

УДК 666.3

В.А. Воронов¹, А.С. Чайникова¹, Д.М. Ткаленко¹**ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ИЛИ ВОДНЫХ СВЯЗУЮЩИХ НА ОСНОВЕ ОКСИДОВ ЭЛЕМЕНТОВ III ИЛИ IV ГРУПП ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ ДЛЯ ЛИТЬЯ ОТЛИВОК ИЗ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ СПЛАВОВ (обзор)**

DOI: 10.18577/2713-0193-2021-0-2-73-84

Рассмотрен опыт использования органических и водных связующих на основе оксидов кремния или алюминия при изготовлении литейных керамических форм и установлены тенденции мировых производителей в данной отрасли к повышению качества, точности и эксплуатационной надежности литых изделий, особенно деталей ответственного назначения из титановых, интерметаллидных и жаропрочных сплавов, получаемых методом литья по выплавляемым моделям. Приведена информация о результатах исследования физико-механических свойств керамических форм и дефектной зоны внешней поверхности отливок из различных сплавов.

Ключевые слова: оксид кремния, оксид алюминия, органическое связующее для изготовления литейных керамических форм, водное связующее для изготовления литейных керамических форм.

V.A. Voronov¹, A.S. Chaynikova¹, D.M. Tkalenko¹**ASPECTS OF USAGE OF ORGANIC OR AQUEOUS BINDERS BASED ON III OR IV GROUP ELEMENTS OXIDES IN THE PRODUCTION OF CERAMIC MOLDS FOR CHEMICALLY ACTIVE ALLOYS CASTING (review)**

The article considers the experience of using organic and aqueous binders based on silicon or aluminum oxides in the manufacturing of ceramic casting molds, and tendencies of world manufacturers in this industry to improve the quality, accuracy and operational reliability of cast products, especially critical parts made of titanium, intermetallic and heat-resistant alloys obtained by investment casting. The paper gives information on the results of studying physical and mechanical properties of ceramic molds and defect zone of the outer surface of castings made of various alloys.

Keywords: silicon oxide, aluminum oxide, organic binder for making ceramic casting molds, water binder for manufacturing of casting ceramic molds.

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

Введение

В настоящее время при изготовлении керамических форм для литья отливок из химически активных сплавов для деталей авиационных двигателей по выплавляемым восковым моделям используется технология, основанная на принципе: окунание–обсыпание–послойная сушка. Данная технология позволяет достичь необходимых значений физико-механических свойств керамических форм, а также соблюсти высокие требования точности геометрических размеров и шероховатости поверхности отливок при изготовлении большого количества одинаковых сложнопрофильных изделий. При выборе материалов и технологии изготовления керамических форм необходимо

учитывать сложные условия, в которых они находятся на различных этапах эксплуатации, а также специфику отливки в них химически активных сплавов: высокую химическую активность легирующих элементов (Ti, Al, Cr, Mo, W, Co, Nb) и углерода, высокую температуру плавления сплавов; низкое остаточное давление воздуха при плавке и формировании отливки [1–5]. Отливки, полученные литьем по выплавляемым моделям, характеризуются высокой размерной точностью (до 4–5 класса) и чистотой поверхности (шероховатость по R_z – до 10 мкм и R_a – до 1,25 мкм), что по точности геометрических размеров максимально приближено к готовой детали и в некоторых случаях не требуется механическая обработка. Такой способ изготовления отливок включает несколько операций с использованием различных материалов. Это определяет повышенную себестоимость готовой продукции [6–8].

Для изготовления отливок с высоким уровнем воспроизводимости и стабильности свойств к литейным керамическим формам предъявляются следующие требования.

– Точность воспроизведения конфигурации моделей – высокие требования к реологическим свойствам (вязкость, смачиваемость, адгезия и др.) керамической суспензии и к морфологии распределения частиц по размерам материала обсыпки. В частности, наиболее прочное прилипание суспензии и воспроизведение конфигурации восковой модели формой получается при условии достижения угла смачивания <45 градусов и вязкости 25–60 с (по ВЗ-4) керамической суспензии для лицевого слоя.

– Прочность керамической формы. При формировании керамической формы образуются внутренние напряжения, при достижении предела прочности которых появляются трещины и расслоения слоев. Этот процесс также обусловлен природой и реологическими свойствами как связующих растворов, так и керамической суспензии – в частности, степенью ее наполненности и условиями сушки покрытия, а также последующего высокотемпературного обжига керамической формы.

– Термическая стойкость. На термическую стойкость керамической формы влияют: температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР); модуль упругости конструкции оболочки и перепад температур в оболочке. При прокаливании керамической формы и при процессе заливки ее сплавом между наружными и внутренними слоями возникает градиент температуры и изменение объема, что вызывает растягивающие и/или сжимающие напряжения, которые могут привести к образованию трещин. В результате несоответствия значений ТКЛР в слоях керамической формы (особенно в контактном слое) также возможно: вспучивание облицовочного слоя, выкрашивание поверхностных зерен по линиям наибольших напряжений, образование трещин в контактном слое, что приводит к образованию дефектов на поверхности отливок.

– Газопроницаемость и газотворность. Керамическая форма представляет собой пористое огнеупорное тело. От газопроницаемости во многом зависит степень удаления газотворных составляющих из формы. Все газотворные составляющие (органические и легколетучие) из состава керамической формы должны быть удалены прокалкой при температуре 950–1000 °С в течение не менее 3–4 ч.

– Химическая стойкость и инертность. При заливке сплава с момента его соприкосновения с лицевым слоем керамической формы и в процессе его кристаллизации происходит взаимодействие расплава с кислородом воздуха и оксидами оболочки – в результате образуется контактная зона (пригар). В связи с тем, что устранение пригара процедура сложная и трудоемкая, разработчики стараются его исключить, подбирая огнеупорные материалы для керамической формы с физико-химическими свойствами, наиболее подходящими для конкретного сплава. При этом керамическая форма должна обладать определенной структурой (рис. 1) [8–11].

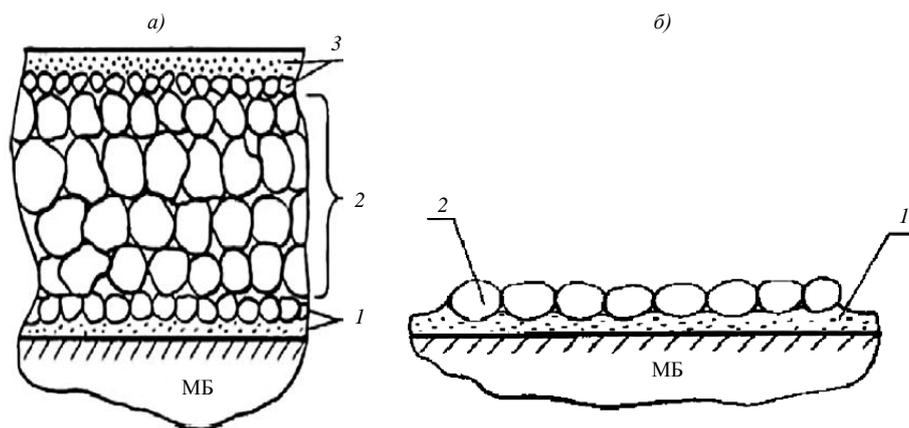


Рис. 1. Структура многослойной керамической формы (а): 1 – лицевой слой; 2 – промежуточный слой; 3 – наружный слой [11]; структура лицевого слоя (б) при нанесении на модельный блок (МБ): 1 – керамическая суспензия; 2 – термостойкие частицы материала обсыпки [11]

В большинстве случаев в качестве исходного материала применяют кварц (SiO_2) – как кристаллический, так и аморфный, отличающиеся строением и значениями ТКЛР. При обжиге кристаллический кварц претерпевает четыре полиморфных превращения с изменением плотности с 2650 до 2200 кг/м^3 (рис. 2). При заливке сплавов контактный слой оболочки нагревается до 1500 °С, что приводит к кристобалитизации кварца с увеличением размеров зерен и снижению прочности керамической формы в момент кристаллизации сплава [11, 12].

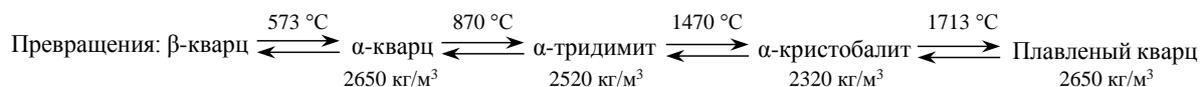


Рис. 2. Схема полиморфных превращений кристаллического кварца с образованием фаз разной плотности [12]

Корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) является термодинамически устойчивой модификацией оксида алюминия во всем интервале температур и единственной модификацией, представленной в природе. Плотность корунда составляет 3950–4020 кг/м^3 . Остальные модификации оксида алюминия являются синтезированными. Наиболее распространенные прекурсоры оксида алюминия – гидроксиды и оксигидроксиды алюминия, причем все они, кроме диаспора, переходят в фазу корунда через переходные метастабильные модификации оксида алюминия, которые подразделяют на низкотемпературные (γ -, ε -, $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$), образующиеся при температурах 500–700 °С, и высокотемпературные (δ -, κ -, $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$), образующиеся при 700–900 °С. Последующий обжиг приводит к образованию корунда при температурах 900–1200 °С (рис. 3) [13].

Однако наличие в оксиде алюминия примесей, таких как соединения натрия и кремния, при использовании его в керамической форме приводит к их размягчению при температуре 1060 °С и резкому падению прочности формы при температуре 1200 °С. Не следует также использовать модификацию $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в качестве материала обсыпки при изготовлении керамической формы, так как данная модификация вызывает активное химическое взаимодействие со сплавом и уменьшение объема зерен (плотность $d_{\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3} = 3700 \text{ кг/м}^3 \rightarrow d_{\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3} = 3900 \text{ кг/м}^3$) [14]. При производстве литейной керамической формы требуется получение точной восковой модели изделия,

применение керамической суспензии, включающей водные или органические связующие на основе оксидов и полидисперсных термостойких частиц оксидов элементов III и IV групп Периодической системы элементов, органические и неорганические добавки, а также термостойкие частицы для обсыпки. Для выполнения всех вышеуказанных критериев керамическая суспензия должна обладать: высокой седиментационной устойчивостью; смачиваемостью как поверхности модельного блока, так и последующих керамических слоев; «живучестью», т. е. сохранением технологической вязкости до начала желатинизации.

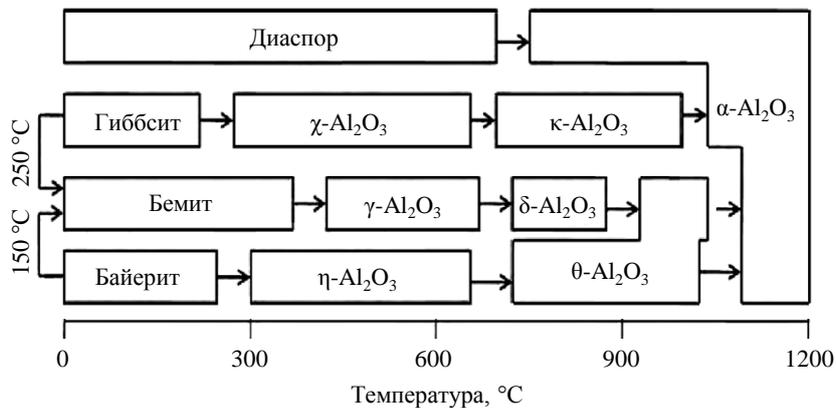


Рис. 3. Схема полиморфных превращений гидроксидов и оксидов алюминия [13]

В настоящее время на литейных предприятиях массово используют органические и водные связующие на основе оксида кремния, при этом ведутся работы по использованию водных связующих на основе алюминия. При изготовлении керамической формы широко используются этилсиликатные связующие, относящиеся к кислым связующим. При этом этилсиликатное связующее в исходном состоянии не может применяться в качестве связующего, так как не придает керамической форме прочности. Для получения связующих растворов исходное этилсиликатное связующее необходимо гидролизовать, чтобы линейное строение молекул исходного этилсиликатного связующего преобразовать в разветвленное и частично сшитое или в коллоидное состояние. При этом «живучесть» гидролизованного этилсиликатного связующего составляет от 2 до 7 сут [15–19].

Другим типом связующего на основе оксида кремния является водорастворимое связующее на основе коллоидного кремнезема, которое представляет собой водную дисперсию сферических наночастиц SiO_2 , связанных друг с другом и способных образовывать связи со всеми огнеупорными частицами оксидов. Кремнезем в водном связующем находится в аморфном состоянии. Вязкость этилсиликатных связующих значительно больше вязкости водно-коллоидных связующих и сравнима со значениями вязкости для воды. При этом наночастиц SiO_2 в этих связующих содержится не менее 25 % (по массе). Частицы в водно-коллоидных связующих не коагулируют и обладают высокой седиментационной устойчивостью. Кроме того, «живучесть» суспензий на основе водно-коллоидного связующего превышает 3 года.

Актуальность данной работы заключается в анализе опыта использования органических и водных связующих на основе оксидов кремния или алюминия при изготовлении литейных керамических форм и установлении механизмов и тенденций современного производства для повышения качества, точности и эксплуатационной надежности литых изделий, особенно деталей ответственного назначения из титановых и жаропрочных сплавов, получаемых методом литья по выплавляемым моделям.

В данной обзорной работе были поставлены следующие задачи: установление влияния природы связующего на реологические свойства (текучесть, седиментационную и смачивающую способность) керамической суспензии и ее «живучесть»; установление влияния химического состава связующего на термические и физико-механические свойства керамической формы – в частности, на изменение геометрических размеров и газотворную способность керамической формы; выявление закономерностей влияния химического состава связующего на поверхностные дефекты отливок из жаропрочных сплавов и на толщину зоны взаимодействия на границе «металл–керамическая форма»; установление критериев выбора связующего для изготовления керамических форм для литья отливок из различных химически активных сплавов.

Материалы и методы

В данной обзорной работе представлены результаты применения связующих на основе оксидов кремния или алюминия, используемых при изготовлении литейных керамических форм. Приведены результаты исследования химического и фазового составов, а также вязкости связующих различных составов. Представлены результаты определения предела прочности при изгибе образцов (в виде керамических пластин) керамической оболочковой формы, а также приведены значения шероховатости поверхности керамической формы и с помощью электронной микроскопии изучена зона взаимодействия на границе «металл–керамическая форма».

Все керамические суспензии подготовлены по единой технологии. В смеситель вводили связующее и наполнитель, перемешивали до получения гомогенной массы, доводя до нужной вязкости, и затем на модельном блоке формировали покрытие методом послойного нанесения. Обсыпку блоков осуществляли термостойкими частицами различных фракций по существующей в серийном производстве технологии. Модельную массу из полученных керамических форм удаляли в бойлерклавах при температуре до 100 °С. Керамические формы подвергали обжигу при температурах от 1000 до 1350 °С в муфельных печах.

Результаты и обсуждение

При литье титановых и интерметаллидных сплавов на поверхности отливки образуется альфированный слой (толщиной до 500–600 мкм), обладающий повышенной твердостью и хрупкостью. При эксплуатации отливки измененные свойства ее поверхности могут стать причиной неисправной работы и привести к ее разрушению. Для удаления данного слоя используют методы травления растворами кислот или механическую обработку [15]. Таким образом, уменьшение толщины альфированного слоя позволит снизить количество выбросов вредных веществ в окружающую среду и положительно скажется на экономике производства за счет снижения расхода металла при выпуске изделий.

Очевидно, что литье по выплавляемым восковым моделям отливок из химически активных сплавов для деталей авиационных двигателей является сложным и многостадийным процессом, требующим решения ряда технических и технологических вопросов на каждой стадии производства для обеспечения качества конечного продукта и снижения процента брака [16].

В авиастроении, как и в других отраслях промышленности, при изготовлении отливок широкое распространение получили литейные керамические формы на основе электрокорунда, получаемые по выплавляемым моделям с применением этилсиликатных связующих – например, марок ЭТС-32 и ЭТС-40. При этом в

большинстве случаев при изготовлении керамических форм используют гидролизованное этилсиликатное связующее, гидролиз которого осуществляют в присутствии органических растворителей – в частности, при добавлении этилового спирта [17]. Однако данный процесс является пожаро- и взрывоопасным, трудно контролируемым и дорогостоящим, так как он связан с использованием органических растворителей. Проведение гидролиза без органических растворителей приводит к тому, что процесс становится нестабильным, как и свойства изготовленных на его основе керамических форм. Кроме того, этилсиликатное связующее является токсичным, а в процессе его отверждения в ряде случаев требуется применение газообразного аммиака, а также установка необходимого оборудования для улавливания и снижения вредных выбросов [18]. В связи с этим в настоящее время широкое применение находит готовое этилсиликатное связующее марки ГС (производство ООО «Пента-91»), которое не требует проведения операции гидролиза и предусматривает возможность послойной сушки без воздействия газообразного аммиака [17]. Однако при использовании данной технологии на поверхности отливок образуется насыщенный примесями и отрицательно влияющий на характеристики изделия поверхностный дефектный слой, вызванный химическим взаимодействием на границе «металл–керамическая форма». Существенными недостатками данных связующих являются также их низкая экологичность и ощутимые затраты на производство отливок, вызванные непродолжительной «живучестью» керамической суспензии и конечным качеством отливок в связи с их последующей механической обработкой [19]. С целью возможной замены этилсиликатных связующих проведены исследования влияния различных кремнийсодержащих связующих на водной основе («Армосил» разной модификации (Россия), Remasol (Великобритания), ЕНТ Binder (США)) на физико-механические свойства оболочковых форм и качество поверхности отливок – в частности, на толщину альфированного слоя и уровень шероховатости поверхности отливки.

В работе [20] отмечено, что основой кремнийсодержащих связующих являются синтетические кремнезоли импортного и российского производства под различными торговыми марками: Syton P и Syton 2x (Monsanto Chemicals Co Ltd); Ludox SM40 (фирма Du Pont); кремнезольное связующее «Сиалит-20» (ЗАО «Силикат»); водная дисперсия выращенных сферических частиц оксида кремния «СИЛАРМ» (ООО «СИТЕК»), «Армосил» различных марок, микрокремнеземистая пыль (АО «Кузнецкие ферросплавы») и др. Поскольку сырье для производства кремнезольных связующих представляет собой синтезированный аморфный кремнезем, оно обладает повышенной стоимостью по отношению к природному сырью, что особенно характерно для импортной продукции.

В работе [21] для изготовления оболочковых форм использовали керамическую суспензию с условной вязкостью 27–75 с, состоящую из связующего и микропорошка электрокорунда фракции F1200 (с добавлением мелкодисперсного порошка алюминия марки АСД-4); обсыпным материалом являлся электрокорунд номеров 20 и 50, с последующим послойным нанесением керамических слоев и сушкой на воздухе в течение 60–90 мин и последующим прокаливанием сформированной керамической формы в муфельных печах в температурном диапазоне от 1000 до 1200 °С. Анализ результатов проведенных испытаний образцов керамических форм показал, что наиболее подходящими физико-механическими свойствами обладали литейные формы после обжига при температуре 1200 °С. Добавление в водное связующее до 7,5 % от массы керамической суспензии мелкодисперсного порошка алюминия марки АСД-4 способствовало увеличению физико-механических характеристик керамических

образцов, предел прочности при изгибе которых при комнатной температуре превышал 25 МПа. Добавление такого же количества порошка марки АСД-4 в кремнезольное связующее отечественного производства («Армосил» различных марок) приводило к значительному увеличению продолжительности сушки керамической формы (более чем в 3 раза относительно импортных аналогов), поэтому рекомендовано применять связующее марки Remasol с добавлением порошка марки АСД-4 в количестве 5 % ($\sigma_{\text{в.и}}^{20^\circ} = 38,35$ МПа) и 7,5 % от массы керамической суспензии ($\sigma_{\text{в.и}}^{20^\circ} = 42,47$ МПа) (рис. 4). Результаты исследования поверхности отливок показали, что при взаимодействии титановых отливок с формами на основе гидролизованного этилсиликатного связующего марки ЭТС-40 наблюдался альфированный слой толщиной от 210 до 239 мкм. На отливках, контактировавших с керамической формой на основе связующих ЕНТ Binder, «Армосил АМ» и «Армосил для титановых сплавов», также наблюдался альфированный слой, толщина которого составляла: 181–222; 219 и 315 мкм соответственно, что сопоставимо с значениями, полученными при использовании этилсиликатного связующего. На керамических формах и отливках, контактировавших с керамической формой на основе чистого связующего марки Remasol и связующего с добавками порошка АСД-4, альфированный слой практически не наблюдался (максимальная толщина слоя – от 15 до 20 мкм) (рис. 5).

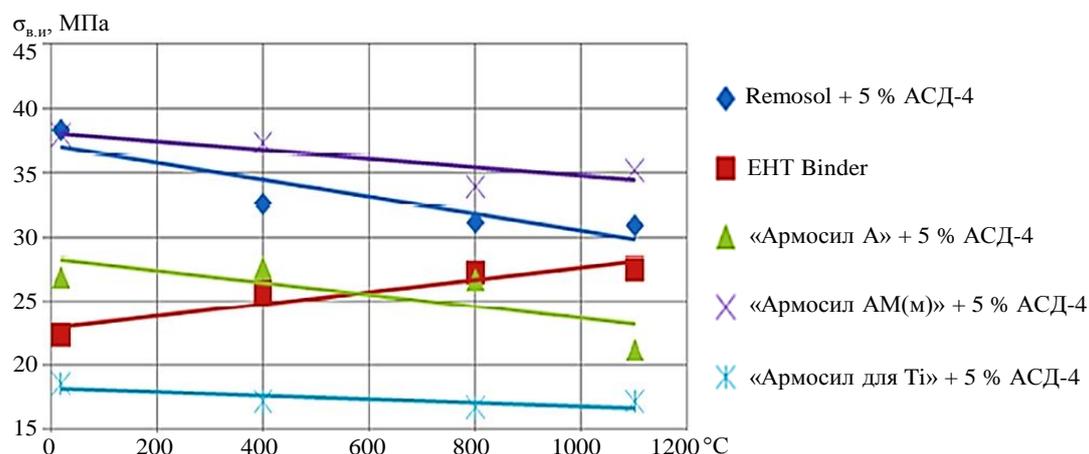


Рис. 4. Температурные зависимости предела прочности при изгибе образцов форм с добавлением 5 % от массы керамической суспензии порошка марки АСД-4 (температура прокали формы 1200 °C) [21]

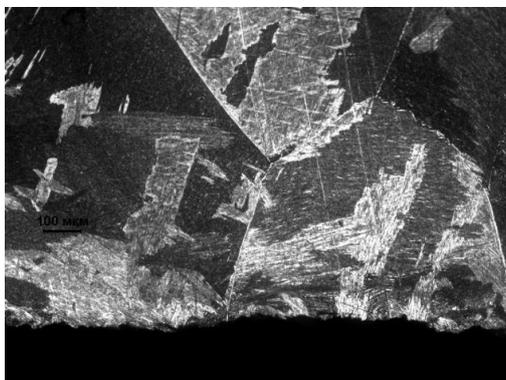


Рис. 5. Микроструктура поверхности контакта сплава с керамической формой на основе связующего марки Remasol с добавлением 5 % от массы керамической суспензии порошка марки АСД-4 [21]

В работе [22] отмечается, что в ПАО «ОДК-УМПО» изготовили отливки лопаток компрессора высокого давления из титановых интерметаллидных сплавов на базе сплава TNM с использованием водного связующего EHT Binder и микропорошка оксида иттрия зернистостью 125–300 меш (первый (лицевой) слой) для обеспечения минимального взаимодействия металла с формой. Последующие керамические слои оболочки изготавливали из керамической суспензии на основе гидролизованного раствора ЭТС-40, материалом обсыпки и наполнителя являлся электрокорунд. Отмечено, что технологическая сложность процесса и наличие санкций со стороны европейских государств на поставку в Россию водных связующих значительно ограничивают серийное изготовление фасонных отливок из гамма-сплавов на российских предприятиях с использованием импортных материалов.

В работе [23] с целью замены импортных материалов для изготовления керамических форм в отечественной промышленности разработаны кремнезольные связующие на водной основе марки ВТ. Эти связующие являются экологически чистыми материалами, технология их использования при литье по восковым моделям не требует применения вредных веществ. Суспензии на основе таких связующих отличаются высокой «живучестью», срок их службы составляет не менее 8 мес без потери свойств. Кремнезольными являются устойчивые коллоидные растворы наночастиц диоксида аморфного кремния SiO_2 в водной среде. Находящиеся в воде аморфные частицы SiO_2 имеют сферическую форму и отрицательный заряд поверхности частиц. При этом частицы в растворе обладают повышенной седиментационной устойчивостью и практически не склонны к осаждению или гелеобразованию. Концентрация частиц SiO_2 в связующих составляет от 22 до 30 %, а размер частиц – от 7 до 16 нм.

В работе [24] специалисты ГНИИХТЭОС совместно с МАТИ-РГТУ им. К.Э. Циолковского разработали бескремнеземное связующее для производства отливок ответственного назначения. Бескремнеземное связующее получали по методике, описанной в патенте [25]. Проведены также сравнительные дилатометрические исследования керамических образцов корундовых форм, полученных с использованием бескремнеземного и этилсиликатного связующих, которые характеризовались близкими кривыми усадки в диапазоне температур от комнатной до 1500 °С. Вследствие этого для повышения прочностных характеристик керамических форм, улучшения качества отливок и снижения себестоимости литья изготавливали комбинированные керамические формы, у которых два первых слоя выполнены на бескремнеземном связующем, а последующие слои – на гидролизованном этилсиликатном растворе. К сожалению, не была определена толщина зоны взаимодействия на поверхности отливок, а проведены лишь исследования по определению содержания кремния на лицевом слое керамической формы после заливки жаропрочным сплавом при температуре 1650 °С, что не дает возможности полноценно оценить преимущество использования разработанного связующего относительно аналогов. В итоге установлено, что на лицевой поверхности комбинированной керамической формы после контакта с металлом кремний и кремнийсодержащие соединения отсутствуют.

В работах [26, 27] проведены исследования по применению литья по восковым моделям бескремнеземных связующих на основе алюмоборфосфатного концентрата (АБФК). В результате установлено, что применение бескремнеземных связующих на основе АБФК ускоряло стадию формообразования и улучшало физико-механические свойства керамических форм по сравнению с формами на основе этилсиликатных связующих.

В работах [28–31] установлено, что использование органических и водных связующих на основе кремния и его соединений при изготовлении первого (лицевого) и

последующих слоев литейной керамической формы приводит: к образованию на рабочей поверхности оксида кремния SiO_2 в свободном виде (кварц, тридимит, кристобалит) и нестехиометричного муллита, что вызывает активное взаимодействие на границе «металл–керамическая форма» и приводит к появлению поверхностных дефектов при формировании точных отливок ответственного назначения, требующих дополнительных технологических операций по их удалению. Полученные данные свидетельствуют о том, что в вакууме уже при температуре формы не более $1400\text{ }^\circ\text{C}$ происходит разложение кремнезема на монооксид кремния и кислород, при этом давление паров над ним достигает $0,0032\text{ Па}$, при повышении температуры до $1550\text{--}1700\text{ }^\circ\text{C}$ давление увеличивается до $0,133\text{--}1,03\text{ Па}$. По сравнению с оксидом кремния оксид алюминия Al_2O_3 более устойчив к разложению в вакууме (суммарное давление паров над оксидом алюминия Al_2O_3 составляет $0,0009\text{ Па}$ при температурах до $1700\text{ }^\circ\text{C}$) [29–31].

В работах [32, 33] проведены эксперименты по установлению влияния связующих на основе Al_2O_3 и SiO_2 при литье отливок по выплавляемым моделям на формирование альфированного слоя на поверхности отливок из титанового сплава ВТ5Л. В результате установлено, что при контакте расплава с керамической формой в течение $12,5$ мин оксид алюминия (в отличие от диоксида кремния) является инертным к расплаву титана при температуре до $1800\text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме, при этом инертность имеет кинетическую природу, поскольку термодинамический расчет указывает на возможность химического взаимодействия Al_2O_3 с расплавом титана при высоких температурах.

Одним из критериев оценки качества керамических суспензий является динамика изменения дзета-потенциала, т. е. изменение дисперсности частиц в течение определенного промежутка времени, которая в свою очередь влияет на агрегативную и седиментационную устойчивость всей системы. Для устранения этой проблемы предусмотрены различные диспергирующие и стабилизирующие добавки и непрерывное перемешивание керамической суспензии. В работе [34] использовали водные связующие: алюмозоль VP Disp W640XC2 (Австрия) и кремнезоль Keycote (США), а также изучали изменение параметров водных керамических суспензий в зависимости от времени. Отмечено, что использование связующих на водно-коллоидной основе вызывает проблемы, связанные со смачиваемостью восковых моделей, но ряд преимуществ подтверждает возможность их использования при выборе оптимального состава керамической суспензии. Проведенные исследования показали, что полученные суспензии отвечают всем техническим требованиям на разных стадиях производства и технологический процесс изготовления литейных форм на автоматизированном комплексе внедрен в производство АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь).

В работе [35] при изготовлении литейных керамических форм использовали водные связующие марок «Алюмокс» и Remal 20 на основе оксида алюминия. Установлено, что применение алюмозоль в производстве отливок весьма затруднительно в связи с обратимым отверждением в керамической форме, что требует определенных условий сушки слоев и удаления модельной массы. Керамические суспензии на основе данного типа связующих рекомендуется применять только для лицевого (контактного) слоя, а обжиг керамических форм целесообразно проводить при температуре $>1250\text{ }^\circ\text{C}$, что в свою очередь может привести к удорожанию стоимости изготовления как керамических форм, так и деталей ответственного назначения.

В работе [36] представлен способ изготовления комбинированных корундовых оболочковых форм при литье по выплавляемым моделям для получения отливок из жаропрочных сплавов. Определены основные технические характеристики образцов керамических форм: пористость 26–27 %, предел прочности при изгибе 27–30 МПа, а также установлено, что достигается меньшее взаимодействие лицевого слоя керамической формы на основе связующего марки «Алюмокс» (чем при использовании керамической формы на основе гидролизованного связующего ЭТС-40) с расплавом жаропрочного сплава (толщина дефектного слоя составила 10–20 мкм) в процессе заливки и охлаждения сплава ЖС26-ВИ.

Заключения

Таким образом, в данной обзорной работе установлено, что при изготовлении керамических форм на основе различных связующих и литье по выплавляемым моделям отливок из титановых, интерметаллидных и жаропрочных сплавов, заливаемых в условиях вакуума:

– использование этилсиликатных связующих приводит к образованию поверхностного дефектного слоя, вызванного химическим взаимодействием на границе «металл–керамическая форма». При этом керамическая суспензия на их основе нестабильна и обладает низкой экологичностью и «живучестью»;

– использование кремнезоль обеспечивает достижение стабильной системы с длительным сроком хранения (>1 года). При этом использование связующих марок ЕНТ Binder и Remasol обеспечивает достижение необходимых физико-механических свойств керамической формы, а при использовании связующего Remasol при заливке титанового сплава альфированный слой практически отсутствует (не более 20 мкм), что в 10 раз превосходит результат, полученный с применением этилсиликатных связующих;

– водные связующие на основе оксида алюминия являются наиболее подходящей альтернативой органическим и водным связующим на основе кремния и его соединений при изготовлении первых двух (лицевых) слоев керамической формы для литья по выплавляемым моделям отливок из титановых, интерметаллидных и жаропрочных сплавов, заливаемых в условиях вакуума. Применение водного связующего на основе оксида алюминия позволяет получить необходимые физико-механические свойства керамической формы и достичь отсутствия взаимодействия на границе «металл–керамическая форма», а следовательно, избавиться от образования поверхностных дефектов на отливках и снизить шероховатость их поверхности.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 36–52.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 5. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-5-24-38.
4. Каблов Е.Н., Толорайя В.Н. ВИАМ – основоположник отечественной технологии литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД и ГТУ // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 105–117.

5. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Вершков А.В. Редкие металлы и редкоземельные элементы – материалы современных и будущих высоких технологий // Труды ВИАМ. 2013. № 2. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 02.12.2020).
6. Иванов В.Н., Казеннов С.А., Курчман Б.С. Литье по выплавляемым моделям. М.: Машиностроение, 1984. 408 с.
7. Репях С.И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. Днепропетровск: Лира, 2006. 1056 с.
8. Иванов И.Н. Экономика промышленного предприятия. М.: Инфра-М, 2018. 320 с.
9. Гусева М.А., Асланян И.Р. Влияние наполнителей на реологические характеристики модельных композиций для литья по выплавляемым моделям // Труды ВИАМ. 2019. № 5 (77). Ст. 11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-5-94-102.
10. Гусева М.А., Асланян И.Р., Пономаренко С.А. Исследование реологии модельных композиций для литья по выплавляемым моделям в зависимости от природы и соотношения основных компонентов // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-126-134.
11. Оборин Л.А., Чернов Н.М., Медведев К.А., Иванов А.А. Литье по выплавляемым моделям: учеб. пособие. Красноярск: Сибирский федер. ун-т, 2009. 133 с.
12. Максютин Л.Г., Шилов А.В., Звездин В.Л., Коряковцев А.С. Литье по выплавляемым моделям отливок авиационно-космического назначения: учеб. пособие. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2005. 140 с.
13. Ptáček P. Strontium Aluminate–Cement Fundamentals, Manufacturing, Hydration, Setting Behavior and Applications. Rijeka: In Tech., 2014. 350 p.
14. Михайлов В.И. Получение и физико-химические свойства материалов на основе нанодисперсных оксидов алюминия и железа (III): дис. ... канд. хим. наук. М., 2016. 129 с.
15. Ламзина И.В., Тарасов А.П., Желтобрюхов В.Ф. Разработка технологии процесса нейтрализации травильных растворов металлургических производств // Вестник БГУ. 2016. № 4. С. 9–15. DOI: 10.22281/2413-9920-2016-02-04-09-15.
16. Пыстогов А.К., Саулин Д.В., Смирнов С.А., Пойлов В.З. Разработка химически стойких составов лицевого слоя форм для литья титановых сплавов // Материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Пермь: Пермск. нац.-иссл. политехн. ун-т, 2019. Т. 2. С. 374–377.
17. Лоханкин А.В. Новые готовые связующие для точного литья // Литейщик России. 2012. № 5. С. 42–44.
18. Гуляева Т.Б., Иоффе М.А., Максимков В.Н., Вечерская Г.И. Этилсиликатные суспензии для керамических форм // Литейное производство. 1992. № 6. С. 18–26.
19. Емельянов В.О., Мартынов К.В., Мутилов В.Н. и др. Водный раствор кремнезоля как альтернатива этилсиликату в ЛВМ // Литейное производство. 2012. № 3. С. 30–31.
20. Гладких И.В. Связующее на основе техногенного сырья для изготовления форм при литье по выплавляемым моделям // Междунар. науч.-техн. конф. «Инновационные технологии в литейном производстве» (Москва, 22–23 апр. 2019 г.). М.: МГТУ, 2019. С. 244–248.
21. Мухамадеев И.Р., Деменок О.Б., Ганеев А.А. и др. Выбор связующих на водной основе для оболочковых форм литья по выплавляемым моделям титановых сплавов // Вестник ЮУрГУ. Сер.: Металлургия. 2015. Т. 15. № 3. С. 95–104.
22. Дашкевич Н.И. Исследование фазового состава и разработка новой технологии приготовления многокомпонентных сплавов на основе алюминидов титана с целью получения фасонных отливок с заданным комплексом служебных свойств: дис. ... канд. техн. наук. М., 2018. 255 с.
23. Вдовин К.Н., Феоктистов Н.А., Овчинникова М.В. Технология формообразования с применением связующих на водной основе в литье по выплавляемым моделям // Актуальные проблемы науки, техники и образования. 2020. Т. 11. № 1. С. 29–31.
24. Варфоломеев М.С., Моисеев В.С., Щербакова Г.И., Стороженко П.А., Шатунов В.В. Высокоогнеупорные корундовые формы на основе бескремнеземного связующего // Неорганические материалы. 2015. Т. 51. № 1. С. 86–92. DOI: 10.7868/S0002337X15010200.

25. Способ получения полиалкоксиалюмоксанов, бескремнеземное связующее на их основе: пат. 2276155 Рос. Федерация; заявл. 21.10.04; опубл. 10.05.06.
26. Знаменский Л.Г., Ивочкина О.В., Верцюх С.С., Варламов А.С. Применение алюмоборфосфатного концентрата в литье по выплавляемым моделям // Литейное производство. 2012. № 3. С. 29–32.
27. Способ приготовления бескремнеземного связующего для литья по выплавляемым моделям химически активных сплавов: пат. 2499650 Рос. Федерация; заявл. 11.10.12; опубл. 27.11.13.
28. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Кочетков А.С. Особенности технологии изготовления высокоогнеупорных керамических форм для получения отливок из γ -TiAl сплавов // Труды ВИАМ. 2020. № 2 (86). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.12.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-31-40.
29. Кулаков Б.А., Дубровин В.К., Карпинский А.В., Чесноков А.А. Технологические особенности получения отливок из титановых сплавов // Литейщик России. 2014. № 1. С. 18–20.
30. Братухин А.Г., Бибииков Е.Л., Глазунов С.Г. и др. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. М.: ВИЛС, 1998. 292 с.
31. Кулаков Б.А., Дубровин В.К., Павлинич С.П., Гойхенберг Ю.Н., Карпинский А.В. Отливки из интерметаллидных титановых сплавов // Литейное производство. 2012. № 7. С. 6–9.
32. Углев Н.П., Пойлов В.З., Каримов Р.А., Саулин Д.В., Селиванов А.М. Анализ особенностей образования α -слоя при литье сплавов титана // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2018. № 2. С. 82–98. DOI: 10.15593/2224-9400/2018.2.07.
33. Никитченко М.Н., Семуков А.С., Саулин Д.В., Ябуров А.Ю. Изучение термодинамической возможности взаимодействия материалов литейной формы с металлом при литье титановых сплавов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2017. № 4. С. 249–263. DOI: 10.15593/2224-9400/2017.4.17.
34. Ордин Д.А., Новокрещенных Е.Н., Пойлов В.З., Углев Н.П. Перевод технологии литья по выплавляемым моделям в авиастроении на керамику, полученную с использованием связующих на водной основе. Обзор выполненных исследований // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2016. № 3. С. 59–74. DOI: 10.15593/2224-9400/2016.3.05.
35. Моисеев В.С., Варфоломеев М.С., Муркина А.С., Щербакова Г.И. Повышение качества литых лопаток ГТД // Литейщик России. 2012. № 5. С. 36–38.
36. Баранова Т.Ф., Валиахметов С.А., Гоголев Г.В. и др. Опыт использования бескремнеземного связующего АЛЮМОКС в технологии изготовления комбинированных керамических форм по выплавляемым моделям для литья жаропрочных сплавов направленной кристаллизацией // Новые огнеупоры. 2016. № 8. С. 1–9.