

К. т. н. **Т. Ф. Баранова**¹ (✉), **И. В. Дьяконова**¹, **Н. И. Шункина**¹,
С. И. Полянский¹, к. т. н. **Ю. Р. Нуртдинов**¹, **М. А. Горбаненко**²

¹ АО «ОДК» Производственный комплекс «Салют», Москва, Россия

² ООО «Технокерамика», д. Верховье Жуковского р-на
Калужской обл., Россия

УДК 549.517.1-492.2:621.74.045

АПРОБАЦИЯ ЭЛЕКТРОКОРУНДОВЫХ ПОРОШКОВ ФИРМЫ «ТЕХНОКЕРАМИКА» ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ КЕРАМИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ ФОРМ

Исследована и разработана технология изготовления керамических форм из электрокорундовых порошков фирмы «Технокерамика» для литья деталей из жаропрочных никелевых сплавов. Порошки использованы вместо серийно применяемых на машиностроительных предприятиях электрокорундовых порошков АО «Русал». Изготовлены и апробированы литейные формы разных размеров и конфигураций внутренней полости для литья охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток из жаропрочных сплавов. Сохранены технические свойства литейных форм; обеспечены характеристики отливок равноосной и направленной структуры в соответствии с техническими требованиями чертежа и технических условий.

Ключевые слова: электрокорундовые порошки, литейные формы, литые детали, жаропрочные сплавы (ЖС-сплавы).

Обеспечение надежности и долговечности газовых турбин при производстве газотурбинных двигателей — одна из самых трудных задач. Она решается за счет применения жаропрочных никелевых сплавов (ЖС-сплавов), содержащих дорогостоящие легирующие химически активные добавки металлов (Cr, W, Mo, Ti, Co и др.) с высокой температурой плавления. Для сокращения расходов на весь жизненный цикл двигателя необходимо постоянно улучшать и удешевлять технологический процесс изготовления его деталей (например, литых лопаток). Общая степень их надежности при повышенном давлении газа должна обеспечивать высокие температуры на выходе из процессора и входе в турбину, позволяя тем самым работать двигателю при высоких скоростях полета с увеличением дальности полета. Надежность литых лопаток зависит от их качества, которое определяется (кроме типа используемого металлического сплава) технологическим процессом литья в керамические оболочковые формы из белого электрокорунда [1]. Применяемые электрокорундовые материалы для литейных форм имеют повышенную термостойкость при высокой огнеупорности. Известно, что качество

форм определяют прежде всего по степени шероховатости внутренней рабочей поверхности, необходимой прочности материала формы для отливки каждого типа лопаток, температуре подогрева форм и степени инертности материала форм к расплавам ЖС-сплавов при ее достаточной термостойкости. Лопатки имеют сложную конфигурацию и содержат выступающие части с переходами от тонких стенок к стенкам большой толщины. Поэтому литейные формы должны обеспечивать получение качественных отливок с высокой размерной точностью.

Серийная технология [1, с. 465–475] изготовления многослойных оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям включает семь основных операций: формование модельного блока, приготовление суспензии для керамического покрытия, нанесение слоев керамического покрытия на модельный блок, обсыпка каждого слоя и его последующая сушка, удаление модельного состава из блоков, обжиг заготовок керамических форм. Состав суспензии для нанесения керамического покрытия: гидролизат этилсиликатного связующего ЭТС-40 (ГОСТ 26371–84) и наполнитель из смеси электрокорундовых микрошлифпорошков (или из порошка дистен-силлиманитового концентрата по ТУ 14-10-017–98) с добавками (или без) других модификаторов. Все слои керамического покрытия обсыпают электрокорундовыми шлифпорошками.

Используют порошки из дорогого дефицитного классифицированного по размерам бело-



Т. Ф. Баранова
E-mail: ogmet@uecrus.com

го электрокорунда (ГОСТ 28818–90). Основным производителем электрокорундовых порошков (серийных) является АО «Русал», г. Бокситогорск; в настоящее время появился новый производитель этих порошков — фирма «Технокерамика». Технология получения электрокорундовых порошков (опытных) на этой фирме основана на плавлении металлургического глинозема Г-00 (ГОСТ 30558–98) в электродуговых печах при высокой температуре и охлаждении слитого в изложницы расплава при цеховой температуре (в АО «Русал» изложницы охлаждают проточной водой). При более длительном охлаждении в опытных слитках образуются крупные и, соответственно, более дефектные кристаллы $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, которые легче подвергаются помолу. Электрокорундовые порошки фирмы «Технокерамика» постепенно начали применять на машиностроительных предприятиях России в технологии литья авиационных деталей из ЖС-сплавов на никелевой основе.

На предприятии «ОДК» Производственный комплекс «Салют» электрокорундовые порошки фирмы «Технокерамика» апробировали при изготовлении литейных форм для литья детали № 1 (плоская конструкция) и лопатки № 1 с равноосной структурой, а также лопатки № 2 с направленной структурой. В суспензии на основе электрокорунда вместо серийных порошков АО «Русал» использовали опытные порошки белого электрокорунда 25А фирмы «Технокерамика» F1200, F360 и F280 по ТУ 3988-075-00224450–99. Для обсыпки слоев наносимой суспензии использовали опытные порошки белого электрокорунда 25А F70 и F36 по ГОСТ 28818–90, ГОСТ Р 52381–2005.

Результаты рентгеноструктурного анализа порошков обеих фирм показали их идентичность по фазовому составу: основная фаза — $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (табл. 1); в некоторых партиях имеются следы высокотемпературной фазы $\chi\text{-Al}_2\text{O}_3$ [2]. Потери при прокаливании ($\Delta m_{\text{прк}}$) серийных порошков 2,2 %, опытных 0,9 %. Кристаллы порошков показаны на рис. 1, химический состав исходных порошков приведен в табл. 2. Содержание примесных оксидов практически одинаково. Оксид кремния в серийном порошке F1200 содержится в количестве 0,15 %, в опытном 0,03 %, что, возможно, обусловлено разными условиями помола плавленного электрокорунда у обоих производителей.

Активность порошков электрокорунда обеих производителей оценивали по удельной поверхности частиц, замеряемой по воздухопроницаемости (оценка внешней поверхности частиц) на приборах типа ПСХ (табл. 3). Хотя оценка качества порошков по значению $S_{\text{уд}}$ относительная, однако она достаточная для сравнения активности зерен Al_2O_3 по их геометрии и дефектности.

Изготовление и исследование опытных оболочковых форм проводили по серийным технологическим процессам послойным методом одновременно с параллельным изготовлением форм и образцов-свидетелей из серийных порошков электрокорунда фирмы «Русал». Условия приготовления суспензий из опытных и серийных порошков были одинаковыми. Все параметры процесса изготовления суспензии согласованы с цеховой технологической инструкцией по изготовлению суспензии из серийных порошков. Суспензию из электрокорундовых порошков готовили в краскомешалке при цеховой температуре 20–24 °С при относительной

Таблица 1. Рентгенографические показатели $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3^*$ в электрокорундовых порошках

$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (табличные данные [2])	F280		F360		F1200	
	серийные	опытные	серийные	опытные	серийные	опытные
3,47/50	3,44/26	3,49/44	3,47/37	3,47/32	3,47/34	3,46/35
2,55/75	2,53/62	2,56/67	2,54/64	2,55/62	2,55/61	2,54/73
2,37/30	2,36/41	2,39/44	2,37/36	2,37/39	2,38/34	2,37/36
2,08/100	2,07/100	2,09/100	2,08/100	2,08/100	2,08/96	2,08/100
1,74/50	1,73/48	1,74/57	1,74/54	1,74/49	1,74/53	1,74/50
1,59/100	1,59/96	1,6/100	1,6/92	1,6/90	1,6/100	1,6/100
1,402/40	1,4/48	1,4/58	1,4/44	1,4/48	1,4/42	1,4/42
1,37/50	1,37/61	1,37/100	1,37/57	1,37/65	1,37/70	1,37/66

* В числителе — межплоскостное расстояние, в знаменателе — интенсивность линий, мм.

Таблица 2. Химический состав электрокорундовых порошков*

Фракция	Массовая доля, %									
	Al_2O_3		Fe_2O_3		SiO_2		Na_2O		$\text{Fe}_{\text{магн}}$	
	опытные	серийные	опытные	серийные	опытные	серийные	опытные	серийные	опытные	серийные
F36	Ост.	Ост.	0,025	—	0,07	—	0,2	—	0,006	—
F70	»	»	0,022	0,02	0,04	0,03	0,2	0,2	0,007	0,007
F280	»	»	0,02	0,015	0,05	0,03	0,1	0,2	0,007	0,006
F360	»	»	0,02	0,018	0,05	0,03	0,3	0,25	0,007	0,006
F1200	»	»	0,02	0,025	0,03	0,15	0,3	0,3	0,006	0,006

* Опытные порошки исследовали методом волнодисперсного рентгенофлуоресцентного анализа на спектрометре S4 Pioneer фирмы Bruker, серийные — на рентгенофлуоресцентном спектрометре AXIOS^{max} Advanced. «Ост.» — остальное количество Al_2O_3 в порошке.

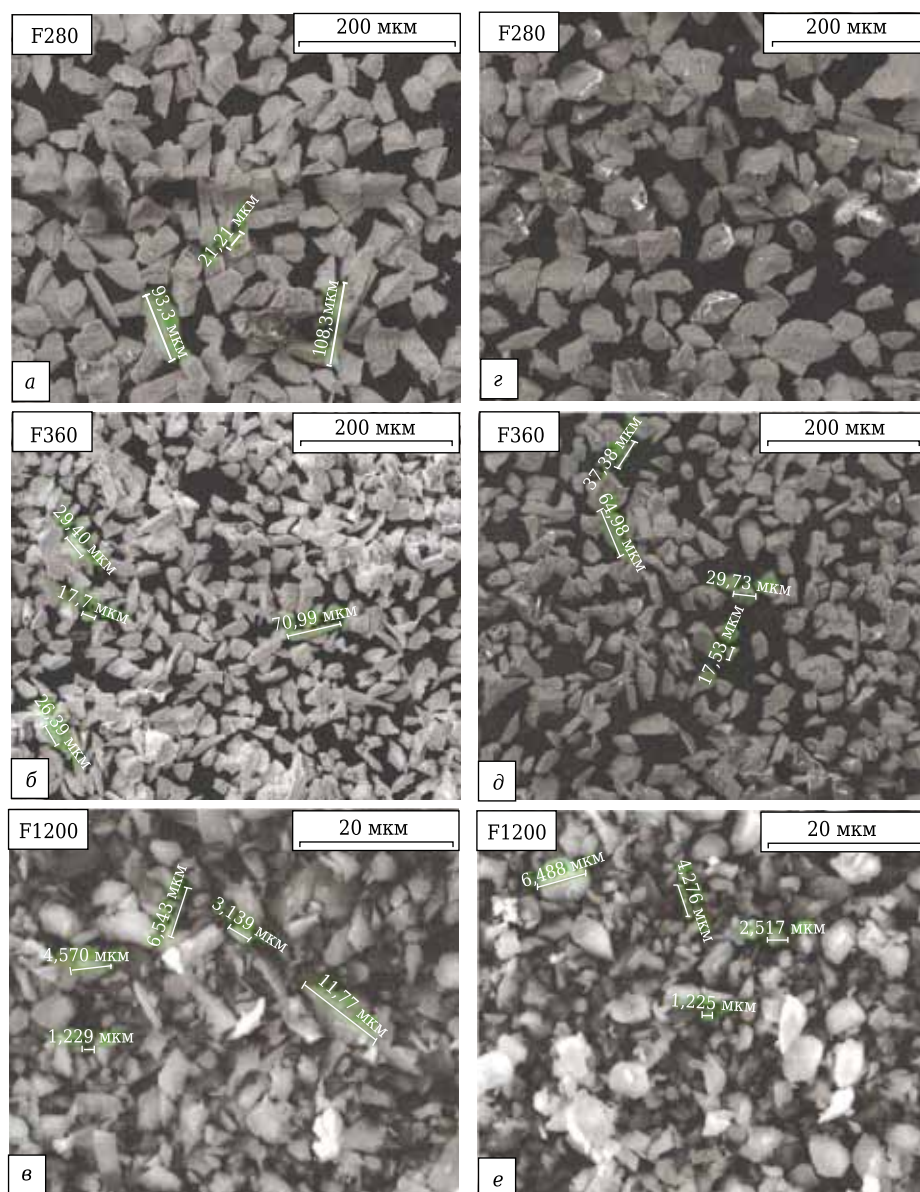


Рис. 1. Кристаллы корунда в исходных порошках АО «Русал» (а–в) и фирмы «Техно-керамика» (з–е)

Таблица 3. Удельная поверхность электрокорундовых порошков

Марка порошка	$S_{уд}$, см ² /г	Прибор
<i>Опытные порошки</i>		
F280	720	ПСХ-8П
F360	1110	»
F1200	6000	»
<i>Серийные порошки</i>		
F280	740	ПСХ-10П
F360	1350	»
F1200	6900	»

* Следует отметить, что после дробления куски электрокорундовых слитков подвергают помолу для получения дисперсных порошков разными методами: опытных — сухим способом в шаровых мельницах, серийных (как более твердых) — мокрым способом.

влажности воздуха 70 %. В качестве связующего использовали гидролизанный ЭТС-40 (гидролизат — продукт гидролиза в кислой среде) при содержании в нем 17–20 % SiO₂.

При изготовлении формы для отливки детали № 1 равновесной структуры готовили два состава суспензии. Состав базового электрокорундового наполнителя [1, с. 465] содержал смесь порошков электрокорунда, мас. %: F280 35, F360 40 и F1200 25. При формировании 1-го, 2-го, 3-го и 7-го слоев суспензия содержала базовый наполнитель. Обсыпку 1-го и 2-го слоев суспензии производили порошком электрокорунда F70. При формировании 4-го, 5-го и 6-го слоев суспензия содержала в качестве наполнителя предварительно прокаленный дистен-силлиманитовый порошок КДСП (ТУ 14-10-017–98), 3-й и последующие слои обсыпали порошком электрокорунда F36 фирмы «Технокерамика». Обсыпку каждого слоя суспензии в блоках проводили на установке с псевдокипящим слоем.

При изготовлении формы для отливки лопатки № 1 равноосной структуры использовали также два состава суспензии. В качестве связующего применяли тот же гидролизат, что и для детали № 1. Первый состав суспензии содержал электрокорундовый наполнитель из трех порошков электрокорунда с добавкой синтезированного алюмината кобальта АК-2 (ТУ 1-595-1495–2002). Его наносили на модельный блок, формируя 1-й слой. При формировании 2-го и последующих слоев использовали суспензию с тем же базовым наполнителем, но без добавок, 1-й и 2-й слои обсыпали порошком F70, последующие — порошком F36.

При изготовлении формы для отливки лопатки № 2 направленной структуры использовали тот же состав суспензии с базовым электрокорундовым наполнителем и с тем же гидролизатом.

Суспензию наносили на модельный блок, формируя 1-й и 2-й слои с последующей обсыпкой их порошком F70. При формировании 3-го и последующих слоев в состав базового наполнителя вводили 7 % алюминиевого порошка АСД-4 (ТУ 1791-007-49421776–2011). Слои обсыпали порошком F36.

Вязкость суспензий из опытных порошков при формировании 1-го слоя, как правило, составляет 60 с для форм для отливки детали № 1 и лопатки № 1 и 38 с для отливки лопатки № 2 (табл. 4). Далее каждую суспензию доводили до рабочей вязкости (по вискозиметру В-34) за счет введения добавки гидролизата. Опытные суспензии с порошками фирмы «Технокерамика» имели вязкость, близкую к вязкости серийных суспензий. Качество наносимых слоев суспензий оценивали визуально. Установлено, что при указанных (см. табл. 4) параметрах вязкости суспензий каждая из суспензий ложилась на модельный блок ровным слоем без подтеков, наплывов, комочков, посторонних включений и других дефектов. Это указывает на то, что главное требование к качеству суспензии из опытных порошков выполнено: каждая суспензия достаточно хорошо смачивает поверхность модельного блока для формирования нужного качества соответствующей отливки.

Каждый слой нанесенной суспензии с обсыпкой при изготовлении форм сушили на воздухе при цеховой температуре 20 °С не менее 20 мин, затем 1 ч в вакуумно-аммиачной камере, потом на воздухе. Визуально после сушки качество поверхности слоев не изменилось. После удаления модельного состава визуально оценивали внешнюю поверхность всех форм и внутреннюю поверхность на одной вскрытой форме для каждого вида деталей. Отмечено, что гладкость внутренней поверхности опытных форм отвечает техническим требованиям, предъявляемым к серийным формам. На внешней поверхности всех форм трещин или включений не обнаружено. Заготовки форм обжигали в печи BOSIO (Stransko PP-13) при температуре около 1000 °С с выдержкой 4 ч при некоторой корректировке параметров обжига для каждого вида форм. Параллельно были изготовлены формы для литья керамических образцов-свидетелей размерами 120×40×4 мм для определения прочности материала полученных оболочковых форм. Изготовлены также формы для литья металлических образцов для определения механических свойств отливаемых сплавов.

Таблица 5. Предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ керамических образцов-свидетелей к формам

Деталь	Материал формы	$\sigma_{изг}$, кг/см ² , образца-свидетеля	
		сырого	обожженного
Деталь № 1	Серийный	35–44	31–39
	Опытный	22–35	15–25
Лопатка № 1* равноосной структуры	Серийный	53–60	115–132
	Опытный	44–73	124–146
Лопатка № 2 направленной структуры	Серийный	28–32	98–133
	Опытный	54–72	190–270

* Пористость обожженных образцов-свидетелей из материала к формам для лопатки № 1: из серийных порошков 29–32 %, из опытных 24–27 %; в зависимости от состава суспензии прочность материала форм имеет достаточно широкие пределы.

Таблица 4. Вязкость суспензий разных составов, с

Формы для деталей	1-й слой	2–8-й слои
<i>Суспензии из опытных порошков</i>		
Деталь № 1	60	28–32
Лопатка № 1	60	28–32
Лопатка № 2	38	28–30
<i>Суспензии из серийных порошков</i>		
Деталь № 1	57	30–31
Лопатка № 1	57	28–32
Лопатка № 2	36	28–30

Качество внешней поверхности обожженных оболочек оценивали визуально, внутренней поверхности — на одной вскрытой форме для каждого вида деталей. Установлено, что внутренняя поверхность каждой вскрытой формы и внешняя поверхность всех форм практически полностью были удовлетворительными (рис. 2). Прочность образцов-свидетелей приведена в табл. 5. Видно, что прочность материала формы для де-

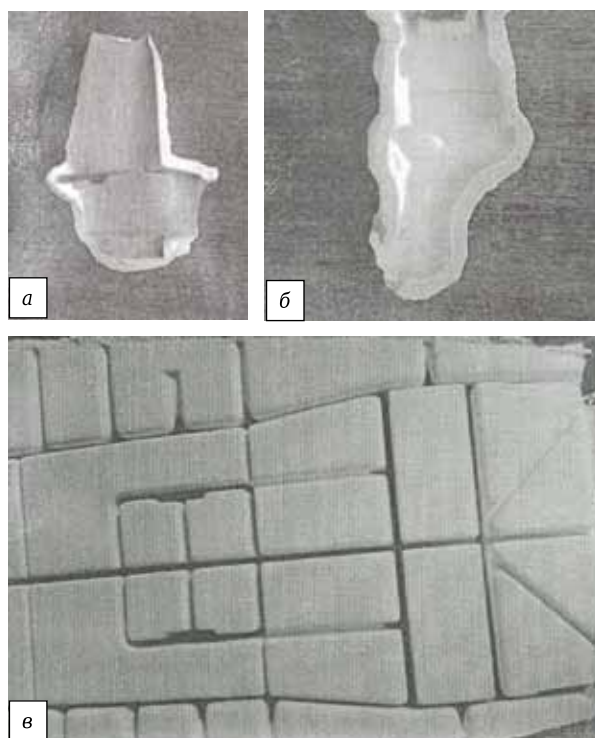


Рис. 2. Вид внутренней поверхности опытных литейных форм после обжига: а — для лопатки равноосной структуры; б — для лопатки направленной структуры; в — для детали № 1

тали № 1 достаточно низкая как у сырых, так и у обожженных образцов-свидетелей. В процессе обжига в материале форм формируется определенный фазовый состав, который обуславливает степень упрочнения формы. По результатам рентгенофазового анализа установлены основные фазы материала обожженной пробы базовой корундовой суспензии: α - Al_2O_3 , муллит, α -кристобалит. Эти фазы имеются в корундовых слоях форм. Состав слоев из суспензии с дистен-силлиманитом обусловлен его структурными изменениями при предварительном обжиге. При обжиге дистен-силлиманит (в основном дистен $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) разлагается с образованием муллита и выделением кремнезема (кремнеземистое стекло, часть которого кристаллизуется в виде α -кристобалита) при увеличении объема. Вследствие этого снижаются плотность и прочность материала (видно по разнице плотности дистена — $3,7 \text{ кг/см}^3$ и муллита — $3,23 \text{ кг/см}^3$). Такие изменения фазового состава обуславливают заметно низкую прочность форм в обожженном виде.

Прочность материала форм для лопатки № 1 с равноосной структурой на опытных образцах сравнима с прочностью материала серийных образцов. Фазовый состав 1-го слоя формируется из основной базовой корундовой суспензии с добавкой порошка алюмината кобальта (модификатора) и включает α - Al_2O_3 , CoO (возможно, Co_3Al_2), алюминат кобальта, β -тридимит. В остальных слоях фазовый состав соответствует составу материала базовой суспензии: α - Al_2O_3 , муллит, α -кристобалит (разные модификации кремнезема), незначительное содержание кремнеземистой стеклофазы.

Прочность керамических образцов материала литейных форм для лопатки № 2 с направленной структурой из опытных электрокорундовых порошков значительно выше, чем из серийных. В процессе обжига алюминий из порошка АСД, окисляясь, превращается в аморфную форму Al_2O_3 , которая соединяется с SiO_2 из гидролизата, образуя муллит. Общее количество стеклофазы в материале формы достаточно низкое. С учетом большей дефектности кристаллов опытного электрокорунда рассматриваемый материал форм лучше спекается и значительно упрочняется. В технологических условиях обжига формируется стабильная структура материала формы, который работоспособен в дальнейшем при высоких температурах перегрева сплава ЖС26-ВИ.

Апробация изготовленных форм проведена в заводских условиях по серийной технологии литья деталей из ЖС-сплавов ВЖЛ-12У, ЖС6У-ВИ, ЖС26-ВИ. При высокой температуре расплавленного металла с учетом влияния конфигурации полости форм на степень турбулентности его потока качество отливок зависит от

процесса разрушения внутренней поверхности формы потоком заливаемого расплава. В момент заливки в материале формы нарушаются адгезионные связи между наполнителем и связующим (между основными фазами), что является причиной возникновения дефектов в лопатках.

Детали (деталь № 1, лопатки № 1 и 2) отливали в опытных и серийных формах с параллельным литьем образцов для определения механических свойств. Формы для лопаток перед плавкой нагревали до 1050 – 1065°C в зависимости от типа деталей. Масса заготовок сплава для лопаток составляла $7,8 \text{ кг}$, для детали № 1 $9,2 \text{ кг}$. Лопатки направленной структуры из сплава ЖС26-ВИ отливали на литейной установке УВНК-8П. Нагрев формы был более жесткий, чем при литье равноосных лопаток: до 1640°C с выдержкой 20 мин . Температура перегрева расплава выше 1640°C , слива 1540°C . Равноосные лопатки из сплава ЖС6У-ВИ отливали на установке УППФ-3М с перегревом сплава до 1550°C и сливом при 1540°C , соответствующие температуры при выплавке детали № 1 из ВЖЛ12У-ВИ 1640°C и 1570°C .

Все отлитые лопатки прошли визуальный, рентгеновский, а также капиллярный люминесцентный контроль на металлургические дефекты. Основные виды дефектов опытных и серийных лопаток практически одинаковы: засор, недолив/неспай, положение тангенциального канала (очень редко). Количественные значения дефектов практически одни и те же. Например, из 24 лопаток направленной структуры забракованы 4 лопатки (2 — засор, 2 — микроструктура), из 27 лопаток равноосной структуры — 5 лопаток (2 — засор, 3 — недолив/неспай, неправильное положение тангенциального канала).

Предварительная оценка шероховатости поверхности отливок лопаток в доступных зонах проведена после удаления стержней и первой обдувки. Установлено, что шероховатость поверхности опытных и серийных лопаток имеет близкие значения. У лопатки направленной структуры: для опытных шероховатость $3,87$ – $4,82 \text{ мкм}$, для серийных $3,34$ – $5,37 \text{ мкм}$; у лопатки равноосной структуры: для опытных шероховатость $5,89$ – $5,93 \text{ мкм}$, для серийных $5,63$ – $6,13 \text{ мкм}$. Шероховатость опытных деталей № 1 с равноосной структурой заметно ниже, чем у серийных. Прочность образцов сплавов соответствует требованиям технических условий (ТУ) (табл. 6).

На двух отливках от каждой отлитой партии деталей проведены операции контроля геометрии внутренней полости на основе ее разметки после вскрытия. Установлено, что геометрические размеры детали № 1 соответствуют требованиям ТТ чертежа. На основе разметки внутренней полости лопаток равноосной структуры из ЖС6У-ВИ и лопаток № 2 направленной

Таблица 6. Механическая прочность выплавленных образцов

Сплав	Кратковременная прочность, кг/см ² , образцов			Длительная прочность, ч, образцов		
	опытных	серийных	ТУ	опытных	серийных	ТУ
ЖС6У-ВИ	<i>Лопатка № 1 равноосной структуры</i>					
	111,2	111,1	>85	40	40	Не менее 40
ЖС26-ВИ	<i>Лопатка № 2 направленной структуры</i>					
	108,4	93,2	>85	40	40	Не менее 40

структуры из ЖС26-ВИ показано соответствие требованиям ТТ чертежа.

Для контроля контура лопаток по сечениям отливки разрезали на плазы (лопатка № 1 по семи сечениям, лопатка № 2 по пяти). Во всех сечениях контур наружной поверхности и внутренней полости соответствовал допуску ТТ чертежа. Определена глубина растрова по карбидам внутренней полости отливок после удаления из них керамических стержней. Для лопаток № 1 она составила 5–10 мкм, для лопаток № 2 10–15 мкм, что соответствует требованиям ТТ чертежа и технических условий. Плотность литья отливок, как и глубина растрова внутренней полости, определена металлографическим анализом. Плотность литья отливок деталей № 1 и лопаток равноосной

структуры соответственно из сплавов ВЖЛ-12У и ЖС6У-ВИ удовлетворительная (рис. 3, 4). Результаты спектрального анализа образцов, отлитых параллельно с деталями, показали соответствие химического состава отливок составу отливаемых сплавов (нормативный документ ОСТ 1-90126–85). Плотность литья у лопаток направленной структуры также удовлетворительная (рис. 5). Химический состав отливок соответствует требованиям технических условий сплава ЖС26-ВИ.

Таким образом, отливки деталей из ЖС-сплавов, выплавленные в литейных керамических формах из электрокорундовых порошков фирмы «Технокерамика», соответствуют техническим требованиям, предъявляемым к авиационным деталям газотурбинных двигателей.

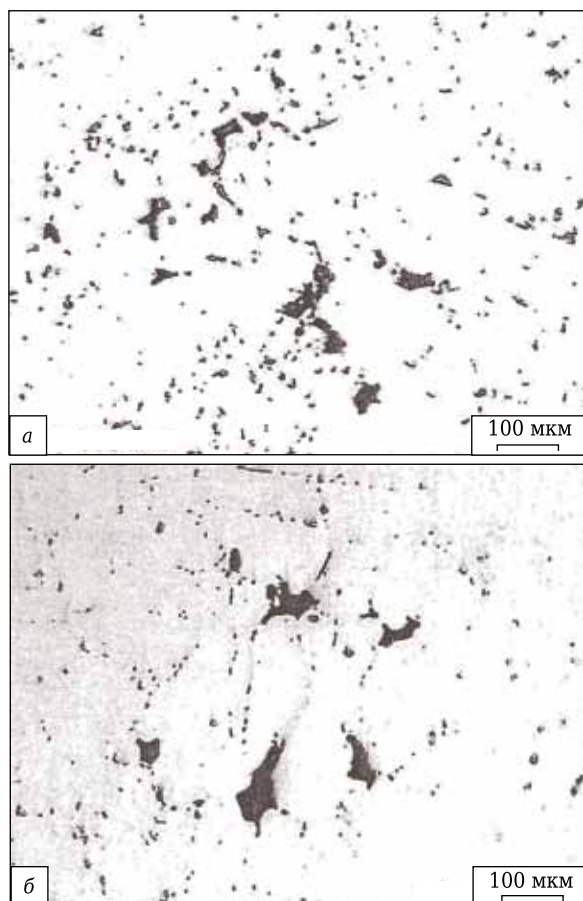


Рис. 3. Микроструктура в исследуемых зонах детали № 1 равноосной структуры: а — продольное сечение; б — поперечное сечение

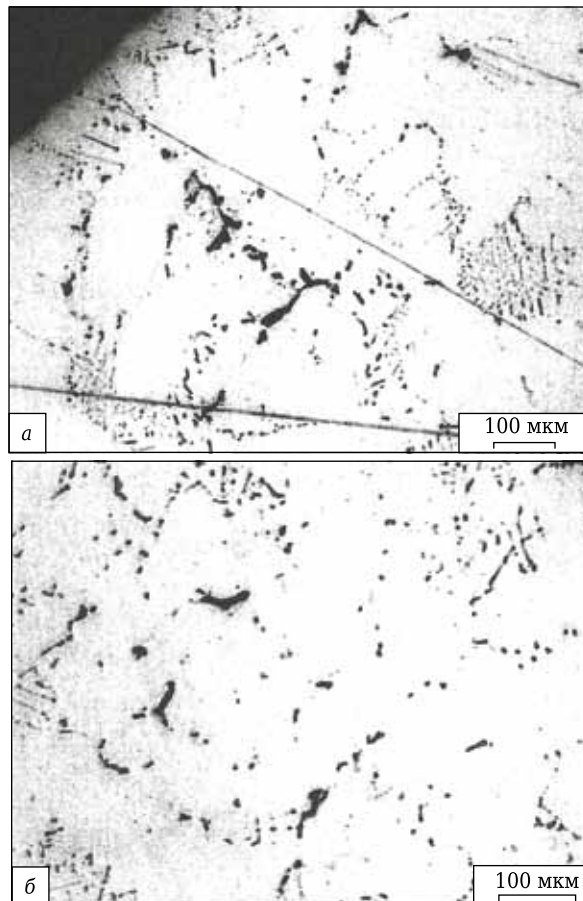


Рис. 4. Микроструктура материала лопаток равноосной структуры из сплава ЖС6У-ВИ: а — опытная лопатка; б — серийная лопатка

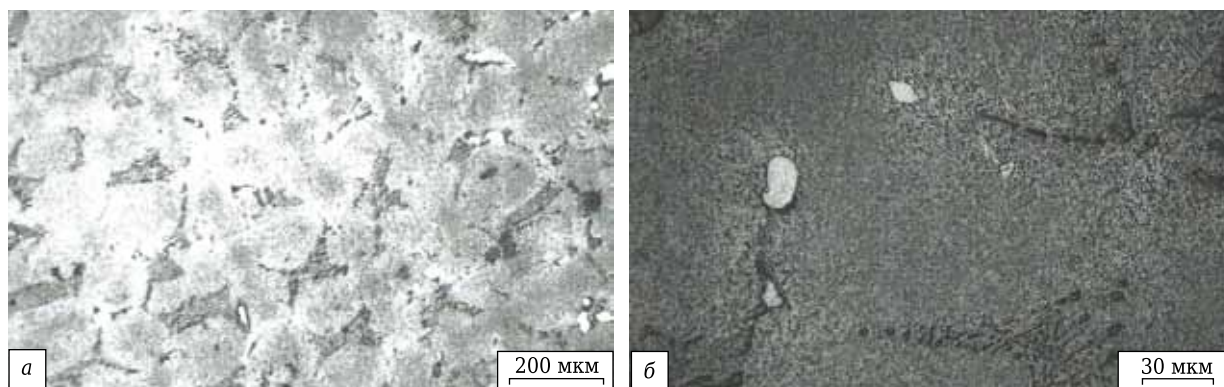


Рис. 5. Микроструктура материала опытной лопатки направленной структуры из сплава ЖС26-ВИ (после травления): а — $\times 100$; б — $\times 500$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные принципы технологии изготовления многослойных оболочковых литейных форм по выплавляемым моделям из суспензий на основе гидролизованного этилсиликата и электрокорундового наполнителя были исполнены при применении электрокорундовых порошков фирмы «Технокерамика» вместо серийно используемых электрокорундовых порошков АО «Русал». Разработана технология изготовления форм разных размеров и конфигураций их внутренней полости для литья охлаждаемых и неохлаждаемых лопаток из ЖС-сплавов.

Сохранены технологические параметры серийного процесса изготовления литейных форм и технические свойства форм; обеспечены характеристики отливок деталей равноосной и направленной структуры в соответствии с требованиями чертежа и технических условий на

отливки из ЖС-сплавов. Химический состав отлитых деталей из сплавов ЖС6У-ВИ и ВЖЛ12У-ВИ соответствует требованиям нормативного документа ОСТ 1-90126-85, а деталей из сплава ЖС26-ВИ — требованиям ТУ 1-92-177-91.

Библиографический список

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы. Технологии. Покрyтия ; под общ. ред. проф. Е. Н. Каблова. — М. : Наука, 2006. — 635 с.
2. **Миркин, Л. И.** Справочник по рентгеноструктурному анализу кристаллов / Л. И. Миркин. — М. : Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1961. — 850 с. ■

Получено 14.02.19

© Т. Ф. Баранова, И. В. Дьяконова,
Н. И. Шункина, С. И. Полянский,
Ю. Р. Нуртдинов, М. А. Горбаненко, 2019 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Held under the patronage of His Royal Highness Prince Khalifa bin Salman Al Khalifa, The Prime Minister of the Kingdom of Bahrain



arabal
ARAB INTERNATIONAL
ALUMINIUM CONFERENCE



Hosted by
alba
Aluminium
for the world

19-21 ноября 2019 г. Манама, Бахрейн

Shaping the future of Aluminium in the Arab Region

23-я Арабская международная конференция по алюминию




www.arabal.com