

УДК 667.621

doi: 10.18577/2071-9140-2015-0-3-44-50

В.Ю. Алексенко¹, М.М. Рябова¹, А.В. Королев¹, А.М. Бойков¹**СВЯЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ПОРОШКОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ (обзор)**

Представлен обзор научной литературы по вопросу использования различных типов связующих материалов для литья порошков под давлением, критериев, предъявляемых к ним, и возможных методов их удаления из формовочных образцов. Обсуждено влияние различных типов связующих веществ на свойства конечных изделий.

Ключевые слова: связующие вещества, литье порошков под давлением, оксид алюминия, удаление связующего, керамика.

This paper presents an overview of the use of various types of binders for molding powders under pressure in press, the criteria imposed on them and their possible removal methods of molding samples. We observe the influence of various types of binders on the properties of the final products.

Keywords: binders, molding of powders under pressure, alumina, binders removal, ceramics.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

В последнее время литье порошковых смесей под давлением привлекает значительное внимание исследователей в качестве метода изготовления из керамических и металлокерамических материалов деталей сложной формы, таких как автомобильные турбокомпрессоры и газотурбинные лопатки, лопасти и роторы, электроизоляторы, штамповые и измерительные инструменты и др. [1–9]. Одна из основных трудностей в данной области заключается в получении изделий с заданными формами из порошков высокого качества [10, 11]. Полученные изделия должны обладать высокой прочностью, однородностью, удельным сопротивлением, оптическими свойствами и низ-

кой себестоимостью. Эти и другие свойства существенным образом зависят от качества используемого сырья и способа его производства. В основном литье под давлением состоит из четырех стадий: формирование пористой заготовки со связующим материалом, литье под давлением в форму, удаление связующего и спекание (рис. 1).

Получение готового изделия с заданными характеристиками достигается путем контроля каждой из этих стадий процесса и выбора соответствующего исходных материалов – порошка и связующего. Связующие используются для получения однородного сырья посредством смешивания их с порошками и для равномерной упаковки

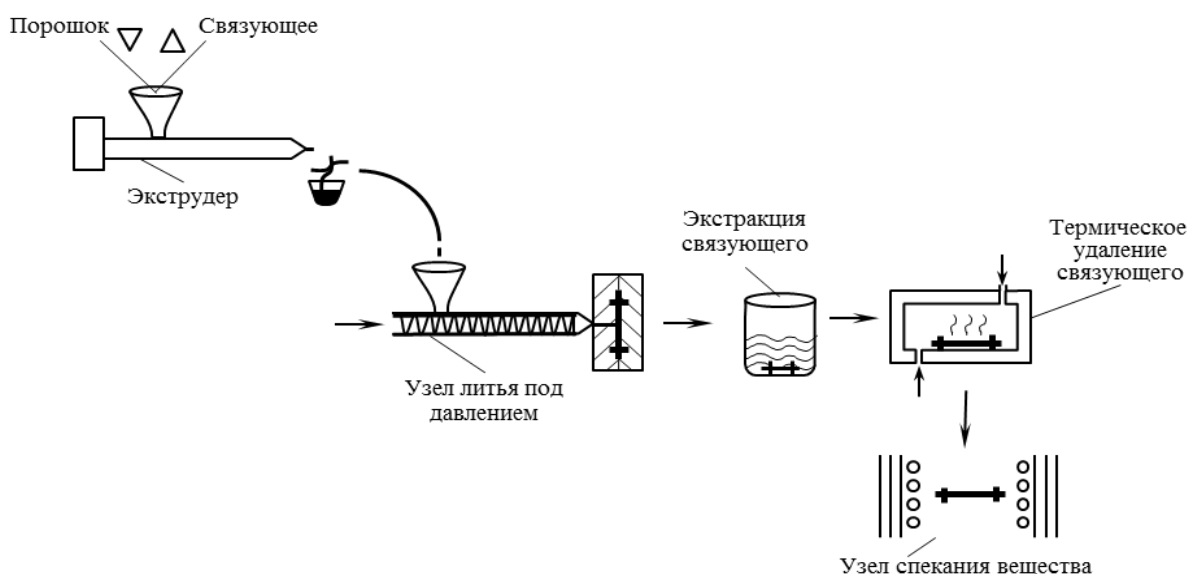


Рис. 1. Стадии получения образцов методом литья под давлением

частиц порошка в необходимую форму до начала процесса спекания. Связующая система оказывает влияние на вязкость сырья, реологию, агломерацию, формовку, спекание и свойства конечной структуры, увеличивает уплотняемость и текучесть порошка. Применение чрезмерного количества связующего материала невыгодно, потому что его избыток приводит к расслоению порошка. Процесс удаления связующего материала из заготовки изделия является наиболее критической стадией в технологиях литья под давлением. На этом этапе могут возникать такие дефекты, как трещины, сколы, вздутия. Основными параметрами процесса удаления связующего материала являются скорость нагрева, продолжительность выдержки при температурах фазовых переходов связующего материала и адсорбционные свойства порошка. Однако при получении изделий сложной пространственной формы определяющим фактором становится прочность материала заготовки. В большинстве работ, представленных в научной литературе, обсуждается выбор типа связующего материала и возможных механизмов процесса его удаления.

Критерии выбора связующего материала

К любому связующему материалу в зависимости от условий его применения предъявляются соответствующие требования. В большинстве случаев связующие материалы должны обладать следующими свойствами: равномерно распределяться по поверхности формовочных материалов в течение определенного времени, что обеспечивает постоянство свойств смеси; придавать смеси текучесть, необходимую для выполнения всех контуров детали, что особенно важно, если эти контуры имеют сложную конфигурацию; обеспечивать достаточную поверхностную и общую прочность как в сыром, так и в сухом состоянии; связующий материал должен быть дешев, недефицитен и безвреден [12].

Кроме описанных выше критериев, выбор и разработка связующих материалов для керамических изделий основывается на необходимости обеспечения требований, предъявляемых к литейной форме: технологических, экономических и технических. Таким образом, выбор связующего материала и способ его удаления являются важными стадиями процесса получения изделий методом литья под давлением.

Типы связующих материалов

В основе классификации связующих материалов, используемых в литейном производстве, лежат два основных признака:

- природа материала (органический, неорганический, водный и неводный);
- характер затвердевания (необратимый, промежуточный, обратимый).

Органические материалы не выдерживают высоких температур заливаемого металла и разлагаются, что приводит к облегчению удаления связующего. Неорганические связующие, напротив, хорошо выдерживают воздействие высоких температур. Они используются для приготовления облицовочных формовочных смесей, а в стержневые смеси добавляются для увеличения прочности в неотвержденном состоянии.

По отношению к воде связующие делятся на водные и неводные. К неводным относятся такие материалы, которые не растворяются в воде и не смачиваются ею, к водным – растворимые в воде. Органические неводные связующие – это растительные масла и масла на основе переработки продуктов нефти. Водные и неводные связующие не смешиваются между собой. Их смешивание почти всегда понижает прочность смесей как во влажном, так и в сухом состоянии.

Необратимо затвердевающие связующие претерпевают сложные химические изменения при нагреве, вызывающие образование прочной пленки. После охлаждения они не восстанавливают свои первоначальные свойства. В основе их затвердевания лежат процессы полимеризации вещества. Обратимо затвердевающие материалы восстанавливают свои первоначальные свойства после охлаждения (битумы, пеки, канифоль) или при действии растворителя (декстрин, пектиновый клей, барда сульфитного щелока) [12].

Наиболее часто для литья порошка под давлением используют парафин, полиэтиленгликоль, полипропилен, полиэтилен, полистирол. Основные свойства этих материалов представлены в табл. 1.

Методы удаления связующих веществ

Основная задача при удалении связующего вещества – эффективно и полно удалить связующие компоненты без возникновения дефектов в полученном материале. Выбор связующего вещества существенно зависит от выбора метода его удаления [13, 14].

Таблица 1

Свойства связующих материалов при комнатной температуре

Связующий материал	Плотность, г/см ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Температура вспышки, °С	Предел прочности при растяжении, МПа
Парафин	0,91	–	199–249	4
Полиэтиленгликоль	1,12	–	182–287	–
Полистирол	1,04	0,1	345–360	50
Полипропилен	0,9	0,2	380–460	35
Полиэтилен	0,91	0,3	341–349	10

Связующее вещество может быть удалено с помощью различных методов: термического разложения, химической экстракции растворителем, сублимации, каталитически и другими методами [15]. Иногда используют сочетание этих способов. При экстракции связующий материал практически полностью экстрагируется, так как его удаляют в виде исходного вещества без химической реакции. Однако этот процесс имеет некоторые ограничения и его трудно контролировать на практике. Термическая обработка, вероятно, является наиболее эффективным и удобным методом удаления связующего при массовом производстве деталей из-за простоты способа и оборудования [16, 17]. Механизм извлечения включает испарение компонентов с низкой молекулярной массой без деструкции основной полимерной цепи. Связующее удаляют в окислительной, восстановительной или инертной атмосфере или в вакууме при медленном нагревании до 100–500°C и выдержки вплоть до 35 ч или более. Скорость нагрева, атмосфера, содержание и тип связующего влияют на конечные размеры детали. В данном случае возможна усадка образца. Поэтому режим нагрева выбирают таким образом, чтобы разложение и испарение связующего происходили без накопления продуктов деструкции, и газообразные продукты разложения связующего удалялись через поры. Содержание углерода и кислорода необходимо контролировать в процессе удаления связующего [17]. Термическое разложение полиолефинов, а также и других полимеров винилового типа заключается преимущественно в случайном разрыве полимерной цепи и, по всей видимости, происходит по радикальному или по тепловому механизму разрушения летучих продуктов деструкции и деполимеризации. Однако массоперенос посредством диффузии в расплавленном связующем материале весьма ограничен. Если перемещение диффузионного потока продуктов распада от центра тела к поверхности, а также их испарение происходит недостаточно быстро, то концентрация продуктов распада может достигать предельного значения. Это приводит к образованию газов внутри образца и, следовательно, к появлению дефектов. В то же время если в системе присутствует кислород, то происходит окислительное разложение на границе раздела связующее/атмосферный газ. Процесс окисления ограничивается поверхностным слоем, толщина которого задается диффузией кислорода в жидком (расплавленном) связующем и продуктами его (связующего) распада. Одновременно с окислительной деструкцией происходит термическая деструкция во всем объеме образца. Следовательно, кривая зависимости потери массы от температуры зависит от объема (размера) образца. Внутреннее термическое разложение представляет собой процесс с высокой энергией активации (150–200 кДж/моль). Процесс окислительного

разложения имеет более низкую энергию активации – порядка 30–40 кДж/моль, и соответственно доминирует при низких температурах.

Так, в работе [18] исследовано термическое удаление связующего материала в различной атмосфере. Авторами разработано оборудование, позволяющее исследовать изменение потери массы в формовочной смеси в процессе удаления связующих веществ в зависимости от температуры. В качестве связующего материала выбраны парафин, сополимер этилена с винилацетатом двух типов, стеариновая и олеиновая кислоты в качестве технологических добавок. Для приготовления суспензии керамики использовали порошок оксида алюминия со средним размером частиц 0,53 мкм доли от общего объема. На рис. 2 показано распределение частиц по размерам, а в табл. 2 – состав суспензии.

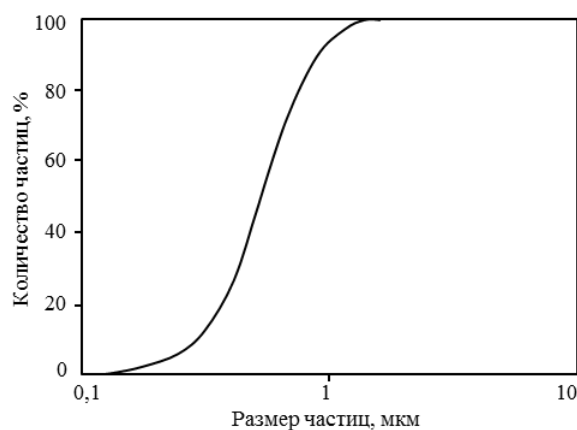


Рис. 2. Распределение частиц по размеру

В результате проведенных исследований процесса теплового удаления связующей системы на воздухе, в атмосфере азота и диоксида углерода оказалось, что в атмосфере, содержащей кислород, невозможно получить бездефектные детали. На поверхности образца образуется слой нелетучих продуктов из-за окислительной деструкции, замедляющий поток диффузии низкомолекулярных компонентов и продуктов термической деструкции образца от центра к поверхности, а также их испарение. Это приводит к образованию газов (в связи с кипением компонентов с низкой молекулярной массой) и продуктов дегградации внутри образца, в результате чего образуются дефекты и сколы. Кроме того, низкое давление оказывает отрицательное влияние на процесс удаления связующего и также приводит к дефектам в образцах. В отличие от неблагоприятного воздействия кислорода воздуха удаление связующего в атмосфере азота и углекислого газа позволяет получить детали без дефектов. Контроль температуры при уменьшении массы в атмосфере азота приводит к возможности определения оптимального цикла теплового удаления связующего вещества и ускоряет этот процесс. В большинстве слу-

Таблица 2

Состав суспензии

Вид суспензии	Содержание, % (объемн.)
Порошок оксида алюминия	86,45
Парафин	4,60
Сополимер типа 1	2,30
Сополимер типа 2	4,60
Стеариновая кислота	1,20
Олеиновая кислота	0,85

чаев полное удаление связующего материала достигается при температурах 400–450°C.

Связующие на основе фоторазлагающихся веществ удаляют в условиях ультрафиолетового излучения. Улучшение процесса удаления связующего из литых пористых заготовок или других образцов описано в многочисленных статьях и направлено в первую очередь на сокращение продолжительности процесса, снижение усадки материала и на увеличение его плотности и точности размеров [19].

Теоретические модели теплового удаления связующего, разработанные в работах [20–25], позволяют прогнозировать длительность этого процесса в зависимости от размера частиц. Оптимальный производственный цикл для удаления связующего из нержавеющей стали (рис. 3) обеспечивает практически полное удаление углерода: 0,008% (по массе) при использовании порошков, распыленных сжатым газом, и 0,012% (по массе) – порошков, полученных распылением водой высокого давления [26]. Для того чтобы удалить связующее можно использовать микроволновое излучение [27–29], которое нагревает внутреннюю часть формованных изделий и тем самым ускоряет процесс. В сочетании с другими источниками тепла это способствует устранению тепловых градиентов, что приводит к снижению деформации изделия.



Рис. 3. Оптимальный термический цикл нагрева для удаления связующего

В случае каталитического удаления связующего – атмосфера, в которую погружают материал, содержит катализатор для деполимеризации, в процессе которой молекулы полимера разруша-

ются. Другие методы удаления также имеют место, например, процессы терморективной конденсации и сублимационная сушка, хотя они не получили должного применения [17].

В научной литературе приведены примеры исследования влияния различных водорастворимых связующих материалов для литья порошков под давлением на свойства конечных образцов [30–36]. Так, авторами работы [30] в качестве связующих веществ использованы латекс, поливиниловый спирт и эфир целлюлозы для литья оксида алюминия под давлением. При этом, помимо исследования микроструктуры полученных материалов, проводилась оценка реологических свойств, упаковки частиц, выгорания связующего и процесса спекания. Удаление связующего контролировали с помощью термогравиметрического анализа – при медленном нагревании образцов до 600°C со скоростью 5°C/мин. После спекания получены плотные беспористые материалы – от 93 до 98,6% по плотности. Оказалось, что применение латекса позволяет использовать высокозагруженные суспензии, так как они имеют низкую вязкость при высоком содержании полимера по сравнению с двумя другими водорастворимыми связующими (поливиниловый спирт и эфир целлюлозы). Это, в свою очередь, приводит к более быстрому процессу сушки. Следует также отметить, что использование латекса позволяет получить образцы более высокого качества и практически 100%-ной плотности. Такое отличие в полученных результатах, возможно, связано с тем, что латекс не растворяется в воде, а образует дисперсный раствор, тогда как два других связующих материала полностью растворяются. Кроме того, авторами проведен эксперимент с добавлением 0,05% оксида магния по отношению к 53,6 и 55% порошка оксида алюминия. В результате установлено, что присутствие оксида магния приводит к снижению стабильности скольжения формочной заготовки и незначительному влиянию на плотность, но улучшает процесс спекания и обеспечивает более высокую конечную плотность.

Автором другой работы [37] исследована новая водная система связующего материала при литье под давлением порошка оксида алюминия. Связующая система состоит из поли-(2-этиленоксазолина) и полиэтиленгликоля – в качестве растворимой фракции в воде, полиэтилена – в качестве полимера основной цепи и стеариновой

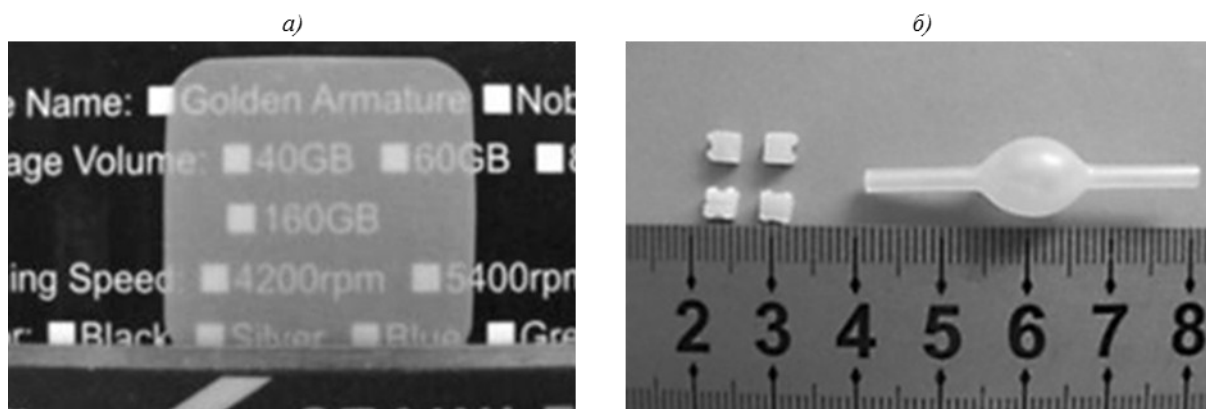


Рис. 4. Полученные методом литья под давлением полупрозрачный образец (толщина 0,8 мм, после полировки) из оксида алюминия (а) и образцы стоматологических скобок и галогенной лампы (б)

кислоты – в роли поверхностно-активного вещества. Исследованы реологические свойства материала в температурном диапазоне от 120 до 160°C и величина сдвига – в диапазоне скоростей от 100 до 1000 с⁻¹. Использовали 50%-ное объемное содержание порошка оксида алюминия. Удаление связующего из литых частей выполнено с применением двухступенчатого процесса. Водорастворимые компоненты удаляли в течение относительно короткого времени с помощью водного выщелачивания в диапазоне температур от ~60 до 80°C. Остальные связующие материалы удалены путем термического пиролиза. В данном случае использовали воду в качестве растворителя для извлечения растворимых компонентов связующего из формованных деталей. Высокая эффективность была достигнута путем увеличения температуры, при этом скорость выжигания увеличивалась из-за большей растворимости и диффузионной способности поли-(2-этилен-оксазолина) и полиэтиленгликоля в воде при более высоких температурах.

В работе [38] также представлен пример исследования процесса литья под давлением для получения практически прозрачных керамических изделий из порошка оксида алюминия. Отметим, что в данном исследовании авторы используют многокомпонентную систему связующих: полиэтилен (10%), этилен винилацетат (10%), парафин (60%), дибутилфталат (5%) и стеариновая кислота (15%), а также вводят в порошок 0,5 млн доли от общего объема оксида магния и иттрия в виде нитратов – для уменьшения роста кристаллов в процессе спекания. Авторы отмечают, что взаимодействие между полярными компонентами связующего и поверхностью порошка оксида алюминия было идентифицировано как кислотно-щелочная реакция Льюиса между гидроксильными кислотными остатками органических материалов, «прилипших» к кислороду на поверхности оксида алюминия. Такое взаимодействие может привести к уменьшению вязкости потока системы «порошок–связующая смесь» за счет строго пред-

почтительной адгезии стеариновой кислоты к поверхности порошка и пластификации компонентов связующей смеси. Стеариновая кислота может преимущественно адсорбироваться на поверхности частиц оксида алюминия с толщиной покрытия 3 нм, и вязкость снижается благодаря модификации стеариновой кислоты. Загрузка порошка оксида алюминия (56% по объему) оптимальна с точки зрения реологических свойств и полученной пористости. Средний размер зерен спеченного тела составлял 30–50 мкм, без существенных пор и аномального роста зерен. В результате получены небольшие по размеру изделия из оксида алюминия с точно заданной формой (рис. 4).

Таким образом, этот метод демонстрирует превосходство литья под давлением для получения светопрозрачных изделий из оксида алюминия, поскольку обеспечивает стабильный, эффективный и низкий по стоимости способ получения малоразмерных и высокоточных изделий.

Общепризнано, что добавление небольшого количества MgO к оксиду алюминия способствует уплотнению порошка Al₂O₃ и облегчает получение изделий с почти 100%-ной теоретической плотностью [39]. Поскольку необходимы малые концентрации, то достичь правильного распределения оксида магния в порошке трудно и это оказывает решающее влияние на свойства полученного материала. В данной работе проведена попытка улучшить распределение оксида магния в порошке оксида алюминия путем использования стеариновой кислоты и ацетата магния как эффективных присадок для MgO, а в качестве связующей смеси – парафина и полипропилена. При этом после процесса смешения всех компонентов с порошком производили нагрев полученной смеси в воздухе для образования частиц MgO. Далее проведены исследования способа удаления связующего и остатков магнийсодержащих веществ. Оказалось, что парафиновый воск и полипропилен можно удалить посредством растворения в гептане, тогда как магнийсодержащие вещества в нем нерастворимы, однако их температуры плав-

ления гораздо ниже температуры плавления полипропилена (169°C). Поэтому все компоненты удалены после термического пиролиза, экстракции гептаном и повторного пиролиза. После спекания наибольшая плотность достигнута с использованием магнийстеарата. Установлено, что при использовании магнийстеарата размер пор меньше, их форма более округлая, чем форма пор у образцов, изготовленных с использованием порошков оксида и ацетата магния. Поскольку присутствие пор неправильной формы является существенным недостатком – в них концентрируются напряжения, то свойства материала, полученного с добавлением магнийстеарата, выше. Кроме того, авторы утверждают, что порошок MgO менее эффективен для агломерации, чем магнийстеарат – из-за высокой плотности или низкого удельного объема.

В работе [40] представлен пример возможности использования водорастворимых связующих, которые имеют особое свойство гелеобразования при охлаждении ниже температуры их гелеобразования. В данной работе авторы исследовали процесс литья под давлением порошка оксида алюминия при использовании природных полисахаридов – агарозы и агара. Агар и агароза образуют

невязкие растворы при температурах, близких к 100°C, которые затем затвердевают при охлаждении до 37 и 45°C соответственно. В большинстве случаев удаление связующего вещества происходит при температуре от 250 до 500°C. При этом полученные образцы имеют хорошие прочность, плотность (96%) и сравнимы по свойствам с литыми деталями, изготовленными более традиционными методами.

В результате проведенного анализа научных литературных данных можно сделать вывод, что в большинстве случаев исследователи выбирают смешанные системы связующих веществ, а также используют вспомогательные вещества для достижения заданных свойств изделия. Наиболее часто используемыми связующими являются термопластичные полимеры или парафин, поскольку они позволяют использовать более простые методы их удаления из образцов. Однако из-за большого числа параметров, влияющих на процесс удаления связующей системы, например состав связующего, характеристика порошка и т. д., трудно определить общий метод и условия удаления связующего материала. Условия этого процесса для каждого случая должны подбираться индивидуально.

ЛИТЕРАТУРА

1. Edirisinghe M.J., Evans J.R.G. Review: Fabrication of engineering ceramics by injection moulding. I. Materials selection //Int. J. High Technology ceramics. 1986. V. 2. P. 1–31.
2. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 373–380.
3. Гончаренко Е.С., Трапезников А.В., Огородов Д.В. Литейные алюминиевые сплавы (к 100-летию со дня рождения М.Б. Альтмана) //Труды ВИАМ. 2014. №4. Ст. 02 (viam-works.ru).
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 60–70.
5. Yea H., Liu X.Ya., Hong H. Fabrication of metal matrix composites by metal injection molding-A review //Journal of materials processing technology. 2008. V. 200. P. 12–24.
6. German R.M. Powder Injection Moulding. Princeton: Metal Powder Industries Federation (MPIF). 1990. 521 с.
7. Алюминиевые сплавы /В кн. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди; Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 143–156.
8. Bandyopadhyay G., French K.W. Injection-molded Ceramics: Critical Aspects Binder Removal Process and Component Fabrication //Journal of the European Ceramic Society. 1993. V. 11. P. 23–34.
9. Евгенов А.Г., Неруш С.В., Василенко С.А. Получение и опробование мелкодисперсного металлического порошка высокохромистого сплава на никелевой основе применительно к лазерной LMD-наплавке //Труды ВИАМ. 2014. №5. Ст. 04 (viam-works.ru).
10. Змичев А.М., Варрик Н.М. Термогравиметрические исследования нитей на основе оксида алюминия //Труды ВИАМ. 2014. №6. Ст. 06 (viam-works.ru).
11. Каблов Е.Н., Чибиркин В.В., Вдовин С.М. Изготовление, свойства и применение теплоотводящих оснований из ММК Al–SiC в силовой электронике и преобразовательной технике //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 20–22.
12. Complex ceramic and metallic shaped by low pressure forming and sublimative drying: pat. 5047182 (A) US; publ. 1991.09.10.
13. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щетанов Б.В. и др. Металлические композиционные материалы на основе Al–SiC для силовой электроники //Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 2. №3. С. 359–368.
14. Глотенков О.Н. Формовочные материалы: Учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. университета. 2004. 164 с.
15. Liu D.-M., Tseng W.J. Binder removal from injection moulded zirconia ceramics //Ceramics International. 1999. V. 25. P. 529–534.
16. Zhang T., Blackburn S., Bridgwater J. Debinding and sintering defects from particle orientation in ceramic

- injection moulding //Journal of Materials Science. 1996. V. 31. P. 5891–5896.
17. Kryachek V.M. Injection molding (review) //Powder Metallurgy and Metal Ceramics. 2004. V. 43. №7–8. P. 336.
18. Trunec M., Cihl G.J. Thermal Debinding of Injection Moulded Ceramics //Journal of the European Ceramic Society. 1997. V. 17. №2–3. P. 203–209.
19. Yun J.W., Lombardo S.J. Determination of rapid heating cycles for binder removal from open pore green ceramic components //Advances in Applied Ceramics. 2009. V. 108. №2. P. 92–101.
20. Lin S.T. Interface control decarburization model for injection moulded parts during debinding //Powder Met. 1997. V. 40. №1. P. 66–68.
21. Lam Y.C., Shengjie Y., Yu S.C.M., Tam K.C. Simulation of Polymer Removal from a Powder Injection Molding Compact by Thermal Debinding //Metallurgical and Materials Transactions A. 2000. V. 31A. P. 2000–2597.
22. Lee H., Choi J.W., Jeung W.Y., Moon T.J. Effect of binder and thermal debinding parameters on residual carbon in injection moulding of Nd (Fe, Co) B powder //Powder Met. 1999. V. 42. №1. P. 41–44.
23. Zhang T., Evans J.R.G. Predicting the Incidence of Voids in the Injection Molding of Thick Ceramic Sections //Journal of the American Ceramic Society. 1993. V. 76. №2. P. 481–86.
24. Krauss V.A., Oliveira A.A.M., Klein A.N., Al-Qureshi H.A., Fredel M.C. A model for PEG removal from alumina injection moulded parts by solvent debinding //Journal of Materials Processing Technology. 2007. V. 182. P. 268–273.
25. Tirumani S. Shivashankar and R.M. German. Effective Length Scale for Predicting Solvent-Debinding Times of Components Produced by Powder Injection Molding //Journal of the American Ceramic Society. 1999. V. 82. №5. P. 1146–52.
26. Yun J.W., Lombardo S.J. Effect of Decomposition Kinetics and Failure Criteria on Binder-Removal Cycles From Three-Dimensional Porous Green Bodies //Journal of the American Ceramic Society. 2006. V. 89. №1. P. 176–183.
27. Levenfeld B., Gruzza A., Varez A., Toralba J.M. Modified metal injection moulding of 316L stainless steel powder using thermosetting binder //Powder Met. 2000. V. 43. №3. P. 233–237.
28. Zhipeng X., Huang Y., Wu J., Zheng L. Microwave debinding of a ceramic injection moulded body //Journal of materials science letters. 1995. V. 14. P. 794–795.
29. Fall M., Vandervoort N., Shulman H. The Role of Microwaves in Binder Removal //Ceramic industry. 2009. №11. P. 12–14.
30. Schaffer G.B., Sercombe T.B., Lumley R.N. Liquid Phase Sintering of Aluminum Alloys //Materials Chemistry and Physics. 2001. V. 67. P. 85–91.
31. MacAskill I.A., Hexemer R.L., Donaldson I.W., Bishop D.P. Effects of Magnesium, Tin and Nitrogen on the Sintering Response of Aluminum Powder //Journal of Materials Processing Technology. 2010. V. 210. P. 2252–2260.
32. Kristoersson A., Roncari E., Galassi C. Comparison of Different Binders for Water-based Tape Casting of Alumina //Journal of the European Ceramic Society. 1998. V. 18. №14. P. 2123–2131.
33. Gorjan L., Dakskobler A., Kosmac T. Strength Evolution of Injection-Molded Ceramic Parts During Wick-Debinding //Journal of the American Ceramic Society. 2012. V. 95. №1. P. 188–193.
34. Yang X., Liu Q. Water-Soluble Binder System Based on Poly-Methylmethacrylate and Poly-Ethylene Glycol for InjectionMolding of Large-Sized Ceramic Parts //Int. J. Appl. Ceram. Technol. 2013. V. 10. №2. P. 339–347.
35. Yang X.F., Xie Z.P., Liu G.W., Huang Y. Dynamics of water debinding in ceramic injection moulding //Advances in Applied Ceramics. 2009. V. 108. №5. P. 295–300.
36. Hanemann Th., Weber O. Polymethylmethacrylate/polyethyleneglycol-based partially water soluble binder system for micro ceramic injection moulding //Microsyst. Technol. 2014. V. 20. P. 51–58.
37. Bakan H.I. Injection moulding of alumina with partially water soluble binder system and solvent debinding kinetics //Materials Science and Technology. 2007. V. 23. №7. P. 787–791.
38. Liu W., Bo T.Z., Xie Z.P., Wu Y., Yang X.F. Fabrication of injection moulded translucent alumina ceramics via pressureless sintering //Advances in Applied Ceramics. 2011. V. 110. №4. P. 251–254.
39. Hwangw K.S., Hsieh C.C. Injection-Molded Alumina Prepared with Mg-Containing Binders //Journal of the American Ceramic Society. 2005. V. 88. №9. P. 2349–2353.
40. Fanelli An.J., Silvers R.D., Frei W.S., Burlew J.V., Marsh G.B. New Aqueous Injection Molding Process for Ceramic Powders //Journal of the American Ceramic Society. 1989. V. 72. №10. P. 1833–1836.