

DOI: 10.15593/2224-9400/2018.4.14

УДК 666.3/.7

В.С. Глазунов, М.В. ЧерепановаПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ПРИМЕНЕНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
В ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Аддитивные технологии – относительно новое, быстро развивающееся направление, использование которого возможно не только в промышленности, но и в повседневной жизни. Такие технологии открывают возможность «выращивания» объектов посредством послойного нанесения материала на генерируемый объект. Первые принтеры, использующие данную технологию, были спроектированы с целью сокращения времени в изготовлении прототипов для оценки инженерами-конструкторами и дизайнерами в отношении будущих особенностей изделия с последующей корректировкой. Развитие и совершенствование вычислительной техники и 3D-моделирования позволило реализовать аддитивные технологии не только в создании прототипов, но и получении полноценных деталей и объектов.

Отличием аддитивных технологий от технологии механической обработки, которая работает по принципу удаления лишних частей, является экономичность в плане сырья, поскольку отсутствует избыток материала. Рост количества технологических решений, позволяющий осуществлять 3D-печать, обусловлен массовым интересом к данному вопросу и возможности использования в домашних условиях. Также повышение интереса обусловлено тем, что данная технология затронула многие сферы деятельности человека: культуру, здравоохранение, многие отрасли производства (включая производство керамических изделий). Производство керамических изделий с помощью аддитивных технологий крайне сложно из-за высоких температур плавления керамики, а также из-за высоких требований, предъявляемых к готовому материалу (прочность, химическая инертность, пористость, и т.д.).

В данной обзорной статье рассмотрены основные методы производства объектов с помощью аддитивных технологий в сфере керамических изделий, требования к сырью, а также способы получения сырья. Сырье в аддитивных технологиях играет немаловажную роль и к нему предъявляются высокие требования, ведь свойства объекта напрямую зависят от качества сырья.

Ключевые слова: аддитивные технологии, керамические изделия, производство, методы, сырье, способ, наночастицы.

V.S. Glazunov, M.V. Cherepanova

Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

APPLICATION OF ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE PRODUCTION OF CERAMIC PRODUCTS

Additive technologies are a relatively new, rapidly developing direction, the use of which is possible not only in industry, but also in everyday life. Such technologies open up the possibility of “growing” objects by layer-by-layer deposition of material on the generated object. The first printers using this technology were designed to reduce the time to produce prototypes for evaluation by design engineers and designers with respect to future product features, with subsequent adjustments. The development and improvement of computer technology and 3D modeling made it possible to implement additive technologies not only in creating prototypes, but also in obtaining full-fledged parts and objects.

The difference between additive technology and machining technology, which works on the principle of removing excess parts, is efficiency in terms of raw materials, since there is no excess material. The growth in the number of technological solutions that allows for 3D printing is due to the massive interest in this issue and the possibility of using it at home. The increase in interest is also because this technology has affected many areas of human activity: culture, health care, many industries (including the production of ceramic products). Production of ceramic products using additive technologies is extremely difficult due to the high melting points of ceramics, as well as due to the high requirements imposed on the finished material (toughness, chemical inertness, porosity, etc.).

This review article discusses the main methods of production of objects using additive technologies in the field of ceramic products, the requirements for raw materials, as well as methods for producing raw materials. Raw materials in additive technologies play an important role and high demands are placed on it, because the properties of an object directly depend on the quality of the raw materials.

Keywords: *additive technologies, ceramic products, production, methods, raw materials, method, nanoparticles.*

Большое влияние на производство керамических изделий с помощью аддитивных технологий оказывает вид исходного сырья. На сегодняшний день все сырье, применяемое для получения керамических изделий с использованием аддитивных технологий, можно разделить на три основные группы: жидкое сырье, представленное ультрафиолет-отверждаемой коллоидной системой, порошки и пастообразное сырье [1]. Рассмотрим наиболее известные аддитивные технологии производства различных материалов в зависимости от типа сырья.

1. Жидкое сырье

- Стереолитография (SLA) – первая коммерчески доступная технология аддитивного производства, характеризуется конверсией жид-

кой светочувствительной смолы в твердое состояние путем избирательного воздействия источника ультрафиолетового света. В данном процессе CAD-модель нарезается слоями, каждый из которых затем сканируется ультрафиолетовым светом для выборочного отверждения смолы в каждом поперечном сечении. После того, как слой будет построен, платформа опускается на одну толщину слоя. Затем смола заполняет лезвие поперек поперечного сечения детали, покрывая его одной толщиной слоя свежей смолы. Затем последующий слой сканируется, придерживаясь предыдущего слоя [2].

- **Multi-Jet Modeling (MJM)** – это процесс аддитивного производства основан на использовании технологии, близкой к струйной печати, но с применением нескольких сопел. Печатающая головка создает струи, ориентированные в линейном массиве. Каждая отдельная струя распределяет ультрафиолетовый отверждаемый полимер (или воск) согласно программе. Головка MJM перемещается вперед и назад, чтобы построить каждый отдельный слой, под потоком ультрафиолетового излучения, чтобы полимер стал твердым. Когда один слой завершен, платформа спускается с толщиной одного слоя, а следующий слой строится на предыдущем слое. Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет построена целая часть. Преимуществами процесса MJM являются экономичность, более короткое время печати и удобство использования [2].

2. Пастообразное сырье

- **Robocasting** – метод аддитивного производства, который с помощью слоев экструдированных водных керамических паст для изготовления трехмерной части. При прокаливании керамическая паста экструдирована через сопло и осаждается на подложке. После осаждения каждого слоя вертикальная ось системы поднимается на одну толщину слоя, а следующий слой осаждается. Этот шаг не зависит от конфигурации. Контроль свойств пасты необходим для процесса robocasting. Паста высыхает из жидкоподобного состояния в твердое состояние, обычно в течение 10–15 с от осаждения, так что следующий слой может быть нанесен без длительного ожидания. Если паста слишком тонкая, слой будет выдавливаться как жидкие бусины, которые распространяются неуправляемо. Если паста слишком толстая, слой будет выглядеть как веревка. При правильной вязкости и консистенции пасты каждый осажденный слой может представлять собой прямоугольное поперечное сечение с относительно прямыми стенками и плоскими вершинами [3].

3. Порошки

- Селективное лазерное спекание (SLS, или лазерное спекание (LS)) представляет собой АМ-процесс, который использует лазерный луч для избирательного плавления и агломерации полимерных частиц в объект путем сканирования поперечных сечений на поверхности слоя порошка. При этом объект имеет 3-мерную форму, основанную на модели САD. После сканирования каждого поперечного сечения его толщина уменьшается, а новый слой материала распределяется сверху. Такая последовательность процесса повторяется до завершения сборки детали. SLS может производить детали из широкого спектра порошковых материалов, включая воск, полимеры, полимерные/стеклянные композиты, полимерные/металлические порошки, металлы и керамику. Механизмы связывания включают спекание в твердом состоянии, химически индуцированное связывание, жидкофазное спекание и частичное плавление. Для металлических и керамических деталей исходные порошки покрывают полимерными веществами или смешивают с полимерными частицами, служащими в качестве связующего. Последующая обработка требуется для удаления связующего вещества и полной агломерации [4].

- Селективное лазерное плавление (SLM) – это процесс, основанный на SLS способе, при этом происходит полное расплавление металлического порошка мощным лазерным лучом с образованием твердой металлической части, которая не требует последующей обработки. Материал, получаемый таким способом, имеет механические свойства, близкие к свойствам листов из проката. Однако SLM процесс трудно контролировать из-за большой энергии, поступающей в частицы расплавленного металла, что вызывает проблемы, такие как комкование, развитие остаточных напряжений и деформация детали. Применимость к чисто керамическим порошкам весьма ограничена из-за их высоких температур плавления и значительных энергозатрат, необходимых для их достижения, а также сложного аппаратурного оформления [4].

- Лазерно-сетчатое проецирование (LENS), или лазерная обработка, представляет собой аддитивно-производственный процесс, в котором, как и в SLM способе, порошок полностью расплавляется лазерным лучом, в результате чего образуются плотные детали без необходимости последующей обработки. Основное различие между LMD и SLM заключается в обеспечении порошкового материала. В LMD порошкообразный материал локально поставляется с помощью насад-

ки для подачи порошка (коаксиально или радиально), а в SLM на основе смолы LMD можно строить очень тонкие стенки из-за очень небольшой зоны теплового воздействия, создаваемой во время процесса. LMD также может создавать слои материала непосредственно на поверхностях трехмерной части и, следовательно, может использоваться для ремонта и защиты от износа или защиты от коррозии. Однако данный способ также требует усовершенствования оборудования для работы с керамическими порошками из-за их высоких температур плавления [5].

- Трехмерная печать (3DP) – это процесс аддитивного производства, в котором цельная часть построена в порошковом слое. Для струйной печати используют печатающую головку, необходимую для распыления жидкого биндинга в слой порошка, а связующее твердое вещество образует слой. Затем поршень, удерживающий деталь, опускается на одну толщину слоя и наносится новый слой порошка. Процесс 3DP довольно гибкий с точки зрения исходных материалов. Можно использовать любую комбинацию порошкообразного материала со связующим, который должен иметь низкую вязкость для образования капелек. Пластиковые, керамические, металлические и металлокерамические композитные детали могут быть изготовлены с использованием 3DP. Недостатком является то, что получаемый материал является пористым из-за ограничений плотности на распределение сухого порошка [6].

В технологиях аддитивного производства применяются различные типы процессов и для каждого из них характерны исходное сырье, способ создания слоя и изменение фазы. В табл. 1 представлены тип и пример сырья, а также способы создания слоя и изменения фазы, используемые в различных аддитивных технологиях.

В качестве сырья наибольшее распространение получили порошки. В настоящее время не существует общих требований к порошковому сырью для аддитивных технологий. Разные компании-производители оборудования для аддитивных технологий предписывают работу с определенным перечнем материалов. Однако можно выделить основные требования к порошкам, используемые в аддитивных технологиях:

- по морфологии (сферичность, допустимое количество дефектов);
- по гранулометрическому составу (верхняя и нижняя граница диапазона применяемых частиц, средний размер частиц);

- по фракционному составу (соотношение фракций внутри выбранного диапазона);
- по технологическим свойствам (текучесть, плотность);
- по химическому составу и газовым примесям (для конкретных порошковых композиций).

Таблица 1

Исходное сырье, способы создания слоя и изменения фазы в различных технологиях аддитивного производства

Технологии аддитивного производства	Тип сырья	Способ создания слоя	Способ изменения фазы	Пример исходного материала
Стереолитография (SLA)	Смола	Лазерное сканирование	Фото-полимеризация	УФ-отверждаемая смола, керамическая суспензия
Multi-Jet Modeling (MJM)	Полимер	Струйная печать	Фото-полимеризация	Акриловый пластик, воск, керамическая суспензия
Robocasting	Паста	Непрерывная экструзия	Удаление связующего	Керамическая паста
Селективное лазерное спекание (SLS)	Порошок	Лазерное сканирование	Частичное плавление	Термопласты, воски, керамический и металлический порошки
Селективное лазерное спекание (SLM)	Порошок	Лазерное сканирование	Полное плавление	Металлический и керамический порошки
Лазерно-сетчатое проецирование (LENS)	Порошок	Порошковая инъекция и плавление лазером	Полное плавление	Металлический и керамический порошки
Трехмерная печать (3DP)	Порошок	Печать связующим	Удаление связующего	Полимеры, металлические и керамические порошки

В последние годы внимание научного сообщества сосредоточено на способах получения высокочистых нанопорошков, которые могут быть использованы в аддитивных технологиях. Существует множество методов получения высокочистых нанопорошков. Однако стоит выделить основные методы получения наночастиц: осаждение из раствора, осаждение из газовой фазы и золь-гель метод. Более подробно данные методы с приведенными примерами из научно-технической и патентной литературы рассмотрены ниже.

1. Метод осаждения из раствора. Методы химического осаждения заключаются в совместном осаждении (соосаждении) компонентов продукта из раствора в виде нерастворимых солей или гидроксидов. Наиболее распространены три типа химического осаждения: гидроксидный, оксалатный и карбонатный методы. Осаждение из водных растворов является наиболее производительным и простым методом, который не требует повышенных температур и давления, органических растворителей. Также преимуществом является относительно короткое время реакции.

Известен способ получения порошка алюмомагнезиальной шпинели методом совместного осаждения [7], при этом в качестве сырья используются соли $Mg(NO_3)_2$, $Al(NO_3)_3 \cdot 6H_2O$, а в качестве осадителя – раствор аммиака. Полученный в результате осаждения порошок $MgAl_2O_4$ с размером частиц 100–500 мкм подвергался прокаливанию в интервале температур от 800 до 1300 °С. При этом процесс шпинелеобразования зависит от многих факторов: дисперсности и природы исходных компонентов, природы и вида примесей, специально введенных добавок, условий отжига и т.д. [8].

Другим примером синтеза веществ методом осаждения является получение алюмоиттриевого граната $Y_3Al_5O_{12}$, допированного неодимом. В ходе эксперимента 0,5 М растворы нитратов иттрия, алюминия, и неодима смешивали в молярном соотношении компонентов 2,94:5,0:0,06 и добавляли 0,2 М раствор гидрокарбоната аммония до образования осадка. Осадок выдержали в растворе для старения в течение двух суток, после чего отфильтровали и тщательно промыли водой. Затем его высушили при 1000 °С и прокалили в интервале температур от 500 до 1100 °С. Исследования на растровом электронном микроскопе показали, что даже при отжиге до 1100 °С размер частиц порошка не превышает 100 нм [9].

2. Метод осаждения из газовой фазы. Методы конденсации из газовой фазы можно разделить на две группы: методы физической конденсации и методы химической конденсации. При физической конденсации состав пара и образующегося при конденсации твердого вещества одинаков. При химической конденсации происходит разложение паров вещества с образованием твердого продукта, химический состав которого отличен от состава пара. По литературным данным известно, что имеется возможность применения нанораспылительной сушки (метод физической конденсации) для получения порошков Al_2O_3 и ZrO_2

[10]. Таким образом, распылительная сушка позволяет получать агломераты размером от 0,5 до 5,0 мкм, состоящие из наночастиц размером 100 нм и меньше [11].

Примером метода химической конденсации является метод гидролиза в пламени. В данном методе летучие соединения (обычно хлориды или карбонилы металлов) распыляют в пламя. За счет высокотемпературного гидролиза образуются мельчайшие капли. Так, по результатам практики, из хлорида алюминия можно получить при гидролизе в пламени Al_2O_3 размером до 6 мкм.

3. Золь-гель метод. Золь-гель технология – метод получения материалов с определенными химическими и физико-механическими свойствами, включающий получение золя и последующий перевод его в гель. Этот метод позволяет получать мелкодисперсные порошки, волокна или тонкие пленки из растворов при температурах, более низких, чем в случае традиционных твердофазных систем. Существенные преимущества данного метода заключаются в следующем: высокая однородность и чистота получаемого материала на молекулярном уровне, возможность регулировать морфологию и размер частиц, удельную поверхность материала. С помощью золь-гель метода можно получить сферические частицы.

Известна технология получения золь-гель методом нанопорошка Al_2O_3 со средним размером частиц 30–40 нм непосредственно из раствора алюмината натрия. Однако в данном способе необходимо использовать дополнительные реагенты (ПАВ и затравки в виде кристаллов Al_2O_3), а также изменять условия выделения оксида алюминия, что значительно влияет на качество получаемого продукта [12].

Авторами исследован фазовый состав и размер частиц нанопорошка диоксида титана, синтезированного с использованием приемов золь-гель технологии [13]. Порошок TiO_2 получали из водно-этанольного раствора хлорида титана (III) обратным осаждением аммиаком. Для поддержания pH использовали аммиачно-ацетатный буферный раствор. Осаждение проводили медленным добавлением водно-этанольного раствора хлорида титана (III) к рассчитанному количеству аммиачно-ацетатного буферного раствора. После коагуляции образовавшегося геля осадок отфильтровали и высушивали. По результатам исследования удалось определить средний размер частиц – 20 нм.

Иттрий-алюминиевый гранат (ИАГ) можно также получать золь-гель технологией [9]. В качестве прекурсоров используют вторичный

бутилат алюминия $\text{Al}(\text{C}_4\text{H}_9\text{O})_3$ и кристаллогидрат хлорида иттрия $\text{YCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Выявлено, что в зависимости от вида гидролиза и температурно-временного режима последующей обработки получают твердые продукты фазового состава. Однако возможен 100 % выход ИАГ со сферическими частицами ≈ 70 нм в случае применения водного раствора соли иттрия.

К золь-гель технологии можно частично отнести метод взрывного самопроизвольного пиролиза цитратных комплексов [14]. Получены порошки нелегированного и легированного галлием оксида цинка с размером частиц до 150 нм. Для этого исходные материалы (оксиды) растворяли в концентрированной азотной кислоте, добавляли комплексобразователь – лимонную кислоту. Полученный раствор нейтрализовали нашатырным спиртом, образуя комплексы. В ходе нагрева и выпаривания раствор переходил в золь, затем в густой гель и в какой-то момент начиналась взрывная самопроизвольная реакция возгорания и пиролиза, а кислород поставлялся при температурном разложении нитрата аммония. В результате во всем объеме формировались агломераты. После отжига формировались порошки оксида цинка [15].

Более систематизированная информация из всего вышеперечисленного по методам получения порошков, сырью для получения порошка, состав порошка, а также размеру частиц представлена в табл. 2. Мировыми лидерами в области аддитивных технологий на сегодняшний момент являются США, Япония, Германия, Китай. Во многих странах уже созданы национальные ассоциации по аддитивным технологиям, объединенные в альянс. Крупные международные корпорации благодаря технологии прямого лазерного выращивания изготавливают сотни тысяч изделий для своих отраслей. В России число промышленных компаний и исследовательских центров, занимающихся использованием и внедрением технологий аддитивного производства крайне мало. В нашей стране недавно появилось производство металлических и неметаллических порошковых композиций для аддитивных технологий. Так, например, во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов организовано производство сверхчистых сферических металлических порошковых сплавов на никелевой и титановой основах. Малое число квалифицированных специалистов, а также отсутствие национальных стандартов сдерживает темпы развития аддитивных технологий в нашей стране, но в последнее время наметилась тенденция ускоренного развития этой технология в нашей стране [16].

Таблица 2

Исходное сырье, продукты и их размеры
для различных методов получения порошков

Метод	Исходное сырье	Продукт	Размер частиц
Осаждение из раствора	Mg(NO ₃) ₂ , Al(NO ₃) ₃ ·6H ₂ O	MgAl ₂ O ₄	100–500 мкм
	Нитраты иттрия, алюминия	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	100 нм и меньше
Осаждение из газовой фазы	Суспензия Al ₂ O ₃ и ZrO ₂	Al ₂ O ₃ и ZrO ₂	100 нм и меньше
	AlCl ₃	Al ₂ O ₃	6 мкм и меньше
Золь-гель	NaAlO ₂	Al ₂ O ₃	30–40 нм
	TiCl ₃	TiO ₂	20 нм
	ZnO	ZnO	150 нм
	Al(C ₄ H ₉ O) ₃ YCl ₃ ·6H ₂ O	Y ₃ Al ₅ O ₁₂	70 нм

Само производство керамических изделий с помощью аддитивных технологий занимает малую долю в промышленности, однако имеется возможность создавать керамические изделия на основе этих технологий, получая, например, алюмооксидную керамику или высокотемпературные композиты на основе Zr [17] и других элементов. Также аддитивные технологии нашли применение при создании деталей камеры сгорания, используемые в машиностроении, при печати фосфат-кальциевой керамики для костной ткани в медицине, а также во многих других областях [18].

Список литературы

1. Leu M.C., Guo N. Additive manufacturing: technology, applications and research needs // *Front. Mech. Eng.* – 2013. – № 8 (3). – P. 215–243.
2. Балакин А.В., Смелов В.Г., Чемпинский Л.А. Применение аддитивных технологий для создания деталей камеры сгорания // *Вестник СГАУ.* – 2012. – № 3(34). – С. 47–52.
3. Additive manufacturing of traditional ceramic powder via selective laser sintering with cold isostatic pressing / Kai Liu, Huajun Sun, Yuanliang Tan, Yusheng Shi, Jie Liu, Shaowei Zhang, Shangyu Huang // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2017. – № 3. – P. 945–952.
4. Прямое лазерное выращивание изделий из порошковых материалов: принцип, оборудование и материалы / В.В. Сомонов, Г.А. Туричин, Е.В. Земляков, К.Д. Бабкин // *Технические науки в России и за рубежом.* – М.: Буки-Веди, 2016. – С. 34–37.
5. Schwentenwein M., Homa J. Additive Manufacturing of Dense Alumina Ceramics // *Int. J. Appl. Ceram. Technol.* – 2015. – № 12 (1). – P. 1–7.

6. 3D Printing of Calcium Phosphate Ceramics for Bone Tissue Engineering and Drug Delivery / R. Trombetta, J.A. Inzana, E.M. Schwarz, S.L. Kates, H.A. Awad // *Annals of Biomedical Engineering*. – 2016. – № 1. – P. 23–44.

7. Сенина М.О., Лемешев Д.О. Получение порошка алюмомагнезической шпинели методом совместного осаждения // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2017. – № 1. – С. 75–76.

8. Пат. 2286965 Рос. Федерация, МПК С04В9/20. Способ получения магнезимального вяжущего / Крамар Л.Я., Черных Т.Н., Трофимов Б.Я., Захезин А.Е., Горбаненко В.М. – № 2005115605/03; заявл. 23.05.2005; опубл. 10.11.2006.

9. Баранова Г.В., Гринберг Е.Е., Жариков Е.В., Получение нанопорошков иттрий-алюминиевого граната гибридной золь-гель технологией и изготовление керамики // *Успехи в химии и химической технологии*. – 2010. – № 9. – С. 89–94.

10. Пат. 2438978 Рос. Федерация, МПК С01F7/46. Способ получения высокочистого оксида алюминия / Мацуба Тосихиро, Мизуно Дзун, Ямада Такиси, Ямамото Сигео. – № 2009127110/05; заявл. 20.01.2011; опубл. 10.01.2012.

11. Лямина Г.В., Илела А.Э., Качаев А.А., Получение нанопорошков оксида алюминия и циркония из растворов их солей методом распылительной сушки // *Бутлеровские чтения*. – 2013. – № 33 (2). – С. 119–124.

12. Синтез микро- и наночастиц оксида алюминия золь-гель методом / А.В. Монин, Е.Г. Земцова, Н.Б. Швейкина, В.М. Смирнов // *Вестник СПбГУ*. – 2010. – № 4 (4). – С. 154–157.

13. Синтез и свойства нанопорошка диоксида титана для получения функциональных материалов / А.А. Гуров, В.И. Карманов, С.Е. Порозова, В.О. Шоков // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 23–29.

14. Багамадова А.М., Мамедов В.В., Асваров А.Ш., Получение нанопорошка оксида цинка методом самопроизвольного взрывного пиролиза цитратных комплексов // *Журнал технической физики*. – 2012. – № 82 (4). – С. 156–158.

15. Пат. 2400451 Рос. Федерация, МПК С04В35/48. Способ получения жаростойкого цирконсодержащего материала / Анциферов В.Н., Кульметьева В.Б., Порозова С.Е., Красный Б.Л., Красный А.Б., Тарасов В.П. – № 2009118561/03; заявл. 18.05.2009; опубл. 27.09.2010.

16. Чемодуров А.Н. Применение аддитивных технологий в производстве изделий машиностроения // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2016 – № 8 (2). – С. 210–217.

17. Пат. 2442752 Рос. Федерация, МПК С01G 25/00. Оксид циркония и способ его получения / Лаубе Йорг, Гюгель Альфред, Оттерштедт Ральф. – № 2009109346/05; заявл. 24.07.2007; опубл. 20.02.2012.

18. Sahasrabudhe H., Bandyopadhyay A. Additive Manufacturing of Reactive In Situ Zr Based Ultra-High Temperature Ceramic Composites // The Minerals, Metals & Materials Society. – 2016. – № 3. – P. 822–830.

References

1. Leu M.C., Guo N. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Front. Mech. Eng.*, 2013, no. 8(3), pp. 215–243.

2. Balakin A.V., Smelov V.G., Chempinsky L.A., Primenenie additivnykh tekhnologiy dlya sozdaniya detaley kamery sgoraniya [Application of additive technologies for creating parts of the combustion chamber]. *Vestnik SGAU*, 2012, no. №3 (34), pp. 47-52.

3. Kai Liu, Huajun Sun, Yuanliang Tan, Yusheng Shi, Jie Liu, Shaowei Zhang, Shangyu Huang. Additive manufacturing of traditional ceramic powder via selective laser sintering with cold isostatic pressing. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, no. 3, pp. 945-952.

4. Somonov V.V., Turichin G.A., Zemlyakov E.V., Babkin K.D., Pryamoe lazernoe vyrashchivanie izdeliy iz poroshkovykh materialov: printsip, oborudovanie i materialy [Direct laser growing of products from powder materials: principle, equipment and materials]. *Tekhnicheskie nauki v Rossii i za rubezhom*, 2016, pp. 34-37.

5. Martin Schwentenwein, Johannes Homa, Additive Manufacturing of Dense Alumina Ceramics. *Int. J. Appl. Ceram. Technol*, 2015, no. 12(1), pp. 1–7.

6. Ryan Trombetta. Jason A.I., Edward M.S., Stephen L.K., Hani A.A., 3D Printing of Calcium Phosphate Ceramics for Bone Tissue Engineering and Drug Delivery. *Annals of Biomedical Engineering*, 2016, pp. 23-44.

7. Senina M.O., Lemeshev D.O. Poluchenie poroshka alyumomagnezial'noy shpineli metodom sovместного osazhdeniya [Obtaining a powder of alumino magnesium spinel by the method of co-precipitation]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2017, no. 1, pp. 75-76.

8. Kramar L.Ya., Chernykh T.N., Trofimov B.Ya., Zakhezin A.E., Gorbanenko V.M Sposob polucheniya magnezial'nogo vyazhushchego [The method of obtaining magnesia binder]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2286965 (2006).

9. Baranova G.V., Grinberg E.E., Zharikov E.V. Poluchenie nanoporoshkov ittriy-alyuminiyevogo granata gibridnoy zol'-gel' tekhnologiyey i izgotovlenie keramiki [Obtaining nanopowders of yttrium-aluminum garnet by hybrid sol-gel technology and making ceramics]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2010, no. 9, pp. 89-94.

10. Matsuba Toshihiro, Mizuno Jung, Yamada Takisi, Yamamoto Shigeo. Sposob polucheniya vysokochistogo oksida alyuminiya [The method of obtaining high-purity aluminum oxide]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2438978 (2012).

11. Lyamina G.V., Ilea A.E., Kachaev A.A. Poluchenie nanoporoshkov oksida alyuminiya i tsirkoniya iz rastvorov ikh soley metodom raspylitel'noy sushki [Obtaining nanopowders of aluminum oxide and zirconium from solutions of their salts by spray drying]. *Butlerovskie chteniya*, 2013, no. 33 (2), pp. 119-124.

12. Monin A.V., Zemtsova E.G., Shveikina N.B., Smirnov V.M. Sintez mikro- i nanochastits oksida alyuminiya zol'-gel' metodom [Synthesis of micro- and nanoparticles of aluminum oxide using the sol-gel method]. *Vestnik SPSU*, 2010, no. 4 (4), pp. 154-157.

13. Gurov A.A., Karmanov V.I., Porozova S.E., Shokov V.O. Sintez i svoystva nanoporoshka dioksida titana dlya polucheniya funktsional'nykh materialov [Synthesis and properties of titanium dioxide nanopowder for the production of functional materials]. *Vestnik PNIPU. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2014, no. 1, pp. 23-29.

14. Bagamadova A.M., Mamedov V.V., Asvarov A.Sh. Poluchenie nanoporoshka oksida tsinka metodom samoproizvol'nogo vzryvnogo piroliza tsitratnykh kompleksov [Obtaining zinc oxide nanopowder by spontaneous explosive pyrolysis of citrate complexes]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2012, no. 82 (4), pp. 156-158.

15. Antsiferov V.N., Kul'met'yeva V.B., Porozova S.E., Krasnyy B.L., Krasnyy A.B., Tarasov V.P. Sposob polucheniya zharostoykogo tsirkonsoderzhashchego materiala [The method of obtaining heat-resistant zircon-containing material]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2400451 (2010).

16. Chemodurov A.N. Primeneniye additivnykh tekhnologiy v proizvodstve izdeliy mashinostroyeniya [Application of additive technologies in the manufacture of engineering products]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, 2016, no. 8 (2), pp. 210-217.

17. Laube Jörg, Gugel Alfred, Otterstedt Ralph. Oksid tsirkoniya i sposob ego polucheniya [Zirconium oxide and method for its production]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2442752 (2012).

18. Sahasrabudhe H., Bandyopadhyay A. Additive Manufacturing of Reactive In Situ Zr Based Ultra-High Temperature Ceramic Composites. *The Minerals & Metals & Materials Society*, 2016, no. 3, pp. 822-830.

Получено 23.10.2018

Об авторах

Глазунов Владислав Сергеевич (Пермь, Россия) – студент, кафедра химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: wadimmm.98@mail.ru).

Черепанова Мария Владимировна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: syromyatnikova.maria@yandex.ru).

About the authors

Vladislav S. Glazunov (Perm, Russian Federation) – Student of the Department of Chemical Technology of the Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: wadimmm.98@mail.ru).

Maria V. Cherepanova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Technology, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990; e-mail: syromyatnikova.maria@yandex.ru).