

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ**TECHNICAL SCIENCES**

УДК 666.65:549.632

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-730-738>

Поступило в редакцию 13.08.2020

Received 13.08.2020

Член-корреспондент А. Ф. Ильющенко, Л. Н. Дьячкова, В. А. Осипов*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь***СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ
ИЗ РЕАКЦИОННОСПЕЧЕННОЙ КАРБИДОКРЕМНИЕВОЙ КЕРАМИКИ**

Аннотация. Представлены результаты исследования процесса получения сложнопрофильных элементов подложки зеркал оптических телескопов из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики. Показано, что прочность карбидокремниевой керамики зависит от дисперсности порошка карбида кремния и от температуры реакционного спекания. Повышение температуры спекания с 1500 до 1650 °С приводит к увеличению прочности на 60 МПа, а до 1800 °С – к снижению прочности на 40 МПа. Повышение прочности объясняется снижением свободного кремния и увеличением содержания вторичного карбида кремния, снижение прочности – ростом размера карбидных зерен. Исследование влияния режимов пайки шестигранных элементов для получения сложнопрофильного элемента подложки зеркала оптического телескопа на прочность паяного шва показало, что положительное влияние на прочность паяного шва оказывает введение в состав припоя на основе карбида кремния порошка карбида кремния дисперсностью 7 мкм и бора аморфного в количестве 6 %. Проведенные испытания паяных образцов при трехточечном изгибе выявили, что разрушение происходит по телу спаиваемых образцов, а не паяному шву. Структура паяного шва зависит от состава припоя и зазора между паяемыми образцами.

Ключевые слова: карбидокремниевая керамика, реакционное спекание, структура, свойства, пайка, сложнопрофильные элементы

Для цитирования. Ильющенко, А. Ф. Сложнопрофильные элементы аэрокосмической техники из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики / А. Ф. Ильющенко, Л. Н. Дьячкова, В. А. Осипов // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 730–738. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-730-738>

Corresponding Member Alexandr Ph. Ilyushchanka, Larisa N. Dyachkova, Vladimir A. Osipov*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus***COMPLEX ELEMENTS OF AEROSPACE EQUIPMENT
FROM REACTION SILICON CARBIDE CERAMICS**

Abstract. The results of studying the process of obtaining complex-profile elements of the substrate of mirrors of optical telescopes from reaction-sintered silicon carbide ceramics are presented. It is shown that the strength of silicon carbide ceramics depends on the dispersion of the silicon carbide powder and on the temperature of reaction sintering. An increase in the sintering temperature from 1500 to 1650 °C leads to an increase in strength by 60 MPa, and to 1800 °C – to a decrease in strength by 40 MPa. An increase in strength is explained by a decrease in free silicon and an increase in the content of secondary silicon carbide, a decrease in strength is explained by an increase in the size of carbide grains. The study of the influence of the modes of soldering of hexagonal elements to obtain a complex-profile element of the substrate of the mirror of an optical telescope on the strength of the soldered seam showed that the introduction of silicon carbide powder 7 μm in size and amorphous boron in an amount of 6 % into the solder composition based on silicon carbide has a positive effect on the strength of the soldered seam. Tests of the brazed specimens at three-point bending showed that fracture occurs along the body of the specimens being brazed, and not the brazed seam. The structure of the brazed joint depends on the composition of the braze alloy and the gap between the samples to be brazed.

Keywords: silicon carbide ceramics, reaction sintering, structure, properties, brazing, complex-profile elements

For citation: Ilyushchanka A. Ph., Dyachkova L. N., Osipov V. A. Complex elements of aerospace equipment from reaction silicon carbide ceramics. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 730–738 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-730-738>

Введение. Аэрокосмическая промышленность сегодня требует применения современных технологий для создания материалов, способных работать в условиях высоких силовых, тепловых нагрузок, радиации, и которые можно применять при производстве самолетов и космических кораблей. Материалы эти должны обладать такими показателями качества конструкционных материалов, как жесткость, прочность, износостойкость, теплостойкость, коррозионная и радиационная стойкость, снижение веса и технологичность. Металлы и сплавы этим повышенным и часто противоречивым требованиям не всегда могут удовлетворять. Поэтому создаются новые виды конструкционных материалов на неметаллической основе. К таким материалам относятся бескислородная керамика и полимеры нового поколения [1; 2]. Однако применение полимеров ограничено их низкой термостойкостью. Бескислородная керамика (бориды, карбиды, нитриды, силициды переходных металлов), благодаря ковалентному строению, имеет высокую твердость, жаропрочность, коррозионную стойкость, теплопроводность, износостойкость [3]. Это делает их перспективными для применения как в аэрокосмической, так и в гражданской технике для конструкционных деталей, деталей двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей, для режущего инструмента, подшипников. Значительная прочность химической связи позволяет использовать подобные материалы в качестве легкой брони, поскольку при очень быстром механическом взаимодействии пули с броней большая часть кинетической энергии тратится на разрыв химических связей броневое материала. Сочетание высоких диэлектрических свойств с хорошей теплопроводностью дает возможность успешно применять некоторые соединения в электронной технике.

На долю керамики, главным образом, на основе SiC, в настоящее время приходится около 20 % мирового производства конструкционных материалов, и их роль в дальнейшем будет возрастать [4]. Карбид кремния является одним из самых перспективных материалов для изготовления крупногабаритных облегченных зеркальных элементов в различных оптических системах, в т. ч. астрономических телескопах, системах передачи энергии с использованием лазерного излучения [5].

Крупным производителем телескопов с использованием карбидокремниевых материалов является вторая по величине оборонно-космическая компания в мире Airbus Defence and Space. Для миссий Европейского космического агентства ею создан ряд космических телескопов, из карбида кремния изготовлено зеркало диаметром 3,5 м для космического аппарата SPICA (Space Infra-Red Telescope for Cosmology and Astrophysics) JAXA/NASA/ESA. В СНГ разработка технологии изготовления зеркал проводится специалистами ОАО «ЛЗОС», АО «ГОИ им. Вавилова» и др. В ОАО «ЛЗОС» было изготовлено несколько макетных образцов зеркал на основе карбида кремния, в АО «ГОИ им. Вавилова» – несколько серий облегченных монолитных корпусов зеркал из карбида кремния различных типоразмеров до 1200 мм в диаметре со степенью облегчения до 80 % [6]. В [7] приводятся данные по конструкции зеркала из карбида кремния диаметром 1230 мм типа «сэндвич» (ОАО «ЛОМО», г. Санкт-Петербург), коэффициент облегчения 0,74.

Получение заготовок облегченных зеркал из карбида кремния является сложным технологическим процессом. В большинстве своем это связано с трудностью получения однородной структуры и фазового состава в объеме заготовки, особенно крупных размеров, остаточной пористостью, необходимостью использования специализированных крупногабаритных печей для реакционного спекания.

Одним из вариантов получения крупногабаритных заготовок зеркал из карбида кремния является сборка зеркал из отдельных элементов шестигранной формы. Такие элементы легче изготовить методами порошковой металлургии и обработать.

На данный момент не разработаны промышленные способы соединения отдельных карбидокремниевых элементов, этот вопрос мало изучен и требует разработки специальных технологий. В отличие от оптического кварцевого стекла и ситалла, которые могут соединяться между собой сплавлением, поэтому можно сваривать большие зеркала и наплавлять на них дополнительный слой, карбидокремниевые элементы соединить между собой без дополнительных операций невозможно. В связи с этим применяют диффузионную сварку, реакционное связывание, реакционную сварку или пайку. Пайка и реакционное связывание оставляют после себя шов на поверх-

ности раздела между соединяющимися частями, при диффузионной сварке из соединяющихся частей образуется бесшовная деталь [8]. Соединение керамических элементов осуществляется также с помощью клеев при комнатной температуре; с помощью металлического и стеклянного припоев в области температур приблизительно 1000 °С, а также реакционным связыванием при ~1400 °С.

Задача соединения элементов из карбидокремниевой керамики решается посредством того [8], что соединяемые элементы приводят в контакт друг с другом в процессе диффузионной сварки в присутствии атмосферы защитного газа и соединяют малодеформирующим образом при использовании температуры не ниже 1600 °С и внешнего давления с образованием монолита, при этом соединяемые элементы испытывают пластическую деформацию в направлении приложения силы менее 5 %. Таким способом могут быть изготовлены керамические элементы сложной формы для деталей с близкими к конечным контурам для производства промышленного оборудования и машиностроения с экстремально высокой термостойкостью, коррозионной стойкостью или износостойкостью, например, пластинчатые теплообменники из спеченной SiC-керамики с экстремально высокой термостойкостью и коррозионной стойкостью.

Однако невозможно полностью использовать их потенциал из-за того, что нет удовлетворительной технологии сварки этих керамических материалов, так как керамика типа SiC не имеет собственного расплава. Различные керамические компоненты могут быть изготовлены отдельно и затем соединены вместе.

Согласно [9], получение новых типов высококачественных керамических изделий затруднено также тем, что промышленные порошки не полностью отвечают современным технологическим требованиям. Из таких порошков без применения специальных технологических приемов нельзя изготовить принципиально новые с точки зрения структуры и свойств керамические материалы. Новые подходы к технологии получения упрочняющих компонентов, принципам выбора спекающих добавок, а также совершенствование методов синтеза порошков и режимов термообработки позволяют значительно повысить физико-химические показатели подобных материалов.

Одним из наиболее перспективных методов получения керамических материалов является реакционное спекание, которое не требует дорогостоящего специального оборудования. Реакционное спекание – особый вид спекания, при котором спекаемый материал уплотняется путем образования нового кристаллического вещества по реакции между одним из компонентов материала, находящимся в виде твердой фазы, и парообразной фазой другого вещества. Происходит своеобразная пропитка пористого тела парообразным веществом, которое вступает в реакцию с основной или специально введенной для осуществления реакции фазой. Реакционным спеканием получают оксидную [10], боридную, нитридную и карбидную керамику [11]. Однако наиболее широко данный метод применяется при получении SiC-керамики.

Преимущества керамики на основе карбида кремния состоят в ее значительной механической прочности при высоких температурах, износостойкости, низком коэффициенте термического расширения, сопротивлении окислению при температурах до 1500 °С, химической инертности, биосовместимости, коррозионной стойкости, устойчивости к радиационным воздействиям, хороших показателях твердости и теплопроводности [4; 9; 12]. Благодаря уникальному сочетанию физико-химических свойств, керамика на основе карбида кремния широко востребована в машиностроении, атомной энергетике, на предприятиях оборонной, металлургической, пищевой, химической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности, в аэрокосмической технике.

Обычно технология включает в себя следующие операции: дозирование порошков заданного гранулометрического состава, смешивание со спекающими добавками, временной технологической связкой и выгорающей добавкой (при необходимости), грануляцию шихты, прессование, сушку и обжиг.

Процесс прессования позволяет получать изделия различной формы, но размеры ограничиваются возможностями прессового оборудования.

Процесс спекания изделий из карбида кремния зависит от физико-химической природы модификаторов. Без модифицирующих добавок карбид кремния спекается при температурах 2000–2300 °С. Уплотнение материалов ускоряется при приложении давления в процессе обжига. Карбид кремния не образует жидкой фазы при температурах до 2000 °С, и при горячем прессовании уплотнение осуществляется в основном за счет перемещения частиц и незначительной пластической деформации. Известно, что при давлении до 60 МПа и температурах ниже 2300 °С из чистого карбида кремния можно получить керамику с плотностью не выше 2,7 г/см³, пористостью не менее 16 %, что не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к конструкционной керамике. Интенсификации спекания карбида кремния при горячем прессовании достигают путем применения добавок, образующих жидкую фазу, смачивающую карбид кремния, что облегчает процесс перемещения частиц друг относительно друга [13].

Реакционное спекание SiC-керамики производится в специальных засыпках, легко образующих паровую фазу, например Si. Парообразный кремний реагирует с введенным в материал углеродом, образуя SiC. Однако для осуществления данного процесса необходимо применение специальных печей, способных обеспечивать спекание в вакууме и инертной атмосфере при избыточном давлении, что не всегда приемлемо. В связи с этим спекание проводят таким образом, чтобы происходила пропитка жидким кремнием карбидокремниевого каркаса. Кремний в процессе выдержки при спекании взаимодействует с углеродом основы материала, происходит образование карбида кремния.

Реакционное спекание в присутствии жидкой фазы позволяет получать не только высокоплотную керамику, но проводить процессы пайки отдельных элементов для получения габаритных изделий сложной формы [14].

Целью работы является исследование влияния режимов спекания в присутствии жидкого кремния заготовок из SiC керамики на ее структуру и свойства и процессов пайки отдельных элементов из нее.

Материалы и методы исследования. Для изготовления образцов использовали порошки карбида кремния марки 64С (ГОСТ 26327–84) и технического углерода марки К354 (ГОСТ 7885–86). Порошок карбида кремния использовали различной дисперсности: 7, 28, 40 мкм. Порошки карбида кремния в количестве 87 мас. % и технического углерода – 13 мас. % смешивали в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 6 ч. В готовую смесь добавляли пластификатор в виде 5 %-ного раствора фенолформальдегидной смолы в этиловом спирте, сушили на воздухе и гранулировали.

Образцы прессовали при давлении 100 МПа, подвергали сушке при 120–140 °С на воздухе в течение 1 ч и спекали при температуре 1500, 1650 и 1800 °С в вакууме в присутствии кремния в виде измельченных кремниевых пластин.

Плотность образцов определяли гидростатическим методом или методом обмера и взвешивания, микротвердость – на микротвердомере «Micromet-II». Предел прочности при изгибе определяли на призматических образцах высотой 5 мм, шириной 10 мм, длиной 55 мм по международному стандарту ASTM C78 / C78M-18 на испытательной машине «Tinius Olsen H150K-U» со скоростью нагружения 2 мм/мин.

Структуру образцов исследовали на нетравленных шлифах, изготовленных на алмазных дисках с помощью микроскопа MEF-3 (Австрия).

Содержание свободного кремния определяли с помощью количественного металлографического анализа на шлифах [15].

Для получения изделий сложной формы из реакционноспеченной карбидокремниевой керамики, когда прессованием изготовить такие изделия не представляется возможным, разрабатывалась специальная технология соединения отдельных, простых по форме, реакционноспеченных элементов пайкой материалом специального состава при 1650 °С в вакууме.

Подобная технология была использована в [9]. Соединительная паста готовилась из смеси мелкозернистых порошков SiC и нефтяного кокса, увлажненной жидким бакелитом до жидкотекучего состояния. Для увеличения поверхностного натяжения расплава кремния при последующем силицирующем обжиге в состав пасты вводили добавки тугоплавких металлов хрома или никеля.

В настоящей работе сборную конструкцию получали из семи отдельных шестигранных элементов реакционной пайкой. Сложность реализации операции состоит в малой изученности на практике изготовления сложных изделий из карбидокремниевой керамики из отдельных элементов методом пайки, отсутствием отработанных составов припоя и способов их нанесения на подлежащие пайке поверхности керамических изделий, а также недостаточной смачиваемости карбида кремния расплавом кремния. Краевой угол смачивания в системе Si–SiC составляет 36° , а это приводит к наличию высокой остаточной пористости в структуре паяного шва и, как следствие, его низкой прочности.

Пайку проводили в вакууме при температуре 1500°C в течение 1 ч.

Для пайки использовали следующие составы припоев:

1 – смесь порошков карбида кремния зернистостью 10 мкм (80 мас. %), дисилицида молибдена (8 мас. %), технического углерода (12 мас. %);

2 – смесь порошков карбида кремния зернистостью 10 мкм (70 мас. %), дисилицида молибдена (7 мас. %), технического углерода (10 мас. %), кремния (13 мас. %);

3 – смесь порошков карбида кремния зернистостью 7 мкм (80 мас. %), дисилицида молибдена (8 мас. %), технического углерода (12 мас. %);

4 – смесь порошков карбида кремния зернистостью 10 мкм (73 мас. %), дисилицида молибдена (7 мас. %), технического углерода (14 мас. %), бора аморфного (6 мас. %).

В качестве пластификатора применяли спиртовой раствор пульвербакелита.

Исследование пайки проводилось с использованием двух шестигранных элементов спаянных между собой по одной из граней. Шестигранные элементы облегченной формы (рис. 1) имели плотность $2,7\text{ г/см}^3$ и общую пористость 20–25 %, что достигалось предварительным реакционным спеканием при температуре 1450°C . Наличие свободного кремния в реакционноспеченной карбидокремниевой керамике и пористости позволяет проводить реакционную пайку с одновременной допропиткой карбидокремниевой основы.

Для определения прочности паяного шва проводили испытания разрушения спаяной конструкции методом трехточечного изгиба на универсальной разрывной машине «Tinius Olsen H150KU». Прочность паяного шва оценивали по усилию разрушения.

Результаты и их обсуждение. Исследование удельной поверхности порошка карбида кремния показало, что порошок дисперсностью 7 мкм имеет удельную поверхность $2,8\text{ м}^2/\text{г}$, 28 мкм – $2,1\text{ м}^2/\text{г}$, 40 мкм – $1,5\text{ м}^2/\text{г}$, а шихта из смеси этих порошков и технического углерода – $11,6\text{ м}^2/\text{г}$.

Дисперсность порошков оказывает влияние на плотность прессовок из карбидокремниевой шихты (рис. 1). Максимальной плотностью обладают образцы из смеси порошков различной дисперсности. Уменьшение размера частиц карбида кремния также приводит к некоторому увеличению плотности прессовок.

Свойства карбидокремниевой керамики зависят как от дисперсности карбида кремния, так и от температуры реакционного спекания. Повышение температуры спекания до 1650°C привело к повышению прочности до 340 МПа (рис. 2, а), а спекание при 1800°C – к снижению прочности.

Повышение прочности при спекании при температуре 1650°C объясняется снижением свободного кремния (рис. 2, б) и увеличением содержания вторичного карбида кремния (рис. 3, б). Снижение прочности карбидокремниевой керамики, спеченной при температуре 1800°C , связано с ростом размера карбидных зерен (рис. 3, с).

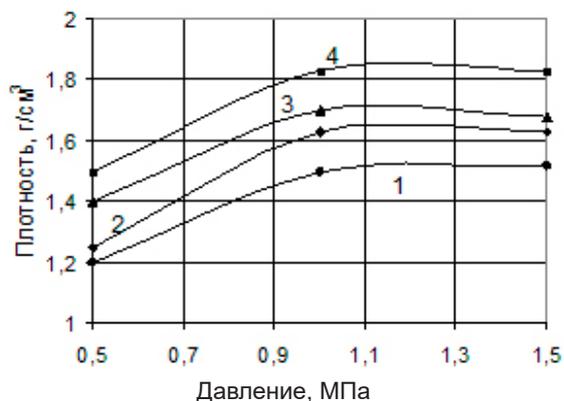


Рис. 1. Влияние давления прессования на плотность образцов из карбида кремния: 1 – 40 мкм, 2 – 28 мкм, 3 – 7 мкм, 4 – смесь порошков

Fig. 1. The effect of pressing pressure on the density of silicon carbide samples: 1 – 40 μm, 2 – 28 μm, 3 – 7 μm, 4 – a mixture of powders

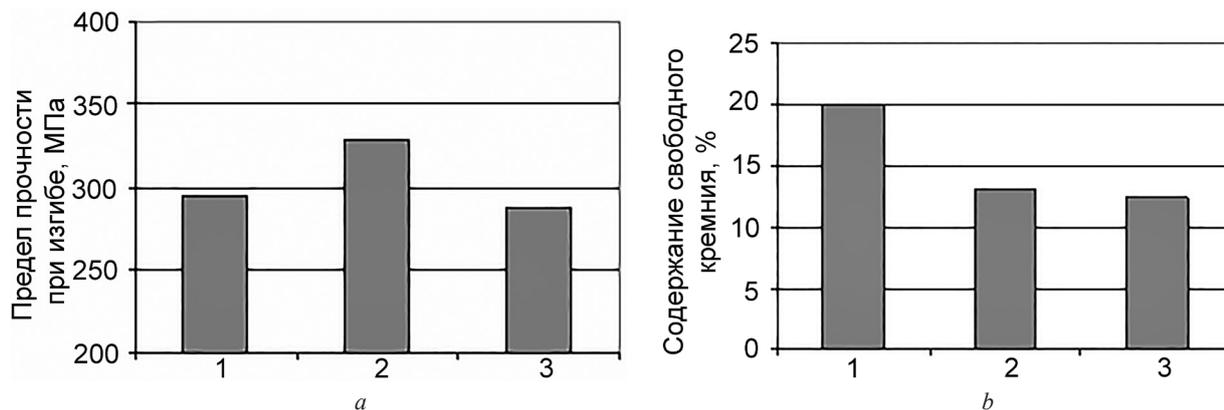


Рис. 2. Влияние температуры реакционного спекания на прочность (а) и содержание свободного кремния (б) в карбидокремниевой керамике, полученной из смеси порошков карбида кремния различной дисперсности: 1 – 1500 °С, 2 – 1650 °С, 3 – 1800 °С

Fig. 2. Influence of the temperature of reaction sintering on the strength (a) and on the content of free silicon (b) in silicon carbide ceramics obtained from a mixture of silicon carbide powders of different dispersion: 1 – 1500 °C, 2 – 1650 °C, 3 – 1800 °C

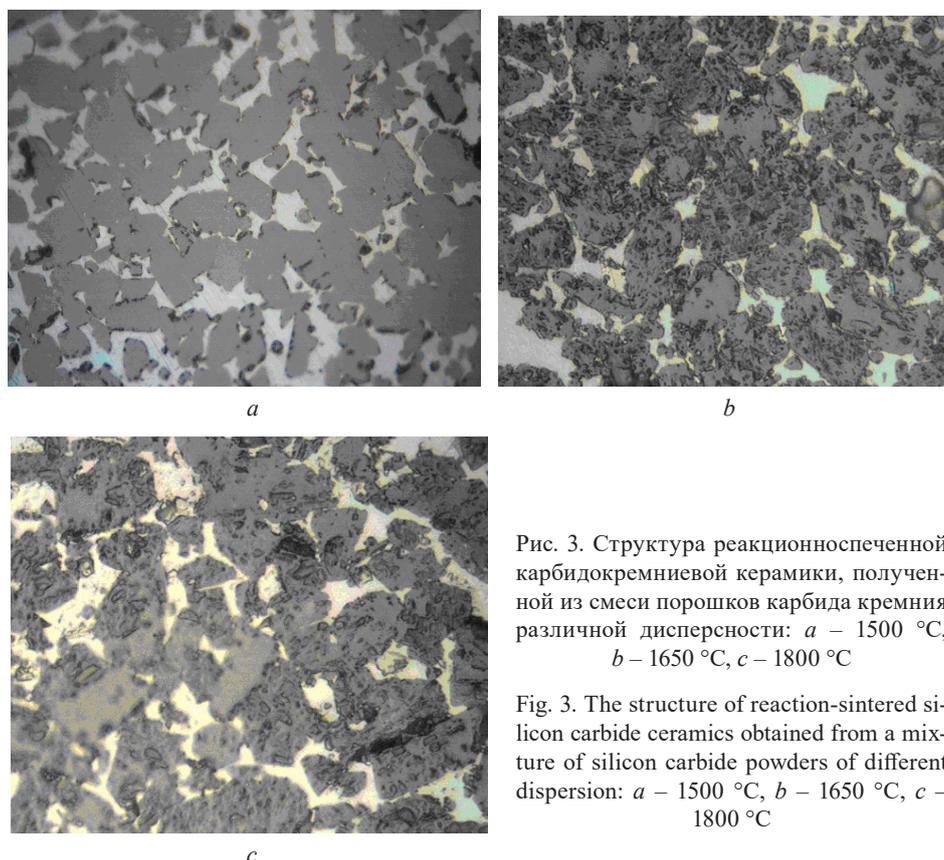


Рис. 3. Структура реакционноспекенной карбидокремниевой керамики, полученной из смеси порошков карбида кремния различной дисперсности: а – 1500 °С, б – 1650 °С, с – 1800 °С

Fig. 3. The structure of reaction-sintered silicon carbide ceramics obtained from a mixture of silicon carbide powders of different dispersion: a – 1500 °C, b – 1650 °C, c – 1800 °C

Исследование влияния режимов пайки шестигранных элементов на прочность паяного шва показало (таблица), что положительное влияние на прочность паяного шва оказывает введение в состав припоя карбида кремния дисперсностью 7 мкм и бора аморфного. В этом случае разрушение происходит не по шву, а по основе материала. Повышение плотности с 2,7 до 2,95 г/см³ приводит к незначительному снижению усилия разрушения, но и в этом случае разрушение происходит по телу спаиваемых образцов, а не паяному шву. Это свидетельствует о высокой адгезионной прочности керамики на границе «шов–основа», что крайне важно для составной керамической подложки зеркала, полученной с применением пайки.

Влияние состава припоя и режима пайки на усилие разрушения при трехточечном изгибе

Influence of the composition of the solder and the soldering mode on the fracture force at three-point bending

Плотность спаиваемых шестигранников, г/см ³ Density of soldered hexagons, g/cm ³	Номер припоя Solder number	Усилие (Н), характер разрушения Force (N), nature of destruction
2,7	1	150, разрушение по шву
2,7	2	30, разрушение по шву
2,7	3	195, разрушение по материалу
2,7	4	260, разрушение по материалу
2,95	4	256, разрушение по материалу

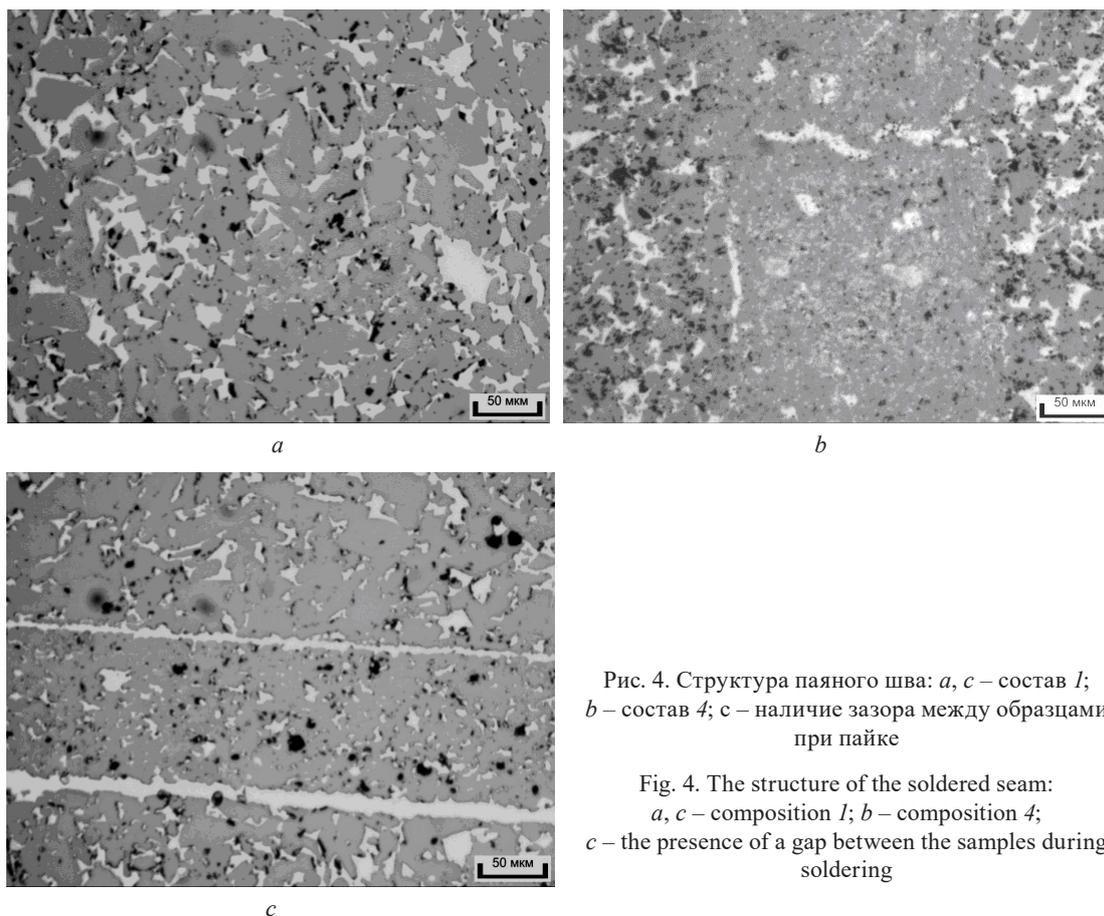


Рис. 4. Структура паяного шва: *a, c* – состав 1; *b* – состав 4; *c* – наличие зазора между образцами при пайке

Fig. 4. The structure of the soldered seam: *a, c* – composition 1; *b* – composition 4; *c* – the presence of a gap between the samples during soldering

Исследование структуры паяного шва подтвердило диффузионную связь шва с основой материала (рис. 4). Структура паяного шва зависит от состава припоя, структура шва первого–третьего составов практически не отличается от состава основы (рис. 4, *a*), четвертого – более мелкодисперсная и характерна меньшим содержанием свободного кремния (рис. 4, *b*).

В случае наличия зазора между спаиваемыми образцами в процессе пайки, на границе паяного шва имеет место прослойка свободного кремния (рис. 4, *c*). Уменьшение толщины зазора, по-видимому, позволит существенно увеличить прочность паяных соединений.

Заключение. Исследован процесс получения сложнопрофильных элементов подложки зеркал оптических телескопов из реакционоспеченной карбидокремниевой керамики. Установлено, что дисперсность порошков карбида кремния оказывает влияние на плотность прессовок, максимальной плотностью обладают образцы из смеси порошков дисперсностью 7, 28, 40 мкм в определенном соотношении. Прочность карбидокремниевой керамики также зависит от дисперсности порошка карбида кремния и от температуры реакционного спекания. Повышение температуры спекания с 1500 до 1650 °С приводит к увеличению прочности на 60 МПа, а до 1800 °С – снижению прочности на 40 МПа. Повышение прочности объясняется снижением

содержания свободного кремния и увеличением содержания вторичного карбида кремния, снижение прочности – ростом размера карбидных зерен.

Исследование влияния режимов пайки шестигранных элементов для получения сложнопрофильного элемента подложки зеркала оптического телескопа на прочность паяного шва показало, что положительное влияние на прочность паяного шва оказывает введение в состав припоя на основе карбида кремния порошка карбида кремния дисперсностью 7 мкм и бора аморфного в количестве 6 %. Проведенные испытания паяных образцов при трехточечном изгибе выявили, что разрушение происходит по телу спаиваемых образцов, а не паяному шву. Структура паяного шва зависит от состава припоя и зазора между паяемыми образцами.

Список использованных источников

1. Житнюк, С. В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники / С. В. Житнюк // Тр. ВИАМ. – 2018. – № 8 (68). – С. 81–88. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88>
2. Кондратюк, А. А. Исследование влияния количества наполнителя на механические характеристики композиционных полимеров / А. А. Кондратюк, С. В. Матренин, О. Ю. Недосекова // Изв. вузов. Физика. – 2014. – Т. 57, № 9/3. – С. 98–102.
3. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы / Е. Н. Каблов [и др.] // Рос. хим. журн. – 2010. – Т. 54, № 1. – С. 20–24.
4. Мэттьюз, Ф. Композиционные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. – М., 2004. – 408 с.
5. Перспективные конструкционные материалы космических телескопических систем / С. В. Алтухов [и др.] // Сб. трудов III конференции «Будущее оптики». – СПб., 2015. – С. 10–11.
6. Химич, Ю. П. Оптическое формообразование крупногабаритного асферического зеркала из карбида кремния / Ю. П. Химич, Г. В. Евтеев, Д. Б. Никитин // Опт. журн. – 2007. – Т. 74, № 2. – С. 70–72.
7. Савицкий, А. М. Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов / А. М. Савицкий, И. М. Соколов // Опт. журн. – 2009. – Т. 76, № 10. – С. 94–98.
8. Moore, T. J. Feasibility study of the welding of SiC / T. J. Moore // J. Am. Ceram. Soc. – 1985. – Vol. 68, N 6. – P. 151–153. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb15224.x>
9. Балкевич, В. Л. Техническая керамика / В. Л. Балкевич. – М., 1984. – 256 с.
10. Абызов, А. М. Исследования в области создания высококачественной алюмооксидной керамики (обзор). Часть 1. Спекание с добавками, реакционное спекание, получение армированных композитов / А. М. Азызов // Стекло и керамика. – 2018. – № 8. – С. 8–19.
11. Шевченко, В. Я. Техническая керамика / В. Я. Шевченко, С. М. Баринов. – М., 1993. – 185 с.
12. Abraham, T. Powder Market Update: Nanoceramic Applications Emerge / T. Abraham // Am. Cer. Soc. Bull. – 2004. – Vol. 83, N 8. – P. 23.
13. Житнюк, С. В. Влияние спекающих добавок на свойства керамики на основе карбида кремния (обзор) / С. В. Житнюк // Тр. ВИАМ. – 2019. – № 3(75). – С. 79–86. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-3-79-86>
14. Состояние и перспективы работ по карбидокремниевой керамике в Институте порошковой металлургии / А. Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия в Беларуси: вызовы времени: сб. науч. тр. ГНПО порошковой металлургии НАН Беларуси. – Минск, 2017. – С. 193–200.
15. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография / С. А. Салтыков. – М., 1976. – 271 с.

References

1. Zhitnyuk S. V. Oxygen-free ceramic materials for the space technics. *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2018, no. 8(68), pp. 81–88 (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88>
2. Kondratuk A. A., Matrenin S. V., Nedosekova O. Yu. Research of influence of the amount of filler on the mechanical characteristics of composite polymers. *Izvestiya vuzov. Fizika* [Russian Physics Journal], 2014, vol. 57, no. 9/3, pp. 98–102 (in Russian).
3. Kablov E. N., Grashchenkov D. V., Isaeva N. V., Solntsev S. S. Promising high-temperature ceramic composite materials. *Russian Chemical Journal*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 20–24 (in Russian).
4. Matthews F. L., Rawlings R. D. *Composite Materials. Engineering and Science*. Woodhead Publ., 1999. 408 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-17714-8>
5. Altukhov S. V., Tulev V. S., Teterina I. V., Fleischer A. G. Perspective structural materials of space telescopic systems. *Sbornik трудов III konferentsii «Budushchee optiki»* [Proceedings of the III Conference “The Future of Optics”]. Saint Petersburg, 2015, pp. 10–11 (in Russian).
6. Khimich Yu. P., Evteev G. V., Nikitin D. B. Optical shaping of a large aspheric mirror composed of silicon carbide. *Journal of Optical Technology*, 2007, vol. 74, no. 2, pp. 133–134. <https://doi.org/10.1364/jot.74.000133>
7. Savitskii A. M., Sokolov I. M. Questions of constructing lightened primary mirrors of space telescopes. *Journal of Optical Technology*, 2009, vol. 76, no. 10, pp. 666–669. <https://doi.org/10.1364/jot.76.000666>

8. Moore T. J. Feasibility study of the welding of SiC. *Journal of the American Ceramic Society*, 1985, vol. 68, no. 6, pp. 151–153. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1985.tb15224.x>
9. Balkevich V. L. *Technical ceramics*. Moscow, 1984. 256 p. (in Russian).
10. Abyzov A. M. Studies in high-performance alumina ceramics development (review). Part 1. Sintering with additives, reactive sintering, reinforced composites production. *Steklo i keramika* [Glass and Ceramics], 2018, no. 8, pp. 8–19 (in Russian).
11. Shevchenko V. Ya., Barinov S. M. *Technical ceramics*. Moscow, 1993. 185 p. (in Russian).
12. Abraham T. Powder Market Update: Nanoceramic Applications Emerge. *American Ceramics Society Bulletin*, 2004, vol. 83, no. 8, pp. 23.
13. Zhitnyuk S. V. Effect of sintering additives on the properties of silicon carbide-based ceramics (review). *Trudy VIAM = Proceedings of VIAM*, 2019, no. 3 (75), pp. 79–86 (in Russian). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-3-79-86>
14. Ilyushchenko A. F., Mironovich G. A., Osipov V. A., Zvonarev E. V. State and prospects of work on silicon carbide ceramics at the Institute of Powder Metallurgy Powder metallurgy in Belarus: challenges of the time. *Poroshkovaya metallurgiya v Belarusi: vyzovy vremeni: sbornik nauchnykh trudov GNPO poroshkovoii metallurgii NAN Belarusi* [Powder metallurgy in Belarus: challenges of the time: collection of scientific papers GNPO Powder Metallurgy of the NAS of Belarus]. Minsk, 2017, pp. 193–200 (in Russian).
15. Saltykov S. A. *Stereometric metallography*. Moscow, 1976. 271 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент, д-р техн. наук, профессор, директор. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mailbelpak.by.

Дьячкова Лариса Николаевна – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией. Институт порошковой металлургии им. О. В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dyachkova@tut.by.

Осипов Владимир Анатольевич – ст. науч. сотрудник. Институт порошковой металлургии НАН Беларуси (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Alexil@mailbelpak.by.

Information about the authors

Ilyushchenko Alexandr Ph. – Corresponding Member, D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mailbelpak.by.

Dyachkova Larisa N. – D. Sc. (Engineering), Associate professor, Head of the Laboratory. Powder Metallurgy Institute named after O. V. Roman (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyachkova@tut.by.

Osipov Vladimir A. – Senior researcher. Powder Metallurgy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Alexil@mailbelpak.by.