

УДК 669.245: 536.421.4

Симановский В. М., Максюта И. И., Квасницкая Ю. Г., Михнян Е. В., Нейма А. В.**ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ФОРМОВОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ
ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ С ОРИЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ**

Задача изготовления таких высоконагруженных элементов газотурбинного двигателя (ГТД) как рабочие лопатки, связана со сложностью их геометрии, а именно, с большим количеством поверхностей критического формообразования и высокими требованиями по точности геометрических параметров поверхностей деталей на уровне 5...7 квалитетов, а также необходимостью достижения шероховатости поверхности не более 1,25 мкм. В последние годы, по мере возрастания температуры газа на входе в турбину, технологическим приемом, позволяющим получать сложнопрофильные лопатки ГТД, отвечающие заданным эксплуатационным характеристикам, являются методы направленной кристаллизации (НК). При этих методах получения отливок керамические формы более длительное время находятся в зоне воздействия высоких температур и контактируют с перегретым (до 1550–1600 °С) металлом. Кроме того, при использовании определенного вида литейного оборудования, например, УВНК-8П (серийная литейная установка для НК, Россия), на которой проводили плавки авторы данной работы, форма подвешивается на захватах и, естественно, испытывает высокие механические нагрузки. Так, при габаритах лопатки до 350 мм и весе блока до 15 кг, изгибающие напряжения, согласно литературным данным, составляют 20–30 кгс/см². С учетом концентраторов напряжений и необходимого запаса прочности, уровень напряжений при испытаниях на изгиб керамики формы должен быть не менее 50 кгс/см². При этом необходимо обеспечить стабильность термического расширения и линейной усадки формы при температурах до 1500–1550 °С [1, 2].

Однако до настоящего времени отсутствуют четкие технологические рекомендации получения модифицированных литейных форм для получения габаритных рабочих лопаток с ориентированной структурой для определенных типов стационарных и транспортных ГТД. Поэтому разработка теоретических и технологических основ процессов получения эффективных модифицированных формовочных керамических смесей для литейной технологии жаропрочных сплавов в отечественном газотурбостроении является весьма актуальной.

Лаборатория точного литья жаропрочных сплавов Физико-технологического института металлов и сплавов Украины (ФТИМС НАНУ) на протяжении ряда лет успешно занимается разработкой модификаторов и способов их ввода в керамические массы для получения формовочных и стержневых материалов при изготовлении равноосных и ориентированных лопаток ГТД из сплавов на никелевой основе [3]. На предприятиях отрасли в Украине прошли опытно-промышленное опробование формовочные композиции с различного типа модификаторами, содержащие наполнитель – электрокорунд, в качестве связующего – гидролизированный этилсиликат.

Особое значение при получении ориентированных структур имеют теплофизические свойства материалов формообразующей керамической оснастки такие, как теплопроводность, теплоемкость, плотность, чтобы как можно меньше препятствовать прохождению теплового потока от нагревателя к металлу и от металла к охлаждающей среде. Это достигается применением материалов с минимальными значениями теплоемкости и плотности, но максимальной теплопроводностью [4].

Важнейшим требованием по отношению к формовочным материалам является и минимальное взаимодействие материала с элементами химического состава жаропрочного сплава. Установлено, что разрушение огнеупорной керамики, контактирующей с расплавленным металлом, происходит по многим причинам. Это и процессы обмена, диффузия компонентов огнеупора сквозь пограничный слой в расплав и, напротив, процессы растворения поверхности огнеупора расплавом и перенос растворенных веществ в расплав. Происходит также механическое разрушение огнеупорной керамики, заключающееся в растрескивании огнеупора, проникновение расплава в трещины футеровки и ее дальнейшее разрушение.

В настоящее время на предприятиях СНГ, производящих лопатки ГТД, а также фирмах – производителях ГТД в ФРГ, США, Англии и др. странах в качестве огнеупорных материалов применяют чаще всего электрокорунд, дистенсиллиманит, глинозем и маршалит, изредка плавленный кварц [1, 5, 6]. Традиционные формовочные смеси, а также шихты для огнеупорных изделий включают огнеупорный наполнитель и связующее, либо изготовлены без связующих методом водных и неводных шликеров. Собственно связующим оболочки, как правило, служит тугоплавкий оксид, образующийся из элементоорганического соединения или из неорганической соли металла и цементирующей зерна основы в процессе формирования оболочки. В настоящее время в качестве связующего широко применяются этилсиликаты марок 32 и 40, которые представляют собой смесь тетраэтоксилаксана и алкоксилаксанов, реже – этилсикат 50.

Связующая способность гидролизованных растворов этилсиликатов, оцениваемая прочностью керамики, повышается с увеличением концентрации в них SiO_2 . Оптимальное количество SiO_2 в растворе (14–20 %) регулируется добавкой растворителя и зависит от вида исходного этилсиликата. Однако присутствие кремнезема, обуславливающего связывание огнеупорного наполнителя, одновременно приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик литейной керамической формы. Это объясняется тем, что технологические условия формирования керамического изделия после обжига при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ обеспечивает массовая доля SiO_2 не менее 11 % [3, 7]. И именно эти 11 % аморфного кремнезема являются источником всех недостатков традиционной технологии, поскольку непрореагировавший кремнезем образует низкоплавкую стеклофазу, которая снижает огнеупорность системы. Методами физико-химического фазового анализа однозначно установлено, что присутствие оксида кремния на поверхности формы приводит к обеднению поверхности отливки алюминием, титаном и хромом, что значительно ухудшает жаропрочность сплава [7].

На предприятиях газотурбостроения Украины чаще всего в качестве керамического огнеупорного наполнителя используется электрокорунд. Это объясняется его достаточной химической стойкостью при температурах выше $1000\text{ }^\circ\text{C}$ в расплавах, содержащих высокоактивные металлы, такие, как титан, хром. Его применение объясняется также экономической целесообразностью, что немаловажно для снижения стоимости литейной продукции. Однако литейные формы системы корунд-этилсиликат обладают заметной пористостью, трудноконтролируемой усадкой, а также низкой структурной прочностью вследствие наличия аморфного кремнезема и, следовательно, недостаточно высокой огнеупорностью при длительных контактах с расплавами жаропрочных сплавов, как этого требует технологический процесс получения лопаток ГТД с ориентированной структурой.

Одним из путей устранения указанных недостатков за счет совершенствования системы кремнекислота – электрокорунд является введение в композицию в качестве модификаторов фазово-структурных характеристик таких компонентов, которые обеспечивали бы связывание остаточного кремнезема в кристаллическую высокотемпературную фазу.

Целью работы является изучение влияния компонентов-модификаторов на характеристики смесей на основе кремнезема.

При проведении теоретического анализа фазово-химических процессов в системе керамический наполнитель – связующее и в ходе эмпирических исследований установлено, что фазовой составляющей, играющей роль огнеупорного каркаса в вышеуказанной системе, может стать муллит – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ [3]. Показано, что при условии введения в качестве модификатора тонкодисперсного порошка алюминия, превращающегося в процессе окисления в оксид алюминия, в композиции происходит термическая диссоциация соединений с образованием муллита в качестве каркасной фазы, что сопровождается перестройкой одной кристаллической решетки в другую. Как следует из табл. 1 введение модификаторов в корунд оказывает влияние на прочностные и термомеханические характеристики спеченной керамики. Так, в табл. 1 приведены результаты испытаний образцов керамики из корунда с модифицирующими добавками для различных температур обжига на предел прочности при изгибе и сжатии. Как и ожидалось, с увеличением температуры обжига прочностные и огнеупорные характеристики растут, поскольку и скорости диффузии и скорости химических реакций возрастают с температурой термообработки.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов керамики на основе корунда с модифицирующими добавками

№ составов	Модификаторы, (содержание %, масс. доля)	Предел прочности при изгибе, МПа			Предел прочности при сжатии, МПа			Температура начала деформирования под нагрузкой 0,2 МПа, °С		
		Температура обжига керамики, °С								
		1200	1400	1600	1200	1400	1600	1200	1400	1600
1	3	10,5	19,7	30,0	26,4	46,0	87,0	1200	1370	1540
2	5	11,4	20,8	33,0	34,0	52,0	96,0	1220	1390	1560
3	7	13,1	22,0	31,2	38,6	57,0	101,0	1240	1410	1580
4	10	17,0	24,3	34,4	45,7	63,0	112,0	1250	1420	1610

Как оказалось, увеличение количества алюминиевого модификатора (составы 1–4) слабо влияет на прочностные и термомеханические характеристики спеченной керамики. Рентгенофазовый анализ показывает присутствие единственной фазы α – Al_2O_3 . А это означает, что термомеханические свойства будут определяться только совершенством растущей фазы α – Al_2O_3 , которое зависит не столько от количества модификатора, сколько от температуры термообработки. Об этом свидетельствует рост всех показателей при увеличении температуры термообработки с 1200 °С до 1600 °С. При этом, несмотря на наличие реакционноактивной фазы – алюминия, лимитирующей стадией является диффузионное спекание [3].

При проведении опытно-промышленного опробования модифицированных формовочных смесей для изготовления партии рабочих лопаток ГТД с ориентированной структурой из сплава ЧС-88, были применены в качестве наполнителя смеси микропорошков электрокорунда, в качестве модификатора в гидролизованый этилсиликат был добавлен порошок алюминия АСД-4, при обсыпке применяли электрокорунд, термообработка форм – при температуре 1300 °С. Заливка формы проводилась при температуре 1520–1530 °С, скорость вытягивания формы из термостата составляла 1,5–2,0 мм/мин. Авторами было показано, что на внешней и внутренней поверхности отливок из сплава ЧС88 при визуальном осмотре и металлографических исследованиях не выявлено микропор, засоров, раковин, неметаллических включений после заливки в формы из новой модифицированной керамической смеси.

ВЫВОДЫ

На основании термического и фазового анализа формовочных композиций установлено, что модифицирование огнеупорной керамики на основе корунда тонкодисперсным металлическим порошком алюминия увеличивает скорость реакции образования муллита и позволяет достигать высоких прочностных характеристик форм при пониженных температурах отжига. Визуальное и металлографическое обследование контактной зоны отливка – форма показало значительное (в 2–2,5 раза) сужение зоны взаимодействия расплав-форма, отсутствие пригара, снижение количества неметаллических включений при применении модифицированных формовочных смесей (3–5 %, масс. доля порошка алюминия АСД-4). Опытно-промышленное опробование отливок из сплавов, залитых в модифицированные формы на основе электрокорунда, показало, что выбранные соотношения ингредиентов материалов модифицированных форм дают возможность в 1,5–1,8 раза повысить термостойкость огнеупорных изделий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей / Е. Н. Каблов. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям / С. И. Репях. – Днепропетровск : Лира ЛТД, 2006. – 1056 с.
3. Симановский В. М. Теория та технология модифицирования формовочных смесей для отливок с специальных сплавов : автореф. дис. д-ра техн. наук / В. М. Симановский. – Киев : ФТИМС НАНУ, 2008. – 36 с.
4. Ефимов В. А. Специальные способы литья : [справочник] / В. А. Ефимов. – М. : Машиностроение, 1991. – 436 с.
5. Бескремнеземные керамические формы для направленной кристаллизации при литье лопаток ГТД / Е. Н. Каблов и др. // Литейное производство. – 2003. – № 5. – С. 16–18.
6. Савельев Ю. Н. Опыт применения плавного кварца в ЛВМ / Ю. Н. Савельев, А. С. Грибанов, В. С. Кучеренко // Литейщик России. – 2005. – № 10. – С. 31–33.
7. Модифицированные формовочные смеси для изготовления отливок из жаропрочных сплавов / В. М. Симановский, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, Ю. Н. Левченко // Литейное производство. – 2008. – № 4. – С. 14–16.

Статья поступила в редакцию 06.10.2011 г.