

К. т. н. Т. Ф. Баранова¹ (✉), С. А. Валиахметов¹, Г. В. Гоголев¹,
Н. И. Шункина¹, к. т. н. М. С. Варфоломеев², д. х. н. Г. И. Щербакова²,
к. т. н. Г. А. Вартанян³

¹ АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», Москва, Россия

² ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС», Москва, Россия

³ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет
им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия

УДК 621.74.045

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЕСКРЕМНЕЗЕМНОГО СВЯЗУЮЩЕГО АЛЮМОКС В ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ФОРМ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ ДЛЯ ЛИТЬЯ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ

Проведены испытания бескремнеземного связующего АЛЮМОКС в условиях литейного цеха АО «НПЦ газотурбостроения «Салют». Разработан способ изготовления комбинированных керамических форм по выплавляемым моделям для литья деталей ответственного назначения из жаропрочных сплавов направленной кристаллизацией. Применение таких форм позволяет получать отливки методом высокоградиентной направленной кристаллизации, отвечающие требованиям чертежа и техническим условиям на деталь. Защитный слой комбинированной формы на связующем АЛЮМОКС значительно уменьшает химическое взаимодействие рабочего слоя формы с компонентами жаропрочного сплава ЖС26-ВИ в процессе его заливки и охлаждения по сравнению со степенью взаимодействия серийной формы на связующем ЭТС-40.

Ключевые слова: бескремнеземное связующее АЛЮМОКС, комбинированная керамическая форма, жаропрочные сплавы, направленная кристаллизация.

Новое поколение жаропрочных сплавов на никелевой основе выдвигает особые требования к технологии литья деталей с направленной кристаллизацией: нагрев оболочковых форм до 1700 °С, деформационную устойчивость и инертность к расплаву при высокой температуре и длительном контакте расплава с оболочковой формой [1, с. 462–474; 2]. В серийном производстве при литье деталей авиационных двигателей используются керамические формы, изготавливаемые методом послойного нанесения огнеупорного покрытия по общепринятой технологии: окунание – обсыпание – послойная сушка. Качество отлитых деталей зависит от качества форм, которое обеспечивается применяемыми для изготовления суспензии огнеупорными материалами: связующим и наполнителем. В настоящее время в литейных цехах применяют кремнеземистые связующие. Например, гидролизированный этилсиликат (ЭТС-40) российского производства [1–3], а также кремнезоли (связу-

ющие на водной основе) марки Ludox SK фирмы «Dupont», США, и марки Primcote Plus фирмы «Ransom Randolph», США [4].

При использовании этилсиликатных керамических форм для литья лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) необходимо учитывать образование пригара на них и нестабильность геометрии отливок, что приводит к необходимости увеличивать припуск на отливки. Припуск впоследствии удаляют пескоструйной обработкой и слесарной зачисткой, в результате чего на поверхности монокристаллических лопаток образуется рекристаллизованный слой. Следует также отметить, что при использовании кремнеземистых форм в жаропрочный сплав попадает большое количество соединений кремния, которые препятствуют использованию оборотной шихты при изготовлении ответственных деталей и требуют проведения дорогостоящей процедуры рафинирования сплава, что значительно влияет на себестоимость литья.

Практика показала, что применение форм с указанными выше связующими целесообразно при литье жаропрочных сплавов в процессе изготовления деталей с равноосной структурой, например из сплава ЖС6У-ВИ с температурой заливки 1530 °С.



Т. Ф. Баранова
E-mail: ogmet@salut.ru

В этих случаях температура подогрева литейных форм перед заливкой невысокая и составляет 950–1050 °С, прочность форм достаточная, их рабочая поверхность твердая и гладкая. Спекание материала форм обеспечивается образованием стеклофазы из кремнезема связующего и примесей из электрокорундового заполнителя и, соответственно, зависит от степени наполнения суспензии (соотношения жидкой и твердой фаз). Чем выше степень наполнения суспензии, тем тоньше пленка связующего вокруг частиц заполнителя, тем меньше величина усадки при сушке, обжиге и нагреве формы перед заливкой расплава. Вероятность растрескивания форм снижается.

При обжиге в материале форм может образоваться муллит вследствие реакции кремнезема связующего с Al_2O_3 заполнителя, однако основная часть SiO_2 находится в свободном виде (кварц, тридимит, кристобалит). При температуре обжига диффузия свободного кремнезема на поверхность рабочего слоя незначительна. В процессе литья при резком повышении температуры рабочей поверхности формы создаются условия термической диссоциации и сублимации оксидов кремния и примесей из материала формы [5]. При контакте формы с расплавленным металлом повышается химическая активность ее материала. При взаимодействии его с расплавом образуются неметаллические включения (пригар) на поверхности отливки, снимаемые в основном механической и пескоструйной обработкой.

При литье деталей из жаропрочных сплавов с равноосной структурой температура нагрева литейных форм под заливку ~1000 °С, температура заливаемого сплава ~1500 °С. На отливках образуется минимальное количество пригара, литейная форма легко отделяется от отливки. При литье деталей с направленной или монокристаллической структурой, например из сплава ЖС26-ВИ (температура заливки 1570 °С), литейная форма нагревается перед заливкой в вакуумной печи с графитовым нагревателем до 1650 °С, при этом создается неравномерное тепловое поле по высоте формы из-за необходимости выполнения условий технологии направленной кристаллизации. Дно формы нагрето до 1650 °С для обеспечения градиента температур на участке соприкосновения формы с жидкометаллическим охладителем на фронте кристаллизации (нагрев нижними нагревателями). Верх формы нагревается боковыми нагревателями до 1600 °С.

После заливки форма 30 мин остается в контакте с жидким металлом. В этом случае часть свободного кремнезема и стеклофазы диффундирует на рабочую поверхность формы, частично испаряется в процессе нагрева формы. Пористость рабочей поверхности увеличивается. На границе металл – форма происходит активное взаимодействие прежде всего легирующих элементов сплава с кремнеземом материала форм,

происходит проникновение расплава в поры формы и образование с Al_2O_3 шпинельных соединений, а также соединений твердого раствора Al_2O_3 с Cr_2O_3 (на отливке образуется пригар).

Слой пригара и остатки материала формы на отливке имеют сиреневый цвет из-за присутствия в нем аналогов образовавшегося рубина. При этом толщина пригара (слоя взаимодействия) как на всей рабочей поверхности формы, так и на поверхности отливок различна. Наибольшая толщина наблюдается на участках формы (соответственно, затем и на отливках), которые располагаются ближе к нагревателю во время нагрева перед заливкой металла. Дополнительные технологические операции по удалению пригара влияют на точность геометрии литых деталей, вызывая колебания их размеров, что требует расхода дорогостоящих материалов на обдувку (электрокорунд) и абразивный инструмент.

В производстве точного литья лопаток направленной кристаллизацией предложены новые способы изготовления литейных форм по выплавляемым моделям. В патенте [6] описан способ получения бескремнеземного алюмоорганического связующего АЛЮМОКС для изготовления оболочковых форм, разработанного в ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС». Связующее АЛЮМОКС использовалось для приготовления керамических суспензий разного назначения [7–9]. АЛЮМОКС представляет собой спиртовой раствор модифицированных алкоксиалюмоксановых олигомеров общей формулой [10, 11]:



где $k = 3 \div 12$; $s + x + 2y + z = 3$; $R = C_2H_5$, изо- C_3H_7 , н- C_4H_9 ; $R^* = C(CH_3) = CHC(O)CH_3$; $C(CH_3) = CHC(O)OC_2H_5$.

На основе разработанных керамических суспензий были изготовлены керамические монооксидные корундовые [12] и комбинированные формы [13] для точного сложнопольного литья химически активных сталей и сплавов на никелевой основе.

Формы, изготовленные по способу [13] с использованием связующего АЛЮМОКС для первых двух слоев, апробированы в АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» при литье лопаток равноосной структуры из жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ с температурой заливки (1530 ± 10) °С. Формы перед заливкой нагревали примерно до (1050 ± 20) °С. Установлено, что слой пригара на опытных отливках в 7 раз меньше (5 мкм), чем на отливках, изготовленных по серийной технологии (толщина слоя пригара 21,5 мкм). Следует отметить, что слой взаимодействия определен металлографическим способом после пескоструйной обработки отливок, поэтому общая толщина пригара в обоих случаях занижена.

В настоящей работе авторами приведены результаты экспериментальных исследований

технологии изготовления комбинированных форм с применением двух связующих для литья лопаток ГТД направленной кристаллизацией: бескремнеземное связующее АЛЮМОКС (ТУ 6-02-1-644-90) — жидкость светло-желтого цвета, массовая доля алюминия 5,9 % (в пересчете на Al_2O_3 11 %) и кремнеземистое связующее — гидролизованый этилсиликат ЭТС-40 (SiO_2 40 %, ГОСТ 26371). Другие используемые материалы соответствовали серийно применяемым при изготовлении оболочковых форм для литья лопаток направленной кристаллизации.

Были изготовлены комбинированные оболочки для литья рабочей лопатки турбины высокого давления (ТВД), металлических образцов для определения технических свойств сплава и параллельно оболочек керамических образцов-свидетелей размерами $120 \times 40 \times 5$ мм (в соответствии с рекомендацией фирмы «VA Technology Ltd» [14]) для уточнения технических свойств материала форм. Оболочки формировали по технологии, включающей изготовление модели, послойное нанесение на модель огнеупорной суспензии на основе пылевидного электрокорунда, последующую обсыпку каждого слоя зернистым электрокорундом, сушку слоев, удаление модели и обжиг керамической формы.

Первые два слоя формы наносили с применением суспензии, содержащей, мас. %: связующего АЛЮМОКС 22,7, огнеупорного заполнителя (смеси микропорошков электрокорунда) 77,3.

Огнеупорный заполнитель состоял из смеси предварительно прокаленных микропорошков электрокорунда следующего состава: F-1000 : F-320 : F-280 = 25 : 40 : 35. Степень наполнения суспензии ж : тв = 1 : 3,55. Емкость с суспензией плотно закрывали полиэтиленовой термоусадочной пленкой и выдерживали в течение суток при 20 °С. После выстаивания суспензия перемешивалась в смесителе крыльчаткой с частотой 2800 об/мин в течение 1,5 ч для первого слоя и 40 мин для второго слоя. Вязкость суспензии корректировали добавлением связующего АЛЮМОКС.

Последующие шесть слоев наносили по серийной технологии с использованием суспензии из связующего на основе ЭТС-40 с активатором спекания АСД-4 и огнеупорным заполнителем при соотношении 21,2 : 6,5 : 72,3.

С учетом повышенных требований к оболочковым формам при литье отливок направленной кристаллизации при выборе условий сушки первых двух слоев суспензии исходили из того, что максимальную прочность оболочки можно достичь только тогда, когда каждый слой будет высушен полностью. Если предыдущие слои остаются высушенными не до конца, то прочность всей оболочки резко снижается. Количества воды, получаемой формой посредством сорбции, может не хватить для полного огеливания связующего, которое должно цементиро-

вать заполнитель и обсыпку в целом. Следует отметить, что гигроскопическая влажность всегда меньше максимальной влажности тела, которая достигается при непосредственном контакте тела с жидкостью (намокание) [15]. Поэтому для сушки суспензий с АЛЮМОКС может быть недостаточным количество паров в воздушной атмосфере сушила, которая насыщается парами воды из емкости с водой, расположенной в нижней части сушила под формами, как это использовалось в работе [13].

В этой связи было принято решение проводить сушку первых двух слоев суспензии на основе связующего АЛЮМОКС при 100 %-ной влажности. Последующую конвективную сушку проводили в условиях цеха при температуре около 25 °С в течение 2–3 ч путем обдувки воздухом каждого слоя. Обеспечение 100 %-ной влажности позволяет произвести полное огеливание суспензии, находящейся в порах как высушенных слоев, так и нанесенного слоя. Формы обдувать воздухом необходимо в течение 2–3 ч, что позволяет высушить их полностью: при сушке менее 2 ч невозможно полностью высушить форму, а сушка более 3 ч нецелесообразна.

Сушку каждого из последующих 6 слоев на суспензии с этилсиликатом проводили по серийной технологии в вакуумно-аммиачной камере. Последующая конвективная сушка проходила в условиях цеха при температуре около 25 °С. Модели из заготовок форм удаляли в бойлерклаве (оборудование для вытопки модельной массы при 180 °С) по серийной технологии.

Формы обжигали при 1200–1350 °С в течение 8–12 ч. При температуре ниже 1200 °С и времени прокаливания меньше 8 ч может наблюдаться осыпание рабочего (внутреннего) слоя. При температуре выше 1350 °С и времени прокаливания больше 12 ч появляются микротрещины вследствие усадки материала формы. При температуре обжига диффузия свободного кремнезема на поверхность рабочего слоя очень незначительна. После обжига форм и образцов визуально оценивали качество их внутренней рабочей поверхности. Поверхность была ровной и плотной, при трении ее рукой отсутствовало пыление и не наблюдалось смазывание слоя материала.

Были определены технические характеристики материала форм на образцах-свидетелях к формам, изготовленных предложенным и серийным способами изготовления оболочковых литейных форм: открытая пористость, предел прочности при статическом изгибе, теплопроводность (табл. 1, 2).

Из табл. 1 видно, что прочность материала форм, изготовленных по предложенной технологии, значительно выше (25–30 МПа), чем форм, изготовленных с применением сушки [13]. По этой технологии не создается увлажнение каждого слоя формы по всей ее толщине из-за ограниченной способности формы поглощать влагу

путем сорбции. При увлажнении формы парами воды достигается равновесное влагосодержание формы, которое в 12–30 раз меньше влагосодержания, достигаемого при непосредственном контакте тела с жидкостью. В результате процесс огеливания материала формы при ее сушке происходил не в полном объеме и стираемость рабочего слоя вручную была ярко выраженной.

Теплопроводность образцов исследовали по методике «Определение теплофизических свойств твердых неэлектропроводных неорганических материалов в воздушной среде методом «горячей проволоки» на кафедре химической технологии керамики и огнеупоров РХТУ им. Д. И. Менделеева. Метод основан на закономер-

ностях прогрева неограниченной среды, внутри которой помещена тонкая нить, разогреваемая электрическим током постоянной мощности (ГОСТ 12170). Схематично образцы показаны на рис. 1. Для определения теплопроводности образцы изготавливали такими же, как для определения прочности, нарезая на них места для укладки нитей (см. рис. 1).

Эффективную теплопроводность определяли в интервале 200–1100 °С. В табл. 1 приведены значения теплопроводности материалов литейных форм серийного производства и форм, полученных в проводимой нами работе, в сравнении с данными [1].

Следует отметить, что теплопроводность материала серийных форм (8 слоев на связующем

Таблица 1. Технологические свойства керамических оболочек литейных форм

Технология	Связующее в суспензии	Температура обжига, °С	Открытая пористость, %	Предел прочности при изгибе, МПа	Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре, °С							
					200	300	600	650	1000	1100	1200	
Серийная: ВИАМ	ЭТС-40 в слоях 1, 2	1000	28–29	25–31	–	–	–	–	–	–	–	2,4–3,0
НПЦГ «Салют»	ЭТС-40+АСД-4* в слоях 3–8	1000	25	11–12	0,82	1,08	1,59	1,6	1,71	1,87		2,08
Технология, предлагаемая	АЛЮМОКС в слоях 1, 2	1200	26	20–25	0,48	0,58	0,88	0,95	1,52	1,82		2,15
НПЦГ «Салют»	ЭТС-40+АСД-4* в слоях 3–8	1350	27	22–27	0,52	0,62	0,95	1,02	1,6	1,85		2,2

* Активатор спекания — порошок алюминия (ТУ 48-5-226–87).

Таблица 2. Состав и свойства комбинированных керамических оболочковых форм

Технология	Суспензия		Сушка при влажности W	Температура, °С			Пригар	
	связующее (в слоях)	заполнитель		обжига	нагрева форм	заливки металла*	глубина внедрения в отливку, мкм	состояние
Предлагаемая	АЛЮМОКС (1, 2) ЭТС-40 (3–8)	Электрокорунд Электрокорунд + АСД-4	W = 100 % (обливание водой) Вакуумно-аммиачная	1350	1640	1540 (ЖС26-ВИ)	10–20	Рыхлый
По патенту 2412019 [13]	АЛЮМОКС (1, 2) ЭТС-40 (3–8)	Электрокорунд Электрокорунд + АСД-4	W = 95 % (влажная атмосфера) Вакуумно-аммиачная	1350	1640	1540 (ЖС26-ВИ)	25–35	Плотный
	АЛЮМОКС (1, 2) ЭТС-40 (3–8)	Электрокорунд »	W = 95 % (влажная атмосфера) Вакуумно-аммиачная	1280	1000	1530 (ЖС6У-ВИ)	5–10	»
	Серийная	ЭТС-40 (1, 2) ЭТС-40 (3–8)	» Электрокорунд + АСД-4	То же » »	1000	1640	1540 (ЖС26-ВИ)	50–70

* Указан в скобках.

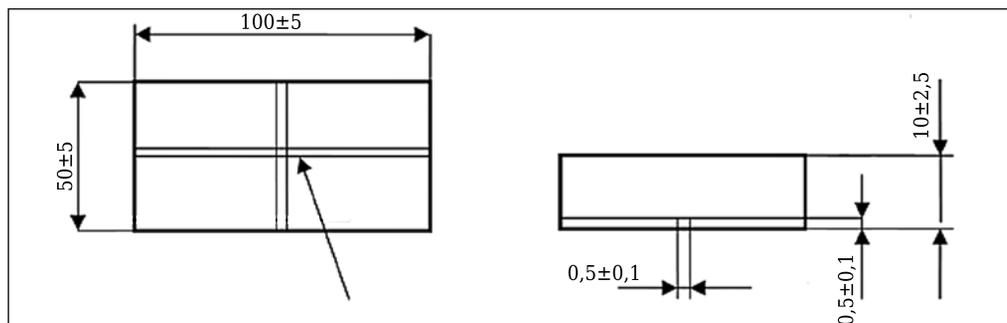


Рис. 1. Образцы для испытания на теплопроводность. Стрелкой указаны места для укладки нитей

ЭТС-40) и теплопроводность материала комбинированных форм (2 слоя на АЛЮМОКС, 6 слоев на ЭТС-40) различаются незначительно вследствие наличия в образцах только двух слоев с алюмоорганическим связующим. Необходимо признать, что любое сравнение результатов, приведенных в табл. 2, с данными [1] условно, так как теплопроводность в указанных работах определяли по разным методикам, хотя полученные данные достаточно сопоставимы.

Плавку металла и заливку изготовленных форм проводили на плавильной установке УВНК-8П с использованием шихты сплава ЖС26-ВИ для лопаток с направленной кристаллизацией. Формы в печи для их подогрева (ППФ) нагревали в течение 60 мин до температуры 1640 ± 10 °С, время выдержки при данной температуре не менее 15 мин. В одной плавке одновременно с отливками лопаток заливали металлические образцы для определения длительной и кратковременной прочности металла.

Отливки, изготовленные в формах с использованием связующего АЛЮМОКС, были проверены всеми видами технологического контроля. Результаты исследований представлены в табл. 2 в сравнении с данными, полученными по серийной технологии, применяемой на предприятии АО «НПЦ газотурбостроения «Салют», и литературным данными. При температуре обжига 1350 °С диффузия свободного кремнезема из слоя 3 формы (содержащего SiO_2) на поверхность рабочего слоя незначительна. В процессе нагрева форм перед заливкой до 1650 °С в составе материала рабочего слоя, кроме корундовой фазы (основы), имеются кремнезем и муллит.

В процессе литья вследствие реакции прежде всего SiO_2 и его паров, а также частично Al_2O_3 с окисленными элементами жидкого сплава образуется рыхлый пригар на поверхности отлитых деталей, особенно в области пера лопаток. Визуальный анализ поверхности отливок исследовали в литом состоянии непосредственно после отливки керамики керамической формы. Анализ показал, что на отливках присутствует пригар светло-сиреневого цвета, внутренняя (рабочая) сторона форм имеет розовый цвет. Толщина пригара неравномерно распределена по поверхности отливок. На всю длину входной кромки отливки лопатки имеется плотный слой пригара, так как она ближе всего находится к нагревателям печи нагрева. На остальных поверхностях отливки пригар более рыхлый. Внутренняя сторона таких форм была окрашена в розово-сиреневый цвет (рис. 2).

Разницу в количестве пригара на отливках, полученных по предложенной и серийной технологиям и по технологии прототипа [13], трудно визуально оценить, но очевидно, что сцепление формы в двух последних случаях с образовавшимся пригаром более сильное, так как вручную его стереть с отливок практически невозможно.

Полученные отливки были проконтролированы согласно серийному технологическому процессу по рентгеноконтролю, контролю макроструктуры и контролю химического состава сплава. Отклонений не обнаружено. Металлические образцы соответствуют требованиям технических условий на кратковременную и длительную прочность. Качество материала лопаток оценено металлографическим и микрорентгеноспектральным анализами на электронном микроскопе.

Исследовали отливки лопаток ТВД из сплава ЖС26-ВИ:

– отливки № 1 — экспериментальные, отлитые в форму на связующем АЛЮМОКС, температура обжига 1350 °С, нагрева перед заливкой 1640 °С;

– отливки № 2 — серийные, отлитые в форму на связующем ЭТС-40, температура обжига 1000 °С, нагрева перед заливкой 1640 °С.

Анализ микрошлифов показал, что взаимодействие формы с металлическим расплавом на границе металл – форма при получении отливок из сплава ЖС26-ВИ происходит с внедрением неметаллических включений, образуется пригар (табл. 3, рис. 3). Установлено, что химический состав поверхностных слоев лопаток и внедренных неметаллических включений одинаковый. Диффузионного взаимодействия литейных оболочек с материалом лопаток не выявлено. Внедренные неметаллические включения на обеих лопатках представляют собой оксид алюминия. Марка материала обеих лопаток ЖС26-ВИ соответствует требованиям ТУ на сплав.

Дополнительно следует отметить, что для удаления плотного пригара с поверхности серийных отливок из форм на связующем ЭТС-40 требу-

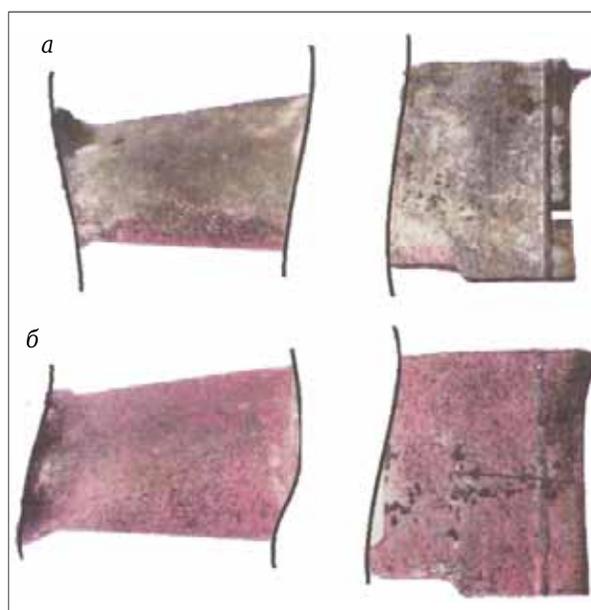


Рис. 2. Вид отливок после отливки керамики: *а* — экспериментальная отливка лопатки № 1; *б* — серийная отливка лопатки № 2; *а, б* — показаны две части одной лопатки, различающиеся степенью шероховатости после отливки

ется большой объем пескоструйной обработки детали. Отливки, полученные в алюмосиликатных формах, имеют на поверхности более рассеянный легко отделяемый пригар, для удаления которого

потребуется меньший объем пескоструйной обработки. Легкое удаление пригара свидетельствует о хорошем разупрочнении формы после заливки в процессе затвердевания сплава.

Таблица 3. Глубина внедрения неметаллических включений в отливку на различных участках лопаток, мм

Отливка лопатки	На входной кромке	На плоскостях корыта и спинки	Ближе к массивной части отливки
№ 1	≤0,03–0,05	0,01–0,025	0,01–0,025
№ 2	≤0,04–0,07	0,02–0,035	≤0,07

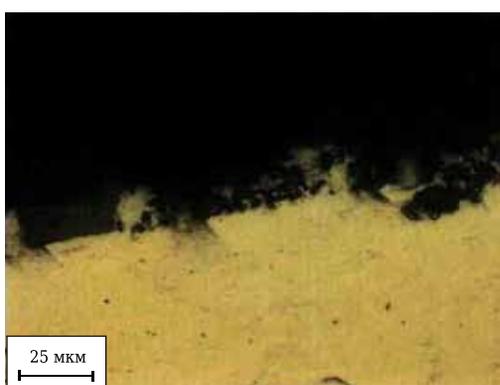
Таблица 4. Шероховатость поверхности лопаток

Место замера	Шероховатость лопаток, мкм	
	серийной	экспериментальной
Полка хвостовика	3,35	3,25
Профиль пера со стороны:		
спинки*	5,15	5,05
корыта	4,11	2,82

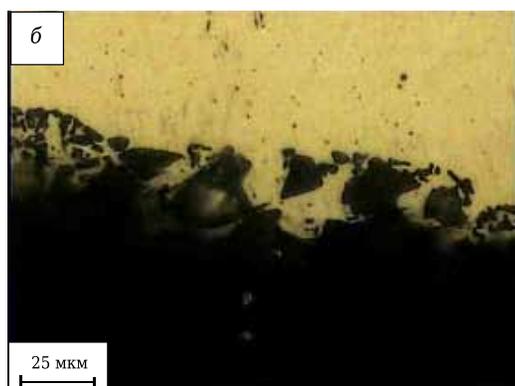
* Находится наиболее близко к нагревателю печи.



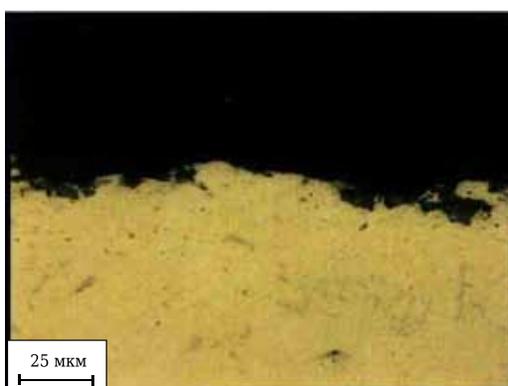
Со стороны входной кромки



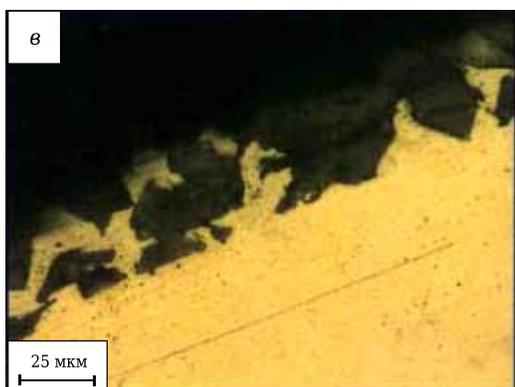
Со стороны спинки



Со стороны входной кромки



Со стороны корыта



Со стороны входной кромки



Со стороны спинки

Рис. 3. Состояние поверхности отливок лопаток: *a* — отливка № 1 из литейной формы на связующем АЛЮМОКС, у бандажной полки; *б* — отливка № 1 из литейной формы на связующем АЛЮМОКС, у полки замка; *в* — отливка № 2 из литейной формы на связующем ЭТС-40, у бандажной полки

Проведена оценка шероховатости поверхности лопаток после пескоструйной обработки. Шероховатость поверхности определяли на профилометре «Жомельтестер» (табл. 4). Шероховатость экспериментальной лопатки заметно ниже, чем у серийной. Особенно низкий показатель шероховатости по профилю пера лопатки со стороны корыта, которое перед заливкой нагревается в печи подогрева форм в меньшей степени из-за большей удаленности от нагревателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан способ изготовления комбинированных корундовых оболочковых форм по выплавляемым моделям для получения отливок из жаропрочных сплавов направленной кристаллизацией [16].

Определены основные технические характеристики материала форм: пористость 26–27 %, предел прочности при изгибе 27–30 МПа, теплопроводность в интервале температур 200–1200 °С 2,08–2,15 Вт/(м·К).

Установлено:

– применение указанных форм позволяет получить методом высокоградиентной направленной кристаллизации отливки, отвечающие

требованиям чертежа и техническим условиям на деталь;

– полное высушивание форм после нанесения суспензии обеспечивается только при 100 %-ной влажности;

– незначительный период времени обсыпаемости слоев суспензии АЛЮМОКС (15–17 с) по сравнению с временем, затрачиваемым при применении суспензии на основе ЭТС-40 (27–30 с), затрудняет изготовление форм для литья деталей сложной конфигурации;

– меньшее химическое взаимодействие рабочего слоя формы на связующем АЛЮМОКС с компонентами жаропрочного сплава в процессе заливки и охлаждения сплава ЖС26-ВИ, чем при использовании формы на ЭТС-40;

– большая часть пригара на экспериментальных лопатках достаточно легко стирается вручную в отличие от пригара на серийных лопатках; легкое удаление пригара свидетельствует о хорошем разупрочнении формы в процессе затвердевания отливки.

Можно ожидать, что за счет уменьшения толщины пригара уменьшится объем механической обработки для обеспечения чистоты и геометрической точности готовых деталей.

Библиографический список

1. **Каблов Е. В.** Литые лопатки газотурбинных двигателей / Е. В. Каблов. — М. : МИСИС, 2001. — 632 с.
2. **Крылов, В. И.** Производство газотурбинных двигателей / В. И. Крылов, Ю. С. Елисеев, К. И. Зудин ; под ред. В. В. Крылова. — М. : Машиностроение / Машиностроение – Полет, 2002. — 376 с.
3. **Карасев, Б. Е.** Производство высокотемпературных литых лопаток авиационных ГТД / Б. Е. Карасев, В. В. Аппименский, А. К. Белявский [и др.] ; под ред. к. т. н. С. И. Яцыка. — М. : Машиностроение, 1995. — 256 с.
4. www.Ludox* SK (Dupont), Ransoms Randolph.
5. **Стадничук, В. И.** Инконгруэнтное испарение оксидов керамической формы при высоких температурах и разряжении / В. И. Стадничук, В. С. Бессмертный // Новые огнеупоры. — 2011. — № 7. — С. 19–21.
6. **Пат. 2276155 РФ, МПК С 07 F 5/06.** Способ получения полиалкоксиалюмоксанов, бескремнеземное связующее на их основе / Щербакова Г. И., Цирлин А. М., Стороженко П. А. [и др.]. — № 2004130613/04; заявл. 21.10.04; опубл. 10.05.06.
7. **Пат. 1838986 АЗ СССР МКИ⁶ В 22 С 1/06, В 22 С 1/16.** Суспензия для изготовления керамических форм по выплавленным моделям / Корнеев Н. Н., Щербакова Г. И., Колесов В. С. [и др.]. — № 4792668/02; заявл. 15.02.90; опубл. 20.02.96.
8. **Пат. 2082535 РФ МКИ⁶ В 22 С 1/06, В 22 С 1/16.** Суспензия для изготовления керамических форм по выплавляемым моделям / Корнеев Н. Н., Щербакова Г. И., Анташев В. Г. [и др.]. — № 95111527/02; заявл. 05.07.95; опубл. 27.06.97, Бюл. № 18.
9. **Пат. 2332278 РФ, В 22 С 1/20.** Суспензия для изготовления керамических форм по выплавляемым моделям / Каблов Е. Н., Демонис И. М., Деев В. В. [и др.].

— № 2006140212/02; заявл. 15.11.06; опубл. 27.08.08, Бюл. № 24.

10. **Стороженко, П. А.** Органоалкоксиалюмоксаны и бескремнеземное связующее на их основе / П. А. Стороженко, Г. И. Щербакова, А. М. Цирлин [и др.] // Неорганические материалы. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 373–382.

11. **Стороженко, П. А.** Алюминий- и кремнийорганические соединения — для современных нанокерамокомпозитов / П. А. Стороженко, Г. И. Щербакова, А. М. Цирлин [и др.] // Нанотехника. — 2008. — № 2 (14). — С. 25–33.

12. **Пат. 2411104 РФ.** Способ изготовления бескремнеземных керамических форм для точного литья металлов по выплавляемым моделям / Муркина А. С., Щербакова Г. И., Варфоломеев М. С. [и др.]. — № 2009136162/02; заявл. 30.09.09; опубл. 10.02.11, Бюл. № 4.

13. **Пат. 2412019 РФ.** Способ изготовления керамических оболочковых форм для литья металлов по выплавляемым моделям / Щербакова Г. И., Стороженко П. А., Муркина А. С. [и др.]. — № 2009136165/02; заявл. 30.09.09; опубл. 20.02.11, Бюл. № 5.

14. www.vatech.co.uk.

15. **Лыков, М. В.** Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. — М. : Химия, 1970. — 432 с.

16. **Пат. 2572118 РФ.** Способ изготовления комбинированных оболочковых форм по выплавляемым моделям для получения отливок из жаропрочных сплавов с направленной и монокристаллической структурами / Баранова Т. Ф., Валиахметов С. А., Шункина Н. И. [и др.]. — № 2014139957/02; заявл. 03.10.14; опубл. 27.12.15, Бюл. № 36. ■

Получено 19.05.16

© Т. Ф. Баранова, С. А. Валиахметов, Г. В. Гоголев, Н. И. Шункина, М. С. Варфоломеев, Г. И. Щербакова, Г. А. Вартамян, 2016 г.