

PACS: 81.20.Lb

С.Ю. Саенко

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОРОШКОВОЙ СРЕДЫ НА ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРОКОНСОЛИДАЦИИ

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»
ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина

Статья поступила в редакцию 9 июля 2010 года

Проанализированы характеристики различных порошков передающей среды в соответствии с ее функциональным назначением – передавать давление, создаваемое в пресс-форме, на керамические преформы и обеспечивать их нагрев за счет тепла, выделяемого при прохождении электрического тока. Проведены эксперименты по изучению уплотнения различных порошков в процессе электроконсолидации керамических преформ. Установлено влияние геометрической формы, характеристики поверхности и физико-механических свойств частиц порошковой среды на процессы макродеформации и консолидации преформ. Определены коэффициенты передачи бокового давления рассмотренных порошков и выявлена качественная корреляция их значений с неоднородностью деформации спеченных изделий.

Ключевые слова: прессование, электроконсолидация, преформа, порошок, частица, геометрическая форма, уплотнение, коэффициент передачи давления

Введение

В современном порошковом материаловедении термин «консолидация» обозначает совокупность процессов, направленных на получение из дисперсного материала изделий с заданными свойствами. Основные технологии консолидации – прессование при низких температурах (холодное, с приложением давления) и спекание при высоких температурах, в котором различают спекание без приложения давления (за счет лапласовых сил) и спекание под давлением, или горячее прессование.

В последнее время интенсивно идет разработка методов активированного спекания, принципиальным отличием которых от традиционных технологий является создание условий для концентрации высокой плотности выделяемой энергии на контактах между частицами порошка. Преимущество новых технологий определяется возможностью снижения температуры и продолжительности процесса спекания, а также достижением более высокой скорости деформации, что способствует повышению плотности и замедляет рост зерна материала. Особый интерес среди методов активированного спекания представляет использова-

ние скоростного нагрева, что позволяет оптимизировать сочетание процессов уплотнения и роста зерен материала. К новым методам относятся такие, как спекание с контролируемой скоростью уплотнения (Rate-Controlled Sintering), активированное спекание под воздействием внешнего поля (FAST – Field Assisted Sintering Techniques), скоростное горячее изостатическое прессование (QHIP – Quick Hot Isostatic Pressing), микроволновое спекание (Microwave Sintering) [1–3].

Среди FAST-методов получения керамических материалов одним из перспективных является процесс электроконсолидации. Этот процесс позволяет осуществлять квазиизостатическое горячее прессование порошковых композиций за минимально короткие промежутки времени изотермической выдержки, что приводит к достижению высоких физико-механических характеристик получаемых изделий. Суть процесса заключается в том, что нагрев предварительно сформованных заготовок (преформ) осуществляется прямым пропусканием электрического тока через упругосжимаемую среду, в которую помещены одна или несколько преформ [4]. Назначение этой среды – передача давления, создаваемого пуансонами, и обеспечение нагрева преформ за счет джоулева тепла, выделяющегося при прохождении тока.

В НИЦ ХФТИ совместно с Арагонской Национальной лабораторией и фирмой «Superior Graphite» (США) разработана, изготовлена и запущена в эксплуатацию пилотная установка для реализации процесса электроконсолидации (рис. 1) [5]. Данная установка обеспечивает возможность реализовать технологический процесс консолидации порошковых преформ керамик различного состава как в защитной среде инертных газов, так и в вакууме (≥ 1.0 Pa).

Процесс электроконсолидации осуществляется непосредственно в пресс-форме, изготовленной из графита и углерод-углеродного композитного материала (УУКМ), имеющей внутренний диаметр 140 mm и высоту 240 mm (рис. 2).

Так как для получения многих функциональных керамик требуются высокие (более 2000°C) температуры, то для контроля температуры в пилотной установке применен рентгенографический метод с использованием термодатчиков плавления, размещенных в порошковой засыпке. Дополнительно использован метод косвенного слежения за температурой с помощью термопары, установленной с внешней стороны пресс-формы. Термодатчики изготовлены из материалов с последовательно возрастающей температурой плавления (медь, никель, железо, титан, цирконий, бор, гафний), момент расплавления фиксируется на мониторе компьютера, куда изображение внутреннего пространства пресс-формы выводится из приемника рентгеновского излучения.

Особенности технологии электроконсолидации обуславливают необходимость решать новую, по сравнению с другими способами, задачу – выбор материала передающей среды, обеспечивающей реализацию параметров спекания. Поэтому вопросы, связанные со свойствами порошка, имеют актуальное значение для осуществления процесса электроконсолидации. Цель настоящей работы – анализ физико-механических, тепловых и структурных характеристик порошков с точки зрения соответствия требованиям, предъявляемым к сыпучей передающей среде для осуществления процесса электроконсолидации.

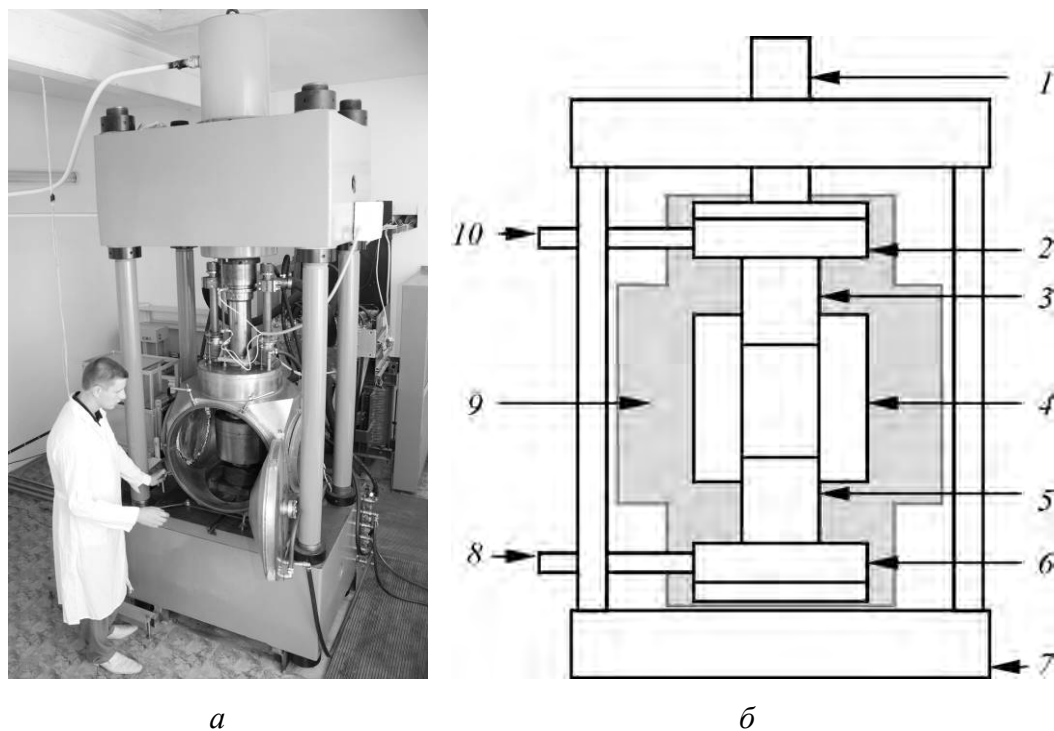


Рис. 1. Внешний вид (а) и схема (б) пилотной установки электроконсолидации : 1 – гидроцилиндр; 2, 6 – верхний и нижний водоохлаждаемые токовводы; 3, 5 – верхний и нижний пуансоны; 4 – пресс-форма; 7 – станина пресса; 8, 10 – кабель электропитания; 9 – вакуумная камера

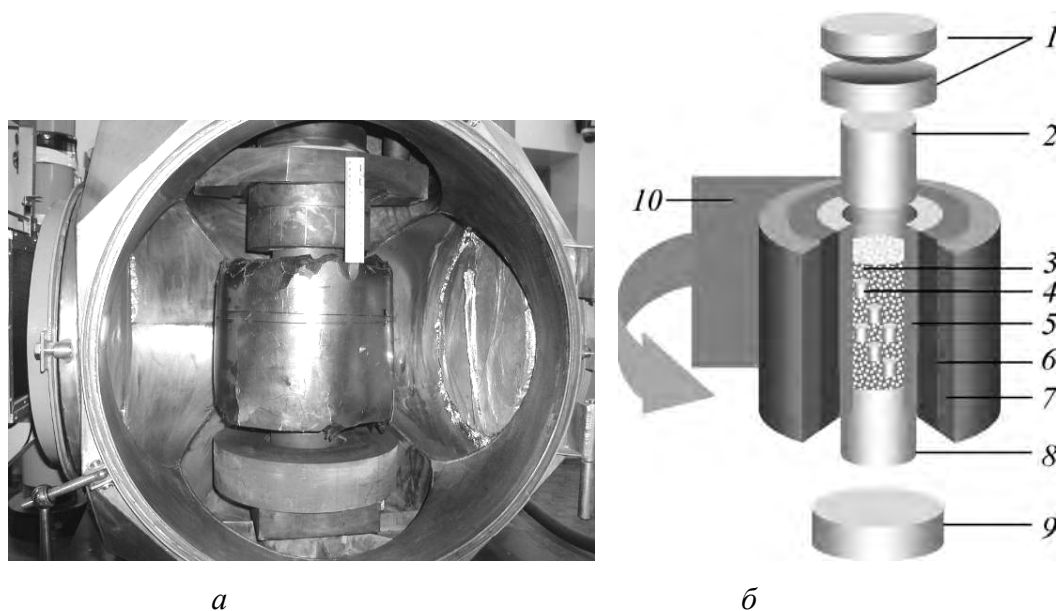


Рис. 2. Внешний вид (а) и конструкция (б) пресс-формы: 1 – сферическая пара; 2, 8 – верхний и нижний пуансоны; 3 – порошковая передающая среда; 4 – преформы; 5 – графитовый цилиндр пресс-формы; 6 – УУКМ силовой цилиндр для упрочнения пресс-формы; 7 – графитовый войлок (теплоизоляция); 9 – нижняя опора; 10 – графитовая фольга

Обоснование выбора характеристик порошков передающей среды

Функциональное назначение передающей среды определяет требования к ее характеристикам, основными из которых являются сохранение в процессе уплотнения однородности по отношению к транспортным свойствам (электро- и теплопроводности), а также способность обеспечить распределение давления на обрабатываемую преформу, близкое к изостатическому. Неоднородность передающей среды приведет не только к неоднородности давления в пределах полости пресс-формы, но и к градиентам температуры, что может негативно отразиться на качестве получаемых изделий.

Чем больше способность частиц порошка перераспределяться под давлением неразрывно и заполнять пустоты, тем однороднее температурное поле и тем ближе к изостатическому распределение давления. Необходимым условием также является достаточное электросопротивление сыпучей среды в процессе уплотнения для обеспечения необходимой температуры спекания порошкового конгломерата преформы.

К основным факторам, определяющим качество порошка как передающей среды, относятся геометрическая форма частиц, характеристика их поверхности (степень скольжения частиц друг относительно друга), а также физико-механические свойства материала порошка. Сферическая форма и гладкая поверхность частиц позволяют минимизировать внутреннее (частиц между собой) и внешнее (о стенки пресс-формы) трение порошковой среды, что способствует более свободному перемещению частиц при уплотнении.

Внешнее трение является одним из факторов, влияющих на распределение приложенного осевого давления по высоте пресс-формы. Из уравнения баланса вертикальных сил у боковой поверхности пресс-формы [6] следует зависимость осевого давления на любом уровне P_z от давления у поверхности подвижного пуансона P_0 :

$$P_z = P_0 \exp\left(-\frac{4k\alpha z}{D}\right), \quad (1)$$

где k – коэффициент трения, α – коэффициент передачи бокового давления (Janssen constant), z – расстояние от поверхности пуансона до данного уровня, D – внутренний диаметр пресс-формы.

Из зависимости (1) следует, что осевое давление с уменьшением z снижается по экспоненциальному закону, причем уменьшение коэффициента трения k (например, за счет нанесения на внутреннюю поверхность пресс-формы смазывающего покрытия) ведет к снижению неоднородности по высоте, а увеличение значения коэффициента бокового давления α – к ее повышению. В то же время, как будет показано ниже, рост значения коэффициента α передающей среды положительно влияет на степень равномерности деформации спекаемой преформы. Из выражения (1) также очевидно, что распределение давления по высоте пресс-формы будет тем однороднее, чем меньше отношение ее высоты к диаметру. При реальных значениях коэффициентов ($k = 0.05-0.1$; $\alpha = 0.2-0.4$) и геометрических параметров пресс-

формы максимальное снижение осевого давления по высоте из-за внешнего трения составит, в зависимости от значения коэффициентов, от 5 до 17%.

В реальных порошках частицы имеют форму, отличающуюся от сферической. В работе [7] методом численного моделирования проанализировано влияние геометрической формы частиц на плотность упаковки. Рассмотрены характеристики монофазных упаковок частиц сложной формы, называемых сферополиэдрами.

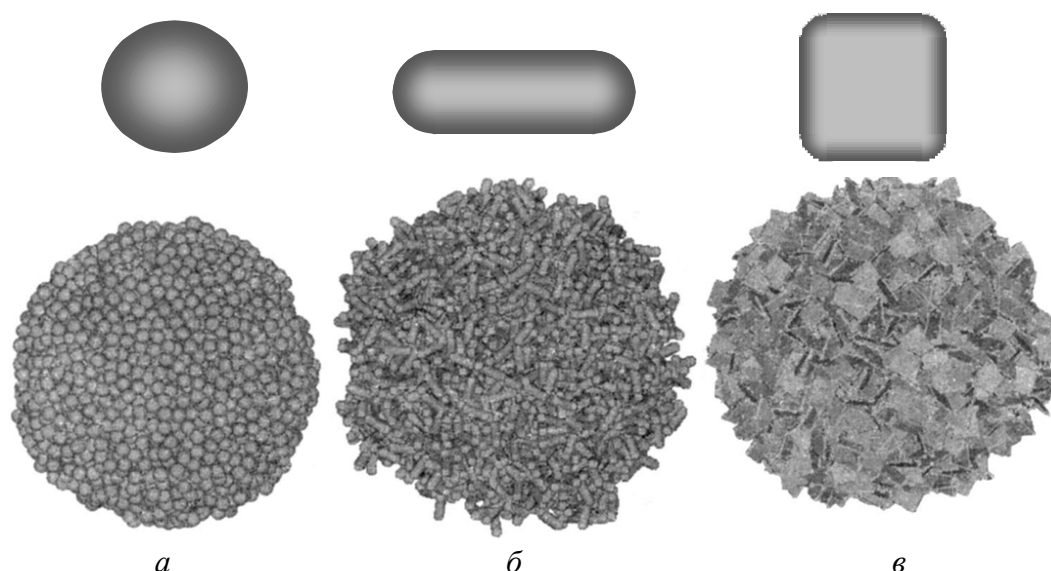


Рис. 3. Упаковки сферических (а), цилиндрических (б) и пластинчатых (в) частиц

Для описания несферичности частиц предложен коэффициент F_L , который характеризует степень вытянутости формы:

$$F_L = \frac{D}{D+L}, \quad (2)$$

где D – диаметр образующей сферы частицы, L – длина образующей сферополиэдра.

Для рассматриваемых форм значение $F_L = 1$ соответствует сфере и квадрату, значение $F_L = 0$ – бесконечно длинному сфероцилиндру. Расчет показал, что для упаковок несферических частиц (объем всех частиц принимался равным объему сферы единичного радиуса) характерно снижение плотности упаковки с уменьшением значения коэффициента F_L . Наименьшую плотность имеет упаковка сфероцилиндров.

Физические и прочностные свойства материала порошка должны обеспечить упругое сжатие передающей среды – в процессе электроконсолидации частицы должны выдерживать давление без разрушения и не подвергаться спеканию при рабочих параметрах по температуре и давлению. Поскольку технология предназначена для создания изделий из порошковых композиций тугоплавких материалов, а активное спекание начинается при температурах выше ~ 0.7 от температуры плавления, это ограничивает выбор мате-

риалов передающей среды. В основном используют различные углеграфитовые материалы, которые обладают достаточной прочностью на сжатие ($\sigma_s \geq 100$ МПа) и сохраняют свои свойства до высоких ($\geq 2200^\circ\text{C}$) температур.

Выбор оптимальных размеров частиц передающей среды не является однозначным, хотя, на первый взгляд, кажется – чем больше дисперсность порошка, тем выше его способность перераспределяться и заполнять пустоты в процессе уплотнения. Ниже приведены некоторые факторы, ограничивающие нижний предел размеров частиц передающей среды.

При интерпретации экспериментальных результатов широкое распространение получили континуальные представления о деформации порошковых тел, согласно которым рассматривается квазисплошная вязкосжимаемая пористая среда, а не совокупность контактирующих частиц [8]. Согласно этой теории при сжатии порошка в цилиндрической обойме пресс-формы осевым давлением P скорость уплотнения без спекания описывается выражением

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{3P\theta}{4\eta_0(1-\theta)}, \quad (3)$$

где θ – пористость среды, η_0 – коэффициент сдвиговой вязкости соответствующего беспористого материала, t – время.

Из уравнения (3) следует, что скорость уплотнения не зависит от размера частиц в процессе уплотнения без спекания. Скорость же спекания определяется дисперсностью порошка, поскольку с уменьшением размера частиц возрастает его удельная поверхность, а следовательно, и удельная поверхностная энергия, что активизирует процесс спекания. Математически это описывается уравнением скорости уплотнения за счет только капиллярных сил:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\frac{9\sigma\theta}{2r_0\eta_0}, \quad (4)$$

где σ – поверхностное натяжение, r_0 – радиус частиц.

Для порошка передающей среды важно, чтобы в процессе электроконсолидации скорость уплотнения превосходила скорость спекания. Влияние размерного эффекта на технологические свойства порошков особенно сильно сказывается при переходе к частицам микроскопического уровня (≤ 100 нм – по классификации Г. Гляйттера [9]). Однако нанопорошки (≤ 0.1 мкм) не являются достаточно хорошей передающей средой, поскольку проявляют резкую размерную зависимость многих характеристик материала, в том числе существенное снижение температуры спекания и тенденцию к формированию агломератов уже в процессе подготовки порошков. Это явление носит типично размерный характер и не свойственно частицам с размерами в десятки и сотни микрон [10]. По литературным данным, предпочтительные размеры частиц графитового порошка передающей среды находятся в пределах 80–500 мкм [11]. Возможно, в случае консолидации преформ сложной формы верхнюю границу размеров частиц передающей среды следует снизить.

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

Влияние характеристик порошка передающей среды на процесс электроконсолидации исследовали при получении образцов керамических материалов титаната диспрозия и гафната диспрозия, предлагаемых в качестве поглощающих элементов ядерных реакторов. Преформами служили цилиндрические образцы, изготовленные из порошковых композиций двух составов: 1) $Dy_2O_3 + 55.9 \text{ mol.}\% TiO_2$ и 2) $Dy_2O_3 + 48 \text{ mol.}\% HfO_2 + 4 \text{ mol.}\% Nb_2O_5$. Преформы готовили по схеме: дозирование и смешивание порошков → введение связующего, формование заготовок в стальной пресс-форме заданных геометрических размеров холодным прессованием → отгонка связующего нагревом при температуре $120^\circ C$ → предварительное спекание на воздухе при температуре $700^\circ C$. Окончательное спекание преформ проводили по технологии электроконсолидации.

На начальном этапе после запуска пилотной установки в качестве передающей среды использовали порошок, изготовленный на основе пиролитического графита марки ГЭ (графит электролитический). С целью уменьшения внешнего трения частиц на стенках пресс-формы перед засыпкой порошка на ее внутренние стенки наносили покрытие из порошка нитрида бора (BN), смешанного с раствором спирта в дистиллированной воде. В указанной передающей среде были спрессованы преформы при параметрах: давление – 30 МПа, температура – $1450^\circ C$, время прессования – 20 min.

Частицы порошка передающей среды имели неправильную геометрическую форму, размер частиц в диапазоне 330–400 μm (рис. 4,а). Передающая способность такой среды не была удовлетворительной, что показали результаты исследования физико-механических свойств полученных изделий. Имела место значительная степень неоднородности передачи давления, что привело к неравномерной деформации изделий. Деформация в направлении приложения усилия прессования значительно превышала поперечную деформацию. Сравнение геометрических параметров образцов до и после прессования показало, что их радиальная усадка составляет всего 21% от осевой (образцы № 1, 2 в табл. 1).

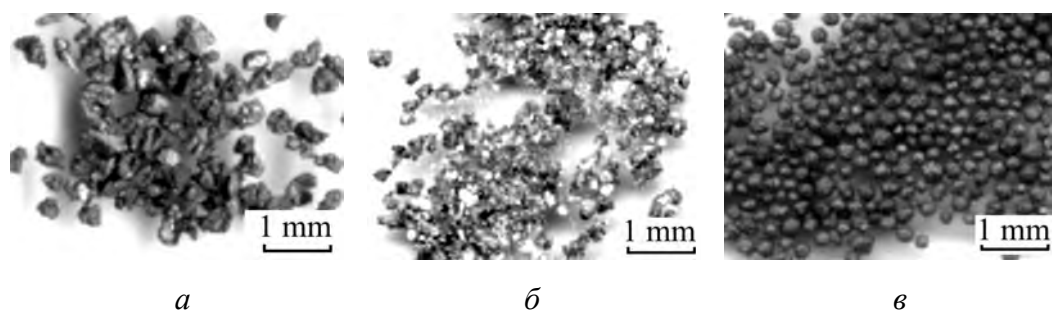


Рис. 4. Вид частиц порошков передающей среды: а – порошок графита марки ГЭ; б – смесь порошков состава (60% ГЭ + 40% BN); в – порошок графита марки 9400

Таблица 1

Изменение геометрических размеров (диаметра D и высоты H) образцов составов 1 ($Du_2O_3 + 55.9 \text{ mol.}\% TiO_2$) и 2 ($Du_2O_3 + 48 \text{ mol.}\% HfO_2 + 4 \text{ mol.}\% Nb_2O_5$) в результате обработки методом электроконсолидации

| № образца | Среда прессования | Исходные размеры, mm | | Режимы прессования | | Конечные размеры, mm | | δD | δH | $\delta D/\delta H$ |
|-----------------|----------------------------|----------------------|-------|--------------------|------------------|----------------------|-------|------------|------------|---------------------|
| | | D | H | $T, ^\circ C$ | $P, \text{ MPa}$ | D_1 | H_1 | % | | |
| Состав 1 | | | | | | | | | | |
| 1 | ГЭ 60% ГЭ + + 40% BN | 9.15 | 16.60 | 1450 | 30 | 8.20 | 8.52 | 10.4 | 48.7 | 0.21 |
| 2 | | | | | | 8.24 | 8.33 | 9.9 | 47.9 | 0.21 |
| 3 | | | | | | 7.72 | 11.30 | 15.4 | 42.9 | 0.36 |
| 4 | | | | | | 7.82 | 11.10 | 14.7 | 38.8 | 0.39 |
| Состав 2 | | | | | | | | | | |
| 5 | Графит марки 9400 | 8.54 | 11.36 | 1600 | 20 | 7.40 | 9.08 | 13.3 | 20.1 | 0.66 |
| 6 | | | 10.16 | | | 7.42 | 8.20 | 13.1 | 19.3 | 0.68 |
| 7 | | | 11.03 | | 40 | 7.30 | 8.11 | 14.5 | 26.5 | 0.55 |
| 8 | | | 9.94 | | | 7.20 | 7.52 | 15.7 | 24.3 | 0.65 |

С целью более плотного заполнения пустот передающей среды в порошок электролитического графита добавили мелкодисперсный порошок BN (до 40 wt.%) (рис. 4,б). При осуществлении процесса электроконсолидации образцов состава 1 в такой среде проявился низкий уровень технологичности этого порошка: при температурах выше $\sim 1400^\circ C$ начиналось спекание частиц, передающая среда превращалась в монолит, и после окончания процесса возникали большие трудности при очистке внутренней полости пресс-формы, извлечении изделия и механической обработке его поверхности. В то же время несколько повысились однородность передачи давления и соответственно равномерность деформации обрабатываемого изделия. По сравнению с прессованием идентичных образцов в среде электролитического графита диаметральная усадка в смеси порошков возросла в среднем до 37% от осевой деформации (образцы № 3, 4 в табл. 1).

Значительного прогресса в результатах эксплуатации пилотной установки электроконсолидации удалось достичь после появления возможности использовать в качестве передающей среды графитовый порошок марки 9400 фирмы Superior Graphite (США). Частицы порошка имеют форму, близкую к сферической, и гладкую поверхность (рис. 4,в). Они упруго деформируются, выдерживают давление прессования без разрушения, устойчивы к повышению температуры до $2200^\circ C$, размер частиц около 200 μm . Частицы обладают способностью обеспечивать неразрывное перераспределение под давлением и заполнение пустот, а также не склонны к образованию агломератов. К положительным свойствам порошка марки 9400 как передающей среды относится возможность многократно применять одну и ту же засыпку, а также способность порошка после окончания процесса свободно «стекать» со стенок пресс-формы и изделия.

Использование графита 9400 в качестве передающей среды позволило наиболее успешно реализовать ряд разработанных технологических процессов для изготовления партий изделий состава 2. Сформованные по вышеописанной схеме преформы помещали в пресс-форму установки электроконсолидации, после чего ее заполняли графитовым порошком марки 9400. Прессование выполняли в вакууме при температуре 1600°C, при двух значениях осевого давления – 20 и 40 МПа. Время выдержки при указанных параметрах 20 min.

Сравнение геометрических параметров образцов до и после процесса электроконсолидации в порошке графита марки 9400 (образцы № 5–8 в табл. 1) показало, что неравномерность деформации изделия зависит от давления прессования – при более высоком давлении неравномерность выше. При давлении прессования 20 МПа радиальная усадка образцов составляет в среднем 67%, а при давлении 40 МПа – 59% от осевой. При этом по сравнению с образцами № 1–4 равномерность деформации образцов, спрессованных в графите марки 9400, повысилась примерно в 2–3 раза.

Для дальнейших исследований влияния характеристик порошка передающей среды на процесс электроконсолидации на основе расчетов и экспериментальных данных был определен коэффициент передачи бокового давления для разных порошков. С этой целью выполнены прочностные испытания трубчатых образцов из УУКМ. Для нагружения образца использовали гидравлические прессы с усилием до 20 и 50 т [12].

Для выполнения расчета прочности создаваемой конструкции необходима достоверная информация о прочностных характеристиках материала. В то же время УУКМ – это материал, свойства которого существенно зависят от типа углеродных волокон ткани, способов намотки и процессов пиролитического уплотнения. В связи с этим испытания проводили в два этапа. На первом образец заполняли вкладышами из резины, создавая условия для практически изостатического распределения давления, и повышали прессовую нагрузку до разрушения образца. На втором этапе испытывали идентичные образцы, но с засыпкой порошков. Были выполнены испытания на трех сериях образцов с засыпкой порошка: 1) графита марки ГЭ, 2) смеси порошков (60% ГЭ + 40% ВN) и 3) порошка графита марки 9400. Коэффициент передачи бокового давления для каждого порошка определяли по формуле

$$\alpha_i = \frac{Q_{0i}}{Q_i}, \quad (4)$$

где индекс $i = \{1, 2, 3\}$ – номер порошка соответственно графита ГЭ, смеси порошков и графита 9400; α_i – коэффициент передачи бокового давления i -го порошка; Q_{0i} – разрушающая нагрузка для образца из серии i с вкладышами из резины; Q_i – разрушающая нагрузка для образца с засыпкой соответствующего порошка.

Результаты экспериментов (по средним значениям для каждой серии) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Разрушающая нагрузка и коэффициенты передачи бокового давления для порошковых сред

| № серии | Порошковая среда | Диаметр образца, mm | | Разрушающая сила, t | | Коэффициент α_i |
|---------|------------------|---------------------|------------|---------------------|-------|------------------------|
| | | наружный | внутренний | Q_{0i} | Q_i | |
| 1 | Графит ГЭ | 75.7 | 65.0 | 3.1 | 17.0 | 0.18 |
| 2 | 60% ГЭ + 40% BN | 75.7 | 65.0 | 3.1 | 10.0 | 0.31 |
| 3 | Графит 9400 | 80.4 | 57.0 | 8.5 | 19.7 | 0.43 |

Хотя на неоднородность деформации образцов в процессе электроконсолидации оказывают влияние и другие факторы, например параметры пресования, все же можно отметить четкую качественную корреляцию полученных значений коэффициента бокового давления и неоднородности деформации, которые имели место при электроконсолидации керамических изделий из порошковых композиций составов 1 и 2 с использованием разных порошков передающей среды.

Выводы

Рассмотрена роль одного из определяющих элементов технологии электроконсолидации – порошковой среды, передающей давление и теплоту помещенным в нее преформам. Проанализировано влияние основных характеристик частиц порошка передающей среды (формы, размера, состояния поверхности, физико-механических свойств) на функциональную способность порошковой среды. Проведены эксперименты по изучению уплотнения различных порошков на основе графита в процессе электроконсолидации керамических преформ и выполнено расчетно-экспериментальное определение коэффициентов передачи бокового давления. Выявлена качественная корреляция значений этого коэффициента со степенью неоднородности деформации спеченных изделий. Показано, что наиболее близкое к изостатическому распределение давления на преформу обеспечивает графитовый порошок с формой частиц, наиболее близкой к сферической, и размером $\leq 200 \mu\text{m}$.

1. В.В. Скороход, Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя, Наукова думка, Київ (1998).
2. A.V. Ragulya, V.V. Skorokhod, 14th Plansee Seminar 2, 735 (1997).
3. W.H. Sutton, Ceramic Bulletin 68, 376 (1989).
4. W.M. Goldberger, B.D. Merkle, and D. Boss, Metal Powder Industries Federation 6, 91 (1994).
5. С.Ю. Саенко, С.И. Грибов, А.В. Пилипенко, Труды XVIII Международной конференции по физике радиационных повреждений и радиационному материаловедению (2008), с. 342.

6. *F.C. Chang, R.R. Fessler, B.D. Merkle, J.M. Borton, W.M. Goldberger*, Particulate Science and Technology **22**, 35 (2004).
7. *М.С. Петров, В.В. Гайдуков, Р.М. Кадушиников, Д.М. Алиевский, И.В. Антонов, Е.Ю. Нурканов*, Порошковая металлургия № 7/8, 5 (2004).
8. *В.В. Скороход*, Порошковая металлургия № 12, 18 (1968).
9. *H. Gleiter*, Acta Mater. **48**, № 1, 1 (2000).
10. *В.В. Скороход, А.В. Рагуля*, Прогресивні матеріали і технології, Академперіодика, Київ (2003), т. 2, с. 7.
11. *W.P. Lichti, A.F. Hofstatter*, Patent 4640711 USA (1987).
12. *С.Ю. Саєнко, Ж.С. Ажажа, С.И. Грибов*, Труды XVIII Международной конференции по физике радиационных повреждений и радиационному материаловедению (2008), с 337.

С.Ю. Саєнко

ВПЛИВ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕДАВАЛЬНОГО ПОРОШКОВОГО СЕРЕДОВИЩА НА ПРОЦЕС ЕЛЕКТРОКОНСОЛІДАЦІЇ

Проаналізовано характеристики різних порошків передавального середовища відповідно до його функціонального призначення – передавати тиск, створюваний в прес-формі, на керамічні преформи і забезпечувати їх нагрівання за рахунок тепла, що виділяється при проходженні електричного струму. Проведено експерименти по вивченню ущільнення різних порошків у процесі електроконсолідації керамічних преформ. Установлено вплив геометричної форми, характеристики поверхні та фізико-механічних властивостей часток порошкового середовища на процеси макродеформації і консолідації преформ. Визначено коефіцієнти передачі бічного тиску розглянутих порошків і виявлено якісну кореляцію їх значень із неоднорідністю деформації спечених виробів.

Ключові слова: пресування, електроконсолідація, преформа, порошок, частка, геометрична форма, ущільнення, коефіцієнт передачі тиску

S.Yu. Sayenko

INFLUENCE OF TRANSMITTING POWDER MEDIUM CHARACTERISTICS ON ELECTROCONSOLIDATION PROCESS

Characteristics of different powders of transmitting medium are analysed in accordance with its functional purpose to transmit pressure created in the press-die to preforms and to provide their heating due to electric current flow. Experiments on studying the compression of different powders in the process of electroconsolidation of ceramic preforms are executed. Influence of geometric shape, surface characteristics and physical/mechanical properties of powder-like medium particles on character of preform deformation is determined. Janssen coefficients of the considered powders are determined and qualitative correlation of their values with inhomogeneity of deformation of the sintered products is revealed.

Keywords: pressing, electroconsolidation, preform, powder, particle, geometric shape, condensation, coefficient of pressure transmitting

Fig. 1. View (*a*) and schematic diagram (*b*) of the pilot electroconsolidation facility: 1 – hydraulic cylinder; 2, 6 – upper and lower water-cooled current lead; 3, 5 – upper and lower rams; 4 – press-die; 7 – support; 8, 10 – electrical lead; 9 – vacuum chamber

Fig. 2. View (*a*) and structure (*b*) of the press-die: 1 – spherical pair; 2, 8 – upper and lower rams; 3 – powder pressure-transmitting medium; 4 – preforms; 5 – graphite cylinder; 6 – carbon composite cylinder for press-die strengthening; 7 – carbon felting (heat insulation); 9 – lower support; 10 – carbon foil

Fig. 3. Packings of spherical (*a*), cylindrical (*b*) and square (*в*) particles

Fig. 4. View of powder-like particles of pressure-transmitting medium: *a* – graphite powder; *b* – powder composition (60% graphite + 40% BN); *в* – 9400 graphite powder