

УДК 666.7

*Л.И. Рассохина¹, О.Н. Битюцкая¹, М.В. Гамазина¹, А.С. Кочетков¹***ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ВЫСОКООГНЕУПОРНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ γ -TiAl СПЛАВОВ**

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-2-31-40

Представлены результаты исследований новых современных материалов для изготовления высокоогнеупорных керамических форм для получения отливок из γ -TiAl сплавов. Проведены испытания технологических, физических и химических свойств связующего золя оксида иттрия (Y_2O_3) и связующего золя оксида алюминия (Al_2O_3).

По результатам исследований основных свойств золя оксида иттрия принято решение прекратить дальнейшие работы со связующим как бесперспективные в части определения возможности его использования для изготовления керамических форм при получении отливок из γ -TiAl сплавов на установке Leicomelt 5.

По результатам исследования основных свойств водного связующего золя оксида алюминия получены удовлетворительные результаты по прочности керамического слоя, его спеканию при высокотемпературном обжиге, в связи с чем принято решение продолжить работы по исследованию свойств золя оксида алюминия с целью дальнейшей разработки технологии изготовления керамических форм для получения отливок из γ -TiAl сплавов на установке Leicomelt 5.

Ключевые слова: *связующее золя оксида иттрия, связующее золя оксида алюминия, водные связующие, высокоогнеупорные керамические формы, интерметаллиды титана.*

*L.I. Rassokhina¹, O.N. Bityutskaya¹, M.V. Gamazina¹, A.S. Kochetkov¹***FEATURES OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY
OF HIGHLY REFRACTORY CERAMIC MOLDS
FOR CASTINGS FROM γ -TiAl ALLOYS**

The results of research on new modern materials for the manufacture of highly refractory ceramic molds for the production of castings from γ -TiAl alloys are presented. Technological, physical and chemical properties of yttrium oxide binder Sol (Y_2O_3) and aluminum oxide binder Sol (Al_2O_3) were tested.

Based on the results of studies of the main properties of yttrium oxide Sol, it was decided to stop further work with the binder as unpromising in terms of determining the possibility of its use for the manufacture of ceramic molds for the manufacture of castings from γ -TiAl alloys at the Leicomelt 5 furnace.

According to the study of the basic properties of water the binder Sol of aluminum oxide were obtained satisfactory results on the strength of the ceramic layer, it sintering during high-temperature firing, therefore it was decided to continue work on the study of the properties of a Sol of aluminum oxide to further develop the technology for the manufacture of ceramic molds for casting of γ -TiAl alloys on the Leicomelt 5 furnace.

Keywords: *the binder sol of yttrium oxide, the binder sol of aluminium oxide, water-based binders, highly resistant ceramic molds, titanium intermetallics.*

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

Интерметаллиды титана и сплавы на их основе привлекают внимание конструкторов авиационных изделий в связи с уникальным сочетанием их физических и эксплуатационных свойств, реализация которых на практике помогла бы, наряду с инновационным конструкторским подходом, при проектировании новых двигателей решить современные задачи промышленного газо- и турбостроения [1–4].

Интерметаллидные γ -сплавы представляют собой одну из трех групп жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана (α_2 -Ti₃Al, O-Ti₂AlNb, γ -TiAl). Максимальные рабочие температуры современных γ -сплавов находятся в интервале от 650 до 850 °С в зависимости от системы легирования и технологий получения и обработки полуфабрикатов и деталей [5–7]. Таким образом, разработка сплава из интерметаллида титана и технологии изготовления отливок из него являются одним из приоритетных направлений, что отражено в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [8].

Нелегированный интерметаллид TiAl обладает хорошими литейными свойствами, но практически не поддается деформации даже в горячем состоянии. Кроме того, он имеет низкое сопротивление ползучести при температуре 800 °С и неудовлетворительную жаростойкость. Однако благодаря таким преимуществам, как относительно низкая плотность (3,8 г/см³ – для γ -TiAl; до 5,3 г/см³ – для γ -сплавов из титана), высокая жаропрочность, сплавы на основе γ -TiAl рассматриваются как один из наиболее перспективных классов легких металлических высокожаропрочных материалов [9–11].

В настоящее время наиболее экономически обоснованной технологией изготовления отливок (в том числе рабочих лопаток турбины низкого давления для газотурбинных двигателей) является высокоточное литье по выплавляемым моделям центробежным способом. Однако сложность и дороговизна технологии литья лопаток и последующих операций газоизостатического прессования и термообработки компенсируются небольшими затратами на финишную обработку отливок. При этом активному освоению γ -TiAl сплавов в производстве в качестве отливок препятствует основной недостаток титановых сплавов – химическая активность титана при высоких температурах, вызывающая активное взаимодействие с большей частью огнеупорных материалов форм и тиглей [2, 12–15]. По результатам проведенного обзора и анализа научно-технической литературы по получению отливок из титановых сплавов методом литья по выплавляемым моделям выявлено, что проблема химического взаимодействия интерметаллидного титанового сплава с материалом тигля может быть решена с применением технологического процесса литья на плавильных вакуумных установках с водоохлаждаемым медным тиглем, тогда как изготовление годных отливок без поверхностных дефектов и измененного поверхностного слоя возможно только при высокой термохимической устойчивости исходных материалов керамических форм (связующих и наполнителей керамической шихты суспензии) к сплаву [16, 17].

Известные исходные материалы, используемые в серийном технологическом процессе получения керамических форм для изготовления отливок из титановых сплавов, не смогут обеспечить получение бездефектных отливок. По результатам ранее проведенных исследований известно, что применяемые в серийной технологии керамические наполнители, такие как микрошлифпорошки электрокорунда (Al₂O₃), оксиды иттрия (Y₂O₃) и циркония (ZrO₂), имеют достаточно близкую друг к другу химическую инертность к основным легирующим элементам титановых интерметаллидных сплавов при заливке керамических форм.

Наибольшую проблему представляют известные и серийно применяемые для изготовления керамических форм связующие на основе кремнезема [17].

Аморфный кремнезем (SiO_2), входящий в состав органических (ЭТС-40, ВТОКС, ГС-20И, ГС-20А и др.) и водных (типа «Армосил», Ludox, Remasol и др.) связующих, является значительно более активным соединением, чем огнеупорные наполнители Al_2O_3 и Y_2O_3 . Оксид кремния в процессе заливки в вакуумной плавильной установке при температурах нагрева форм в момент кристаллизации отливки из титанового сплава способен подвергаться термодиссоциации с выделением монооксида кремния SiO , а также атомарного и молекулярного кислорода, которые обладают высокой химической активностью к расплаву титанового сплава и приводят к образованию поверхностных дефектов с формированием металлоксидного слоя. Эти выводы сделаны по результатам ранее проведенных исследований устойчивости оксидов к разложению, которую определяли по летучести, выраженной через суммарное давление паров продуктов диссоциации, и по скорости испарения оксидов, определяемой в зависимости от парциального давления кислорода по уравнению Герца–Лэнгмюра [14, 16, 17]. Полученные данные свидетельствуют о том, что кремнезем обладает низкой устойчивостью к инконгруэнтному испарению с разложением на монооксид кремния и кислород в вакууме уже при температуре формы не более $1400\text{ }^\circ\text{C}$, когда давление паров над ним достигает $0,0032\text{ Па}$.

При повышении температуры до $1550\text{--}1700\text{ }^\circ\text{C}$, при которой производится заливка $\gamma\text{-TiAl}$ сплава, суммарное давление паров ΣP_{SiO_2} увеличивается до $0,133\text{--}1,03\text{ Па}$, т. е. становится равным остаточному давлению, создаваемому при литье титановых сплавов в плавильных вакуумных установках. Поэтому в условиях контакта керамических форм с расплавом титановых сплавов при прогреве форм до температуры $>1574\text{ }^\circ\text{C}$ оксид кремния на основе органического связующего испаряется с интенсивным выделением газообразных веществ. В сравнении с оксидом SiO_2 оксид Al_2O_3 достаточно устойчив к разложению в вакууме. Суммарное давление пара $\Sigma P_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ над оксидом алюминия в исследуемом интервале температур составляет $\leq 0,0009\text{ Па}$, что более чем в 1000 раз меньше, чем над оксидом кремния. Величины $\Sigma P_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ не достигают давления разряжения $0,133\text{--}1,33\text{ Па}$, создаваемого в плавильных вакуумных установках при литье титановых сплавов. Например, возгонка оксида алюминия даже в вакууме при остаточном давлении $0,133\text{ Па}$ может начаться лишь при температуре $>2000\text{ }^\circ\text{C}$ [14, 16].

Оксиды SiO_2 и Al_2O_3 существенно различаются и по скорости испарения. В исследуемом интервале температур и давлений, при которых заливают керамические формы титановыми сплавами, скорость испарения оксида SiO_2 более чем в 1000 раз больше скорости потока химических элементов разложения оксида Al_2O_3 ; еще более термохимически устойчив оксид Y_2O_3 , который испаряется конгруэнтно. Таким образом, проведенные исследования показали, что для повышения термохимической устойчивости керамических форм необходимо изменить содержание кремнезема (SiO_2) в используемых связующих или применять связующие нового класса, не содержащие аморфный кремнезем [14, 16, 17].

Материалы и методы

Результаты проведенных работ по поиску новых современных материалов для изготовления керамических форм, применяемых для отливок из $\gamma\text{-TiAl}$ сплава, показали, что наиболее известным и применяемым за рубежом материалом является принципиально новое водное связующее на основе золя оксида иттрия (рис. 1). Во ФГУП «ВИАМ» проведены исследования его основных свойств и возможности использования в качестве связующего для изготовления керамических форм для отливок из $\gamma\text{-TiAl}$ сплава, а также произведен входной контроль основных свойств этого связующего (табл. 1).



Рис. 1. Общий вид золя оксида иттрия

Таблица 1

Основные показатели водного связующего золя оксида иттрия (Y_2O_3)

| Показатели | Значения показателей |
|---|----------------------|
| Содержание твердых частиц Y_2O_3 в растворе, % (по массе) | 16,6 |
| pH при температуре 20 °С | 7,74 |
| Плотность при температуре 20 °С, г/см ³ | 1,33 |

Для уточнения содержания массовой доли твердых частиц оксида иттрия в водном связующем, которое необходимо для проведения дальнейших исследований по разработке состава керамической суспензии, проведен термогравиметрический анализ водного связующего в инертной (азот) и окислительной (воздух) атмосфере. По результатам проведенных работ показано, что при нагревании до 600 °С в атмосфере воздуха (рис. 2, а) в связующем остается $16\pm 1\%$ (по массе) твердого остатка, тогда как при нагревании до 600 °С в инертной атмосфере азота (рис. 2, б) в связующем остается $17\pm 1\%$ (по массе) твердого остатка. Суммарная потеря массы после испарения основной части воды (40–150 °С) в диапазоне температур от 150 до 600 °С составляет 7–9% (по массе).

При изготовлении любых керамических суспензий все связующие, в том числе и водные, должны обладать следующими свойствами: смачивать поверхность модели, не растворяя ее; не вступать в химическое взаимодействие с составляющими модельного состава; иметь достаточно высокую вязкость для получения седиментационно-устойчивой суспензии; обладать высокой адгезионной способностью к огнеупорным наполнителям в суспензии и обсыпчным материалам.

Толщина слоя керамической суспензии обеспечивается степенью ее наполнения, которую определяют соотношением масс твердой и жидкой фаз. Выбрать оптимальное соотношение возможно в ходе определения оценки текучести керамической суспензии на основе водных связующих золь оксидов иттрия (Y_2O_3) и алюминия (Al_2O_3). Для оценки текучести керамических суспензий выбранных составов исследовали изменения показателя ее условной вязкости, замеряемой с помощью вискозиметра ВЗ-4, с последующей оценкой кроющей способности каждой суспензии. Кроющую способность оценивали по качеству поверхности лицевого слоя. Исследование условной вязкости проводили сразу после ручного приготовления суспензий. Нанесение слоев на восковую модель лопатки производили спустя 2–3 ч: за это время происходят стабилизация pH, разделение агрегатов пылевидного материала, более равномерное распределение связующего по его поверхности, т. е. можно наблюдать окончательный процесс смачивания наполнителя с уменьшением условной вязкости суспензии.

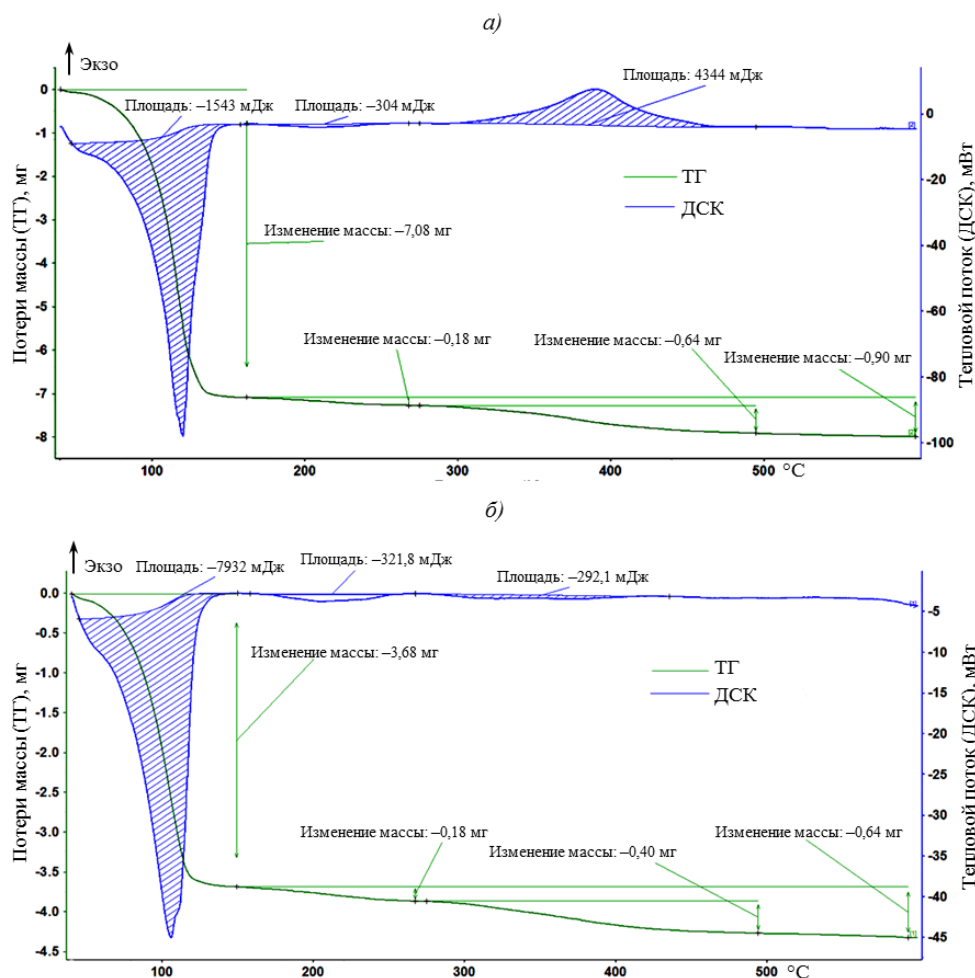


Рис. 2. Данные синхронного термического анализа нагревания образца водного связующего золя оксида иттрия в динамической атмосфере воздуха (а) и азота (б)

С учетом проведенных испытаний основных свойств водного связующего золя оксида Y_2O_3 , а также ранее проведенных во ФГУП «ВИАМ» исследований принято следующее решение – для изготовления керамических форм с использованием водного связующего золя оксида Y_2O_3 применять комбинированные слои на основе водного и органического связующих. В связи с этим выбраны:

- оптимальные соотношения масс твердой и жидкой фазы керамической суспензии первого и последующих слоев;
- технологические параметры формирования керамического покрытия каждого слоя, включающие условную вязкость керамической суспензии;
- режимы сушки керамического слоя на основе водного связующего золя оксида Y_2O_3 и органического связующего, учитывающие время сушки на воздухе, под вентилятором, в воздушно-аммиачной среде и окончательного проветривания на воздухе.

По разработанным технологическим параметрам изготовлена керамическая форма на основе связующего золя оксида Y_2O_3 прототипа лопатки, которая представлена на рис. 3.

По разработанным технологическим режимам из внутренней полости керамической формы удалена модельная композиция (рис. 4, а) и произведен высокотемпературный обжиг керамической формы прототипа лопатки (рис. 4, б).

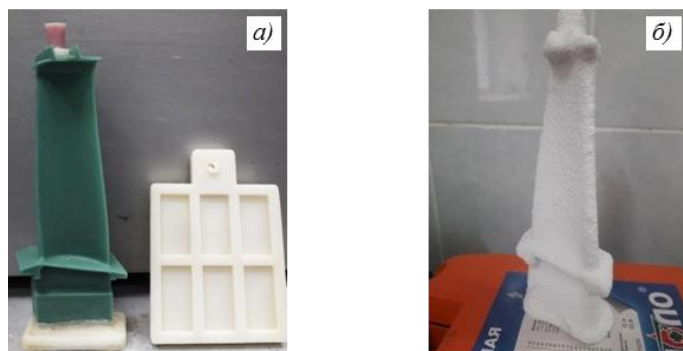


Рис. 3. Общий вид восковой модели прототипа лопатки и пластины для изготовления керамических образцов (а) и керамической формы прототипа лопатки до удаления восковой композиции (б), изготовленной на основе связующего золя оксида иттрия



Рис. 4. Общий вид керамической формы после удаления модельной композиции (а) и после высокотемпературного обжига (б)

При формировании керамического покрытия прототипа лопатки исследована живучесть керамической суспензии на основе водного связующего золя оксида иттрия после нанесения первого слоя и определено, что живучесть керамической суспензии неудовлетворительная, т. е. произошло огеливание керамической суспензии на основе водного связующего золя оксида Y_2O_3 спустя 2 ч после ее изготовления (рис. 5).

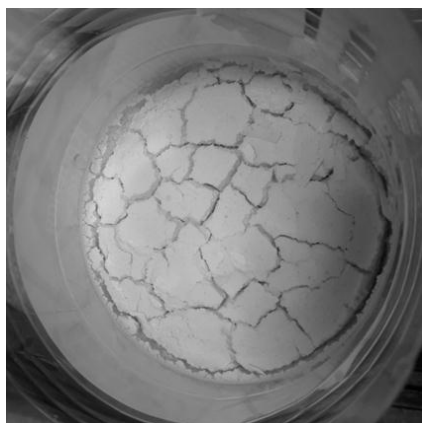


Рис. 5. Общий вид керамической суспензии на основе водного связующего золя оксида иттрия после того как произошло огеливание

Во ФГУП «ВИАМ» исследованы основные свойства водного коллоидного раствора на основе оксида Al_2O_3 и возможности его использования в качестве связующего для изготовления керамических форм для отливок из γ -TiAl сплава. Данное водное

связующее представляет собой полидисперсную систему в виде жидкости от прозрачного до молочного цвета. Основные свойства водного коллоидного раствора на основе оксида алюминия представлены в табл. 2.

Таблица 2

Основные показатели водного связующего золь оксида алюминия (Al_2O_3)

| Показатели | Значения показателей |
|--|----------------------|
| Содержание твердых частиц Al_2O_3 в растворе, % (по массе) | 15,26 |
| рН при температуре 20° С | 3,73 |
| Плотность при температуре 20 °С, г/см ³ | 1,05 |

С учетом проведенных испытаний основных свойств водного связующего золь оксида Al_2O_3 , а также ранее проведенных во ФГУП «ВИАМ» исследований принято следующее решение – для изготовления керамических форм с использованием водного связующего золь оксида Al_2O_3 применять комбинированные слои на основе водного и органического связующих. В связи с этим выбраны:

- оптимальные соотношения масс твердой и жидкой фазы керамической суспензии первого и последующих слоев;
- технологические параметры формирования керамического покрытия каждого слоя, включающие условную вязкость керамической суспензии;
- режимы сушки керамического слоя на основе водного связующего золь оксида Al_2O_3 и органического связующего, учитывающие время сушки на воздухе, под вентилятором, в воздушно-аммиачной среде и окончательного проветривания на воздухе.

По разработанным технологическим параметрам изготовлена керамическая форма на основе связующего золь оксида Al_2O_3 прототипа лопатки, которая представлена на рис. 6, а.

По разработанным технологическим режимам из внутренней полости керамической формы удалена модельная композиция (рис. 6, б) и произведен высокотемпературный обжиг керамической формы и образцов-свидетелей прототипа лопатки (рис. 7).



Рис. 6. Общий вид керамической формы, изготовленной на основе связующего золь оксида алюминия, прототипа лопатки до удаления восковой композиции (а) и после удаления модельной композиции (б)

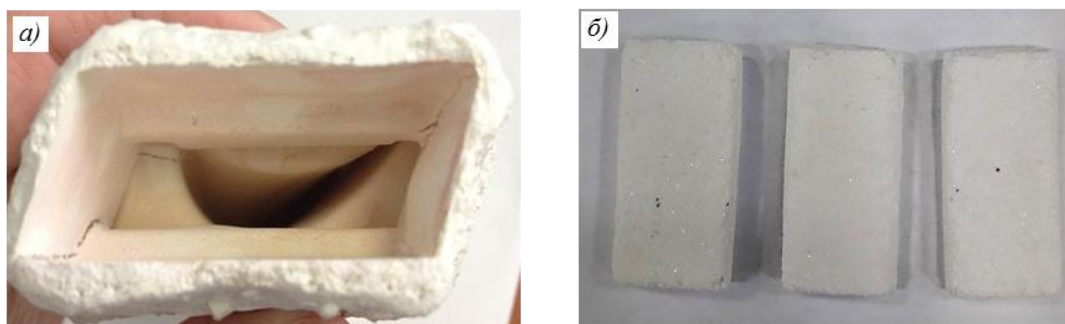


Рис. 7. Общий вид керамической формы (а) и керамических образцов-свидетелей (б) после высокотемпературного обжига

**Результаты исследований основных прочностных характеристик
керамических образцов-свидетелей, изготовленных на основе связующего золя
оксида алюминия (Al_2O_3)**

| Свойства | Средние значения свойств |
|--|--------------------------|
| Предел прочности при изгибе, МПа, при температуре, °С: 20 1600 | 5,95 1,4 |
| Открытая пористость, % | 34,4 |
| Шероховатость R_a поверхности керамических форм, мкм | 30,4 |

Проведены исследования основных прочностных характеристик изготовленных керамических образцов-свидетелей, результаты которых представлены в табл. 3.

Методики проведения исследований

Для оценки основных свойств водных связующих на основе золь оксидов иттрия (Y_2O_3) и алюминия (Al_2O_3) проведены следующие исследования:

– содержание массовой доли твердых частиц в растворах определено на термогравиметрическом анализаторе модели TGA 2 комплексонометрическим методом согласно ГОСТ 10398–76;

– значение показателя рН при температуре 20 °С определено согласно ГОСТ 33776–2016;

– плотность связующего определена согласно ГОСТ 18995.1–73.

Результаты и обсуждение

По результатам проведенной работы в целях исследования основных свойств водного связующего золя оксида иттрия в качестве связующего для изготовления керамических форм и определения возможности его использования для изготовления керамических форм для литья отливок из γ -TiAl сплавов на установке Leicomelt 5 выявлено, что керамическая суспензия ложится на восковую модель ровно, обладает хорошей укрывной способностью, удовлетворительной смачиваемостью и обеспечивает равномерный слой покрытия (без подтеков и несплошностей), трещин после сушки сформированного слоя не выявлено (рис. 3). После удаления модельной массы из керамической формы фрагмента лопатки в бойлерклаве произошло частичное отслоение лицевого слоя (рис. 4, а), а после проведенного высокотемпературного обжига керамической формы фрагмента лопатки при визуальном контроле выявлено, что лицевой слой на основе золя оксида иттрия и порошков оксида Y_2O_3 в качестве керамической шихты приобрел яркий желтый цвет, расслоился и разрушился. В связи с тем, что расслоились и разрушились керамические образцы-свидетели, провести испытания по определению прочностных характеристик керамической формы, изготовленной с использованием связующего золя оксида иттрия, не представилось возможным. Принято решение прекратить дальнейшие работы по исследованию основных свойств водного связующего с целью определения возможности его использования для получения керамических форм для литья отливок из γ -TiAl сплавов на установке Leicomelt 5 как бесперспективные.

По результатам проведенной работы в целях исследования основных свойств на основе золя оксида алюминия в качестве связующего для изготовления керамических форм и определения возможности его использования для изготовления керамических форм для литья отливок из γ -TiAl сплавов на установке Leicomelt 5 выявлено, что керамическая суспензия на основе золя оксида алюминия также ложится на восковую модель ровно, обладает хорошей укрывной способностью, удовлетворительной смачиваемостью и обеспечивает равномерный слой покрытия (без подтеков и несплошностей), трещин после сушки сформированных слоев не выявлено (рис. 6, а). После удаления модельной массы из керамической формы фрагмента лопатки в бойлерклаве отслоения

лицевого слоя не обнаружено, выявлены незначительные трещины (рис. 7). При визуальном контроле керамических образцов-свидетелей трещин и расслоений лицевых слоев не выявлено. Проведены исследования основных прочностных характеристик изготовленных керамических образцов-свидетелей. Получены удовлетворительные результаты по прочности при температурах 20 и 1600 °С, значения по шероховатости ($R_a=30,4$ мкм) не удовлетворяют требованиям к внутренней поверхности керамических форм для литья отливок из γ -TiAl сплавов. Принято решение продолжить работы по исследованию основных свойств золя оксида алюминия для разработки технологии изготовления керамических форм для литья отливок из γ -TiAl сплавов на установке Leicomelt 5.

Заключения

1. Проведены исследования основных свойств водных связующих на основе золь оксидов иттрия и алюминия для изготовления керамических форм отливок из γ -TiAl сплавов.

2. С учетом проведенных исследований основных свойств водных связующих золь оксидов иттрия и алюминия выбраны оптимальные соотношения масс твердой и жидкой фаз, технологические параметры формирования керамического покрытия, режимы сушки керамического слоя на основе золь оксидов иттрия и алюминия.

3. По разработанным технологическим параметрам изготовлены керамические формы аналога лопатки с применением водных связующих золь оксидов иттрия и алюминия.

4. По разработанным технологическим режимам удалена модельная композиция из внутренней полости керамических форм и произведен высокотемпературный обжиг керамических форм прототипа лопатки.

5. Определение прочностных характеристик керамических образцов-свидетелей, изготовленных с использованием золя оксида иттрия, не проведено из-за разрушения образцов в процессе высокотемпературного обжига.

6. По результатам визуального контроля лицевого слоя внутренней полости керамической формы (расслоение и разрушение) и разрушенных образцов-свидетелей, изготовленных с использованием золя оксида иттрия, принято решение прекратить дальнейшие работы по исследованию основных свойств связующего золя оксида иттрия с целью определения возможности его использования для изготовления керамических форм для литья отливок из γ -TiAl сплавов на установке Leicomelt 5.

7. По результатам визуального контроля внутренней полости керамической формы прототипа лопатки и поверхности керамических образцов-свидетелей, изготовленных с использованием связующего золя оксида алюминия, отслоений лицевых слоев не выявлено. Определены прочностные характеристики керамических образцов-свидетелей, изготовленных с использованием золя оксида алюминия, получены удовлетворительные результаты по прочности при температурах 20 и 1600 °С и принято решение продолжить работы по исследованию основных свойств золя оксида алюминия для разработки технологии изготовления керамических форм для литья отливок из γ -TiAl сплавов на установке Leicomelt 5.

Библиографический список

1. Ночовная Н.А., Базылева О.А., Каблов Д.Е., Панин П.В. Интерметаллидные сплавы на основе титана и никеля. М.: ВИАМ, 2018. 308 с.
2. Белов В.Д., Павлинич С.П., Фадеев А.В. Интерметаллид Ti–Al – материал завтрашнего дня для российского двигателестроения // Литейщик России. 2013. №11. С. 12–14.

3. Каблов Е.Н., Лукин В.И. Интерметаллиды на основе титана и никеля для изделий новой техники // Автоматическая сварка. 2008. №11. С. 76–82.
4. Путьрский С.В., Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Крохина В.А. Исследование влияния различных режимов термической обработки на свойства полуфабрикатов и сварных соединений из сплава ВТ22М // Авиационные материалы и технологии. 2019. №1 (54). С. 3–10. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-1-3-10.
5. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: справочник. М.: ВИЛС; МАТИ, 2009. 520 с.
6. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С., Боков К.А. Современные жаропрочные сплавы на основе гамма-алюминидов титана // Металловедение и термическая обработка металлов. 2014. №7 (709). С. 23–27.
7. Каблов Е.Н., Ночовная Н.А., Панин П.В., Алексеев Е.Б., Новак А.В. Исследование структуры и свойств жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана с микродобавками гадолиния // Металловедение. 2017. №3. С. 3–10.
8. 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.
9. Имаев В.М., Имаев Р.М., Оленева Т.И. Современное состояние исследований и перспективы развития технологий интерметаллидных γ -TiAl сплавов // Письма о материалах. 2011. Т. 1. С. 25–31.
10. Андреев А.Л., Аношкин Н.Ф., Бочвар Г.А. и др. Титановые сплавы. Плавка и литье титановых сплавов. М.: Металлургия, 1994. 368 с.
11. Каблов Д.Е., Панин П.В., Ширяев А.А., Ночовная Н.А. Опыт использования вакуумно-дуговой печи ALD VAR L200 для выплавки слитков жаропрочных сплавов на основе алюминидов титана // Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 27–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-2-27-33.
12. Ночовная Н.А., Панин П.В., Кочетков А.С. Проблемы получения химически и структурно однородных слитков из жаропрочных сплавов на основе гамма-алюминидов титана // Тр. конф. «Проблемы производства слитков и полуфабрикатов из сложнолегированных и интерметаллидных титановых сплавов». М.: ВИАМ, 2015. Ст. 03. 1 электрон. оптич. диск (CD).
13. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технология, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
14. 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.
15. Путьрский С.В., Арисланов А.А., Артеменко Н.И., Яковлев А.Л. Различные методы повышения износостойкости титановых сплавов и сравнительный анализ их эффективности применительно к титановому сплаву ВТ23М // Авиационные материалы и технологии. 2018. №1 (50). С. 19–24. DOI: 10.18577/2071-9240-2018-0-1-19-24.
16. Братухин А.Г., Бибииков Е.Л., Глазунов С.Г. и др. Производство фасонных отливок из титановых сплавов. М.: ВИЛС, 1998. 292 с.
17. 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.