

## Повышение точности сложнопрофильных отливок при применении комплексно-модифицированной стержневой керамики

С целью повышения эксплуатационных характеристик керамических материалов для литейных стержней, формирующих внутренние полости охлаждаемых лопаток ГТД с ориентированной структурой, авторами предложена концепция применения комплексного модифицирования огнеупорных смесей на основе корунда и плавленного кварца металлическими порошками алюминия, кремния и бора. Полученный эффект повышения свойств (термическая стойкость, повышение прочности на изгиб и сжатие) авторы объясняют интенсификацией образования фазовой составляющей – муллита, играющей роль огнеупорного каркаса.

**Ключевые слова:** огнеупорные смеси, корунд, плавленный кварц, стержень, механические характеристики, жаропрочный сплав

Разработка теоретических и технологических основ процессов изготовления сложнопрофильных рабочих и сопловых лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) из многокомпонентных жаропрочных сплавов связана не только со сложностью обеспечения прецизионного состава отливок, но и необходимостью достижения геометрически точных размеров. Известно, что эти детали отличаются большим количеством поверхностей критического формообразования, особенно в лопатках с воздушным охлаждением. Так, анализ видов брака показывает, что до 50 % его приходится на разностенность, термические трещины и коробление керамических стержней, формирующих внутреннюю полость, при их многоразовом обжиге в процессе изготовления и, далее, кристаллизации отливок.

ФТИМС НАН Украины совместно с предприятиями газотурбостроения Украины на протяжении многих лет проводят работы по усовершенствованию технологии получения стержней, прежде всего, на основе корунда и плавленного кварца, для деталей ГТД с равноосной и ориентированной структурой. На предыдущих этапах работы были сформулированы основные принципы управления физико-химическими и механическими характеристиками огнеупорных керамических смесей для тиглей, форм, стержней за счет введения в составы добавки-модификатора в виде дисперсного металлического порошка (либо алюминия, либо кремния), что получило название метода мономодифицирования [1-3]. Это позволило разработать и запатентовать составы керамических смесей, предназначенных для литья охлаждаемых лопаток ГТД, главным образом, с равноосной структурой, обладающих более высокой термо- и химической стойкостью по сравнению с традиционными керамическими смесями [4].

При получении отливок с направленной кристаллизацией, в процессе которой керамические формы и литейные стержни большее время контактируют с перегретым до 1550–1600 °С расплавом, к физи-

ко-механическим свойствам огнеупорной керамики предъявляются более жесткие требования. Это касается и минимизации взаимодействия материала с элементами химического состава жаропрочного расплава, включающего такие активные химические элементы, как хром, алюминий, титан.

В данной работе с целью дальнейшего повышения эксплуатационных характеристик керамических материалов для деталей с ориентированной структурой, авторами предложена как продолжение работ по мономодифицированию, концепция применения комплексного модифицирования металлическими порошками алюминия, кремния и бора огнеупорных смесей на основе корунда и плавленного кварца.

Известно, что на этапе сушки и прокали стержневой керамики, и особенно при заливке и кристаллизации, на нее воздействуют неравномерные температурные поля. Возникает сложное напряженно-деформированное состояние системы стержень-оболочка-отливка, которое в конечном итоге определяет геометрическую точность лопатки.

С целью оценки степени неравномерности температурных максимумов и минимумов при прокали стержней и при заливке новых разрабатываемых сплавов с повышенным содержанием тугоплавких элементов, имеющих более высокую температуру плавления, авторами проведены термометрические замеры температурных полей. Распределение температуры по ширине керамического стержня при заливке расплава показано на рис. 1.

Примером использования положительного влияния комплексных модификаторов на прочностные характеристики, в частности, прочности на изгиб, является разработанная авторами статьи огнеупорная смесь для изготовления литейных керамических стержней на основе корунда для получения лопаток ГТД с ориентированной структурой, в частности для стационарных газоперекачивающих установок (ГТН-16, ГТН-25, НК-12СТ) [5]. Прототипом новой разработки авторов являлась смесь на основе корунда

с применением мономодификатора в виде порошка кремния. Для установления влияния количества введенных модификаторов на эксплуатационные характеристики керамических смесей на основе корунда и кварца, проводились испытания следующих свойств: температуры деформации под нагрузкой (ГОСТ 4070-2000); предел прочности при изгибе и сжатии керамической массы (ГОСТ 23409.8-78); огнеупорность (ГОСТ 4069-69).

Данная смесь имела достаточную прочность на изгиб (37 МПа при  $T_{исп.}$  1050 °С) для отливок с равноосной кристаллизацией. Но в условиях использования более тугоплавких сплавов нового поколения для литых деталей с направленной кристаллизацией необходимо было повысить прочностные характеристики, что было достигнуто за счет дополнительного введения порошка алюминия в количестве до 3,5 % (табл. 1) [6]. Как показали эксперименты, количество алюминия менее 0,5 % недостаточно увеличивает прочность на изгиб стержней, а при введении его 3,5 % мас. прочностные свойства достигают уровня, требуемого условиями эксплуатации (см. табл. 1) [5].

Полученный эффект повышения свойств можно объяснить тем, что при проведении анализа фазо-

во-химических процессов в системе керамический наполнитель-связующее-комплексный модификатор было установлено, что фазовой составляющей, играющей роль огнеупорного каркаса в данной системе, может стать, аналогично методу мономодифицирования, такое соединение, как муллит –  $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$  (рис. 2) [3]. Так, рентгенофазовым анализом на установке ДРОН-2 показано наличие структурных превращений в муллитовую группу, что подтверждается усилением на дифрактограмме соответствующих линий, характерных именно для муллита. Степень муллитизации при введении в качестве модификаторов комплексно алюминия и кремния определяли по методике, основанной на зависимости дифракционного отражения от содержания соответствующей фазы. Вероятно, при введении модификаторов в композицию, интенсифицируется термическая диссоциация соединений с образованием муллита в качестве каркасной фазы, что сопровождается перестройкой одной кристаллической решетки в другую (рис. 3).

Технология приготовления разработанной новой стержневой смеси не отличается от обычной и заключается в расплавлении пластификатора (парафин нефтяной марки В3, В4 (ГОСТ 23683-79), введении порошка кремния Кр-1 (ГОСТ 2169-69) и алюминия АСД-4 (ТУ 48-5-226-82) в расплавленный пластификатор при тщательном их перемешивании. Затем в расплавленную смесь вводится огнеупорный наполнитель и смесь тщательно перемешивается. Удельная поверхность корундовых смесей должна находиться в пределах 500-1900 см<sup>2</sup>/г, в соответствии с этим массовая доля пластификатора колеблется от 13 до 18 %. Глинозем, примененный как засыпка при выжигании стержней, прокаливали при температуре 1200 (± 50) °С в течение 6 (± 0,5) часов и просеивали через сито 0063. Спекание стержней проводят в засыпке со скоростью нагрева 50 °С/ч до температуры 600 °С, затем со скоростью 100-150 °С/ч нагревают до температуры 1250 °С и выдерживают 2 часа. Как видно из таблицы № 1, при введении в смесь дополнительно алюминия, значительно увеличивается термостойкость стержней.

Подробнее рассмотрим вопросы, связанные с применением стержней для получения современных типоразмеров лопаток ГТД с усложненной системой воздушных каналов. В этом случае целесообразно применение в качестве наполнителя огнеупорной керамики из плавленого кварца с плотностью 2,23 г/см<sup>3</sup> и температурой

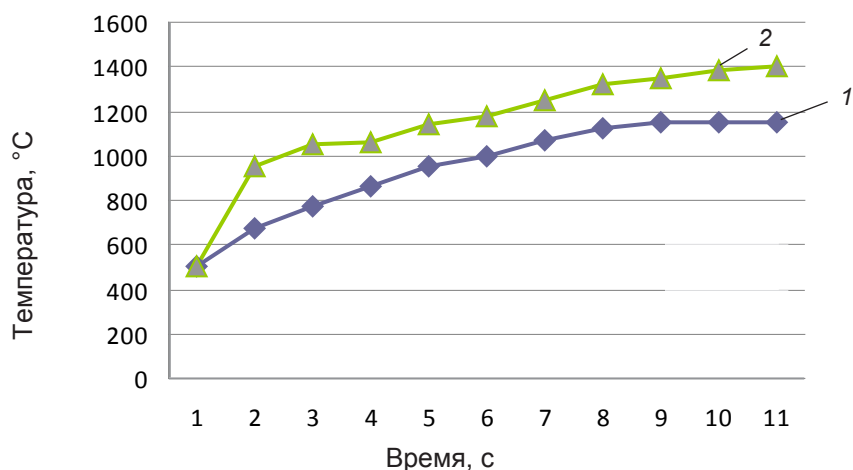


Рис. 1. Распределение температуры по ширине керамического стержня при заливке расплава: 1 – входная кромка, 2 – выходная кромка

Таблица 1

**Зависимость прочности на изгиб от состава смеси на основе корунда с комплексным модифицированием Al + Si**

Состав смеси, доля, %мас.				Прочность на изгиб, МПа ( $T_{исп.}$ – 1050 °С)
огнеупорный наполнитель	пластификатор	порошок алюминия	порошок кремния	
корунд				
83,0	13	1,5	2,5	37,5
79,5	16	3,0	1,5	39,0
81,0	15	1,0	3,0	38,1
78,0	18	2,0	2,0	38,5
82,0	14	0,5	3,5	37,2
79,5	17	2,5	1,0	39,0
83,5	14	–	2,5	37

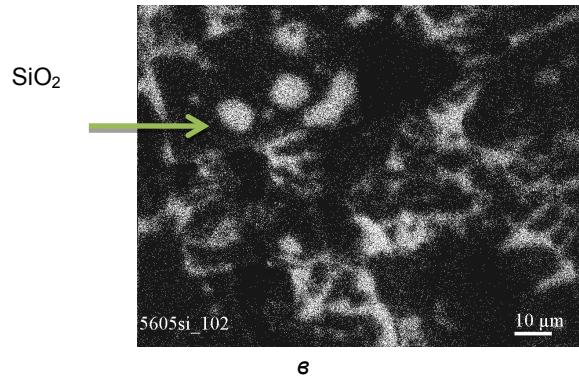
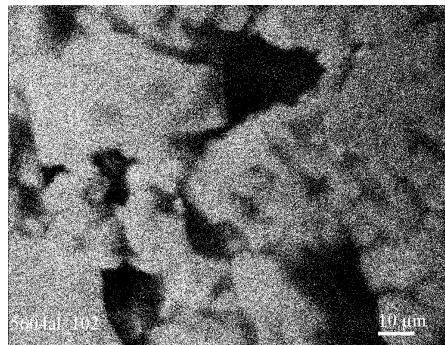
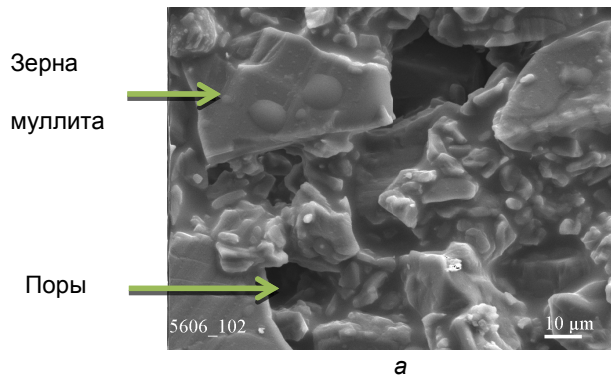


Рис. 2. Микроструктура стержня на основе корунда, модифицированного алюминием + кремнием: а – в электронных лучах, б – в характеристических лучах алюминия, в – в характеристических лучах кремния, ×1000

плавления 1725 °С. Он имеет коэффициент линейного термического расширения на порядок ниже, чем у других огнеупоров, что дает возможность обеспечить высокую геометрическую точность отливок, снизить разностенность лопаток и в результате позволяет уменьшить количество литейного брака.

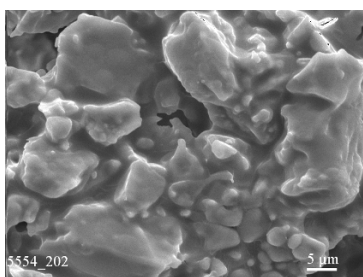
Следует отметить, что ранее авторами была разработана смесь для изготовления литейных керами-

ческих стержней для лопаток турбин с ориентированной структурой, которая содержит легкоплавкий пластификатор, порошок алюминия и плавный кварц. В этой композиции легкоплавкий пластификатор является связующим при изготовлении стержней методом термошликера и его количество обусловлено получением композиции определенной вязкости для изготовления стержней различной конфигурации. Алюминий в процессе отжига взаимодействует с присутствующим кислородом, препятствуя образованию кристобалита. Кроме того, образующийся оксид алюминия увеличивает степень спекания керамики. Однако, основным недостатком такой смеси была ее недостаточная прочность. Известно также, что смесь, которая имеет в составе плавный кварц, в процессе спекания при температурах более 1200 °С растрескивается, то есть кристаллизация плавного кварца приводит к потере прочности. Для устранения этого недостатка было применено дополнительно к алюминию, комплексное модифицирование порошками кремния и бора. При этом атомы металлического кремния, размещаемые между зернами основы SiO<sub>2</sub>, дополнительно укрепляют каркас огнеупорной смеси. А тонкодисперсные порошки алюминия и аморфного бора выполняют роль геттера, так как взаимодействуют при нагреве с адсорбированным на поверхности кварца кислородом и парами воды. Кроме того, при содержании Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> около 5 % в системе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> образуется эвтектика, которая способствует снижению температуры спекания (рис. 4).

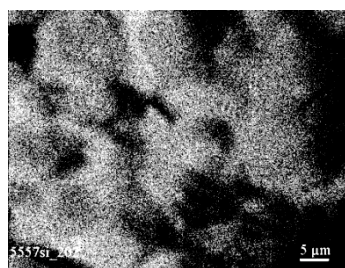
Рис. 3. Дифрактограмма образца стержневой керамики на основе корунда с модификаторами

Для определения оптимального количества комплекса модификаторов были изготовлены





В отраженных электронах



В характеристических лучах кремния

**Рис. 4.** Микроструктура стержня на основе плавленного кварца, комплексномодифицированного Al+B+Si,  $\times 2000$

**Зависимость прочности на изгиб от состава смеси на основе плавленного кварца с комплексным модифицированием Al + B + Si**

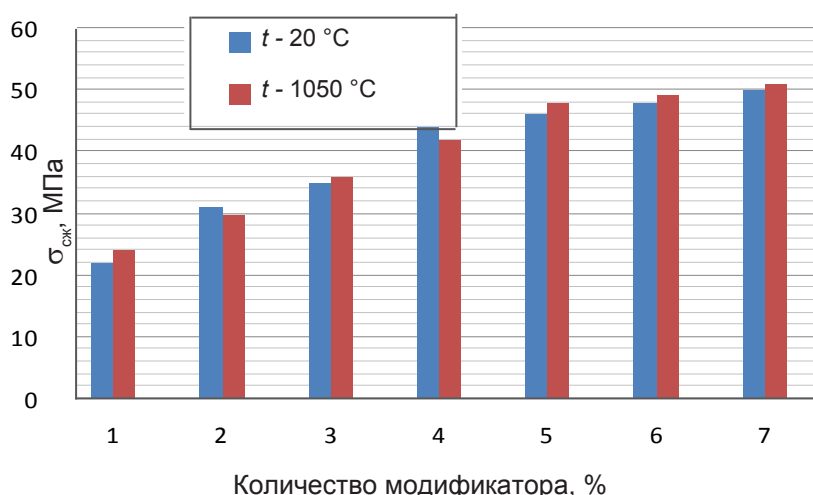
Состав смеси, %мас.					Прочность на изгиб, МПа ( $T_{исп} - 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
плавленный кварц	пластификатор ПП-10	порошок алюминия	порошок бора	порошок кремния	
78,8	16	3,0	0,2	2,0	23,5
81,2	14	3,0	0,3	1,5	23,8
75,1	18,5	3,0	0,4	3,0	24,6
78,5	17	3,0	0,5	1,0	24,8
72,9	19	3,0	0,1	5,0	24,5
80,9	15	3,0	0,6	0,5	25,0
74,45	18	3,0	0,05	4,5	21,8
78,25	14,5	3,0	0,75	3,5	23,1
Прототип					
плавленный кварц	пластификатор ПП -10	порошок алюминия			Прочность на изгиб, МПа ( $T_{исп} - 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ )
84	13	3,0			

Таблица 2

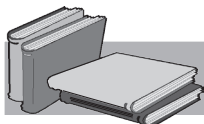
образцы керамики с различным содержанием алюминия, бора, кремния (табл. 2). Для равномерного распределения вводили порошки в расплав пластификатора, а затем подготавливали нужный состав керамической массы. Из керамической массы запрессовывали образцы, спекали при температуре 1250 °С с выдержкой 2 часа, с подъемом температуры со скоростью 100-150 °С/ч. Образцы испытывали на прочность при изгибе и сжатии при температуре 20 и 1050 °С (рис. 5).

Как показали опытно-промышленные испытания в рамках программы совместных исследований ФТИМС НАНУ с ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев), уменьшение степени коробления стержней при применении комплексно-модифицированной стержневой массы дало возможность добиться формирования отливок с повышенной на 5-7 % размерной точностью элементов и снижения шероховатости поверхности до 1,25-1,30 мкм [7].

В целом анализ результатов исследований показал, что применение разработанных стержневых смесей в серийном производстве является перспективным, так как приводит к снижению на 3-4 % брака литых лопаток за счет повышения геометрической точности отливок, а также увеличивается на 5-7 % выход годных стержней за счет возрастания их термостойкости и прочности на изгиб, что позволяет значительно снизить затраты на материалы и энергоносители.



**Рис. 5.** Зависимость прочности при сжатии ( $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) керамики из плавленного кварца от количества модификатора



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Симановский В. М.* Теория и технология модифицирования формовочных смесей для отливок специальных сплавов: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Киев: ФТИМС НАНУ. – 2008. – 36 с.
2. *Каблов Е. Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей. – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
3. Основные требования к формовочным материалам для получения деталей с ориентированной структурой / В. М. Симановский, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая, Е. В. Михнян, А. В. Нейма // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії, збірник наукових праць. – 2011. – № 4. – С.139-141.
4. Пат. № 82603, Україна, МПК (2006) B22C 9/10 C04B 35/04 (2008.01), C04B 35/10. Суміш для виготовлення ливарних керамічних стрижнів / В. М. Симановський, Ю. Г. Квасницька, О. Й. Шинський, І. І. Максютя, М. О. Сушков, В. Г. Єфімова. – Опубл. 25.04.2008 р, Бюл. № 8.
5. Пат. № 79420, Україна, МПК B22C 1/18 (2006.01). Суміш для виготовлення ливарних керамічних стрижнів / І. І. Максютя, Ю. Г. Квасницька, О. Й. Шинський, Г. П. Мьяльница, В. П. Гаврилюк. – Опубл. 25.04.2013р, Бюл. № 8.
6. Технологические особенности высокохромистого никелевого сплава комплексно-легированного рением и танталом / И. И. Максютя, О. В. Клясс, Ю. Г. Квасницкая, Г. Ф. Мьяльница, Е. В. Михнян // Современная электрометаллургия. – 2014. – № 1. – С. 41-48.
7. Акт опытно-промышленной проверки. ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект», Николаев. – 20.02.2013 г.

### Анотація

*Максюта І. І., Квасницька Ю. Г., Михнян О. В., Нейма О. В.*

Підвищення точності складнопрофільних виливків при застосуванні комплексно-модифікованої стрижневої кераміки

З метою підвищення експлуатаційних характеристик керамічних матеріалів для ливарних стрижнів, що формують внутрішні порожнини охолоджуваних лопаток ГТД з орієнтованою структурою, авторами запропонована, як продовження робіт з мономодифікування, концепція застосування комплексного модифікування вогнетривких сумішей на основі корунду та плавленого кварцу металевими порошками алюмінію, кремнію та бору. Отриманий ефект підвищення властивостей (термічна стійкість, підвищення міцності на вигин і стиснення) автори пояснюють інтенсифікацією утворення фазової складової – муліту, що грає роль вогнетривкого каркасу.

### Ключові слова

вогнетривкі суміші, корунд, плавлений кварц, стрижень, механічні характеристики, жароміцний сплав

### Summary

*Maksiuta I. I., Kvasnitskaya Yu. G., Mihnyan E. V., Neima A. V.*

Increase castings precision by using complex-modified ceramics for rods

For the purpose of improving processability of ceramic materials for rods that forms inner cavity of the cooled gas turbine engine blades with oriented structure, so authors propose a continuation work on mono-modifying as the concept of using complex modifying the mixtures of refractory corundum and fused quartz with metal powders of a aluminum, silicon and boron. The effect boosting properties (thermal stability, increased flexural and compression) authors explain education intensification phase component – mullite playing the role of refractory skeleton.

### Keywords

refractory mixture, corundum, fused quartz, rod, mechanical characteristics, heat-resistant alloy

Поступила 12.03.14