

УДК 666.3:620.1

Ю.Е. Лебедева<sup>1</sup>, А.Н. Афанасьев-Ходыкин<sup>1</sup>,  
Г.М. Прокопченко<sup>1</sup>, А.А. Шавнев<sup>1</sup>, Д.И. Серебряков<sup>2</sup>

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОНСТРУКТИВНО-ПОДОБНОГО ОБРАЗЦА СЕКТОРА СОПЛОВОГО АППАРАТА И ПРОВЕДЕНИЕ ЕГО ИСПЫТАНИЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1500 °С

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-10-51-62

*Проведено исследование взаимодействия керамического композиционного материала (ККМ) системы SiC–SiC<sub>w</sub>–B<sub>4</sub>C–AlN со сплавом ЭП648 в процессе высокотемпературной пайки. Наименьшей эрозионной активностью как по отношению к ККМ, так и к сплаву ЭП648 обладает припой ВПр50. Изготовлен экспериментальный конструктивно-подобный образец сектора соплового аппарата с применением прототипов неохлаждаемой сопловой лопатки из ККМ, испытания которого проведены при температуре 1500 °С. Следов уноса материала с поверхности ККМ не обнаружено.*

**Ключевые слова:** керамический композиционный материал, карбид кремния, сектор соплового аппарата, сплав ЭП648, пайка, высокотемпературные испытания.

Yu.E. Lebedeva<sup>1</sup>, A.N. Afanasev-Hodikin<sup>1</sup>,  
G.M. Prokopchenko<sup>1</sup>, A.A. Shavnev<sup>1</sup>, D.I. Serebryakov<sup>2</sup>

## OBTAINING OF EXPERIMENTAL CONSTRUCTIONALLY SIMILAR SAMPLE OF THE NOZZLE ASSEMBLY SECTOR AND CARRYING OUT ITS TESTS AT TEMPERATURE OF 1500 °C

*The interaction of the SiC–SiC<sub>w</sub>–B<sub>4</sub>C–AlN system ceramic composite material (CCM) with the EP648 alloy in the process of high-temperature brazing was studied. The smallest erosion activity both in relation to CCM, and to the EP648 alloy, has HMP solder VPr50. An experimental constructionally similar sample of the nozzle assembly sector was made using uncooled nozzle blade prototypes from CCM. Tests of an experimental constructionally similar sample of the nozzle assembly sector at a temperature of 1500 °C were carried out. No traces of material ablation from the surface of the CMC were found.*

**Keywords:** ceramic composite material, silicon carbide, nozzle assembly sector, alloy EP648, soldering, high temperature tests.

<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

<sup>2</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «Central Institute of Aviation Motors after P.I. Baranov» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: info@ciam.ru

### Введение

Одним из направлений совершенствования рабочих характеристик турбин современных вертолетных двигателей является применение в их конструкции более жаростойких и легких конструкционных материалов, по сравнению с используемыми в настоящее время жаропрочными сплавами.

Разработка сложнопрофильных изделий на основе керамических композиционных материалов (ККМ) является сложной и нетривиальной задачей. В связи с этим актуальным представляется развитие новых технологических подходов к созданию элементов конструкции газотурбинного двигателя из ККМ, таких как неохлаждаемые сопловые лопатки. Разработкой технологий создания элементов конструкции турбин низкого и высокого давления из ККМ (роторных, статорных и сопловых лопаток, над-роторных вставок, сектора турбины высокого давления) на протяжении многих лет занимаются ведущие фирмы – производители материалов (Allied Signal, Куосера, АО «ОНПП «Технология им. А.Г. Ромашина») и двигателестроительные организации (General Electric, Pratt & Whitney, Rolls-Royce, Solar Turbines, Honeywell, Snecma, MTU, Kawasaki, ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова» – ЦИАМ).

Разработка способов крепления элементов конструкций из керамических и металлических материалов является актуальной задачей в связи с тем, что в последнее время повышаются требования к теплонагруженным узлам двигательных установок и все больше работ проводится по получению деталей из керамических композиционных материалов. Одним из способов крепления является высокотемпературная пайка. Для пайки никелевых жаропрочных сплавов широкое распространение в авиационной промышленности получили сложнoleгированные никелевые жаропрочные и никель-медь-марганцевые припои серии ВПр [1–4]. Наиболее массовое применение в промышленности получили припои, представленные в табл. 1.

*Таблица 1*

**Припой серии ВПр разработки ФГУП «ВИАМ»**

Марка припоя	Паяемые материалы	Температура, °С	
		пайки	рабочая
ВПр1	Коррозионностойкие стали	1140–1190	600
ВПр2	Коррозионностойкие стали	1000–1070	600
ВПр4	Коррозионностойкие стали	1050–1080	600
ВПр7	Коррозионностойкие стали	1160–1180	600
ВПр11-40Н	Сплавы типа ЖС6, ВЖ98, ЭИ868, ЭИ867, ЭИ435	1080–1120	800
ВПр24	Сплавы типа ЖС6У, ВЖЛ12	1200–1240	1050
ВПр27	Сплавы типа ЖС6У, ВЖЛ12, ВЖЛ14	1150–1200	1000
ВПр36	Никелевые жаропрочные сплавы типа ЖС26	1250–1280	1150
ВПр37	Никелевые жаропрочные сплавы типа ВКНА	1280–1290	1200
ВПр42	Сплавы типа ЭИ435, ВЖЛ12, ЖС6	1120–1150	1000
ВПр44	Сплавы типа ЖС32, ЖС36, ВЖМ4	1260–1280	1150
ВПр50	Коррозионностойкие стали и никелевые жаропрочные сплавы	1130–1160	1000

Высокотемпературную пайку сопровождает и ряд трудностей. Это связано как с необходимой хорошей смачиваемостью материалом припоя поверхностей соединяемых элементов конструкции, так и с ограничением зоны диффузионного взаимодействия, которая должна быть достаточной для обеспечения требуемого уровня прочностных характеристик паяного соединения. Аморфные металлические ленточные припои на основе никеля обладают уникальными физико-химическими свойствами: хорошей структурной и химической однородностью, равнотолщинностью, пластичностью. Состав припоя должен обеспечивать необходимый уровень смачиваемости и растекаемости, а также низкую эрозионную активность по отношению к основному материалу.

Керамические материалы и композиты на их основе в свою очередь не имеют альтернативы в условиях длительного воздействия температуры в окислительной среде

(>1200 °С), обладают высокой эрозионной стойкостью, что делает их перспективными для применения при изготовлении теплонагруженных узлов и деталей [5–18].

Целями данной работы являются исследование взаимодействия ККМ системы SiC–SiC<sub>w</sub>–B<sub>4</sub>C–AlN со сплавом ЭП648 в процессе высокотемпературной пайки, изготовление экспериментального конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата из прототипов неохлаждаемой сопловой лопатки из ККМ и проведение его испытаний при температуре 1500 °С.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 14.1. «Конструкционные керамические композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

### Материалы и методы

Прототипы неохлаждаемой сопловой лопатки турбины изготавливали из ККМ системы SiC–SiC<sub>w</sub>–B<sub>4</sub>C–AlN методом искрового плазменного спекания [20].

В качестве исходных компонентов для создания прототипов неохлаждаемой сопловой лопатки из ККМ использовали карбид кремния марки F1200, в качестве армирующих наполнителей – вискры карбида кремния SiC<sub>w</sub> (ООО НПП «Викинг»), нитрид алюминия AlN с размером частиц 150–200 нм (фирма «Плазмотерм») и карбид бора B<sub>4</sub>C. Фракционный состав порошков оценивали с помощью лазерного анализатора размера частиц Analysette 22 (фирма Fritsch, Германия).

Подготовку шихты ККМ для прототипов проводили путем перемешивания компонентов в стеклянных стаканах в среде изопропилового спирта с использованием магнитной мешалки и ультразвукового диспергирования. Полученную суспензию сушили в сушильном шкафу при температуре 100 °С.

Подготовленную шихту помещали в графитовую пресс-форму и проводили спекание экспериментальных образцов ККМ на установке гибридного искрового плазменного спекания в токе аргона с заданной скоростью нагрева. Температура спекания прототипа составляла 1800–1900 °С. Изменение температуры графитовой пресс-формы и прессуемого образца фиксировали с помощью двух пирометров марки IGA6.

Метод искрового плазменного спекания (ИПС, SPS) – это технология, использующая одноосное прессование и импульс постоянного тока под низким давлением для обеспечения высокой скорости консолидации порошка. Данная технология служит для консолидации широкого спектра материалов – от полимерных материалов до тугоплавких соединений с температурой плавления >3000 °С. В основе метода лежит процесс, при котором импульсный электрический ток пропускается непосредственно через заготовку, благодаря чему достигаются высокие скорости нагрева/охлаждения (до 600 °С/мин) и малая продолжительность рабочего цикла. Прямое пропускание электрического тока позволяет уменьшить рост зерна, активируя диффузные механизмы спекания и позволяя сохранять в полученных изделиях первоначальные свойства порошков, а также предотвратить фазовые превращения [21–32].

Исследование паяных соединений проводили с помощью оптического микроскопа типа МБС-10.

Установка для проведения испытаний экспериментального конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата на стенде Ц-16ВК Научно-испытательного центра ЦИАМ представлена на рис. 1. Основным элементом установки является многокомпонентное фронтное устройство, которое позволяет создавать достаточно равномерный высокотемпературный газовый поток в области испытываемых образцов. Диаметр факела на выходе из фронтного устройства составляет 155 мм, расстояние до экспериментального конструктивно-подобного образца 150–200 мм.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки для испытаний прототипа неохлаждаемой сопловой лопатки турбины из ККМ

В процессе испытаний во фронтальное устройство осуществляется подача метана, воздуха и кислорода. Продукты сгорания метана и кислорода обеспечивают нагрев воздуха до температуры 1500 °С.

Проведение измерений и регистрация параметров стенда и экспериментального объекта осуществляются автоматизированной информационно-измерительной системой (АИИС) стенда, а воспроизведение заданных режимов испытаний – автоматизированной системой управления технологическим процессом (АСУТП). Подготовка АИИС и АСУТП стенда включает: подбор датчиков по диапазону и точности, их установку в стендовую систему измерения на соответствующие места, подготовку информационного фонда согласно карте препарировки, градуировку измерительных каналов в составе с датчиками давлений, подготовку программы управления для АСУТП, реализующей необходимую циклограмму работы стенда и экспериментальной установки.

Подготовка запорно-регулирующей арматуры включает: подачу питания на пульт управления и системы регулирования, проверку срабатывания ЗРА и систем регулирования, прогон тестовой циклограммы с пульта управления.

Перед испытаниями проведены технологические пуски для отработки циклограммы запуска генератора газового потока, в качестве технологического образца использовали керамическую пластину. Зарегистрированный нагрев пластины в области воздействия высокотемпературного газового потока показал, что поток на выходе из фронтального устройства достаточно равномерный. Распределение температуры на поверхности образца регистрировали тепловизором.

### Результаты и обсуждение

Для крепления прототипов неохлаждаемой сопловой лопатки из ККМ в полках из сплава ЭП648 опробована технология высокотемпературной пайки. Максимальная температура технологических нагревов для данного сплава составляет 1200 °С. Рабочая температура паяных соединений с учетом охлаждения полков блока сопловых лопаток должна быть не менее 800 °С.

Для проведения исследований выбраны припои ВПр4, ВПр11-40Н, ВПр50, ВПр27. Композиционный керамический материал для прототипа неохлаждаемой сопловой лопатки турбины на основе системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$  содержит в своем составе значительное количество карбида кремния  $\text{SiC}$ . При взаимодействии расплава никелевого припоя с ККМ карбид кремния может разлагаться на Si и C, которые растворяются в расплаве припоя. В результате такого взаимодействия температура плавления (а соответственно, жидкотекучесть и эрозионная активность припоев) может значительно возрасти. Поэтому с целью выбора наиболее оптимального припоя провели серию экспериментов по оценке взаимодействия серийных припоев с ККМ. Для этого на подложку из сплава ЭП648 устанавливали образец ККМ, вблизи паяемого зазора укладывали навеску исследуемого припоя и производили пайку по рекомендованным режимам. Внешний вид образцов после пайки представлен на рис. 2.

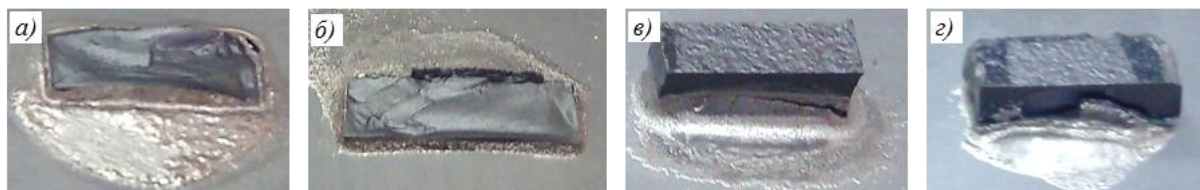


Рис. 2. Внешний вид образцов из сплава ЭП648 с ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$  после пайки различными припоями со стороны входной галтели:

*a* – ВПр4; *б* – ВПр11-40Н; *в* – ВПр50; *з* – ВПр27

Описание внешнего вида припоев после пайки ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$  со сплавом марки ЭП648:

ВПр4	Галтель неровная, вблизи ККМ виден «подрез», поверхность припоя шероховатая, на ККМ следов эрозии визуально не наблюдается, на пластине сплава марки ЭП648 по периметру образца наблюдается сквозная эрозия со стороны выходной галтели, по всему периметру образца ККМ на границе с паяным швом видна трещина
ВПр11-40Н	Галтель по всему периметру ровная, гладкая, с радиусом $\sim(1-1,5)$ мм, на ККМ следов эрозии визуально не наблюдается, по всему периметру образца ККМ на границе с паяным швом видна трещина
ВПр50	Галтель по всему периметру ровная, гладкая, с радиусом $\sim(1-2,0)$ мм, на ККМ следов эрозии визуально не наблюдается, по всему периметру образца ККМ на границе с паяным швом видна трещина
ВПр27	Галтель неровная, гладкая, вблизи ККМ со стороны входной галтели виден «подрез», выходная галтель ровная, с малым радиусом ( $<0,5$ мм), на ККМ следов эрозии визуально не наблюдается, по всему периметру образца ККМ на границе с паяным швом видна трещина, на пластине сплава марки ЭП648 со стороны выходной галтели наблюдается точечная сквозная эрозия

По результатам визуального осмотра все образцы после пайки имеют трещину на ККМ, расположенную по границе с зоной облуживания или отступающую от нее на небольшое расстояние ( $<1$  мм). Подложка из сплава ЭП648 выгнута в сторону образца ККМ. По-видимому, это связано со значительной разницей температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$  и сплава ЭП648. Температурный коэффициент линейного расширения сплава ЭП648 составляет

$(10,1-17,1) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а ТКЛР для ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$  равен  $(5,3-5,4) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  – соответственно, ТКЛР сплава ЭП648 отличается от ТКЛР рассматриваемой системы в 2–3 раза.

Кроме того, видно, что припой ВПр4 и ВПр27 показывают очень сильную нехарактерную для них эрозионную активность по отношению к сплаву ЭП648 (достигающую 500 мкм). Скорее всего, это вызвано взаимодействием припоев с карбидом кремния  $\text{SiC}$ , содержащимся в ККМ. Величина эрозионной активности припоя определялась по величине слоя основного материала, растворенного припоем в процессе пайки. Опробованные в работе припои обычно показывают невысокую эрозионную активность по отношению к сплаву ЭП648 – на уровне 30–80 мкм.

Проведено исследование микроструктуры паяных соединений, выполненных различными припоями. Для этого паяные образцы ККМ разрезали по плоскости, проходящей от центра входной галтели до центра выходной. Микроструктуры паяных соединений приведены на рис. 3–6, а характеристики взаимодействия припоев с ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$  и сплавом ЭП648 – в табл. 2.



Рис. 3. Микроструктура паяного соединения сплава ЭП648 с ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$ , выполненная припоем ВПр4:  
*a* – входная галтель ( $\times 100$ ); *б* – середина паяного шва ( $\times 200$ ); *в* – выходная галтель ( $\times 50$ )

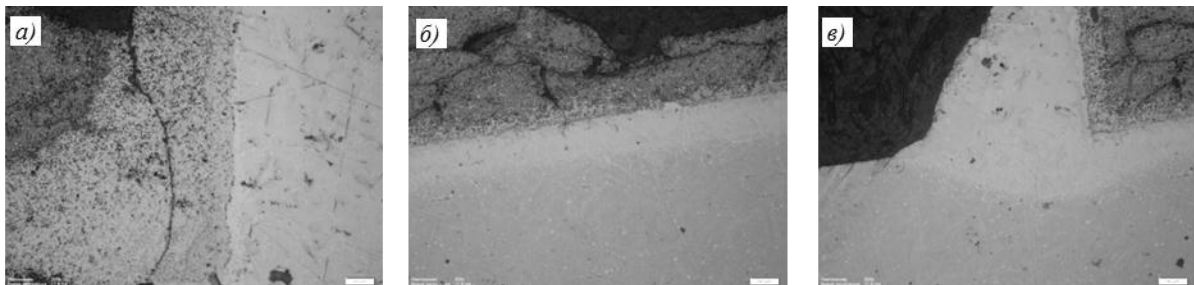


Рис. 4. Микроструктура ( $\times 200$ ) паяного соединения сплава ЭП648 с ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$ , выполненная припоем ВПр1 1-40H:  
*a* – входная галтель; *б* – середина паяного шва; *в* – выходная галтель

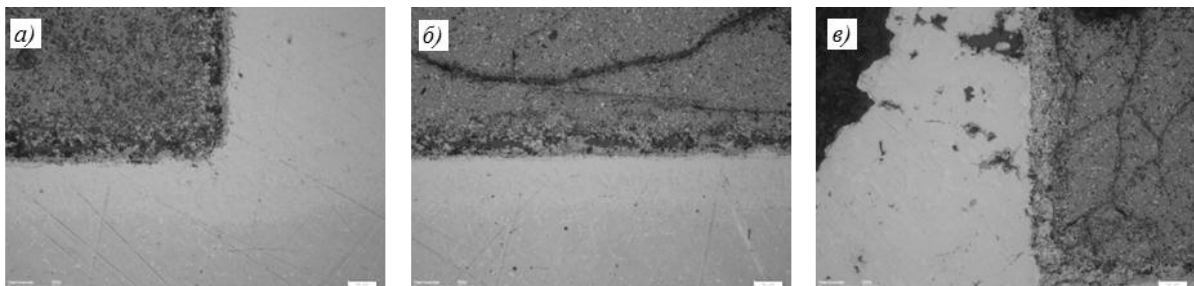


Рис. 5. Микроструктура ( $\times 200$ ) паяного соединения сплава ЭП648 с ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AlN}$ , выполненная припоем ВПр50:  
*a* – входная галтель; *б* – середина паяного шва; *в* – выходная галтель

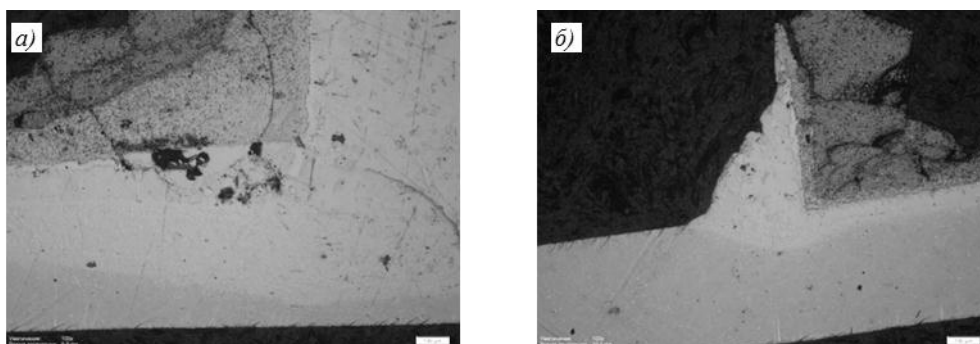


Рис. 6. Микроструктура ( $\times 100$ ) паяного соединения сплава ЭП648 с ККМ системы SiC-SiC<sub>w</sub>-B<sub>4</sub>C-AlN, выполненная припоем ВПр27:

*a* – входная галтель; *б* – выходная галтель

Таблица 2

**Характеристики взаимодействия припоев с ККМ системы SiC-SiC<sub>w</sub>-B<sub>4</sub>C-AlN и сплавом ЭП648**

Место взаимодействия припоя с материалом	Эрозия, мкм, при использовании припоя марки			
	ВПр4	ВПр11-40Н	ВПр50	ВПр27
Для сплава ЭП648				
Вблизи входной галтели	290	345	50	310
В середине паяного шва	77	50	70	50
Вблизи выходной галтели	380	90	90	100
Для ККМ* системы SiC-SiC <sub>w</sub> -B <sub>4</sub> C-AlN				
Вблизи входной галтели	420	340	50	280
В середине паяного шва	60	50	65	50
Вблизи выходной галтели	370	50	50	50

\* С проникновением.

Как видно из приведенных данных, припой марки ВПр50 обладает наиболее низкой эрозионной активностью как по отношению к сплаву ЭП648, так и по отношению к ККМ системы SiC-SiC<sub>w</sub>-B<sub>4</sub>C-AlN. Это свидетельствует о минимальном взаимодействии припоя с ККМ.

Немаловажными факторами, влияющими на качество паяного соединения, особенно при пайке разнородных материалов с разными ТКЛР, являются конструкция паяного соединения и способ питания припоем. Как известно, керамические материалы обладают прочностью при сжатии, значительно превосходящей прочность при растяжении и изгибе. Поэтому для снижения вероятности образования трещин деталь из ККМ в зоне паяного соединения должна испытывать преимущественно сжимающие напряжения. Применительно к блоку сопловых лопаток выбрана конструкция паяного соединения, при которой перо лопатки фиксируется в глухой полости полки из сплава ЭП648. Так как ТКЛР сплава ЭП648 больше, чем у ККМ системы SiC-SiC<sub>w</sub>-B<sub>4</sub>C-AlN, то после охлаждения паяного соединения перо лопатки из ККМ будет испытывать сжимающие напряжения со стороны полки из сплава ЭП648 в месте заделки.

Для выбора исследования влияния способа питания припоем изготовлены образцы, имитирующие вышеописанную конструкцию, на которых опробованы три способа питания припоем:

– односторонняя укладка припоя на поверхность сплава ЭП648 в непосредственной близости от ККМ;

– укладка припоя на поверхность сплава ЭП648 в непосредственной близости от ККМ с обеих сторон;

– укладка припоя в сквозное отверстие в детали из ЭП648, заканчивающееся на торцевой поверхности детали из ККМ.

Внешний вид образцов после пайки представлен на рис. 7.

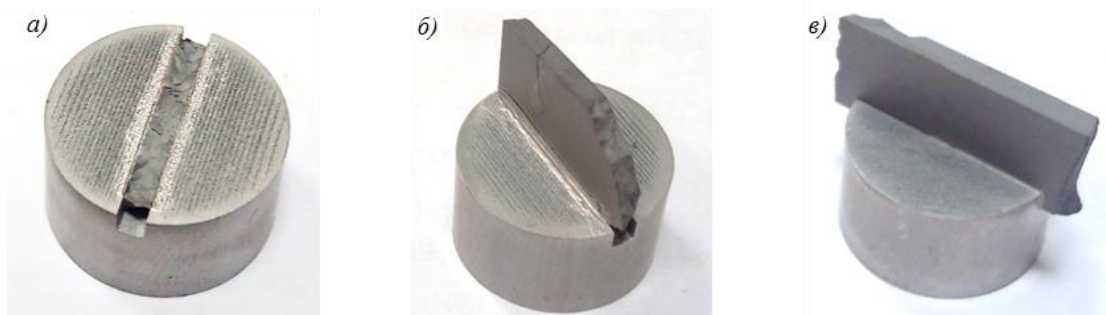


Рис. 7. Внешний вид образцов из сплава ЭП648 с ККМ после пайки с различными способами питания припоем:

*a* – одностороннее питание; *б* – двухстороннее питание; *в* – питание через отверстие

Как видно из приведенных фотографий, только один способ питания (через отверстие) обеспечивает формирование паяного соединения без разрушения целостности ККМ. По-видимому, это связано с более равномерным распределением напряжений в паяном соединении и исключением «подреза» из-за эрозии ККМ, наиболее сильно проявляющейся со стороны входной галтели.

Совместно с АО «ОДК-Климов» разработана конструкция и изготовлен экспериментальный конструктивно-подобный образец сектора соплового аппарата из прототипов неохлаждаемой сопловой лопатки турбины из ККМ системы  $\text{SiC-SiC}_w\text{-B}_4\text{C-AIN}$  и полук из сплава ЭП648 (рис. 8).



Рис. 8. Прототип неохлаждаемой сопловой лопатки турбины из ККМ (*a*) и экспериментальный конструктивно-подобный образец сектора соплового аппарата (*б*)

Во ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» проведены испытания прототипа неохлаждаемой сопловой лопатки турбины из керамического композиционного материала в составе экспериментального конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата при температуре 1500 °С.

Для установки экспериментального конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата на стенде изготовлена водоохлаждаемая оснастка, представляющая собой два канала в виде трубок, через которые протекает вода. Схема установки данного образца показана на рис. 9. В результате контакта экспериментального конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата с водоохлаждаемыми трубками оснастки происходит его охлаждение до допустимого уровня температур (<800 °С).

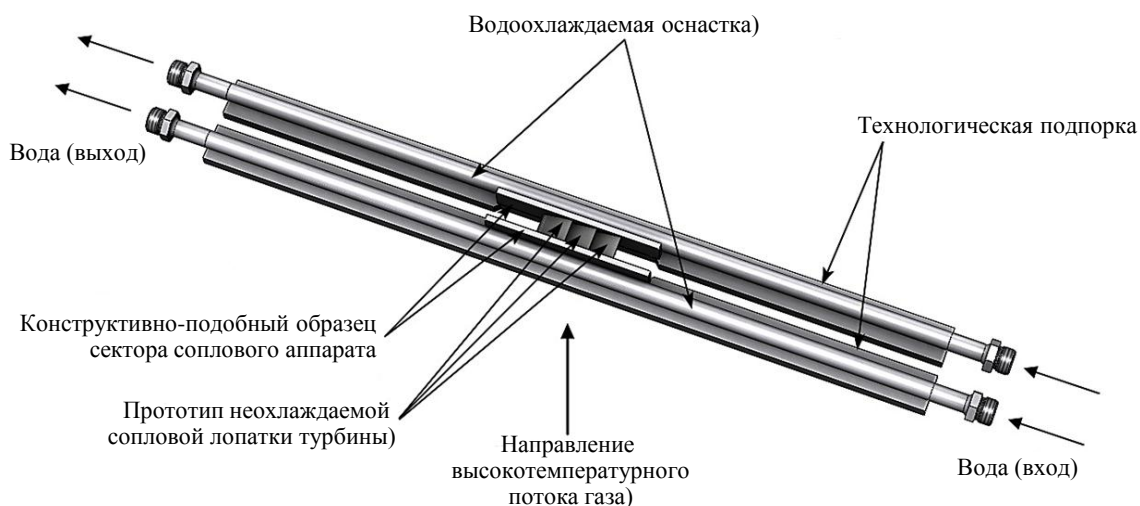


Рис. 9. Оснастка для установки экспериментально конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата на стенде

Высокотемпературные испытания проводили в два этапа:

- термоциклические испытания (30 циклов) по режиму: нагрев до температуры 1500 °С (погрешность измерения температуры +1%), выдержка при данной температуре 3 мин, охлаждение на воздухе не менее 15 мин, длительность одного цикла ~20 мин;
- ресурсные испытания (оценка жаростойкости) по режиму: нагрев до температуры 1500 °С, выдержка при данной температуре 180 мин, охлаждение на воздухе.

В процессе испытаний осуществлялся плавный нагрев прототипов сопловой лопатки турбины из ККМ, температура на поверхности которых составила 1500 °С, а максимальная зарегистрированная температура 1560 °С. При этом зарегистрирован следующий расход газов: 1,9–2,02 г/с – метана; 9,6–9,8 г/с – воздуха; 10,1–10,5 г/с – кислорода. На рис. 10 представлен экспериментальный конструктивно-подобный образец во время и после испытаний.

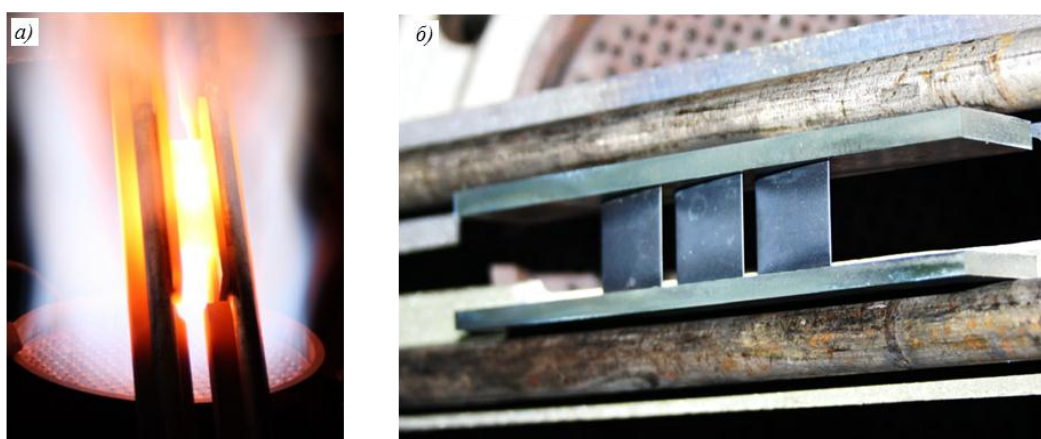


Рис. 10. Экспериментальный конструктивно-подобный образец соплового аппарата на стенде: а – во время испытаний; б – после испытаний

По результатам исследований установлено, что прототипы сопловой лопатки турбины из ККМ характеризуются высокими термостойкостью и жаростойкостью. Прототипы сопловой лопатки турбины выдержали без разрушения, растрескивания и изменения геометрических размеров 30 циклов по описанному режиму термоциклирования

и 180 мин при температуре 1500 °С в продуктах сгорания топлива. Следов уноса материала с поверхности не обнаружено.

Проведена оценка эффективности применения керамического композиционного материала в конструкции соплового аппарата турбины перспективного вертолетного двигателя. Результаты проведенных экспериментальных исследований позволяют сделать вывод о том, что разработанный ККМ может быть применен в конструкции соплового аппарата турбины перспективного вертолетного двигателя – это может повысить характеристики двигателя за счет повышения температуры газа в камере сгорания до 1500 °С.

### Заключения

Опробована технология высокотемпературной пайки ККМ со сплавом ЭП648 с применением сложнелегированных никелевых жаропрочных и никель-медь-марганцевых припоев типа ВПр. Для крепления прототипов неохлаждаемой сопловой лопатки турбины из ККМ в составе экспериментального конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата выбран припой ВПр50 из-за его наиболее низкой эрозионной активности как по отношению к сплаву ЭП648, так и к ККМ системы SiC–SiC<sub>w</sub>–B<sub>4</sub>C–AlN.

Прототипы неохлаждаемой сопловой лопатки турбины из ККМ в составе экспериментального конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата выдержали высокотемпературные испытания на термостойкость и жаростойкость по заданным режимам без изменения геометрических размеров, растрескивания и уноса материала с поверхности при температуре испытаний 1500 °С. Максимальная температура, зарегистрированная на поверхности неохлаждаемой сопловой лопатки, составила 1560 °С.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют о высокой работоспособности разработанного ККМ для неохлаждаемых сопловых лопаток турбины при температурах до 1500 °С.

### Благодарность

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «ОДК-Климов» С.Н. Малыгину и Н.А. Шаровой за разработку конструкции экспериментального конструктивно-подобного образца сектора соплового аппарата, ценные консультации и обсуждение результатов работы.

### Библиографический список

1. Лукин В.И., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Припои на никелевой основе для пайки жаропрочных сплавов и сталей // Сварочное производство. 2014. №7. С. 36–42.
2. Ефимочкин И.Ю., Федотов С.В., Рыльников В.С., Афанасьев-Ходыкин А.Н. Высокотемпературные припои, полученные методом механического легирования // Сварочное производство. 2015. №3. С. 25–28.
3. Оспенникова О.Г., Лукин В.И., Афанасьев-Ходыкин А.Н., Галушка И.А., Шевченко О.В. Перспективные разработки в области высокотемпературной пайки жаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2017. №S. С. 144–158. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-144-158.
4. Каблов Е.Н., Фоломейкин Ю.И., Столярова В.Л., Лопатин С.И. Процессы взаимодействия ниобий-кремниевого расплава с огнеупорной керамикой // Журнал общей химии. 2016. Т. 86. №9. С. 1542–1546.
5. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Сорокин О.Ю. Керамические материалы в авиационном двигателестроении (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2018. №12 (72). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.

6. Krenkel W., Berndt F. C/C–SiC composites for space applications and advanced friction systems // *Materials Science and Engineering A*. 2005. Vol. 412. No. 1–2. P. 177–181.
7. Jacobson N.S. Corrosion of silicon-based ceramics in combustion environments // *Journal of European Ceramic Society*. 1993. Vol. 76. P. 3–28.
8. Van Roode M., Price J., Miriyala N., Leroux D. Ceramic matrix composite combustor liners: A summary of field evaluations // *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2007. Vol. 129. No. 1. P. 21–30.
9. Choi S.R., Bansal N.P. Shear Strength as a Function of Test Rate for SiC<sub>f</sub>/BSAS Ceramic Matrix Composite at Elevated Temperature // *Journal of American Ceramic Society*. 2004. Vol. 87. No. 10. P. 1912–1918.
10. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.St. Perspective high-temperature ceramic composite materials // *Russian Journal of General Chemistry*. 2011. Vol. 81. No. 5. P. 986–991.
11. Ceramic matrix composite and method of manufacturing the same: pat. US 5990025 A; filed 28.03.97; publ. 23.11.99.
12. Naslain R.R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview // *Composites Science and Technology*. 2004. Vol. 64. P. 155–170.
13. Каримбаев Т.Д., Мезенцев М.А., Ежов А.Ю. Разработка и экспериментальные исследования неметаллических деталей и узлов горячей части перспективного газотурбинного двигателя // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2015. Т. 14. №3-1. С. 128–138.
14. Corman G. Melt infiltrated ceramic matrix composites for shrouds and combustor liners of advanced industrial gas turbines: Final Report. New York, 2010. 503 p.
15. Corman G. Melt infiltrated composites (HIPERCOMP) for gas turbine engine applications. New York, 2005. 499 p.
16. Corman G., Upadhyay R., Sinha S. et al. General Electric company: selected applications of ceramics and composite materials // *Materials Research for Manufacturing*. 2016. P. 59–91.
17. Shaoming D. Preparation of SiC/SiC composites by hot pressing, using Tyranno-SA fiber as reinforcement // *Journal of American Ceramic Society*. 2003. Vol. 86. No. 1. P. 26–32.
18. Kablov E.N., Karachevtsev F.N., Stolyarova V.L., Vorozhtcov V.A., Lopatin S.I. Vaporization and thermodynamics of ceramics in the Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–ZrO<sub>2</sub>–HfO<sub>2</sub> system // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. 2019. Vol. 33. No. 19. P. 1537–1546.
19. 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.
20. Керамический композиционный материал: пат. 2689947 Рос. Федерация; заявл. 25.04.18; опубл. 29.05.19.
21. Торресильяс С.М.Р., Солис П.Н.В., Окунькова А.А., Перетягин П.Ю. Основы процесса искрового плазменного спекания нанопорошков. М.: Техносфера, 2014. 96 с.
22. Хасанов А.О. Разработка составов и технологии спарк-плазменного спекания керамических материалов, композитов на основе микро- и нанопорошков В<sub>4</sub>С: дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. 201 с.
23. Chuvildeev V.N., Boldin M.S., Nokhrin A.V. et al. Structure and properties of advanced materials obtained by Spark Plasma Sintering // *Acta Astronautica*. 2015. Vol. 109. P. 172–176.
24. Chuvildeev V.N., Boldin M.S., Dyatlova Ya.G. et al. Comparative study of hot pressing and high-speed electropulse plasma sintering of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ZrO<sub>2</sub>/Ti(C, N) powders // *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2015. Vol. 60. No. 8. P. 987–993.
25. Авраменко В.А., Папынов Е.К., Шичалин О.О. и др. Искровое плазменное спекание как инновационный подход в создании наноструктурированных керамик нового поколения // *Наноматериалы и технологии: сб. тр. VI Междунар. конф. «Наноматериалы и технологии», V Междунар. конф. по материаловедению и II Междунар. конф. по функциональным материалам*. Улан-Удэ, 2016. С. 82–90.

26. Баринов В.Ю., Рогачев А.С., Вадченко С.Г., Московских Д.О., Колобов Ю.Р. Искровое плазменное спекание изделий сложной формы с использованием квазиизостатического прессования // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016. №1–3. С. 312–315.
27. Ваганова М.Л., Сорокин О.Ю., Осин И.В. Соединение керамических материалов методом искрового плазменного спекания // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 306–317. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-306-317.
28. Батиенков Р.В., Ефимочкин И.Ю., Худнев А.А. Исследование удельного электрического сопротивления порошковых Mo–W сплавов, полученных методом искрового плазменного спекания // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №7 (79). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 09.01.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-50-58.
29. Сорокин О.Ю., Солнцев С.Ст., Евдокимов С.А., Осин И.В. Метод гибридного искрового плазменного спекания: принцип, возможности, перспективы применения // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S6. С. 11–16. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-11-16.
30. Noviyaaanto A. Characteristics of SiCf/SiC hybrid composites fabricated by hot pressing and spark plasma sintering // *Advances in Applied Ceramics*. 2011. Vol. 110. No. 7. P. 375–382.
31. Болдин М.С., Сахаров Н.В., Шотин С.В. и др. Композиционные керамики на основе оксида алюминия, полученные методом электроимпульсного плазменного спекания для трибологических применений // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2012. №6 (1). С. 32–37.
32. Sakharov K.A., Simonenko E.P., Simonenko N.P., Vaganova M.L., Lebedeva Yu.E., Chaynikova A.S., Osin I.V., Sorokin O.Yu., Grashchenkov D.V., Sevastyanov V.G., Kuznetsov N.T., Kablov E.N. Glycol-citrate synthesis of fine-grained oxides  $\text{La}_{2-x}\text{Gd}_x\text{Zr}_2\text{O}_7$  and preparation of corresponding ceramics using FAST/SPS process // *Ceramics International*. 2018. Vol. 44. No. 7. P. 7647–7655.