	0,02	0,05	0,04	0,02	0,05
средний размер диаметра, мм	230,20	224,41	224,18	223,76	167,18	165,36
максимальное отрицательное отклонение, %	0,06	0,07	0,05	0,07	0,06	0,03
После обжига:						
максимальное положительное отклонение, %	0,42	0,97	1,27	0,59	0,46	0,53
средний размер диаметра, мм	227,67	222,42	221,83	221,53	165,18	163,34
максимальное отрицательное отклонение, %	0,53	0,96	2,08	0,35	0,43	0,47
Отклонение от круглости в измеряемом сечении готового изделия* ² , мм	0,95	1,93	3,35	0,94	0,89	1,0
* ¹ Длина изделия до обжига 1020,0 мм, после обжига 1009,8 мм.						
* ² Представляет собой разность максимального и минимального диаметров.						

Таблица 2. Геометрические размеры муфеля до и после обжига, выполненного с применением оснастки для обжига

Показатели*	Сечение					
	I	II	III	IV	V	VI
До обжига:						
максимальное положительное отклонение, %	0,03	0,04	0,02	0,06	0,04	0,03
средний размер диаметра, мм	230,22	224,44	224,13	223,81	167,14	165,35
максимальное отрицательное отклонение, %	0,07	0,04	0,03	0,06	0,03	0,05
После обжига:						
максимальное положительное отклонение, %	0,27	0,30	0,27	0,09	0,16	0,13
средний размер диаметра, мм	227,73	222,36	221,92	221,61	165,25	163,42
максимальное отрицательное отклонение, %	0,19	0,27	0,20	0,11	0,13	0,21
Отклонение от круглости в измеряемом сечении готового изделия, мм	0,46	0,57	0,47	0,20	0,29	0,34
* Длина изделия до обжига 1020,0 мм, после обжига 1010,2 мм.						

обеспечивало требуемую химическую чистоту материалов и не приводило к нежелательному взаимодействию при обжиге.

Таким образом, использование технологии плазменного напыления позволяет изготавливать тонкостенные изделия с обеспечи-

ем требований 14-го качества по отклонению размеров и формы, не применяя механическую обработку после обжига. Использование несложных приспособлений при размещении тонкостенного изделия в печи для обжига позволяет уменьшить поля допуска в 6 раз.

Библиографический список

1. Бычков, А. В. Каков «оптимум» для ЗТЦ? / А. В. Бычков // Росэнергоатом РЭА (<http://old.rosenergoatom.info/2009-11-01-17-32-02/81-lr->).
2. Пат. на полезную модель 91314 РФ, МПК⁹ В 32 В 18/00, F 27 В 14/10. Слоистый жаростойкий конструкционный материал для изделий объемной формы, преимущественно тиглей (варианты) / Ермаков А. В., Никифоров С. В., Бочегов А. А. ; заявитель и патентообладатель ЗАО «Уральские Инновационные

Технологии». — № 2009130206/22 ; заявл. 05.09.09 ; опубл. 10.02.10, Бюл. № 4.

3. Кайнарский, И. С. Корундовые огнеупоры и керамика / И. С. Кайнарский, Э. В. Дегтярева, И. Г. Орлова. — М. : Металлургия, 1981. — 168 с.■

Получено 08.11.13

© А. А. Бочегов, А. В. Ермаков, С. В. Никифоров, И. В. Вандышева, 2014 г.