

направляемых на деятельность Института, составляет примерно 30 на 70. То есть на каждый рубль, вложенный государством, мы даем 2–3 рубля «живых» контрактных денег.

Что касается новых программ, то сейчас обсуждается «Ресурс-СГ», она может начаться в конце следующего года. Для нас предусматриваются задания по материалам, датчикам, созданию роботизированных систем для освоения космоса. Есть интересная идея робота-строителя, который будет возводить в невесомости, как паук паутину, объекты типа решетки, арматуры, буквально вытаскивая из себя материал и передвигаясь по нему дальше по мере его затвердевания. Имеется проект создания роботизированной универсальной платформы, которая сможет ходить и по Земле, и по поверхности Луны, Венеры или других планет, будет снабжаться разными видами аппаратуры под различные задачи. Для нее предусмотрены особые электродвигатели, которые будут работать от солнечных панелей, с очень хорошими характеристиками. За них будет отвечать наш Центр электромеханических и гибридных силовых установок мобильных машин. Он известен как один из участников создания белорусского электромобиля, а теперь будет работать над аналогом для космоса. Важно, что такие проекты привлекают молодежь. Надо создавать условия, выстраивать систему координат для наиболее продвинутых ребят. Ведь наука – это профессиональное цеховое ремесло, одни люди учатся у других только в работе и общении. Ученый должен постоянно выполнять сложные работы, совершенствовать подходы. У нас есть школа, есть коллектив, компетенции, которые мы стараемся удержать, чтобы быть интегрированными в мировую среду. Это удерживание не очень простое, но мы на это мотивированы. ■



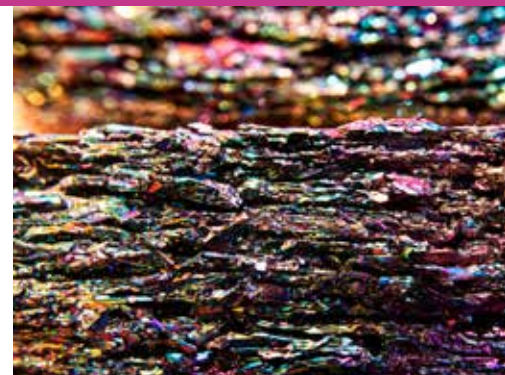
**К** арбид кремния – удивительный материал, образованный двумя самыми распространенными элементами земной коры – углеродом и кремнием, на основе которых зиждутся материальные основы жизни и которые имеют широкое практическое применение, в частности являются базовым строительным кирпичиком современной электроники. Его предсказали и пытались получать уже в середине XIX в. В 1891 г. Эдвард Ачесон разработал способ получения кристаллического SiC в промышленном масштабе, и этот метод используется до сих пор. Первые исследования материала, который долгое время считался вторым по твердости в природе, выполнил Анри Муассан, обнаруживший его микроскопические количества в образцах из метеоритного кратера возле Каньона Смерти в Аризоне. В 1905 г. этот минерал в честь его открывателя был назван муассанитом и, возможно, с легкой руки ученого получился почти универсальным по спектру своих приложений и не менее ценным, чем алмаз. Интересно отметить, что муассанит в настоящее время распространен в ювелирной промышленности как один из лучших синтетических заменителей бриллиантов (рис. 1).

Когда мы ведем речь о карбиде кремния, необходимо различать монокристаллическую его разновидность, применяющуюся преимущественно в электронике и ювелирном деле, и поликристаллическую, выступающую основой для получения полноразмерных керамических изделий, в состав которых дополнительно могут входить кремний, углерод и другие соединения.

Универсальность материала привлекла внимание сотрудников Института тепло- и массообмена и стала важным мотивом для исследований в области его синтеза, повышения комплекса физико-механических свойств керамики

# КАРБИД КРЕМНИЯ:

## ОТ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЗАДАЧ НА ЗЕМЛЕ ДО ЗВЕЗДНОГО НЕБА НАД ГОЛОВОЙ



**Павел Гринчук,**  
заведующий  
отделением те-  
плофизики ИТМО  
имени А.В. Лыко-  
ва, член-корре-  
спондент

**Андрей Акулич,**  
научный  
сотрудник  
лаборатории  
радиационно-  
конвективного  
теплообмена  
ИТМО  
имени А.В. Лыкова

**Михаил Степкин,**  
инженер-технолог  
лаборатории  
радиационно-  
конвективного  
теплообмена  
ИТМО  
имени А.В. Лыкова

**Михаил Кияшко,**  
научный  
сотрудник  
лаборатории  
радиационно-  
конвективного  
теплообмена  
ИТМО  
имени А.В. Лыкова

**Дмитрий Соловей,**  
старший научный  
сотрудник  
лаборатории  
радиационно-  
конвективного  
теплообмена ИТМО  
имени А.В. Лыкова,  
кандидат  
технических наук

на его основе. И хотя карбид кремния известен уже более века, по мнению специалистов, крайне высокая твердость и плохая механическая обрабатываемость сдерживают его массовое применение. Значительным достижением ИТМО стала разработка уникальной многостадийной технологии, которая позволяет быстро и точно изготавливать изделия сложной геометрии из этого сверхтвердого материала.

Чем же хорош карбид кремния? Прежде всего уникальным сочетанием физико-химических свойств. Керамика на его основе обладает высокой механической прочностью, износостойкостью, твердостью (что делает ее важным абразивным материалом), а также стойкостью к термоударам, обусловленной низким коэффициентом термического расширения и большим коэффициентом теплопроводности, высокой температурой плавления (2830 °С, самый легкий материал в диапазоне 3000 °С и выше, за исключением графита), значительным сопротивлением окислению (жаростойкостью) до 1600 °С, а также инертностью к химическому и радиационному воздействию. В то же время монокристаллический карбид кремния – отличный полупроводник. Именно на кристаллах SiC были впервые обнаружены два важнейших для полупроводниковой электроники явления – электролюминесценция и выпрямительные свойства p-n-структур [2, 3]. Сегодня на карбиде

кремния базируется значительная часть силовой электроники. В США созданы рабочие прототипы электронных компонентов на основе SiC, которые работоспособны длительное время при температуре 500 °С и давлении около 100 атм., что соответствует условиям на поверхности Венеры [4].

Остановимся кратко на перечислении сфер применения карбида кремния. Высокая твердость материала делает его великолепным абразивом [5]. В паре с алмазом этот минерал трудится в буровом инструменте для добычи нефти и газа [6]. Сочетание прочности, легкости и твердости делают его перспективным для бронезащиты живой силы и техники [7]. Прототипы таких

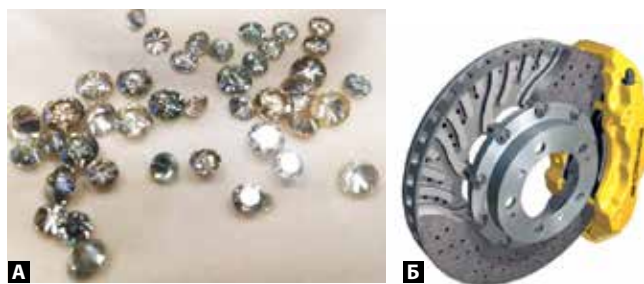


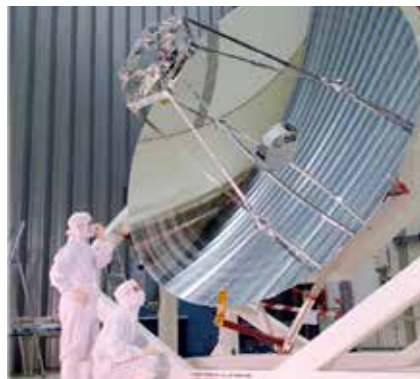
Рис. 1. Сферы применения карбида кремния:  
А) ограненные кристаллы муассанита (монокристаллического карбида кремния) ювелирного качества;  
Б) керамические тормоза C/SiC для Porsche 911 GT2 [1]

Рис. 2. Прототипы бронезащиты из карбида кремния, созданные в ИТМО имени А.В. Лыкова



пластин были созданы и в ИТМО (рис. 2). Высокая температура плавления в сочетании со стойкостью к термоударам сделали изделия из карбида кремния очень востребованными в промышленности и высокотехнологичных производствах. Из этого материала изготавливаются насадки для газопламенных горелок [8]; пористые фильтры для фильтрации жидкой стали и других металлов; пористые матрицы для нанесения катализаторов; высокотемпературные теплообменники, в том числе микроканальные; тигли для плавки цветных металлов; высокотемпературные нагреватели для электрических печей сопротивления. Прорабатываются вопросы использования конструктивных элементов из карбидокремниевой керамики для тепловой защиты спускаемых космических аппаратов [9]. Из карбида кремния выпускаются огнеупоры для футеровки печей, утилизирующих радиоактивные отходы, и установок-электролизеров для получения алюминия. Сочетание указанных свойств с высокой радиационной стойкостью делает перспективным применение карбида кремния в ядерной энергетике – для производства оболочек ТВЭЛ (в рамках концепции толерантного топлива), а также в качестве защитного покрытия микротрещин для высокотемпературных газоохлаждаемых ядерных реакторов. К тому же в сфере длительного захоронения ядерных отходов на смену пеналам из толстостенной нержавеющей стали, кото-

Рис. 3. Зеркало из карбидокремниевой керамики диаметром 3,5 м, созданное для миссии Гершель Европейского космического агентства (2009 г.)



рые относительно быстро теряют свою герметичность, приходят аналоги из карбида кремния.

Отдельно следует упомянуть выдерживающие экстремальные нагрузки торможения пары трения из этого материала, которые почти 20 лет назад появились на серийных суперкарах и начинают использоваться в авиации [1]. Предпринимались попытки создать керамические автомобильные турбины из карбида кремния [10], однако в силу высокой сложности изготовления их производство не стало серийным. Здесь же стоит упомянуть и подшипники, которые в силу высоких нагрузок и агрессивных условий эксплуатации также делаются из карбида кремния.

Существует ряд приложений, в которых от карбида кремния требуются не только brutальные способности, позволяющие пройти через огонь и воду, а более тонкие качества. Речь идет о зеркалах. Так, разработчики космических и наземных телескопов стремятся к увеличению диаметра главного большого зеркала. Ключевым моментом их создания выступает возможность уменьшения массы изделия при условии сохранения качества и формы поверхности. Традиционные материалы, такие как стекло и стеклокерамика, уже подошли к пределу эксплуатации в силу ряда причин [11]. Одним из новых материалов, наиболее подходящих для создания космической оптики, опять же является карбид кремния.

В 2009 г. Европейским космическим агентством была запущена миссия Гершель, телескоп для которой обладал самым совершенным на тот момент зеркалом из карбида кремния диаметром 3,5 м (рис. 3). Для охлаждения датчиков, работавших в инфракрасном диапазоне, на орбиту была выведена и большая емкость с жидким гелием. Проект был завершен через несколько лет, когда закончился гелий, но созданное зеркало осталось инженерным шедевром. Его удельную массу удалось уменьшить с  $200 \text{ кг/м}^2$  (космический телескоп Hubble, 1990) до  $27 \text{ кг/м}^2$  (миссия Herschel, 2009) при переходе от стеклокерамики к карбиду кремния, что важно для инструментов, выводимых в космос. Но технология изготовления зеркал такого уровня – коммерческая и технологическая тайна разработчиков, хранящаяся в строгом секрете. Ученым Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова удалось ее разгадать и создать информационные зеркала из карбида кремния диаметром до 200 мм (рис. 4 а, б, в), которые можно масштабировать на большие размеры.

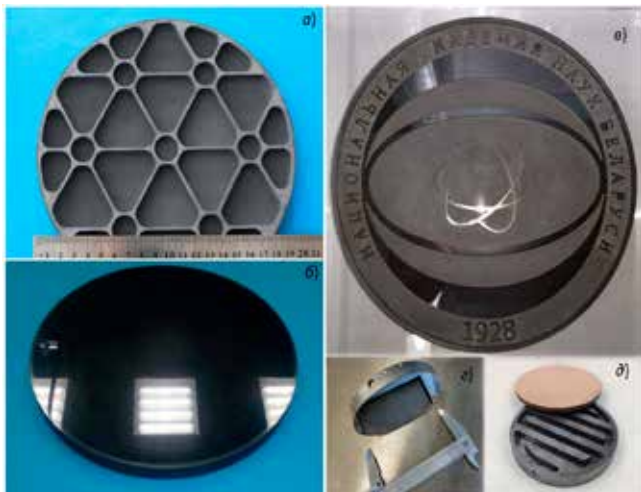


Рис. 4. Зеркала из карбида кремния, созданные в ИТМО: а, б – информационное зеркало для космической оптики диаметром 200 мм, удельной массой  $17 \text{ кг/м}^2$ , со структурой облегчения на тыльной стороне подложки; толщина ребер структуры облегчения составляет 1,8 мм; в – демонстрация возможностей тонкой обработки карбида кремния по разработанной технологии – памятный сувенир к юбилею Национальной академии наук Беларуси; г, д – прототип силового лазерного зеркала с каналами для водяного охлаждения

Еще одна наработка специалистов ИТМО – прототипы силовых зеркал из карбидокремниевой керамики (рис. 4 г, д) для работы с мощным лазерным излучением плотностью в десятки и даже сотни гигаватт на квадратный метр. Такую нагрузку способны выдержать только конструкции с внутренним жидкостным охлаждением. И опять самый перспективный материал в этой сфере – карбид кремния [12].

Полученная в ИТМО уникальная технология изготовления изделий сложной геометрии позволила существенно ускорить создание конкретных разработок [13, 14]. На рис. 5



Рис. 5. Образцы изделий сложной геометрии из карбидокремниевой керамики, изготовленные по технологии ИТМО

представлены их образцы – от конструктивных элементов микродвигателей и теплообменных аппаратов до тиглей. Технология позволяет создавать даже такие тонкие конструкции, как винтовое соединение из керамики.

Изыскания по данному материалу ведутся широким фронтом. Так, из керамоматричного композита карбид кремния – углерод был разработан экспериментальный образец суперконденсатора – накопителя электрической энергии. Это стало возможно благодаря формированию в материале наноструктурированного графеноподобного углерода. Были достигнуты достаточно высокие характеристики по удельной емкости электроэнергии, которую можно собирать в данном изделии.

Мультидисциплинарность и разноплановость задач, решаемых Институтом тепло- и массообмена, позволили изучить ряд нюансов получения карбида кремния и изделий на его основе. Этот материал богат как своими приложениями, так и многогранностью качеств, поэтому работы в данном направлении продолжаются. ■

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. W. Krenkel, F. Berndt. C/C–SiC composites for space applications and advanced friction systems // *Materials Science and Engineering*. 2005. Т. 412, № 1–2. С. 177–181.
2. А. А. Лебедев. Центры с глубокими уровнями в карбиде кремния (обзор) // *Физика и техника полупроводников*. 1999. Т. 33, №2. С. 129–155.
3. А. А. Лебедев и др. Электроника на основе SiC // УФН. 2019. Т. 189, №8. С. 803–848.
4. P.G. Neudeck, et al. Prolonged silicon carbide integrated circuit operation in Venus surface atmospheric conditions // *AIP Advances*. 2016. Т. 6, №12. С. 125119.
5. А. Н. Краснов, А. М. Цывьян. Абразивный инструмент из микрочастиц карбида кремния на керамической связке // *Стекло и керамика*. 2007. №8. С. 33–35.
6. N.A. Bondarenko, Osipov A.S., Mechnik V.A., Petrusha I.A., Gazha G.P. (2007). Drilling tool equipped with heat-resistant cutting inserts // *Prospecting and Development of Oil and Gas Fields*. 2007. №4(25). P. 14–18
7. И. Ю. Келина и др. Ударопрочная керамика на основе карбида кремния // *Огнеупоры и техническая керамика*. 2010. №1–2. С. 17–24.
8. Sanders W.A., Johnston J.R. High Velocity Burner Rig Oxidation and Thermal Fatigue Behavior of Si3N4- and SiC Base Ceramics to 1370 Deg C. 1978. №NASA-TM-79040.
9. Grinchuk P.S., Tretyak M.S., Chuprasov V.V. Thermal protection material on the base of silicon-carbide ceramics // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2020. Т. 709, №4. С. 044112.
10. Н. Кауа. The application of ceramic-matrix composites to the automotive ceramic gas turbine // *Composites science and technology*. 1999. Т. 59, №6. С. 861–872.
11. П. С. Гринчук и др. Высокотемпературная карбидокремниевая керамика для крупногабаритной космической оптики // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2019. Т. 63, №2. С. 223–234.
12. В. Ю. Хомич, В. А. Шмаков. Крупногабаритные зеркала в силовой оптике // *Успехи физических наук*. 2019. Т. 189, №3. С. 263–270.
13. P.S. Grinchuk et al. Advanced technology for fabrication of reaction-bonded SiC with controlled composition and properties // *Journal of the European Ceramic Society*. 2021. Т. 41, №12. С. 5813–5824.
14. P.S. Grinchuk et al. High productive machining of C/SiC preceramics // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2021. V. 18, №6. С. 2293–2305.