Формирование неразъемного соединения карбидокремниевой керамики и жаропрочного сплава с применением искрового плазменного спекания

Папынов Е.К.[1], **Чуклинов С.В.**[2], **Шичалин О.О.**[1], **Сергиенко В.И.**[3], **Марчуков Е.Ю.**[2], **Мухин А.Н.**[2], **Белов А.А.**[1]

[1] *Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток*

[2] *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва*

[3] *Дальневосточное отделение РАН, г. Владивосток*

e-mail: papynov.ek@dvfu.ru

Исследован способ формирования неразъемного соединения карбидокремниевой керамики (SiC) и жаропрочного сплава (марка ЖС6У-ВИ) с применением искрового плазменного спекания. Показано, что использование в качестве связующей добавки смеси порошков Ti и Ag (Ti-Ag) в соотношении 30 : 70 масс. % и плотного слоя данной связки, а также демпферного слоя на основе молибдена (система Ti-Ag/Mo) обеспечивает получение прочного и бездефектного неразъемного соединения между SiC и сплавом в условиях спекания при температуре 1000°C и силе механической нагрузки 4 кН. Установлено, что фазовый и элементный состав, а также структура керамики и сплава, подвергаясь искровому плазменному разогреву, не претерпевают изменений при формировании композита. Бездефектная целостность структуры достигается нивелированием разницы температурных коэффициентов линейного расширения на границе керамики и сплава за счет демпферного слоя Mo и определенной толщины связующего слоя Ti-Ag.

Ключевые слова: высокотемпературная керамика, металлокерамический композит, функционально-градиентный материал, спекающая добавка, демпферный слой, искровое плазменное спекание

Введение

Керамические материалы на основе карбида кремния представляют собой класс высокотемпературных композиционных материалов, применение которых в авиакосмической технике имеет большие перспективы[1; 2]. Этому способствуют их уникальные свойства, в том числе высокая механическая прочность, термическая стойкость, низкая плотность, высокая теплопроводность и коррозионная стойкость. При этом внедрение SiC-компонентов в авиационные двигатели и энергетические установки сопряжено с серьезной технологической проблемой – формированием надежных неразъемных соединений керамики с жаропрочными сплавами [3].

Сложность получения качественных соединений между SiC и сплавом обусловлена фундаментальными различиями в физико-химической природе этих материалов. Можно выделить следующие ключевые факторы, затрудняющие создание прочных соединений:

– несовместимость химических связей, препятствующая эффективной взаимной атомной диффузии на границе раздела;

– образование хрупких промежуточных соединений (оксидов, карбидов, нитридов) на границе раздела;

– невозможность использования спаивающих компонентов из-за низкой смачиваемости керамических поверхностей металлическими расплавами;

– различия в температурном коэффициенте линейного расширения, теплопроводности и термической стойкости, вызывающие внутренние напряжения, приводящие к объемной деструкции [3; 4].

Для минимизации влияния указанных факторов предлагаются различные технологические подходы, включающие предварительную подготовку поверхностей (травление, напыление, металлизация) и применение промежуточных связующих или демпфирующих слоев. Успешно используются добавки в виде порошковых смесей металлов, сеток, фольги или монолитных прослоек с повышенной пластичностью, способных частично расплавляться на границе контакта, а также упругие металлы с коэффициентами термического расширения близкими к тем, которые имеет керамика [4–6].

Особый интерес в последние годы вызывают электрофизические методы спекания, такие как искровое плазменное спекание (ИПС) и спекание в электрической вспышке, известные за рубежом как spark plasma sintering [7–9] и flash sintering [10], которые обеспечивают локальный сверхбыстрый разогрев в зоне контакта соединяемых материалов. Данный режим позволяет интенсифицировать диффузионные процессы и минимизировать термические напряжения, возникающие при нагреве. Так, например, использование ИПС продемонстрировало возможность получения качественных соединений SiC – SiC, SiC – C, Cu – Cu, Ti – сталь, TiAl – Ti_2AlNb и других систем [11–19].

Однако в открытой литературе представлено ограниченное количество работ по применению ИПС для соединения SiC-керамики со сплавами и сталями различных марок, востребованными в авиационном двигателестроении. Одним из примеров является предшествующее исследование нашего коллектива, направленное на формирование неразъемного соединения SiC и высоколегированной стали Х18Н15 методом ИПС с использованием различных связующих и демпферных систем [20].

Настоящая статья посвящена развитию этого направления. Целью нового исследования является разработка способа получения надежного неразъемного соединения используемой в промышленности SiC-керамики и жаропрочного сплава ЖС6У-ВИ по технологии ИПС, а также всесторонняя физико-химическая оценка качества сформированного соединения. Достижение поставленной цели позволит приблизиться к обоснованию возможности использования SiC-компонентов в перспективных авиационных двигателях.

Следует отметить, что SiC-керамика и жаропрочные сплавы, в том числе ЖС6У-ВИ, широко применяются в изготовлении деталей горячего тракта современных авиационных и наземных газотурбинных двигателей. Соединение этих материалов представляет особый практический интерес – оно позволит разрабатывать и создавать высокотехнологичные изделия с улучшенными эксплуатационными характеристиками, например лопатки и диски турбин, сопловые аппараты, корпуса камер сгорания и т.д. Решение задачи по соединению керамики и жаропрочного сплава методом ИПС значительно расширит возможности применения керамических материалов в авиационных двигателях.

Экспериментальная часть

Материалы и оборудование для получения образцов. Для получения образцов с неразъемным соединением керамика – сплав использовали:

– образец карбида кремния (промышленное обозначение «Композит-1600») в виде прямоугольного бруска размером 54,2 × 8 × 8 мм (рис. 1,*а*), разделенный резанием на фрагменты размером 8 × 8 × 6 мм (см. рис. 1,*б*);

– заготовки жаропрочного сплава марки ЖС6У-ВИ (ОСТ 1 90126-85) размером 40 × 8 × 12,9 мм (см. рис. 1,*в*);

– спекающие добавки в виде композитной смеси высокодисперсных порошков металлов на основе связующего титана и демпфера серебра в соотношении 30 : 70 масс. % (система Ti-Ag) для компенсации разницы температурных коэффициентов линейного расширения;

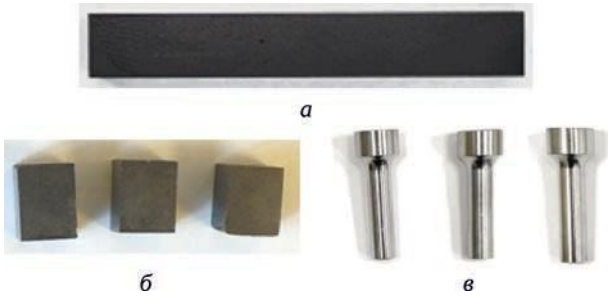


Рис. 1. Общий вид образцов:
а, *б* – образец и заготовки из SiC-керамики «Композит-1600»; *в* – заготовки из сплава ЖС6У-ВИ

– демпферная прослойка из молибдена в виде плотного тонкого цилиндра (таблетки), полученного по технологии ИПС из промышленного порошка: температура спекания 1600°С, скорость нагрева 100°С/мин, время выдержки при максимальной температуре 5 мин, давление прессования 30 МПа, время охлаждения 30 мин в вакууме;

– две графитовые пресс-формы высотой 30 мм, с внешним диаметром 30 мм, внутренним диаметром 8 мм (ПФ-1) и 12 мм (ПФ-2) в комплекте с плунжером для подпрессовки высотой 15 мм, диаметром 12 мм (рис. 2,*а*);

– ткань войлочная для предотвращения теплопотерь при разогреве пресс-оснастки;

– графитовая бумага толщиной 0,2 мм для изоляции и предотвращения припекания образцов к стенкам пресс-формы и плунжерам;

– порошок графита в качестве вспомогательного материала для заполнения свободного пространства в пресс-форме и равномерного распределения нагрузки на образец при разогреве заготовки.

Эксперименты по получению образцов с неразъемным соединением проводили на установке для искрового плазменного спекания SPS-515S (Dr. Sinter LAB, Япония). Температуру контролировали оптическим пирометром IR-AHS (Hitachi, Япония). Порошок из смеси металлов

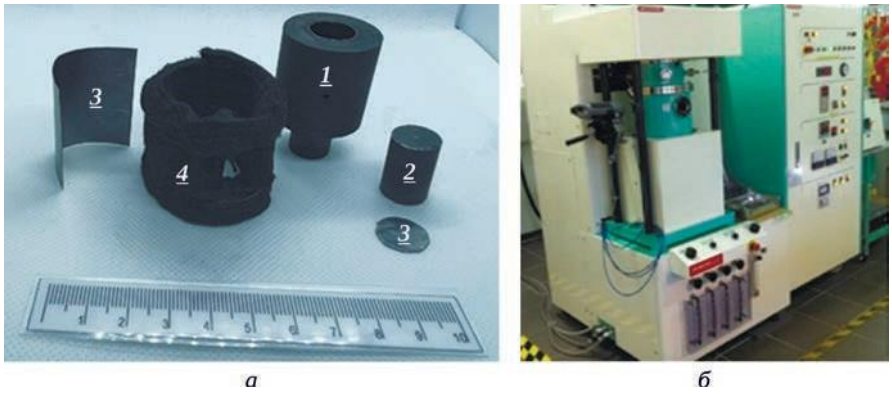


Рис. 2. Пресс-оснастка и комплектующие для реализации эксперимента (*а*) и установка для искрового плазменного спекания (*б*):
1 – графитовая пресс-форма; *2* – графитовый плунжер; *3* – графитовая бумага (фольга); *4* – войлок

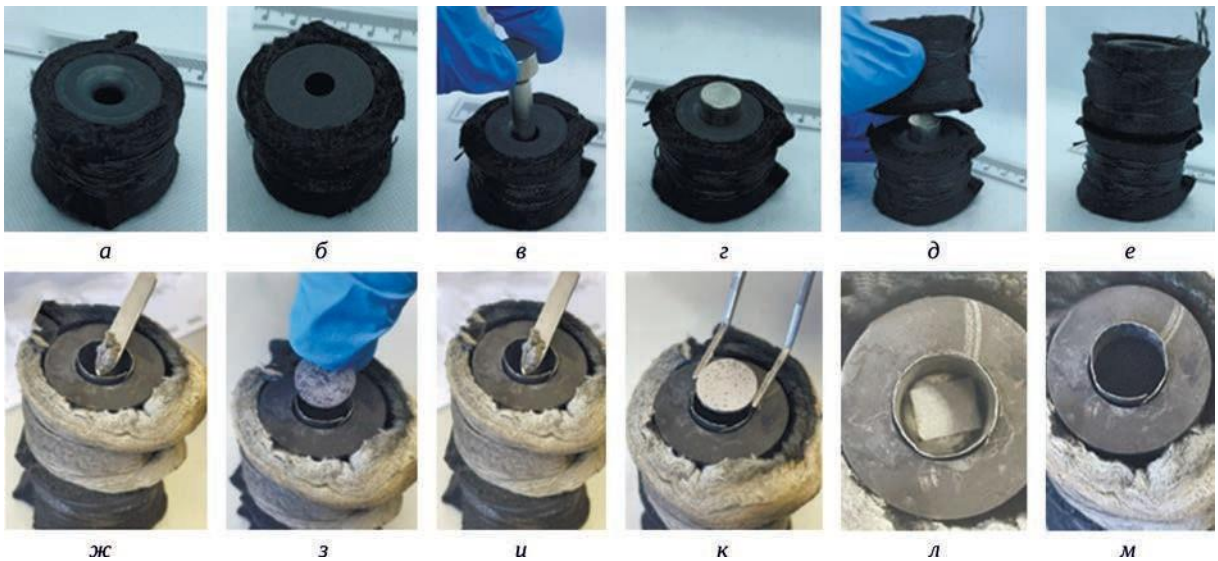


Рис. 3. Сборка пресс-конструкции для проведения эксперимента по получению образцов с неразъемным соединением керамика – сплав («Композит-1600» – ЖС6У-ВИ) по технологии ИПС

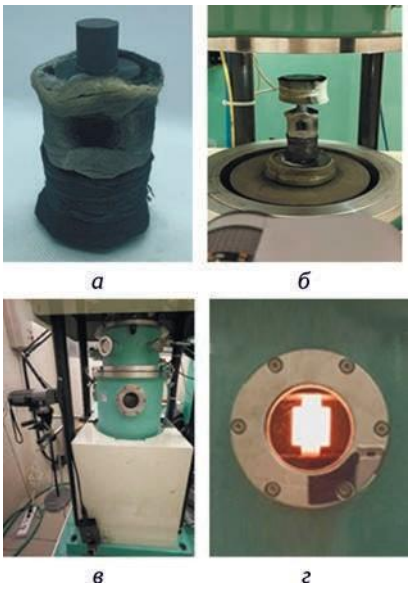


Рис. 4. Эксперимент по получению образцов с неразъемным соединением керамика – сплав («Композит-1600» – ЖС6У-ВИ) по технологии ИПС

Ti-Ag готовили путем ультразвуковой гомогенизации в дистиллированной воде объемом 250 мл с использованием зонда Ts 103 из титанового сплава с амплитудой 50% в течение 5 мин и энергией 16 КДж, для чего применяли прибор Sonopuls HD 4200 (Bandelin, Германия).

Методика получения образцов. Сборку пресс-конструкции проводили по следующей схеме (рис. 3): графитовые пресс-формы оборачивали в теплоизоляционную ткань (*а*, *б*), далее в одну из пресс-форм (имеет фаску вокруг отверстия рабочей зоны) помещали заготовку жаропрочного сплава (*в*, *г*) и сверху устанавливали вторую пресс-форму (*д*, *е*). В пресс-конструкцию помещали первый слой металлической добавки (связки) в виде порошка Ti-Ag массой 0,3 г (*ж*), затем устанавливали прослойку демпфера в виде плотной таблетки из молибдена массой 1,77 г (*з*), потом насыпали второй слой металлической добавки (связки) в виде порошка Ti-Ag массой 0,3 г (*и*) и ставили прослойку из аналогичной связки Ti-Ag в виде плотной таблетки толщиной 1 и 2 мм (*к*). Сверху устанавливали фрагмент керамической заготовки (*л*) и свободное пространство между заготовкой и стенками пресс-формы заполняли порошком графита массой 1 г (*м*).

Пресс-конструкцию (рис. 4) в готовом виде (*а*) устанавливали в камеру спекания (*б*), вакуумировали (*в*) и далее разогревали (*г*). Разогрев проводили в вакууме. Температура процесса 1000°С, скорость разогрева 100°С/мин, время выдержки при максимальной температуре 5 мин, сила нагрузки 4 кН. Температуру образца контролировали с поверхности внутренней стенки пресс-формы оптическим пирометром (см. рис. 4,*в*). Охлаждали образец в течение 30 мин в вакуумной камере спекания. Далее пресс-конструкцию вынимали из камеры, распрессовывали и извлекали образец.

Методы изучения физико-химических характеристик образцов. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводили на многоцелевом рентгеновском дифрактометре D8 Advance (Bruker AXS, Германия). Структуру образца

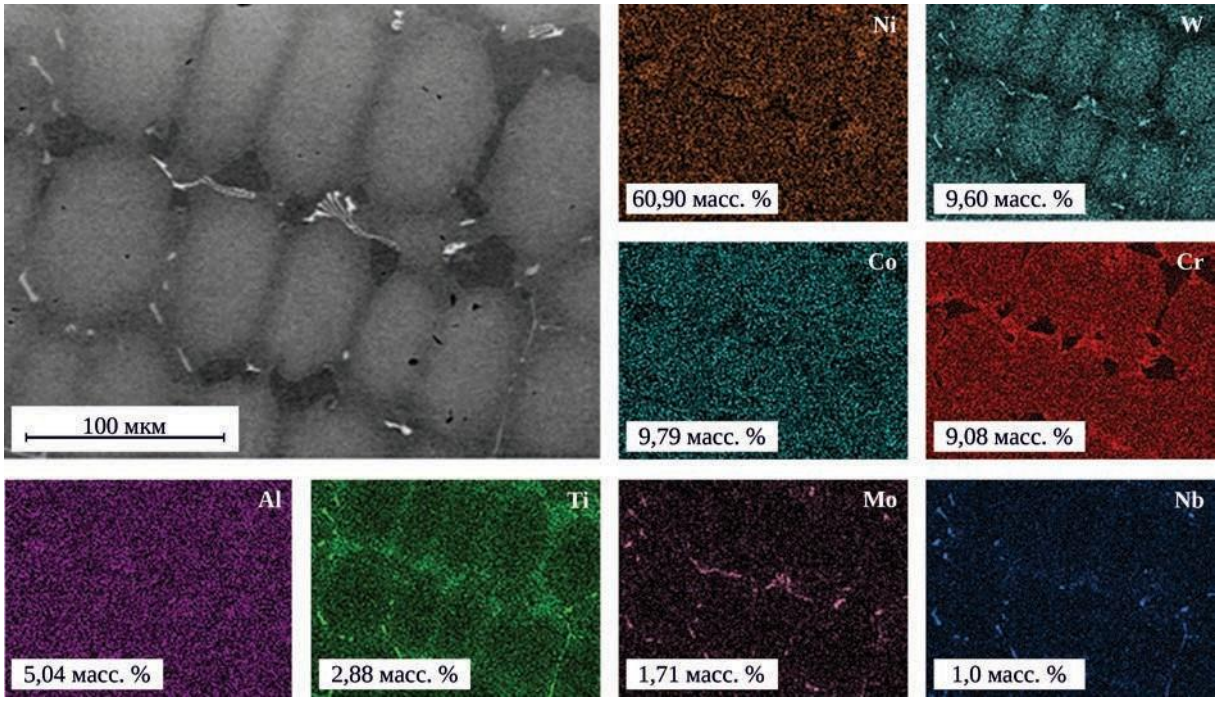


Рис. 5. Элементный анализ (ЭДС-анализ) заготовок сплава ЖС6У-ВИ: микрофотография исследуемой области поверхности и картирование распределения элементов

исследовали методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) на микроскопе CrossBeam 1540 XB (Carl Zeiss, Германия), оснащенном внутриобъективным детектором рассеянного света с обратным рассеянием электронов (BSE). Энергодисперсионный спектральный анализ (ЭДС-анализ) проводили с помощью приставки (Bruker, Германия), интегрированной с электронным микроскопом.

Результаты и их обсуждение

При физико-химических исследованиях был установлен состав и структура металлических и керамических заготовок, используемых для получения образца с неразъемным соединением керамика – сплав. По данным ЭДС-анализа определено, что элементный состав заготовок жаропрочного сплава (рис. 5) идентичен: сплав

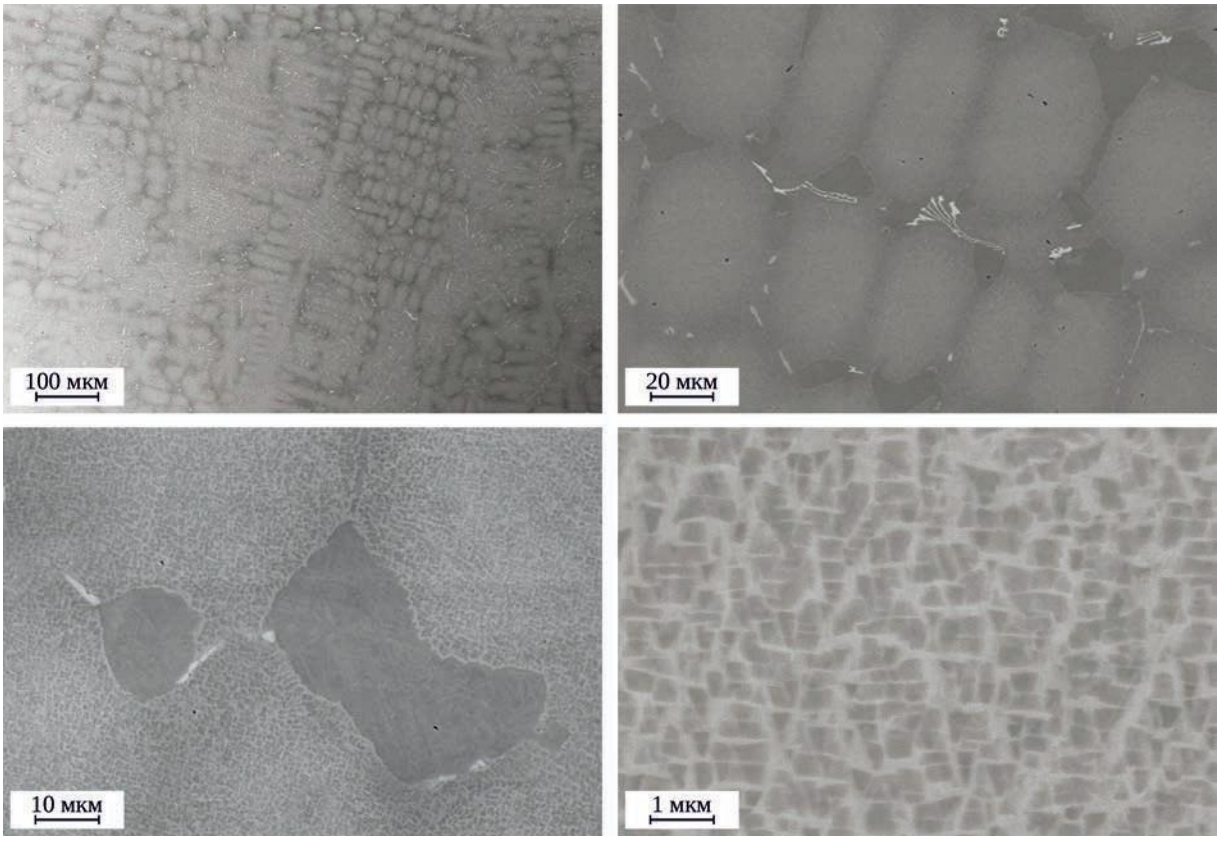


Рис. 6. Структура (РЭМ-изображение) поверхности заготовок сплава ЖС6У-ВИ

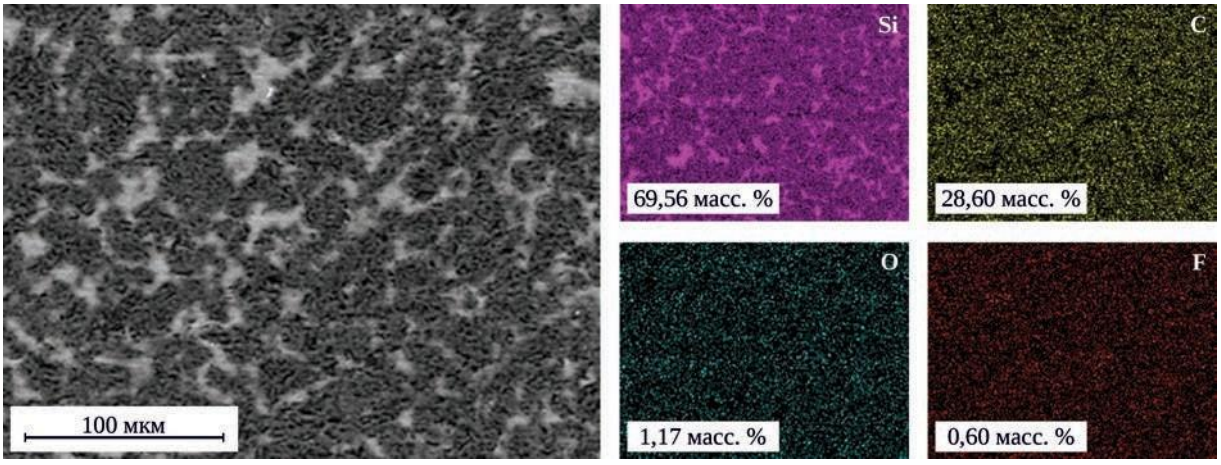


Рис. 7. Элементный анализ (ЭДС-анализ) заготовок SiC-керамики «Композит-1600»: микрофотография исследуемой области поверхности и картирование распределения элементов

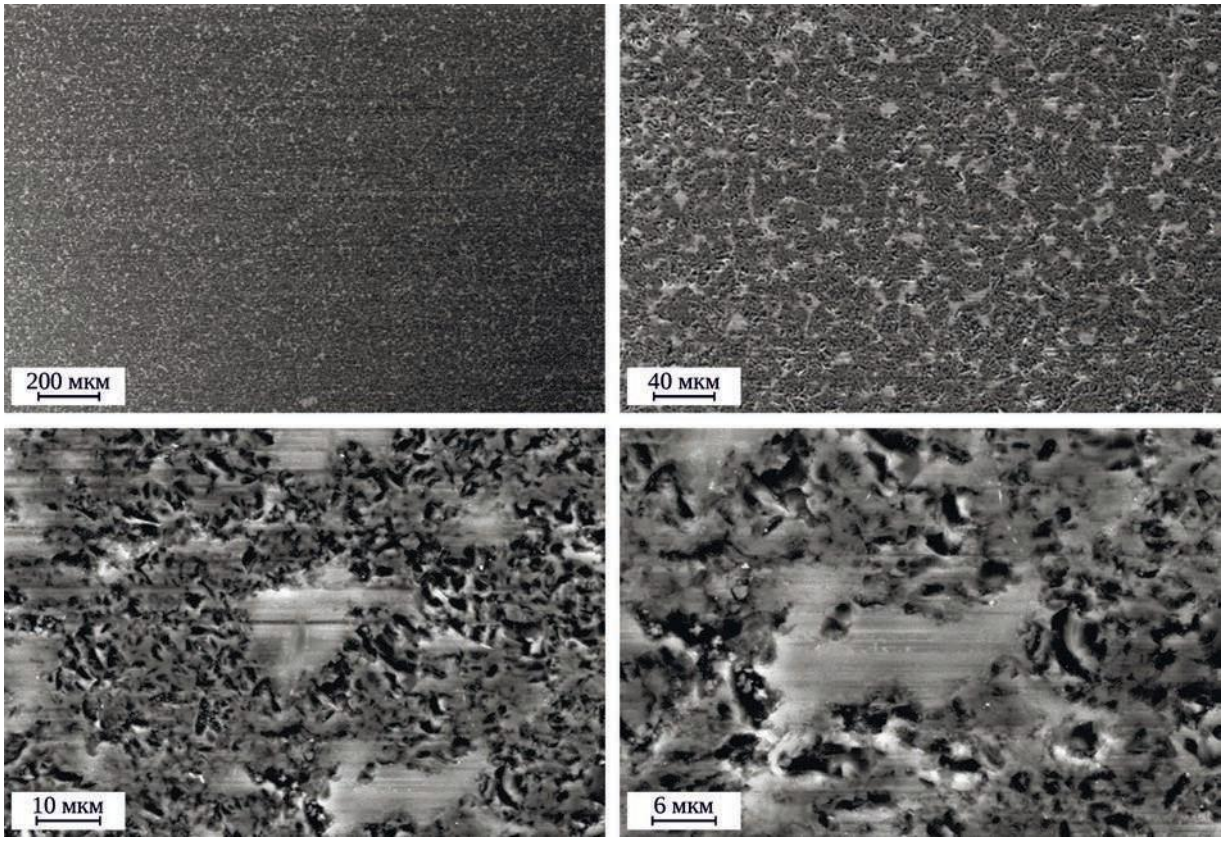


Рис. 8. Структура (РЭМ-изображение) поверхности заготовок SiC-керамики «Композит-1600»

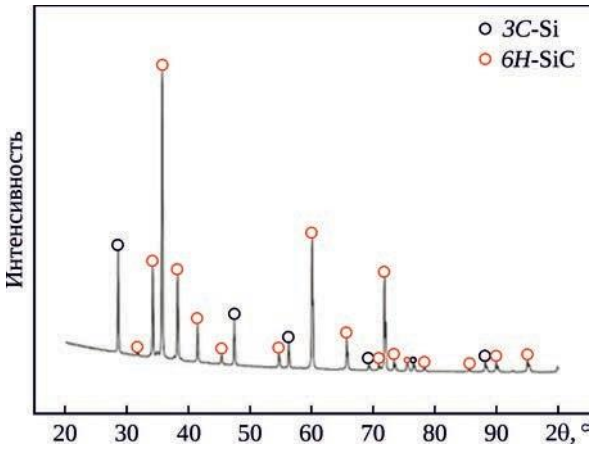


Рис. 9. Фазовый состав (РФА) SiC-керамики «Композит-1600»



Рис. 10. Образцы с неразъемным соединением керамика – сплав («Композит-1600» – ЖС6У-ВИ), полученные по технологии ИПС, с различной толщиной связующего слоя Ti-Ag: 2 мм (№ 1 и № 2), 1 мм (№ 3)

с содержанием никеля до 60,2…60,9 масс. %, вольфрама – 9,56…10,57 масс. %, кобальта – 9,73…9,65 масс. %, хрома – 9,05…9,28 масс. %, алюминия – 5,04…5,05 масс. %, титана – 2,61…2,88 масс. %, молибдена – 1,71…1,89 масс. %, ниобия – 0,85…1,04 масс. %. Согласно карте распределения указанных элементов, наиболее равномерно распределены по поверхности Ni, Co и Al.

Структура сплава (рис. 6) также идентична у всех исследуемых заготовок и представлена монолитной поверхностью. Дефекты и открытые поры отсутствуют. Отмечено наличие нескольких разнородных по структуре областей, что обусловлено различием фаз.

Элементный состав заготовок керамики также идентичен: SiC с содержанием кремния 69,56…70,09 масс. %, углерода – 27,16…28,60 масс. % (рис. 7). Отмечено некоторое количество кислорода (1,17…1,76 масс. %), что свидетельствует о частичном поверхностном окислении кремния с образованием его оксида. Выявлена незначительная примесь натрия – 0,07…0,14 масс. %, фтора – 0,60…0,85 масс. %, что может быть обусловлено используемым методом получения образца. Согласно карте распределения элементов, основное количество кремния представлено крупными агломератами, а углерод распределен равномерно.

Таблица. Уточнение структуры образца SiC-керамики «Композит-1600» методом Ритвельда

Фаза	Содержание, масс. %	Параметры ячейки, Å			Объем ячейки, Å^3	R_{wp}	GOF
		a	*b*	*c*			
SiC	86,89	3,0802	3,0802	15,1146	124,197	6,10	7,48
Si	13,11	5,4237	5,4237	5,4237	159,5464		

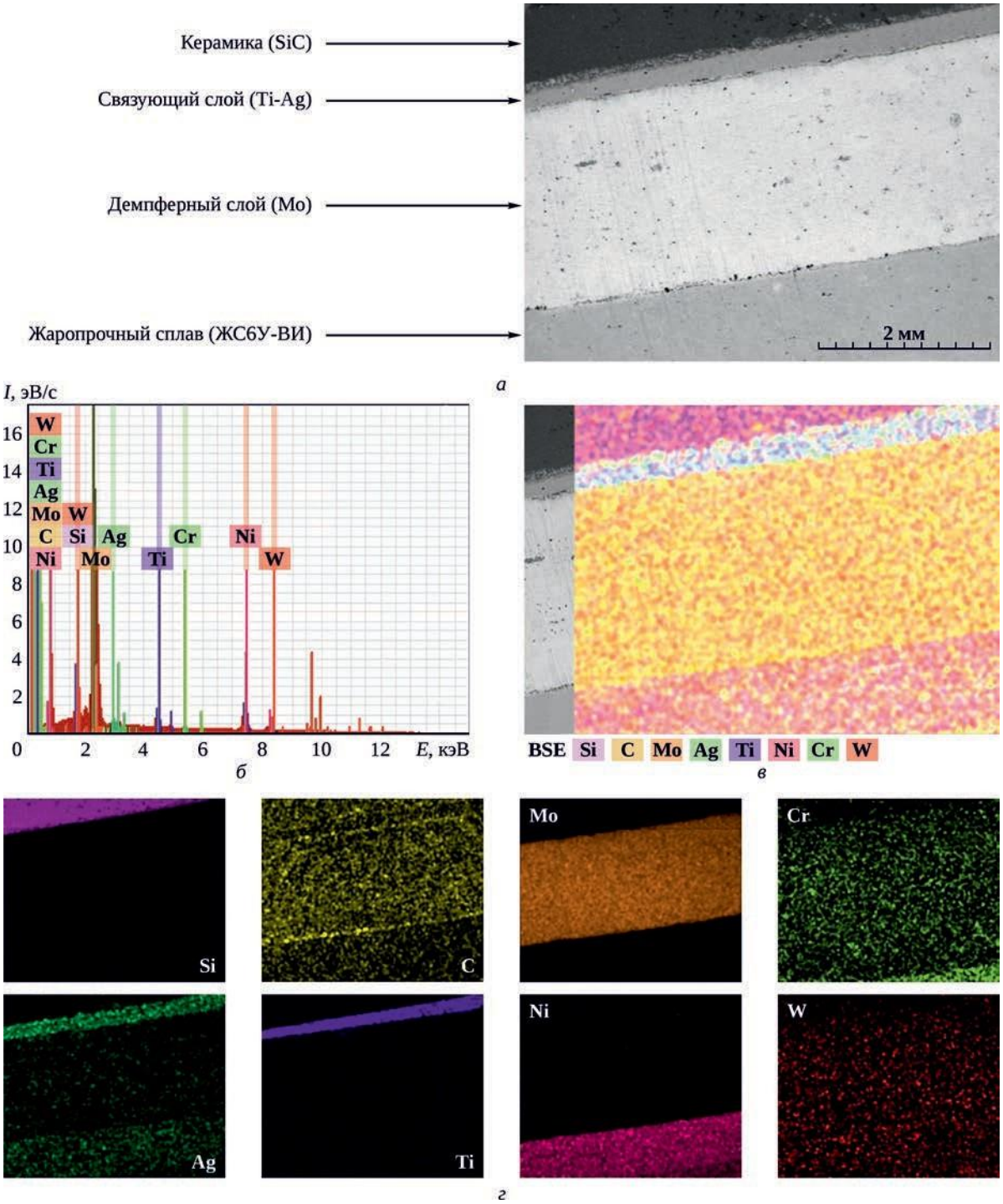


Рис. 11. Анализ поверхности поперечного среза образца № 1
с неразъемным соединением керамика – сплав («Композит-1600» – ЖС6У-ВИ) на границе контакта:
а – РЭМ-изображение; *б* – ЭДС-спектр, полученный с анализируемой области поверхности;
в, г – качественный элементный анализ (ЭДС-анализ) поверхности среза

По данным РЭМ (рис. 8), структура керамики представлена немонолитной поверхностью, имеются крупные поры, что связано с технологией ее изготовления. Отмечено наличие нескольких разнородных по структуре областей в виде крупных монолитных агломератов.

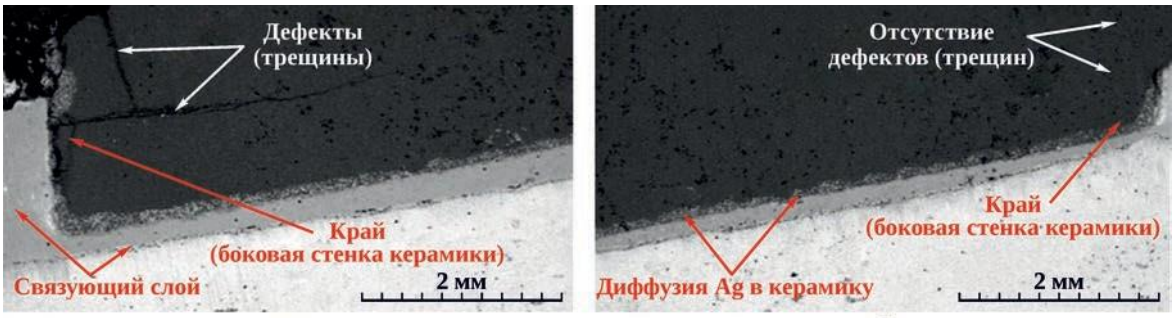
Установлено, что фазовый состав керамики (рис. 9) включает кристаллическую фазу карбида кремния гексагональной структуры – *6H*-SiC (PDF-номер карточки ICSD 015325), с параметрами ячейки $a = b = 3{,}0806$ Å, $c = 15{,}1174$ Å, пространственной группы P63mc. Вторая фаза представлена чистым кремнием кубической структуры – *3C*-Si (PDF-номер карточки ICSD 060389), с параметрами ячейки $a = b = c = 5{,}4298$ Å, пространственной группы Fd-3m.

Для уточнения структуры был проведен расчет фазового состава методом Ритвельда с помощью программного обеспечения Topas 3 (таблица). Согласно результатам, фазовый состав соответствует заявленному для образца «Композит-1600» и установленному по данным РФА (см. рис. 9). Параметры ячеек кристаллической решетки изменяются незначительно, а низкие значения фактора ошибки (R_{wp}) и фактора соответствия (GOF) говорят о высокой точности расчета.

По результатам экспериментов были получены три образца с неразъемным соединением керамика – сплав (рис. 10). Проведены физико-химические исследования, и изучена структура поверхности, а также определен качественный элементный состав сплава, керамики и зоны контакта. Предварительно проведена пробоподготовка образцов № 1 и № 3 для анализа, сделан поперечный срез и подготовлена поверхность срезов путем шлифовки и полировки.

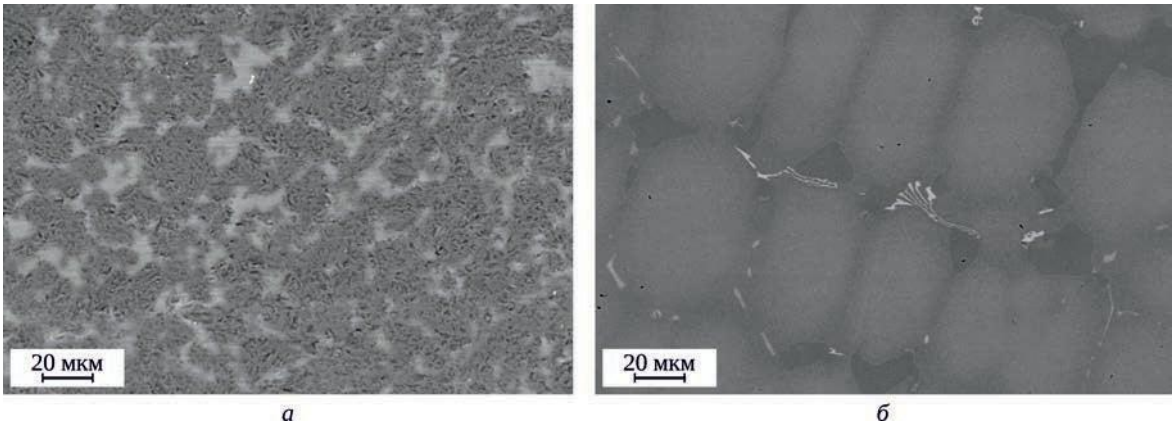
По результатам анализа установлено, что основными частями соединенного образца являются (сверху вниз на поперечном срезе, рис. 11,*а*): керамика SiC; связующий слой Ti-Ag; демпферный слой молибдена; жаропрочный сплав. ЭДС-анализ показал наличие основных элементов в составе исследуемого образца: керамика (Si, C), связка (Ti-Ag), демпфер (Mo), никелированный сплав (см. рис. 11,*б*). Согласно карте распределения элементов, диффузии основных элементов между слоями не наблюдается (см. рис. 11,*в*). Отмечено некоторое распределение углерода, хрома, вольфрама по всей исследуемой области среза (см. рис. 11,*г*), что, вероятно, связано с загрязнением анализируемой поверхности при ее подготовке механическим распилом и шлифовкой.

По данным РЭМ (рис. 12) установлено, что границы контакта разнородных материалов, включая промежуточные слои связки и демпфера, равномерны по всей длине соединения. Керамика по краям боковых стенок



а *б*

Рис. 12. Структура (РЭМ-изображение) поверхности поперечного среза образцов с неразъемным соединением керамика – сплав («Композит-1600» – ЖС6У-ВИ) на границе контакта: *а* – образец с толщиной связующего слоя (Ti-Ag) 2 мм (№ 1); *б* – образец с толщиной связующего слоя (Ti-Ag) 1 мм (№ 3)



а *б*

Рис. 13. Структура (РЭМ-изображение) керамики (*а*) и жаропрочного сплава (*б*) образца № 1 с неразъемным соединением («Композит-1600» – ЖС6У-ВИ)

вплавлена в плотный слой связки Ti-Ag на глубину 0,5…1,5 мм, в зависимости от толщины слоя связки – 1 или 2 мм. В случае большой толщины связки (образец № 1) на краю керамики и сплава выявлены области дефектов (трещин) на расстоянии около 1 мм от зоны соединения. Следует отметить, что трещины не проникают вглубь керамики, что указывает на отсутствие сильного внутреннего напряжения на краю (в углу) контакта связка – керамика. Напротив, при тонком слое связки (образец № 3) вплавление керамики минимально и данные дефекты полностью отсутствуют. Выявлена незначительная диффузия Ag в поры керамики в приповерхностной зоне контакта (см. рис. 12,*б*).

Результаты рентгенофазового анализа указывают на идентичность состава керамики до и после ее соединения с металлом, т.е. после термической обработки. Дифрактограмма образца керамики после ее соединения с жаропрочным сплавом идентична дифрактограмме до обработки в условиях ИПС и соответствует представленной на рис. 9. Аналогичная идентичность отмечена и для структуры керамики и сплава: морфология поверхности срезов данных образцов остается неизменной, что установлено по данным РЭМ (рис. 13).

Заключение

В работе экспериментальным путем получены образцы с неразъемным соединением SiC-керамики («Композит-1600») и жаропрочного сплава (ЖС6У-ВИ) по технологии ИПС. Показано, что использование в качестве связующей добавки смеси порошков Ti-Ag в соотношении 30 : 70 масс. % и плотного слоя данной связки, а также демпферного слоя на основе Mo (система Ti-Ag/Mo) обеспечивает формирование прочного и бездефектного неразъемного соединения SiC – сплав («Композит-1600» – ЖС6У-ВИ) в условиях ИПС при температуре 1000°C и силе механической нагрузки 4 кН. Установлено, что фазовый и элементный состав, а также структура керамики и сплава при искровом плазменном разогреве не претерпевают изменений при формировании композита, что подтверждено методами РФА, РЭМ и ЭДС. Установлено, что бездефектная целостность структуры достигается нивелированием разницы температурных коэффициентов линейного расширения на границе керамики и сплава за счет демпферного слоя молибдена и плотного слоя связки Ti-Ag при толщине последнего менее 2 мм. Полученные в работе результаты обладают научной значимостью, поскольку вносят вклад в развитие фундаментальных представлений о закономерностях формирования соединений между принципиально разнородными материалами – керамикой и сплавом – в условиях интенсивного локального энергетического воздействия. Обоснование возможного промышленного применения технологии ИПС для задач авиадвигателестроения требует комплексного научного и практического исследования.

Литература / References

1. Karadimas G., Salonitis K. Ceramic matrix composites for aero engine applications – a review // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, no. 5. Art. 3017. 42 p. DOI 10.3390/app13053017.
2. Advances in modifications and high-temperature applications of silicon carbide ceramic matrix composites in aerospace: a focused review / X. Wang, X. Gao, Zh. Zhang, L. Cheng, H. Ma, W. Yang // Journal of the European Ceramic Society. 2021. Vol. 48, no. 9. P. 4671–4688.
3. Current issues and problems in the joining of ceramic to metal / Uday M.B., Ahmad-Fauzi M.N., Alias Mohd Noor and Srithar Rajoo // Joining Technologies / ed. by M. Ishak. InTechOpen, 2016. Chap. 8. P. 159–193. URL: https://doi.org/10.5772/64524 (accessed: 10.06.2024).
4. A review paper on effect of the welding process of ceramics and metals / Yan Zhang, YanKun Chen, DeShui Yu, DaQian Sun, HongMei Li // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9, no. 6. P. 16214–16236. DOI 10.1016/j.jmrt.2020.11.088.
5. Hausner S., Wielage B. Brazing of metal and ceramic joints // Advances in brazing : Science, technology and applications. Woodhead Publishing, 2013. Chap. 12. P. 361–393. URL: https://doi.org/10.1533/9780857096500.2.361 (accessed: 10.06.2024).
6. Nascimento R.M. do, Martinelli A.E., Buschinelli A.J.A. Review article: Recent advances in metal-ceramic brazing // Cerâmica. 2003. Vol. 49, no. 312. P. 178–198. DOI 10.1590/s0366-69132003000400002.
7. Болдин М.С. Физические основы технологии электроимпульсного плазменного спекания : электронное учебно-методическое пособие. Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2012. 59 с.
   Boldin M.S. Fizicheskie osnovy tekhnologii elektroimpul’snogo plazmennogo spekaniia: elektronnoe uchebno-metodicheskoe posobie [The physical fundamentals of electro-pulse plasma sintering technology: digital educational and methodological manual]. Nizhny Novgorod: Nizhegorodskii gosuniversitet [State University of Nizhny Novgorod], 2012. 59 p.

8. Григорьев Е.Г., Калин Б.А. Электроимпульсная технология формирования материалов из порошков : учебное пособие. М. : МИФИ, 2008. 152 с.
Grigoriev E.G., Kalin B.A. Elektroimpul'snaia tekhnologiia formirovaniia materialov iz poroshkov: uchebnoe posobie [Electric pulse technology for forming powder-based materials. Training manual]. Moscow: MIFI [MEPhI], 2008. 152 p.
9. A review of multi-physical fields induced phenomena and effects in spark plasma sintering: fundamentals and applications / Zh.-Y. Hu, Zh.-H. Zhan et al. // Materials & Design. 2020. Vol. 191. Art. 108662. 54 p. DOI 10.1016/j.matdes.2020.108662.
10. Review of flash sintering: materials, mechanisms and modelling / M. Yu, S. Grasso, R. Mckinnon, T. Saunders, and M.J. Reece // Advances in Applied Ceramics. 2017. Vol. 116, no. 1. P. 24–60. DOI 10.1080/17436753.2016.1251051.
11. 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.
Vaganova M.L., Sorokin O.Yu., Osin I.V. Soedinenie keramicheskikh materialov metodom iskrovogo plazmennogo spekaniia [Joining of ceramic materials by the method of spark plasma sintering]. Aviatsionnye materialy i tekhnologii [Aviation Materials and Technologies]. 2017. No. S. P. 306–317. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-s-306-317.
12. Joining of C/SiC materials by spark plasma sintering / V. Tsakiris, W. Kappel, D. Talpeanu, F. Albu, D. Patroi, V. Marinescu // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 1029. P. 200–205. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.1029.200.
13. Joining of silicon carbide and graphite by spark plasma sintering / T. Okuni, Y. Miyamoto, H. Abe, M. Naito // Ceramics International. 2014. Vol. 40, no. 1, pt. B. P. 1359–1363. DOI 10.1016/j.ceramint.2013.07.017.
14. Joining of C/SiC composites by spark plasma sintering technique / S. Rizzo, S. Grasso, M. Salvo, V. Casalegno, M.J. Reece, M. Ferraris // Journal of the European Ceramic Society. 2014. Vol. 34, no. 4. P. 903–913. DOI 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.10.028.
15. Steel to titanium solid state joining displaying superior mechanical properties / A. Miriyev, D. Barlam, R. Shneck, A. Stern, N. Frage // Journal of Materials Processing Technology. 2014. Vol. 214, no. 12. P. 2884–2890. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.026.
16. Titanium to steel joining by spark plasma sintering (SPS) technology / A. Miriyev, A. Stern, E. Tuval, S. Kalabukhov et al. // Journal of Materials Processing Technology. 2013. Vol. 213, no. 2. P. 161–166. DOI 10.1016/j.jmatprotec.2012.09.017.
17. Spark plasma diffusion bonding of $TiAl/Ti_2AlNb$ with Ti as interlayer / B. Zhang, Ch. Chen, J. He, J. Hou, L. Chai and Y. Lv // Materials. 2020. Vol. 13, no. 15. Art. 3300. 9 p. DOI 10.3390/ma13153300.
18. Decomposition of $Ag_2C_2O_4$ in a spark plasma sintering apparatus: morphological study and application for materials joining / D.V. Dudina, A.A. Matvienko, A.A. Sidelnikov, M.A. Legan, V.I. Mali, M.A. Esikov, P.A. Gribov, V.V. Boldyrev // Materials Today: Proceedings. 2019. Vol. 16, pt. 1. P. 187–190. DOI 10.1016/j.matpr.2019.05.242.
19. Electric current-assisted joining of copper plates using silver formed by in-situ decomposition of $Ag_2C_2O_4$ / D.V. Dudina, A.A. Matvienko, A.A. Sidelnikov, M.A. Legan, V.I. Mali, M.A. Esikov, A.G. Anisimov, P.A. Gribov and V.V. Boldyrev // Metals. 2018. Vol. 8, no. 7. DOI 10.3390/met8070538.
20. Получение функционально-градиентных материалов на основе карбида кремния и высоколегированной стали по технологии искрового плазменного спекания / С.В. Чуклинов, В.И. Сергиенко, Е.К. Папынов, О.О. Шичалин, Е.Ю. Марчуков, А.Н. Мухин // Журнал неорганической химии. 2023. Т. 68, № 1. С. 115–132. DOI 10.31857/S0044457X22601237.
Chuklinov S.V., Sergienko V.I., Papynov E.K., Shichalin O.O., Marchukov E.Y., Mukhin A.N. Poluchenie funktsional'no-gradientnykh materialov na osnove karbida kremniia i vysokolegirovannoi stali po tekhnologii iskrovogo plazmennogo spekaniia [Production of functionally gradient materials based on silicon carbide and high-alloy steel using spark plasma sintering technology]. Zhurnal neorganicheskoi khimii [Russian Journal of Inorganic Chemistry]. 2023. Vol. 68, no. 1. P. 115–132. DOI 10.31857/S0044457X22601237.

Материалы получены редакцией 11.07.2024

Для цитирования:

Формирование неразъемного соединения карбидокремниевой керамики и жаропрочного сплава с применением искрового плазменного спекания / Папынов Е.К., Чуклинов С.В., Шичалин О.О., Сергиенко В.И., Марчуков Е.Ю., Мухин А.Н., Белов А.А. // Авиационные двигатели. 2024. № 3 (24). С. 31–40.