

УДК 621.747.53

**В. М. Симановский, И. И. Максютя, Ю. Г. Квасницкая,  
А. С. Притуляк, Ю. Н. Левченко**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

### **КЕРАМИЧЕСКИЕ СТЕРЖНИ И ФИЛЬТРУЮЩИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ЛИТЬЯ ОХЛАЖДАЕМЫХ ЛОПАТОК ГТД**

*На основе исследования фазово-структурных особенностей керамики, модифицированной тонкодисперсными металлическими порошками алюминия и кремния, разработана технология изготовления термостойких изделий литейной оснастки – керамических стержней и фильтрующих элементов, проведено их опытно-промышленное опробование для получения отливок жаропрочных сплавов с комплексом повышенных эксплуатационных характеристик.*

*На основі дослідження фазово-структурних особливостей кераміки, модифікованої тонкодисперсними металевими порошками алюмінію та кремнію, розроблено технологію виготовлення термостійких виробів ливарної оснастки – керамічних стрижнів та фільтруючих елементів, проведено їх дослідно-промислове випробування для одержання виливків з жароміцних сплавів з комплексом підвищених експлуатаційних характеристик.*

*On the base of investigations physical-chemical and mechanical parameters of modified ceramics developed technology of more spelling-resistant production from modified ceramics (filters and rods); experimental-industrial tests for manufacturing of superalloys casts with higher complex of merits were realized.*

**Ключевые слова:** жаропрочные сплавы, лопатки ГТД, керамические стержни, фильтрующие элементы.

Современная технология литья рабочих и сопловых лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с равноосной и ориентированной структурой способствует постоянному совершенствованию керамических огнеупорных материалов для изготовления литейной оснастки.

Литейная керамика обеспечивает точность геометрических размеров и чистоту поверхностей отливок. При изготовлении тонкостенных отливок с внутренними полостями к которым относятся охлаждаемые рабочие лопатки ГТД, особо важными элементами являются стержни.

Однако материал литейной оснастки вследствие взаимодействия с расплавленным металлом может оказывать влияние на его химический состав, особенно в приповерхностных слоях отливки. Так, еще в процессах шихтовки, плавки, транспортирования к форме жидкого расплава существует реальная опасность попадания в него и образования в нем нежелательных включений. Поэтому в современном литейном производстве использование пористых керамических фильтров (ПКФ) стало общепринятой технологией улучшения качества отливок.

В данной работе рассматриваются новые материалы и технологические процессы, разработанные для производства стержней и элементов фильтров на протяжении последних лет, в том числе в ФТИМС НАНУ.

Основными физико-механическими характеристиками, из которых исходят при оптимизации состава керамической смеси для стержней, являются повышенная прочность в широком диапазоне температур, минимальная усадка, высокая пористость и низкая шероховатость, поскольку внутренние полости, формируемые стержневыми вставками, не подлежат дальнейшей механической обработке. Таким образом, качество поверхности напрямую связано с возможностью достижения изготавливаемыми деталями расчетных эксплуатационных параметров [1, 2].

Наиболее распространенные технологии получения стержней заключаются в проведении процессов формообразования и связывания между собой частиц порошков различного фракционного состава путем высокотемпературного спекания (обжига), спекания с последующей пропиткой жидким связующим веществом, химического отверждения связующего вещества смеси в пресс-форме и т. д. [1,2].

В настоящее время самыми распространенными материалами для промышленно изготавливаемых в газотурбостроении керамических стержней являются электрокорунд и плавеный (аморфный) кварц, которые наиболее соответствуют комплексу физико-химических, технологических и экономических требований [1-3].

В данной статье подробнее рассмотрены вопросы, связанные с применением стержней на основе плавеного кварца, которые способны обеспечить высокую геометрическую точность отливки, уменьшить разностенность лопаток, что в результате позволяет снизить количество литейного брака.

Плавеный кварц представляет собой химическое соединение, отвечающее формуле  $\text{SiO}_{2-x}$ . Однако аморфное состояние оксида кремния является термодинамически неустойчивым. Известно, что кварц при нагреве плавится и претерпевает 4 полиморфных превращения, сопровождающихся изменением плотности [3]. Из этого следует, что объемные изменения при кристаллизации будут приводить к растрескиванию керамики. Эмпирически подтверждено, что основными активаторами процесса кристаллизации кварца являются кислород и пары воды. С ростом содержания  $\text{H}_2\text{O}$  в плавеном кварце начало образования кристобалита смещается в сторону более низких температур. Предполагается, что кристаллизация аморфного кварца обусловлена образованием в поверхностном слое большого числа кислородных вакансий и областей, содержащих частично восстановленную и термодинамически малоустойчивую форму кремнезема  $\text{SiO}_{2-x}$ , которая может менять состав в области гомогенности по реакции  $\text{SiO}_{2-x} \leftrightarrow (x/2) \text{Si} + (1-x/2) \text{SiO}_2$  с образованием менее восстановленной формы кремнезема [2, 3].

Эта реакция приводит к перестройке поверхности структуры аморфного кремнезема и инициирует образование центров и зародышей кристаллизации. Процесс кристаллизации интенсифицируется присутствием многочисленных примесных ионов. Щелочные и щелочноземельные оксиды особенно способствуют кристаллизации, причем специфическое действие катионов при гидролизации щелочей не связано с образованием ими жидкой фазы или ее количеством, хотя наличие ее значительно ускоряет процесс кристаллизации. Влияние различных добавок было исследовано в работах [4-6]. Обнаружили, что практически все вводимые добавки (оксиды щелочных металлов, оксиды титана, циркония и алюминия) повышают кристаллизационную способность аморфного оксида кремния, причем с увеличением количества добавок эта способность растет. Малая добавка  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,05 %) несколько замедляет образование кристаллической корки, повышая температуру образования кристаллитов и замедляя процесс роста кристаллического слоя на поверхности керамики [6-8].

Для торможения процессов кристаллизации, снижения количества кристаллической фазы и температуры спекания в ФТИМС НАНУ предложили в качестве модификаторов плавеного кварца применять тонкодисперсный порошок алюминия [4, 5, 9]. Алюминий, являясь по своей природе геттером, при нагреве может взаимодействовать с адсорбированным на поверхности кварца кислородом и парами воды, образуя оксиды [3]. Кроме того, было показано, что при содержании в системе  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  около 5 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , в ней образуется эвтектика, способствующая снижению температуры спекания смеси [3, 6, 7]. При проведении термографии обнаружили, что на термограмме плавеного

## Проблемы технологии формы

кварца, модифицированного алюминием, отсутствует экзотермический пик взаимодействия кварца с кислородом [4, 5]. Алюминий окисляется, снижая кристаллизационную способность плавленного кварца.

Для определения оптимального количества модификатора были изготовлены образцы керамики на основе кварца с различным содержанием алюминия от 0,5 до 10 %мас. Использовали непрозрачный плавленный кварц ЗАО «Икосил» г. С-Петербург марки ПНКС-1 (ТУ 5931-002- 01112114-94), содержащий фракцию <0053 не < 87 %мас. и порошок алюминия АСД-4 (ТУ 48-5-226-82).

Изготавливали смеси следующего состава, %мас.: плавленный кварц – 82-83, порошок алюминия – 0,5-10, пластификатор – 13-14.

Для равномерного распределения дисперсного порошка алюминия его вводили в расплав пластификатора, а затем подготавливали нужный состав керамической массы. Из смеси методом прессования изготавливали образцы, затем проводили их термообработку при температуре 1250 °С с выдержкой 2 ч при максимальной температуре. Образцы испытывали на прочность при изгибе и сжатии при температурах 20 и 1050 °С. Результаты исследований приведены в таблице.

### Прочность керамики из плавленного кварца, модифицированного порошком алюминия (АСД-4)

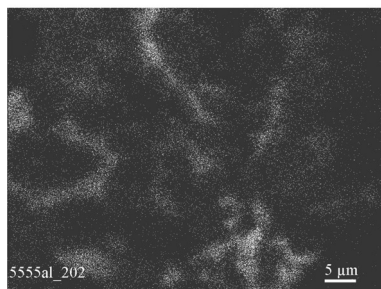
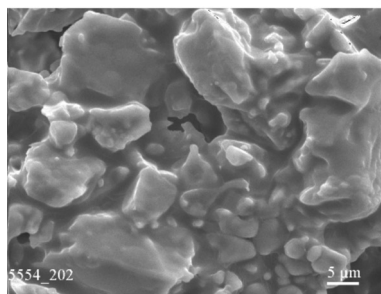
Номер состава	Количество порошка алюминия (АСД-4) в смеси, %мас.	Прочность при изгибе, МПа		Прочность при сжатии, МПа
		температура испытаний, °С		
		20	1050	20
1	-	8,6	9,2	22
2	0,5	10,1	12,0	28
3	1	11,4	12,9	31
4	2	14,0	15,1	35
4	2	17,5	19,4	45
6	5	21,0	22,0	47
7	7	22,1	22,0	49
8	10	23,4	21,2	51

Анализ данных показывает, что прочность стержневой керамики из плавленного кварца возрастает пропорционально до содержания алюминия 3,0-5,0 %. При дальнейшем увеличении количества модификатора (до 10 %) имеет место незначительное возрастание прочности. Характер наблюдаемой зависимости прочностных характеристик для плавленного кварца, модифицированного алюминием, одинаков как при температуре 20 °С, так и 1050 °С. Микроструктура образца плавленного кварца, модифицированного алюминием, показана на рисунке. Данные исследований подтверждают присутствие в межзеренном пространстве оксидов алюминия и кремния.

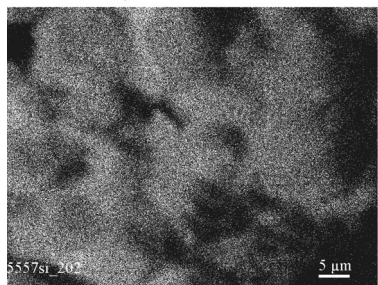
Опытная партия стержней из модифицированного кварца для формирования сложных внутренних полостей литых лопаток ГТД, изготовленная на отраслевых предприятиях Украины, показала увеличение выхода годного литья в 1,2-1,5 раза.

Как было сказано ранее, важным резервом повышения качества литья является фильтрационное рафинирование расплавов, при котором они пропускаются через слой огнеупора с развитой поверхностью для очистки их от неметаллических включений (НВ). Этот метод впервые был опробован применительно к магниевым, алюминиевым, медным, цинковым, а затем и к более тугоплавким сплавам, в том числе и к жаропрочным [1, 2, 10].

Так как после фильтрации металл должен иметь температуру выше температуры ликвидуса, то при рафинировании расплава фильтром могут задерживаться только первичные



в характеристических  
лучах алюминия



в характеристических  
лучах кремния

Микроструктура керамики из плав-  
ленного кварца, модифицированного  
5 % Al (МРСА)

и вторичные НВ. Из этого следует, что при фильтровании сплав может быть очищен, прежде всего, от оксидных, нитридных и карбидных включений. Так как сульфидные включения образуются в процессе затвердевания, то снижение количества сульфидов не может быть обеспечено механической фильтрацией, но, как показывают проведенные авторами исследования, успешным может стать применение рафинирования расплава с помощью электронно-лучевого переплава [11]. В этом случае благодаря значительному локальному перегреву металла в области фокального пятна может происходить высокотемпературная диссоциация включений и такого типа.

Считается, что эффект очистки металлических расплавов от НВ при фильтрации достигается за счет удерживания НВ, находящихся в расплаве, размеры которых больше размера ячеек сетчатого фильтра, а также адгезионного взаимодействия мелких включений с материалом фильтра [10-12].

В качестве материалов для фильтров применяют, главным образом, глинозем и диоксид циркония, их смеси и карбид кремния [10-13]. Керамические пористые фильтры чаще всего изготавливают путем нанесения керамической пульпы (шликера) на органическую пенную основу, имеющую полностью сетчатую структуру.

В последнее время в состав шихты для фильтров все чаще вводятся периклазные и шпинельные компоненты. Так, в работе [12] фильтры представляют собой спеченное изделие из огнеупорного наполнителя в количестве 100 весовых частей  $Al_2O_3$  или шпинели  $Al_2O_3 \cdot MgO$  и неорганического связующего в количестве 5-25 весовых частей, которое содержит 60-90 % мас. кристаллического порошка шпинели  $Al_2O_3 \cdot MgO$ , 5-12 %  $B_2O_3$ , и не более 30 % оксида алюминия, магния или титана.

Реальная нагрузка, действующая на фильтр в начальный момент заливки, — динамический удар струи металла. При постоянных массе сплава и удельной поверхности ПКФ пропускная способность, а, следовательно, и эффективность фильтрации будут зависеть от размера пор, температуры перегрева расплава и нагрева фильтрующего устройства. Следует отметить, что в промышленных условиях достаточно распространенными являются керамические фильтры с пористостью, не превышающей 45 %, и с размером пор 300-320 мкм [12-14]. К сожалению, технологический процесс получения пористой керамики с размерами пор 1-5 мм и пористостью, превосходящей 70 %, изучен недостаточно. В этой связи разработка процессов получения такого типа пористых керамических фильтров является весьма актуальной и требует решения нескольких технических задач: определения органической порообразующей добавки, ее оптимального зернового состава, оценки оптимальной пористости, обеспечивающей как требуемую эксплуатационную прочность материала фильтра, так и оптимальную скорость фильтрации.

В нашей работе для оптимизации основных технологических параметров процесса фильтрации жаропрочных сплавов типа ЧС проводили эксперименты по следующей методике: образцы фильтров из модифицированного дисперсным алюминием корунда вставляли в воронкообразную емкость, которую опускали в опоку. Затем фильтры прогревали до температур 900, 950, 1000 °С. Температура расплава, который заливали в опоку через фильтр, варьировалась в интервале 1400-1500 °С. Были опробованы фильтры

с диаметром пор от 2 до 4 мм. Результаты исследования влияния температуры подогрева фильтра и металлического расплава на работоспособность фильтрующей системы из модифицированного корунда (пористость - 85 %, плотность - 0,5 г/см<sup>3</sup>) позволили установить, что оптимальная скорость фильтрации наблюдается при температуре подогрева фильтра 950 °С, а расплава - 1450 °С.

### Выводы

• Из приведенных в работе данных следует, что изготовление сложнопрофильных стержней из керамических смесей традиционных составов на основе плавного кварца затруднено из-за термических трещин, возникающих в результате полиморфных превращений при проведении высокотемпературной термообработки. Авторы показали, что введение в аморфный кварц в качестве модификатора 5 % мас. дисперсного порошка алюминия снижает трещинообразование, затормаживая процессы перехода кварца в кристаллическое состояние. Это позволяет повысить уровень прочностных характеристик стержневой керамики на основе кварца с 8-10 МПа (без модификатора) до требуемой техпроцессом изготовления лопаток ГТД прочности на изгиб 18-20 МПа.

• Для обеспечения эффективной фильтрации жаропрочных сплавов типа ЧС оптимальным размером пор керамического фильтра на основе модифицированного корунда следует считать 2-4 мм, при этом температура подогрева фильтра должна быть не менее 950 °С, а расплава - 1450 °С.

### Список литературы

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей. - М.: МИСИС, 2001. - 632 с.
2. Репях С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям. - Днепропетровск: Лира ЛТД, 2006. - 1056 с.
3. Энциклопедия неорганических материалов. - Киев: Гл. редакция УСЭ, 1972. - Т. 1. - 840 с.
4. Симановский В. М. Обоснование выбора модификаторов для литейных керамических форм и стержней // Металл и литье Украины. - 2006. - № 9-10. - С. 31-32.
5. Симановский В. М. Теоретические основы получения литейных форм и стержней на основе модифицированной керамики // Процессы литья. - 2001. - № 2. - С. 41-47.
6. Лукин Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой // Огнеупоры и техническая керамика. - 1996. - № 4. - С. 3-13.
7. Савельев Ю. Н., Грибанов А. С., Кучеренко В. С. Опыт применения плавного кварца в ЛВМ // Литейщик России. - 2005. - № 10. - С. 31-33.
8. Кондратьев А. С., Попов В. Н., Аксельрод Л. М. и др. Возможности фильтрующего рафинирования металлов и требования к огнеупорным фильтрующим элементам // Огнеупоры. - 1990. - № 7. - С. 13-19.
9. Пат. 80076 Україна, МПК В22С 1/16. Суміш для виготовлення ливарних керамічних стрижнів /В. М. Сімановський, Ю. Г. Квасницька, І. І. Максютя. - Опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12.
10. Леонов А. Н., Децко М. М. Теория проектирования пенокерамических фильтров для очистки расплавов металлов // Огнеупоры и техническая керамика. - 1999. - № 12. - С. 14-20.
11. Максютя І. І., Сімановський В. М., Квасницька Ю. Г. Розробка складу та технології виготовлення медичних сплавів на кобальто-хромовій основі з застосуванням рафінуючих методів // Металл и литье Украины. - 2007. - № 3. - С. 40-44.
12. Могилевский Е. И., Бурцев Е. И. Технология изготовления и испытание керамических фильтров для рафинирования прецизионных сплавов // Огнеупоры и техническая керамика. - 2000. - № 1. - С. 43 - 45.
13. Староверов Ю. С., Чернов Ю. А. Применение пенокерамических фильтров в литейном и сталеплавильном производстве за рубежом // Огнеупоры. - 1992. - № 1. - С. 38-40.
14. Ali S., Martharasan R., Apelia D. The cleaning steels by filtration // Metallurgical Transactions. - 1985. - V. 168, № 4. - P. 725-742.

Поступила 17.06.2008