

УДК 666.7

Л.И. Рассохина<sup>1</sup>, О.Н. Битюцкая<sup>1</sup>, М.В. Гамазина<sup>1</sup>, В.В. Авдеев<sup>1</sup>

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВОВ КЕРАМИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ НА ОСНОВЕ ПЛАВЛЕННОГО КВАРЦА И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-34-42

*Представлены результаты исследований по выбору исходных материалов (керамическая шихта, термопластификатор) и экспериментальных составов стержневой массы для изготовления керамических стержней из плавленного кварца. Определены оптимальные технологические параметры, а также разработаны технологии изготовления стержневой массы экспериментальных составов. Представлены результаты исследований технологических параметров изготовления керамических образцов стержневых экспериментальных составов на основе плавленного кварца, по результатам которых выбран оптимальный.*

**Ключевые слова:** *плавленый кварц, стержневая масса на основе плавленного кварца, керамический стержень, восковая модель с керамическим стержнем, отливка охлаждаемой лопатки.*

L.I. Rassokhina<sup>1</sup>, O.N. Bityutskaya<sup>1</sup>, M.V. Gamazina<sup>1</sup>, V.V. Avdeev<sup>1</sup>

## RESEARCH OF COMPOSITIONS OF CERAMIC RODS BASED ON FUSED QUARTZ AND THEIR MANUFACTURING TECHNOLOGY

*The results of research on the selection of raw materials (ceramic charge, thermoplasticizer) and experimental compositions of the core mass for the manufacture of ceramic rods from fused quartz are presented. The optimal technological parameters were selected and the technology for manufacturing the core mass of experimental compositions was developed. The results of studies of technological parameters for the production of ceramic samples of experimental rod compositions based on fused quartz are presented. According to the results of these studies, the optimal one is selected.*

**Keywords:** *fused quartz, core mass based on fused quartz, ceramic core, wax model with a ceramic core, casting of a cooled blade.*

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

### Введение

В настоящее время все предприятия авиационной отрасли, выпускающие лопатки турбин для газотурбинных двигателей и установок (ГТД и ГТУ), для изготовления керамических стержней используют стержневые составы, основным исходным керамическим материалом которых является оксид алюминия (электрокорунд) различных фракций. Удаление керамических стержней на основе электрокорунда с развитой поверхностью представляет собой большую проблему. Для обеспечения 100%-го удаления керамических стержней из внутренней полости турбинных лопаток требуется увеличение количества технологических циклов, что приводит к повышению трудоемкости и стоимости изготовления турбинных лопаток, а также к образованию различных дефектов на поверхности внутренней и наружной полостей лопаток в процессе удаления (выщелачивание карбидов, осаждение чистого никеля, зарождение водородных трещин) [1–12].

Обозначенные проблемы обуславливают необходимость изыскания новых материалов и новых составов из них с высокими прочностью, стойкостью к термическим ударам и химической инертностью к жаропрочным сплавам, а также с низким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) и легкоудаляемостью. Такими керамическими материалами являются плавленный кварц ( $\text{SiO}_2$ ) и стержневые составы на его основе, достоинства которых заключаются в их очень низком ТКЛР, возможности снижения температуры спекания при сохранении прочностных характеристик и легкоудаляемости из лопаток турбин в водных растворах щелочей.

Таким образом, разработка составов керамических стержней на основе плавленного кварца и технологии их изготовления является одним из приоритетных направлений, отраженных в «Стратегических направлениях развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» [13].

### Материалы и методы

Получение керамических стержней для лопаток турбин ГТД и ГТУ представляет собой сложную техническую задачу, поскольку к стержням предъявляются высокие и взаимоисключающие требования:

- низкая объемная и линейная усадка при высокотемпературном обжиге, обеспечивающая высокую геометрическую точность;
- минимальная шероховатость поверхности, обеспечивающая отсутствие концентраторов напряжений во внутренней полости отливок лопаток;
- оптимальное сочетание высокой прочности и пористости для исключения дефектов типа «полум» стержней, а также обеспечение 100%-го удаления керамических стержней без дефектов поверхности охлаждаемых лопаток типа «растрав»;
- химическая инертность к расплавам жаропрочных никелевых сплавов при высоких температурах заливки, выдержки при кристаллизации и охлаждении отливок лопаток [1, 2].

По результатам проведенного анализа научно-технической информации выявлено, что в настоящее время в России и за рубежом разработаны стержневые составы для изготовления керамических стержней, которые могут обеспечить предъявляемые высокие требования и в которые в качестве исходных керамических материалов входит плавленный кварц. Стержни на основе плавленного кварца устойчивы к воздействию жаропрочных никелевых сплавов, имеют низкий ТКЛР и легко удаляются из внутренней полости. Однако все ранее разработанные составы керамических стержней на основе плавленного кварца предназначены для изготовления фасонных отливок с керамическими стержнями простой геометрической формы [2].

Технология твердофазного спекания для изготовления керамических стержней основана на использовании зернистых порошков чистых оксидов, что позволяет получать пористые высокоогнеупорные керамические стержни зернистого строения. Структура керамического материала зернистого строения может быть сформирована из непрерывного и ступенчатого зерновых составов. При выборе ступенчатого зернового состава необходимо использовать принцип укладки зерен с незначительной разницей в размерах отдельных фракций порошков как наиболее универсальный для регулирования в широких пределах основных свойств материала стержней [4].

Выбор ступенчатого зернового состава порошков плавленного кварца базировался на положении, что при определенном соотношении размеров и массового содержания фракций порошков оксидов должна возникать пористая структура из взаимнопроникающих объемных каркасов (блоков), сложенных из зерен, связанных керамической связкой. Предложенная модель зернистой структуры должна снизить напряжения между объемными каркасами, сложенными из частиц близких размеров, которые возникают при высокотемпературном обжиге, и позволит решить проблему

коробления сложных тонкостенных керамических стержней. Применение таких порошковых композиций не приведет к снижению пористости, так как зерна близких размеров не могут взаимно заполнять пустоты, которые образуются при их укладке. Общее число контактов между зернами по сравнению с монофракционными составами должно возрасти и способствовать увеличению прочности материала керамического стержня, а также снижению шероховатости [4–7].

За основу исследований по выбору оптимального состава керамической шихты стержневой смеси в качестве керамического материала в экспериментальных составах использован плавный кварц марок ПКП, ПКС95С, ПК3008С, ПК3016С и ПК30,315-0,4С производства ООО «Родонит».

По результатам анализа научно-технической информации установлено, что наличие дефектов (микротрещины, коробление) на керамических стержнях при обжиге напрямую зависит от чистоты исходных керамических материалов и присутствия примесей, в связи с чем проведены исследования химического состава выбранных марок плавного кварца, входящих в экспериментальные составы, которые показали, что такие материалы – химически чистые и с минимальным содержанием примесей (см. таблицу).

**Химический состав плавного кварца (SiO<sub>2</sub>) различных марок**

Марка плавного кварца	Содержание основного материала и примесей, %			
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
ПКП	99,84	0,15	0,01	–
ПКС95С	99,8	0,13	0,06	0,008
ПК3008С	100,0	–	–	–
ПК3016С	99,99	–	0,006	0,008
ПК30,315-0,4С	100	–	–	–

Кроме того, анализ научно-технической информации в области создания керамических стержней на основе плавного кварца для литья лопаток турбин из жаропрочных никелевых сплавов, а также ранее проведенные во ФГУП «ВИАМ» исследования показали, что недостатки керамических стержней на основе плавного кварца связаны с его низкой прочностью (предел прочности при изгибе составляет 10,0–12,0 МПа) и фазовой нестабильностью. При спекании плавный аморфный SiO<sub>2</sub> частично растекловывается с образованием кристобалита (α-фаза). На стадии охлаждения данная кристаллическая модификация SiO<sub>2</sub> подвержена деструктивному полиморфному превращению с изменением удельного объема, что приводит к образованию макротрещин, резкому снижению прочности и короблению. Максимальное содержание кристаллической α-фазы, при котором керамические стержни способны сохранять приемлемые прочностные свойства, не превышает 15–30% (объемн.). Одним из способов снижения образования кристобалита и, как следствие, снижения брака керамических стержней является введение в состав керамической шихты минерализаторов и термически стабильных добавок, активирующих спекание, а также подавляющих усадку и образование макротрещин в керамических стержнях при обжиге. В связи с этим, кроме основного керамического материала – плавного кварца, в разработанных экспериментальных составах использовали более тугоплавкие оксиды: циркон (ZrSiO<sub>4</sub>), оксид циркония (ZrO<sub>2</sub>), оксид алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), сиалон α- и β-фазы (Si–Al–O–N) (оксинитрид алюминия–кремния). Исследованиями, проведенными ранее во ФГУП «ВИАМ», определено, что, изменяя степень измельчения (S<sub>удельн</sub>) циркона и его количество в составе, можно регулировать усадку и прочность керамических стержней, поэтому для использования циркона марки КЦП 63 в экспериментальных составах произведен его дополнительный помол.

За основу разрабатываемой технологии получения керамических стержней на основе плавленного кварца взята технология твердофазного спекания, которая заключается в изготовлении керамической смеси, состоящей из керамической основы (различные фракции плавленного кварца), высокоэффективных спекающих добавок и термопластификатора, с последующим прессованием и высокотемпературным обжигом керамических стержней.

В качестве термопластификатора в экспериментальных составах взят двухкомпонентный состав, состоящий из парафина марки П-2 (90% (по массе)) с более низкими температурами плавления и испарения, а также полиэтилена марки 158-03-020 (10% (по массе)) с более высокими температурами плавления и испарения. При высокотемпературном обжиге сначала испаряется парафин, а полиэтилен сдерживает расслоение и разрушение стержня и только при температурах начала спекания керамического стержня ( $>600$  °С) полностью испаряется сам. Температура воспламенения составляющих компонентов пластификатора должна быть выше температуры их испарения. При воспламенении одного из компонентов во время процесса испарения термопластификатора невозможно управлять процессом спекания керамических стержней.

В экспериментальных составах использовали материал – порошок стеарата кальция ( $C_{36}H_{70}CaO_4$ ), который улучшает пластификацию стержневой смеси и предотвращает прилипание сырых стержней к пресс-форме. Кроме того, оксид кальция (CaO) влияет на величину усадки и прочность керамического стержня, а ионы  $CaO^{+2}$  препятствуют образованию кристобалита.

По результатам проведенного анализа научно-технической информации выбраны материалы (керамическая шихта, термопластификатор), а также экспериментальные составы стержневой массы с различным соотношением плавленного кварца разных фракций и термопластификатора [8, 9].

Определены оптимальные технологические параметры изготовления стержневой массы экспериментальных составов. Перед началом приготовления стержневой смеси все исходные компоненты просушивали при температуре 200 °С и просеивали. Далее в расчетное количество расплавленного пластификатора марки ПП10 поочередно вводили расчетное количество каждого исходного компонента экспериментального состава, начиная от тонких фракций порошков до зернистых составляющих плавленного кварца. После введения каждого компонента стержневую смесь при температуре не менее 120 °С перемешивали (со скоростью вращения мешалки не менее 100 об/мин) в течение заданного времени. Общее время изготовления стержневой смеси составило не менее 120 мин. Затем стержневую массу экспериментальных составов вакуумировали при заданных остаточном давлении и продолжительности выдержки. Охлаждение проводили на охлаждаемой металлической поверхности.

Таким образом, проведена работа по исследованию технологических параметров изготовления образцов выбранных стержневых экспериментальных составов на основе плавленного кварца. Из приготовленных стержневых масс экспериментальных составов на гидравлическом прессе по намеченным технологическим параметрам (усилие прессования, температура стержневой массы, продолжительность выдержки) изготовлены в необходимом количестве образцы размером  $4 \times 12 \times 50$  и  $4 \times 10 \times 120$  мм каждого экспериментального состава (рис. 1).

Результаты анализа научно-технической информации показали, что минимальное или полное отсутствие расстекловывания аморфного  $SiO_2$  при изготовлении керамических стержней из составов на основе плавленного кварца зависит от высокотемпературного обжига. Высокотемпературный обжиг также имеет основное значение при изготовлении керамических стержней, так как определяет основные свойства по

прочности при комнатной температуре, высокотемпературной прочности, пористости и величине максимального прогиба при температуре 1500 °С.

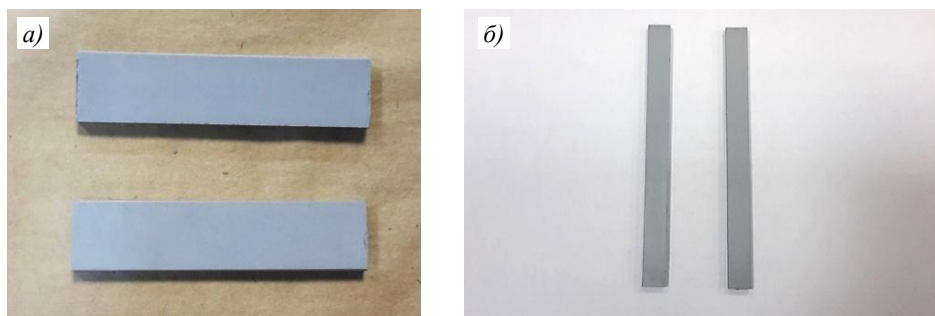


Рис. 1. Общий вид образцов-свидетелей размером 4×12×50 (а) и 4×10×120 мм (б) экспериментального состава

Исследованы параметры высокотемпературного обжига керамических стержней на образцах – рабочая температура, продолжительность выдержки стержней при обжиге, скорость их нагрева и охлаждения. Опробовано несколько вариантов режимов высокотемпературного обжига – для этого образцы, изготовленные из экспериментальных составов, зачищены от облоя и заусенцев и уложены в короба для последующего высокотемпературного обжига по выбранным режимам.

Проведены испытания (на образцах керамических стержней) основных свойств экспериментальных составов после обжига: прочности при изгибе при температурах 20 ( $\sigma_{\text{в.изг}}^{20^\circ}$ ) и 1500 °С ( $\sigma_{\text{в.изг}}^{1500^\circ}$ ), открытой пористости и шероховатости. По результатам испытаний определен оптимальный экспериментальный состав стержневой массы керамических стержней на основе плавленного кварца, имеющий наиболее высокий уровень свойств по пределам прочности при изгибе при температурах 20 ( $\sigma_{\text{в.изг}}^{20^\circ} = 14,42$  МПа) и 1500 °С ( $\sigma_{\text{в.изг}}^{1500^\circ} = 2,73$  МПа), а также по шероховатости ( $R_a = 3,58$  мкм) и открытой пористости ( $P_{\text{откр}} = 35,15\%$ ).

Проведена работа по исследованию технологических параметров (усилие прессования, температура стержневой массы, продолжительность выдержки) изготовления керамических стержней из оптимального экспериментального состава стержневой массы на основе плавленного кварца. Изготовлена партия керамических стержней, произведен ее обжиг (рис. 2, а–в).

Визуальный контроль изготовленных керамических стержней показал, что стержневая масса разработанного состава технологична, удовлетворительно прессуется, а разработанные технологические параметры прессования обеспечили получение керамических стержней без дефектов типа «трещина» и «неслитина».

Проведена опытная работа по исследованию влияния пропитки прокаленных керамических стержней на основе плавленного кварца на прочность при изгибе при температурах 20 и 1500 °С. В качестве материала для пропитки использовали: 15%-ный водный раствор хлористого иттрия, лак бакелитовый марки ЛБС-1, 50%-ный спиртовой раствор лака бакелитового марки ЛБС-1 и лак термостойкий марки КО-815. Общий вид керамических стержней и образцов после пропитки различными материалами представлен на рис. 2, г.

По результатам испытаний пропитанных керамических стержней выявлено, что наиболее эффективным материалом их упрочнения является термостойкий лак марки КО-815, позволивший повысить предел прочности при изгибе при температуре 20 °С до  $\sigma_{\text{в.изг}}^{20^\circ} = 20,39$  МПа, а при температуре 1500 °С – до  $\sigma_{\text{в.изг}}^{1500^\circ} = 3,17$  МПа.

С использованием пропитанных термостойким лаком марки КО-815 годных керамических стержней произведены восковые модели, собраны модельные блоки и изготовлены керамические формы по серийной технологии ФГУП «ВИАМ» (рис. 3 и 4) [14–16].

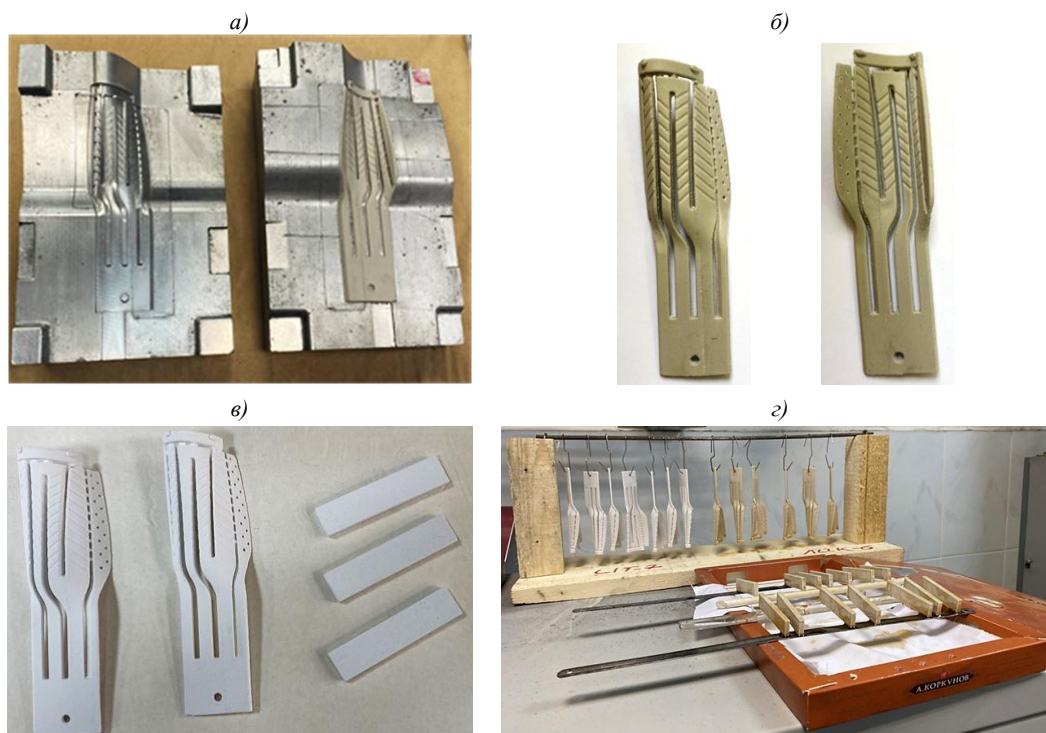


Рис. 2. Общий вид пресс-формы (а), «сырого» керамического стержня после зачистки (б), а также керамических стержней и образцов после обжига (в) и пропитки различными материалами (г)



Рис. 3. Общий вид восковых моделей с керамическими стержнями из плавленного кварца



Рис. 4. Общий вид модельного блока (а) и керамической формы (б)



Рис. 5. Общий вид отливки лопатки с керамическим стержнем из плавленного кварца

Произведены заливка керамических форм и отрезка отливок лопаток с последующей их пескоструйной очисткой (рис. 5). По результатам визуального контроля отливок лопаток турбин выявлено, что керамические стержни на основе плавленного кварца разработанного состава обеспечили получение отливок лопаток турбин без дефектов типа «поллом стержня» и «выход стержня».

#### Методики проведения исследований

Для оценки основных свойств экспериментальных составов керамических стержней на основе плавленного кварца проведены исследования:

- определение прочности стержневой керамики при трехточечном изгибе при температуре 20 °С ( $\sigma_{\text{визг}}^{20^\circ}$ ) на вакуумной установке ПРВ-302М согласно ГОСТ 473.8–81;
- определение прочности стержневой керамики при трехточечном изгибе при температуре 1500 °С ( $\sigma_{\text{визг}}^{1500^\circ}$ ) на вакуумной установке ПРВ-302М согласно ГОСТ 25085–81;
- определение открытой пористости согласно ГОСТ 2409–2014;
- определение шероховатости согласно ГОСТ 2789–73.

#### Результаты и обсуждение

Результаты проведенной опытной работы по исследованию экспериментальных составов керамических стержней на основе плавленного кварца, выбору их оптимального состава и технологических параметров обжига, а также результаты разработки технологий изготовления стержневой массы и керамических стержней показали, что:

- выбранный оптимальный состав керамических стержней на основе плавленного кварца, состоящий из порошков плавленного кварца различных фракций, стеарата кальция, электрокорунда, сиалона, а также разработанные технологии изготовления керамических стержней и их высокотемпературного обжига позволили получить керамические стержни с наиболее высоким уровнем свойств по пределам прочности при изгибе при температурах 20 ( $\sigma_{\text{визг}}^{20^\circ} = 14,42$  МПа) и 1500 °С ( $\sigma_{\text{визг}}^{1500^\circ} = 2,73$  МПа), а также по шероховатости ( $R_a = 3,58$  мкм) и открытой пористости ( $P_{\text{откр}} = 35,15\%$ );
- наиболее эффективным материалом упрочнения стержней является термостойкий лак марки КО-815, позволивший повысить предел прочности при изгибе при температуре 20 °С до  $\sigma_{\text{визг}}^{20^\circ} = 20,39$  МПа и при температуре 1500 °С – до  $\sigma_{\text{визг}}^{1500^\circ} = 3,17$  МПа.

Результаты визуального контроля отливок турбинных лопаток, залитых с использованием пропитанных термостойким лаком марки КО-815 годных керамических стержней, показали, что керамические стержни из плавленного кварца разработанного состава обеспечивают получение отливок турбинных лопаток без дефектов типа «поллом стержня» и «выход стержня».

### Заключения

Проведен анализ научно-технической информации в области создания керамических стержней на основе плавленного кварца для литья лопаток турбин из жаропрочных никелевых сплавов, согласно которому установлено, что в состав керамических стержней на основе плавленного кварца, кроме основы (плавленного кварца), необходимо введение минерализаторов и термически стабильных добавок, активирующих спекание, подавляющих усадку и образование макротрещин в керамических стержнях при обжиге. По результатам данного анализа во ФГУП «ВИАМ» выбраны материалы (различные фракции плавленного кварца, высокоэффективные спекающие добавки и термопластификатор) и экспериментальные составы с различным соотношением плавленного кварца разных фракций и термопластификатора.

Разработаны технологические параметры изготовления стержневой массы, керамических образцов стержней, а также их высокотемпературного обжига. Исследованы технологические параметры изготовления керамических образцов стержней на основе плавленного кварца: прессования (усилие прессования, температура стержневой массы, продолжительность выдержки) и высокотемпературного обжига (рабочая температура обжига, продолжительность выдержки стержней при обжиге, скорость их нагрева и охлаждения при обжиге). Исследованы свойства экспериментальных образцов керамических стержней выбранных составов, изготовленных по разработанным технологическим параметрам, по результатам которых выбран оптимальный состав, обеспечивающий наиболее высокий уровень свойств по пределу прочности при изгибе при температурах 20 ( $\sigma_{\text{в.изг}}^{20^\circ} = 14,42$  МПа) и 1500 °С ( $\sigma_{\text{в.изг}}^{1500^\circ} = 2,73$  МПа), шероховатости ( $R_a = 3,58$  мкм) и открытой пористости ( $P_{\text{откр}} = 35,15\%$ ).

Проведена опытная работа по исследованию влияния пропитки прокаленных керамических образцов стержней на основе плавленного кварца на прочность при температурах 20 и 1500 °С. В качестве материала для пропитки использовали: 15%-ный водный раствор хлористого иттрия, лак бакелитовый марки ЛБС-1, 50%-ный спиртовой раствор лака бакелитового марки ЛБС-1 и лак термостойкий марки КО-815. По результатам испытаний пропитанных керамических образцов стержней выявлено, что наиболее эффективным материалом упрочнения стержней является термостойкий лак марки КО-815, позволивший повысить предел прочности при изгибе при температуре 20 °С до  $\sigma_{\text{в.изг}}^{20^\circ} = 20,39$  МПа, а при температуре 1500 °С – до  $\sigma_{\text{в.изг}}^{1500^\circ} = 3,17$  МПа.

С использованием годных керамических стержней, пропитанных термостойким лаком марки КО-815, произведены восковые модели, собраны модельные блоки, изготовлены и залиты керамические формы. По результатам визуального контроля отливок лопаток турбин выявлено, что керамические стержни из плавленного кварца разработанного состава обеспечили получение отливок лопаток турбин без дефектов типа «полом стержня» и «выход стержня».

### Библиографический список

1. Литые лопатки газотурбинных двигателей: сплавы, технология, покрытия / под общ. ред. Е.Н. Каблова. 2-е изд. М.: Наука, 2006. 632 с.
2. Каблов Е.Н., Фоломейкин Ю.И., Демонис И.М. Высокоогнеупорные керамические стержни и формы для литья охлаждаемых лопаток газотурбинных двигателей // Сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Наука и технология силикатных материалов – настоящее и будущее»: в 2 т. СПб.: Информационное образование, 2003. Т. 2. С. 49–56.
3. Беляков А.В., Разумнова И.В., Демонис И.М., Фоломейкин Ю.И. Легкоудаляемые керамические стержни для литья лопаток ГТД по выплавляемым моделям // Стекло и керамика. 2012. №4. С. 26–31.

4. Ланда М.И., Копытов Н.Н. Влияние зернового состава порошковой композиции на свойства пористой корундовой керамики повышенной прочности // Огнеупоры. 1984. №4. С. 21–25.
5. Бакунов В.С., Балкевич В.Л., Власов А.С. и др. Керамика из высокоогнеупорных окислов. М.: Металлургия, 1977. 304 с.
6. Стрелов К.К. Структура и свойства огнеупоров. М.: Металлургия, 1982. 208 с.
7. Фоломейкин Ю.И. Формирование структуры пористого высокоогнеупорного керамического материала зернистого строения // Стекло и керамика. 2015. №8. С. 30–35.
8. Смесь для изготовления литейных керамических стержней полых лопаток из жаропрочных сплавов литьем по выплавляемым моделям: пат. 2691435 Рос. Федерация; заявл. 23.07.18; опубл. 13.06.19.
9. Смесь для изготовления литейных керамических стержней: пат. 2273543 Рос. Федерация; заявл. 01.09.04; опубл. 10.04.06.
10. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Высокоэффективное охлаждение лопаток горячего тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2017. №2 (47). С. 3–14. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14.
11. Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В. Оптимизация технологии изготовления керамических стержней для улучшения качества литых лопаток газотурбинных двигателей // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №3–4. Ст. 04. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 30.11.2020).
12. Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В. Отработка технологии получения отливок лопаток ГТД методом направленной кристаллизации из сплавов на основе Nb–Si композита // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. №4 (52). Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 30.11.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-1-1.
13. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Лощинин Ю.В., Шорстов С.Ю., Кузьмина И.Г. Исследование влияния технологических факторов на теплопроводность материалов керамических форм для литья // Авиационные материалы и технологии. 2019. №2 (55). С. 89–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2019-0-2-89-94.
15. Зуев А.В., Лощинин Ю.В., Баринов Д.Я., Мараховский П.С. Расчетно-экспериментальные исследования теплофизических свойств // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 575–595. DOI: 10.18577/2071-91-40-2017-0-S-575-595.
16. Лощинин Ю.В., Фоломейкин Ю.И., Рыкова Т.П., Мараховский П.С., Пахомкин С.И. Теплофизические свойства материалов керамики форм и стержней для литья лопаток ГТД из жаропрочных сплавов // Материаловедение. 2014. №3 (204). С. 47–52.