

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ, ПУЧКОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ И ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

УДК 544.032.65

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ ИЗ САМОСВЯЗАННОГО SiC С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2023 г. С. А. Лысенко^а, *, Н. Н. Юрышев^а, Н. П. Вагин^а

^аФизический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, 119991 Россия

*E-mail: s.lyssenko@mail.ru

Поступила в редакцию 11.07.2022 г.

После доработки 30.07.2022 г.

Принята к публикации 31.07.2022 г.

Исследована возможность получения изделий из самосвязанного карбида кремния с помощью лазерного излучения при отсутствии какой-либо дополнительной пропитки углеродсодержащими материалами после силицирования. Установлено, что благодаря управлению тепловым нагревом в каждой точке воздействия возможно последовательно за один цикл провести все необходимые этапы стандартной процедуры реакционного спекания и изменить традиционный подход формирования подобных изделий, использующий высокотемпературные нагревательные печи. Качество спекания определялось после вытравливания непрореагировавшего кремния несколькими лабораторными методами. Основное внимание уделялось исследованию мостиков между частицами из вторичного SiC как внутри слоев, так и на их границах, поскольку именно они определяют прочностные показатели создаваемого материала и позволяют соединять спекающиеся области между собой. После отработки всех необходимых этапов спекания у однослойных образцов была осуществлена попытка последовательного наращивания нескольких слоев, а также имитация процесса сварки двух заранее спеченных образцов.

Ключевые слова: карбид кремния, самосвязанный, реакционноспеченный, SiC, SiSiC, PKK, лазерный синтез, воздействие лазерного излучения на вещество, последовательное наращивание слоев, лазерная сварка

DOI: 10.56304/S2079562922050281

ВВЕДЕНИЕ

Карбид кремния или карборунд (SiC) – сложное химическое соединение, состоящее из углерода и кремния [1]. На данный момент известно более 200 различных полиморфных модификаций данного вещества [2]. Керамика на основе карбида кремния и его композитов обладает несколькими уникальными характеристиками, главными из которых для данного исследования являются: механическая прочность, химическая инертность и устойчивость к радиационным воздействиям при нормальных и высоких температурах [3], но данные показатели сильно зависят от способов получения SiC.

В природе SiC встречается очень редко. Но уже более века назад его научились получать искусственно. Основным способом его получения является химические реакции синтеза, реализуемые разными способами и проходящие при различных физических условиях [4]. Поэтому свойства каждого конкретного полученного карбида кремния могут значительно отличаться. Они зависят не только от состава используемых для синтеза компонентов и конкретной технологии получения (кри-

сталлический, поликристаллический, полученный методом горячего прессования, рекристаллизованный, самосвязанный, жидкофазный и т.д. [5–8]), но и от количества и разновидностей полиморфных модификаций, их концентрации в конечном изделии, а также присутствия сторонних примесей [9, 10].

Благодаря своим уникальным свойствам, керамика на основе SiC может быть широко востребована в машиностроении, атомной энергетике, на предприятиях оборонной и химической промышленности [11]. Но использование изделий из карбида кремния пока все еще ограничено. Главной причиной этого является отсутствие процесса плавления у карбида кремния, т.к. он не плавится и, соответственно, не имеет жидкой фазы [12]. Данное свойство потребовало поиска другого решения, а именно, получение карбида кремния методом химического синтеза из материалов, содержащих кремний и углерод. Но найденные способы промышленного получения SiC, например, метод Ачесона [13], не подходят для изготовления изделий заданной геометрической формы и требуют последующей достаточно трудоемкой и дорогостоящей механической обработки [14].

Поэтому в мире уже несколько десятилетий налажено промышленное производство недорогого аналога — самосвязанного или реакционноспеченного карбида кремния (ПКК, SiSiC), который, хоть и уступает по своим техническим характеристикам кристаллическому или поликристаллическому SiC, но, тем не менее, вполне подходит для многих промышленных применений. Дополнительно это позволяет получать продукты заданной формы гораздо дешевле, используя процедуру предварительного формования детали перед ее спеканием. Однако получение любой разновидности карбида кремния связано с обеспечением высоких температур, создающихся в специализированных печах различного типа, внутри которых необходимо поддерживать равномерное распределение температурного поля, что весьма непросто организовать для изделий протяженного размера. Часто для получения SiC максимальной плотности используется достаточно высокое внешнее давление, исчисляемое в десятки атмосфер и более [15].

В своих исследованиях мы попробовали получить необходимые для осуществления реакции синтеза температуры без использования нагревательных печей, а только с помощью лазерного нагрева и при отсутствии дополнительного внешнего давления. Возможным применением результатов проводимых исследований могут быть работы по заделке трещин на трубах из карбида кремния в химической промышленности и других вредных производствах, а также потенциально для герметизации пеналов, создающихся для хранения отработанного ядерного топлива и разрабатываемых из SiC материалов корпусов ТВЭЛов [16]. Для подобных изделий большой проблемой является наличие различных веществ внутри герметизируемых емкостей, которые не могут быть подвержены нагреву до температуры порядка 2000°C в течение продолжительного времени. Именно такие температуры реализуются в печах при осуществлении реакции синтеза деталей из карбида кремния или в местах их стыковки друг с другом. К тому же лазерное воздействие осуществляется точно, обрабатываемая область достаточно ограничена и может быть уменьшена до микронных размеров, что приводит к гораздо меньшему разогреву остальных частей детали, а время воздействия ограничивается, как правило, секундами.

Важным фактором для применения материалов из карбида кремния в химической отрасли или атомной промышленности является отсутствие сторонних примесей, которые изначально могут присутствовать в компонентах шихты, например, для уменьшения температуры протекания процесса или его ускорения. Примеси могут также образоваться и при нарушении технологии протекания процесса синтеза SiC из-за взаимодействия компонентов формируемой детали с неинертной газовой средой, стенками камеры или поддержива-

ющими обрабатываемый образец конструктивными элементами, что может быть вполне вероятно при температурах около 2000°C и даже более.

Особенностью синтеза самосвязанного карбида кремния является присутствие в конечном продукте свободных Si и C, не полностью прореагировавших в процессе реакции синтеза. Наличие свободного кремния (Si) ухудшает температурные свойства SiC, а присутствие свободного углерода (C) уменьшает прочностные показатели. Поэтому производители данной керамики стараются максимально уменьшать концентрации свободных Si и C, а также пытаются образовать протяженный связанный каркас из первичного и вторичного карбида кремния, обеспечивающего механическую прочность. Поскольку в процессе реакционного спекания SiSiC получается материал без сторонних добавок, только SiC и несвязанные Si и C, концентрацию которых потенциально можно уменьшить, а усадка при таком способе спекания проявляется в минимальной степени, и не требуется высокое внешнее давление, то выбор был сделан именно на нем.

С точки зрения технологичности метод реакционного спекания является весьма непростым при его реализации из-за наличия нескольких стадий при его осуществлении [17]. Суть процесса реакционного спекания состоит в образовании вторичного SiC, который представляет собой связку для частиц исходного или первичного карбида кремния, являющегося компонентом шихты вместе с углеродом и специальным связующим. При этом производится несколько основных этапов:

Приготовление шихты:

- Очистление и дозирование порошков заданного гранулометрического состава
- Перемешивание с временной технологической связкой

Отверждение или сушка

- Формование
- Сушка (полимеризация связки, удаление растворителя, например, для этилового спирта это температура не более 70–78°C)

Карбонизация

- Разогрев в инертной среде до разложения органических связующих на углерод, шлак и газы (ступенчатый нагрев от $T = 200$ до 400 и 900°C)

Силицирующий обжиг

- Пропитка парами и жидким кремнием через имеющиеся в заготовке поры (без использования примесей температура процесса $T = 2100^\circ\text{C}$)

Таким образом, три из четырех перечисленных стадий происходят при различной температуре. Все их достаточно легко обеспечить, управляя мощностью лазерного излучения и меняя площадь пятна в месте воздействия.



Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Применение лазерного нагрева для получения SiSiC добавляет к уже перечисленным проблемам спекания самого самосвязанного карбида кремния еще и трудности использования в этом процессе лазерного излучения. Значительное влияние вносят: сильное отражение лазерного луча расплавом кремния, рассеивание луча на парах Si и высокая теплопроводность холодного SiSiC, если линейные размеры обрабатываемого образца значительно превышают диаметр лазерного пятна. Тем не менее, применение лазерного излучения для спекания самосвязанного карбида кремния может оказаться достаточно перспективным подходом к решению проблемы спекания подготовленной шихты из этого материала, так как возможно управлять температурным режимом в месте воздействия, а для получения SiSiC для каждой стадии процесса требуется своя температура. Дополнительно лазерное излучение позволяет организовать различные режимы теплового нагрева (непрерывное, импульсное, а также менять фокусировку лазерного пятна) для установления оптимальной глубины, скорости или продолжительности нагрева.

Таким образом, для проведения работ по спеканию самосвязанного карбида кремния определены следующие задачи:

- Воспроизведение всех необходимых технологических процессов, требующих своей температуры, по отдельности с помощью лазерного нагрева.
- Отработка оптимальных температурных и временных режимов воздействия лазерного излучения на каждое используемое сочетание компо-

нентов шихты, для осуществления повторяемости процесса.

- Испытание различных сочетаний компонентов шихты для поиска оптимального и получения в конечных образцах хотя бы частичного прочностного каркаса из спекшихся частиц карбида кремния.
- Проведение серии лабораторных исследований качества спекаемых образцов.
- Переход от спекания однослойных образцов к наращиванию нескольких слоев методом реакционного спекания
- Соединение двух заранее полученных однослойных образцов через их стыковку с помощью спекания прослойки между ними, т.е. имитация процесса сварки

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для выполнения запланированных экспериментов была изготовлена специальная вакуумная камера и собран испытательный стенд с необходимым измерительным оборудованием (рис. 1).

Луч (4) волоконного лазера YLR-700-MM-CW ($\lambda = 1.07$ мкм) с регулируемой мощностью излучения до 700 Вт (1) с помощью оптической системы (2, 3, 13), позволяющей формировать лазерное пятно с площадью воздействия около 12 мм² через входное окно (6) направлялся на мишень, представляющую собой молибденовую кювету (11) с образцом из отвердевшей шихты, которые находились в герметичной камере (5). Предварительно внутри камеры создавался вакуум масляным насосом VALUE до значений 10^{-2} атм и затем на-

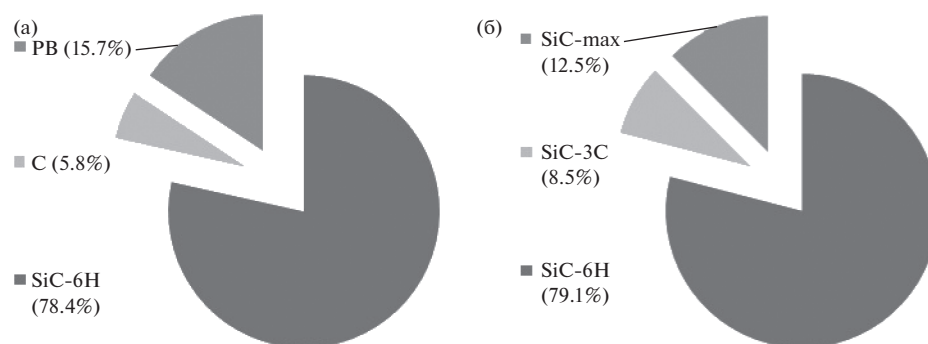


Рис. 2. (а) Вещественный состав компонентов шихты до перемешивания. (б) Анализ фазового состава образца после травления в смеси кислот.

пускался инертный газ аргон через специальные отверстия (7, 8) с давлением немного превышающим атмосферное. Кювета располагалась на нагревательной пластине (10) и подогревалась для удаления кислорода из используемых порошковых материалов. Наблюдение за ходом экспериментов и фиксации происходящих внутри камеры процессов осуществлялись с помощью оптических датчиков через смотровое окно (12).

Шихта для образцов, готовилась, следуя типовой процедуре получения карбида кремния реакционным способом [18]. Она состояла из смеси порошков карбида кремния с размером зерен 25–40 мкм и углерода с линейным размером частиц до 5 мкм, смешиваемых при различных соотношениях в течение нескольких часов на шаровой мельнице. Далее в шихту добавлялась технологическая связка в виде спиртового раствора пульвербакелита СФП-012А3. Затем шихта помещалась для формования и отверждения в небольшие формы, изготовленные из алюминиевой фольги.

В итоге получались заготовки диаметром 6 мм и толщиной 1.0–1.4 мм. Для ускорения процесса обычно применялся внешний подогрев от нагревательной пластины. Далее заготовки проходили процедуру карбонизации в среде аргона при нормальном давлении и нагревом с помощью лазера. При этом с выдержкой по 30 мин. температура поддерживалась на трех различных значениях: 200, 400, 900°C. Полученный таким образом карбонизированный образец помещался в кювету и обсыпался порошковым кремнием. Далее кювета помещалась в рабочую камеру, где создавалась среда из аргона, и происходило облучение мишени лазером.

Для удаления остатков свободного кремния из полученных образцов они помещались в смесь двух концентрированных кислот ($\text{HF} + \text{HNO}_3$, в соотношении 1 : 1) на несколько часов при комнатной температуре. Затем следовала процедура их промывки и сушки. Далее все полученные образцы измерялись, взвешивались и осматривались в оптическом микроскопе, а лучшие из них

отбирались для проведения различных исследований на лабораторном оборудовании.

После завершения серии успешных экспериментов по спеканию однослойных образцов некоторые из них были исследованы различными методами. Сначала провели структурный анализ на рентгеновском дифрактометре Panalytical X'Pert Pro MRD (Нидерланды). Ниже приведены диаграммы состава шихты (рис. 2а) и фазовый состав синтезированного лазером образца из данной шихты (рис. 2б).

Гексагональный политип SiC-6H – это первичный карбид кремния, C – углерод, ПБ – пульвербакелит, эти вещества входили в шихту изначально. SiC-3C – кубический политип карбида кремния, SiC-max – выявленные при исследовании политипы с большим периодом кристаллической решетки. Таким образом, это политипы вторичного карбида кремния, которые были синтезированы уже при лазерном воздействии. На диаграммах видно, что количество первичного гексагонального политипа SiC-6H в ходе спекания практически не изменилось, и отсутствие кремния, т.к. в шихту он не входил, а все полученные образцы перед исследованиями обязательно подвергались травлению смесью кислот для удаления не участвующих в реакции его остатков.

На рисунках, которые представлены ниже, изображены фотографии микроструктур излома и поверхности однослойных образцов, синтезированных лазером. Снимки получены на сканирующем электронном микроскопе JSM-7001F, JEOL (Япония). На рис. 3а можно увидеть области синтеза вторичного карбида кремния по граням исходных кристаллов SiC, а также “мостики” – области между частицами первичного карбида кремния из вновь образованного вторичного (некоторые из них показаны стрелками). Чем большее количество частиц исходного SiC во время реакции синтеза образовали мостики между собой из вторичного карбида кремния, тем более прочный и цельный каркас из них образуется.

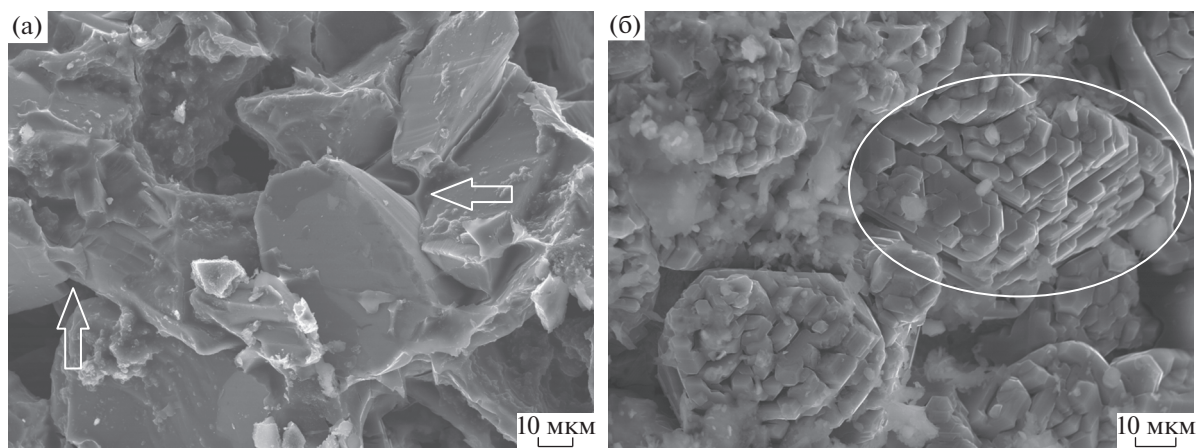


Рис. 3. (а) Возникновение мостиков между частицами первичного SiC. Вид излома (увеличение в 700 раз). (б) Рост пластинчатых кристаллов на поверхности первичного SiC. Вид поверхности (увеличение в 800 раз).

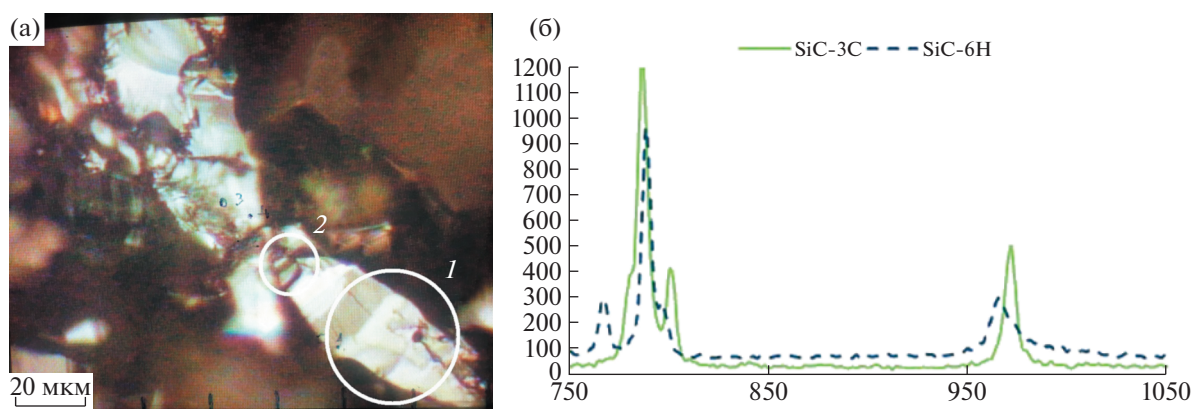


Рис. 4. (а) Вид двух кристаллов и мостика между ними. (б) Спектры КРС первичного кристалла и мостика.

При реакционном спекании в конечном продукте могут присутствовать остатки свободного кремния и углерода, которые ухудшают свойства самосвязанного карбида кремния (SiSiC) по сравнению с кристаллическим или поликристаллическим SiC. Свободный углерод уменьшает механическую прочность, а присутствие свободного кремния понижает тепловые показатели. Однако эти недостатки можно уменьшить за счет получения качественной связки из вторичного карбида кремния между частицами первичного SiC. Наличие подобного каркаса значительно улучшает механическую, химическую и радиационную прочность конечного изделия при высоких температурах, поскольку именно на него падают вся основные виды нагрузок.

На рис. 3б представлена микроструктура поверхности однослойного образца, синтезированного лазером. В выделенной области отчетливо виден рост и сращивание кристаллов вторичного SiC в виде плоских параллельных пластинок, что весьма характерно для гексагональных политипичных структур карбида кремния [19].

Затем было проведено исследование изломов образцов, спекленных с помощью лазера, методом комбинационного рассеяния света (КРС) на первичных кристаллах и на образовавшихся мостиках между ними. Один из таких результатов приведен далее. На рис. 4а представлена фотография исследуемого участка, полученная в оптическом микроскопе. А пара спектров, снятая с этого участка, представлена на рис. 4б. На линии из штрихов обозначен спектр, соответствующий поверхности первичного кристалла (на фото слева — это выделенная область 1), данный спектр соответствует политу типу SiC-6H. На сплошной линии выведен спектр, полученный на мостике между двумя первичными кристаллами (на фото слева — это выделенная область 2), соответствующий политу типу SiC-3C. По оси абсцисс отложен спектральный диапазон в обратных сантиметрах (см^{-1}), а по оси ординат — интенсивности полученных пиков в относительных единицах.

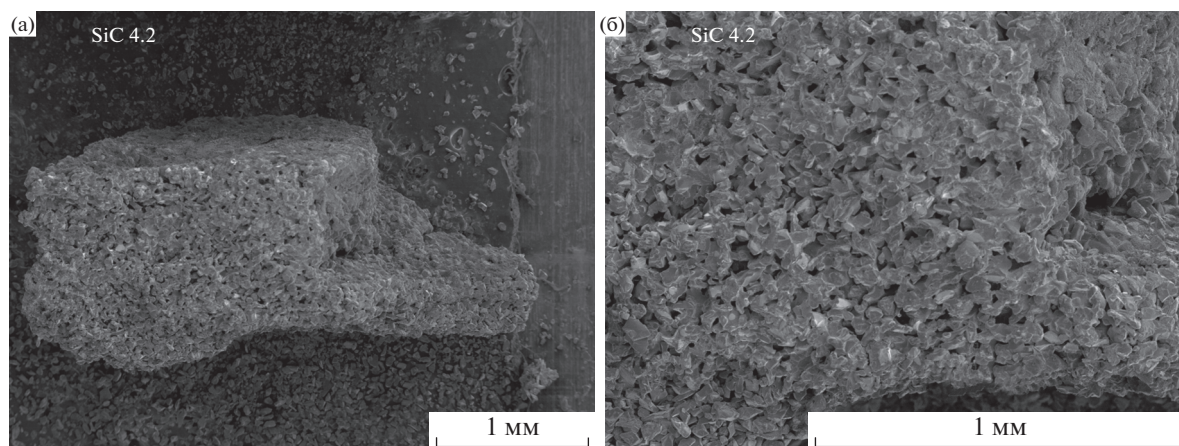


Рис. 5. (а) Двухслойный образец при увеличении в 30 раз. (б) Граница между слоями при увеличении в 75 раз.

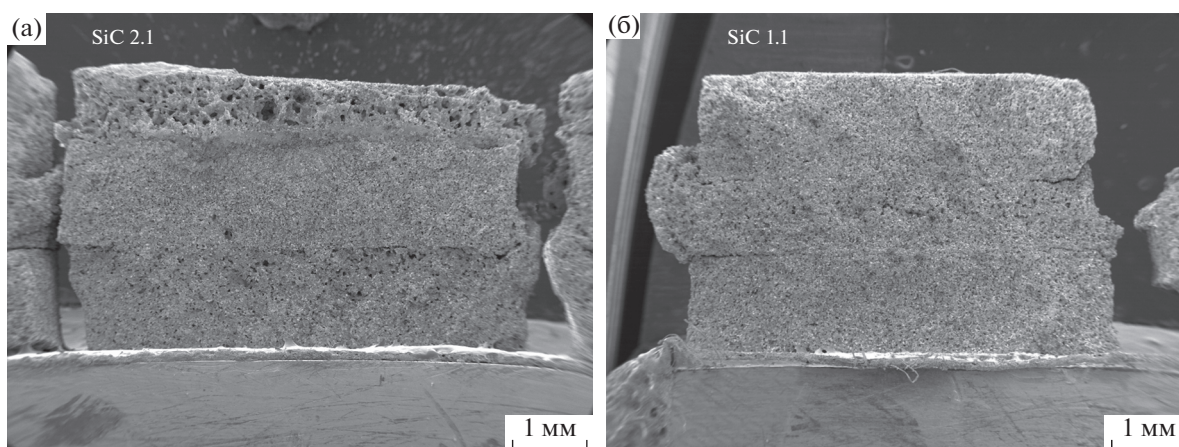


Рис. 6. (а) Вид излома образца из 3-х слоев (последнее спекание верхнего слоя). (б) Вид излома образца из 3-х слоев (последнее спекание среднего слоя).

Полученные результаты свидетельствуют о наличии реакции синтеза SiC в образцах при их нагреве с помощью лазерного воздействия. А наблюдаемое наличие вторичного карбида кремния в виде пластинок между частицами первичного SiC и в виде карбида кремния позволил нам сделать предположение о возможности формирования на поверхности полученных образцов новых слоев и начать серию экспериментов по их наращиванию.

Новые слои на заранее спеченные образцы наносились после очистки одной из их поверхностей от остатков свободного кремния. Обычно это было с помощью химического травления смесью кислот и последующей промывки и сушки. Все остальные операции (формование, сушка, карбонизация и силицирование) проводились аналогично вышеописанной схеме для однослойных образцов.

На рис. 5а и 5б представлены изображения двухслойного образца, полученные на электрон-

ном микроскопе при разном увеличении (в 30 раз слева и в 75 раз справа). Специально подобран такой ракурс, где граница между слоями просматривается отчетливо при малом увеличении. Но при большем увеличении границу между слоями визуально обнаружить уже достаточно сложно.

Аналогичным образом был сформирован и третий слой. На рис. 6а представлен полученный на электронном микроскопе вид излома трехслойного образца при последовательном наращивании слоев, т.е. при проведении с каждым из них полного комплекса необходимых операций.

Верхний слой получился более пористым. Это можно объяснить нарушением тепловых или временных условий отверждения или не очень качественным перемешиванием шихты на этапе ее подготовки.

Затем были выполнены эксперименты по имитации процесса сварки 2-х заранее синтезированных слоев путем спекания с помощью лазерного

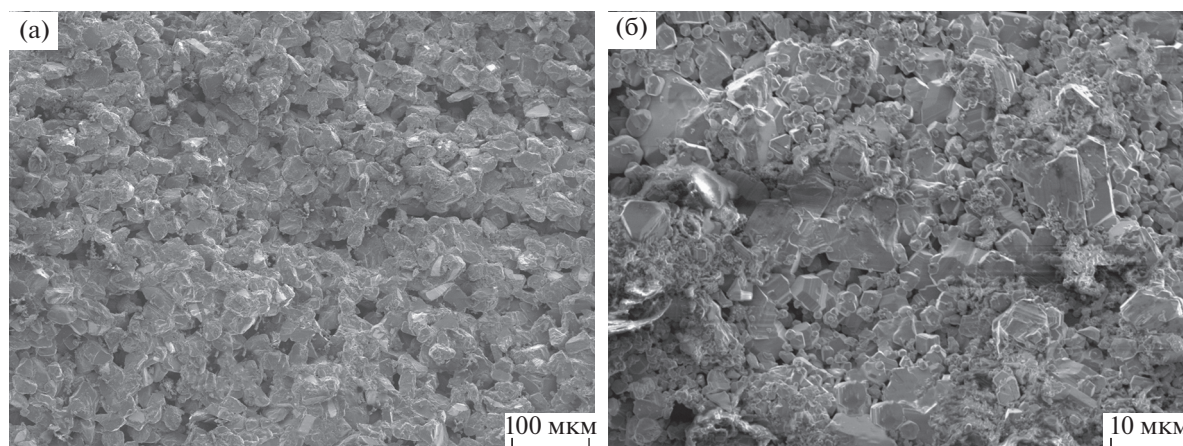


Рис. 7. (а) Типичный вид участка излома между двумя слоями в электронном микроскопе при увеличении в 150 раз. (б) Типичный вид участка излома между двумя слоями в электронном микроскопе при увеличении в 1500 раз.

нагрева прослойки из шихты между ними. На рис. 6б представлен вид излома трехслойного образца, полученный на электронном микроскопе, при спекании среднего слоя между двумя заранее спеченными образцами.

На обеих фотографиях можно визуально увидеть весьма удовлетворительное и сопоставимое по качеству соединение нескольких поверхностей самосвязанного SiC.

На рис. 7а и 7б показаны типичные виды участков на изломах трехслойных образцов между двумя слоями в электронном микроскопе при увеличении изображений в 150 и в 1500 раз. Изображения специально подобраны таким образом, что бы граница между слоями отсутствовала не везде. Причем вид границ между слоями при их последовательном наращивании и при спекании двух слоев через прослойку практически неразличим.

В обоих представленных трехслойных образцах граница между слоями пока не является сплошной, но можно на ней наблюдаются участки, где различие между слоями стирается. Выяснение причин этого потребует продолжения исследований и позволяет надеяться на создание условий для улучшения качества спекания в будущем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ПЕРСПЕКТИВЫ

Проведенные эксперименты подтвердили возможность спекания одного и нескольких слоев с помощью типовой процедуры получения самосвязанного карбида кремния, но с использованием только лазерного нагрева, что позволяет отказаться от использования высокотемпературных печей.

Полученные результаты в ходе лабораторных исследований показывают образование вторичного карбида кремния, в котором обнаружены полииты, не присутствовавшие в шихте ранее, что свиде-

тельствует об осуществлении синтеза вторичного карбида кремния из компонентов шихты и кремния. Дополнительным подтверждением протекания процесса синтеза является увеличение массы образцов, измеренной после их карбонизации, силицирования, т.е. пропитки кремнием, и последующем травлении непрореагировавшего кремния в смеси кислот.

В двухслойных и трехслойных образцах обнаружены области, в которых не видна граница между слоями, т.е. между частицами первичного SiC из разных слоев образуются мостики из вторичного карбида кремния, спеченного из Si и шихты, и являющиеся частью общего прочностного каркаса, прока еще не полного но уже представляющих собой сплошные островки, некоторые из которых связаны между собой.

Далее запланированы эксперименты по спеканию многослойных образцов, их подготовка для проведения серии механических испытаний. Затем осуществить переход от спекания многослойных, но малогабаритных образцов на более массивные, где фактор теплопроводности начнет проявляться гораздо сильнее.

Полученные результаты позволяют продолжить исследования и надеяться в будущем на осуществление таких работ как ликвидация трещин, заделка отверстий, герметизация емкостей, уменьшение шероховатости у изделий, спеченных ранее промышленным способом, а также соединение двух поверхностей самосвязанного SiC при изготовлении или ремонте деталей.

Применение лазера в технологии синтеза самосвязанного карбида кремния позволяет спекать малые объемы SiC локально и достаточно быстро без нагрева всего остального изделия, что может быть чрезвычайно важно при работе с резервуарами, заполненными опасными или вредными веществами.

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключении авторы выражают благодарность Р.А. Хмельницкому за содействие при работе на электронном микроскопе, В.П. Мартовицкому за серию исследований методом рентгеноструктурного анализа и Н.Н. Мельнику за снятие спектров комбинационного рассеяния. Их комментарии, замечания и предложения были очень полезны в нашей работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. *Schlichting J., Riley F.L.* Concise Encyclopedia of Advanced Ceramic Materials. 1991. Oxford: Pergamon.
2. *Шелованова Г.Н.* Современные проблемы микро- и нанoeлектроники: учебное пособие. 2017. Красноярск: Сибирский федеральный университет.
3. *Григорьев О.Н.* // Порошковая металлургия. 2012. № 11. С. 100–116.
4. *Гаршин А.П. и др.* Керамика для машиностроения. 2003. Москва: Научтехлитиздат.
5. *Frolova M.G. et al.* // Inorg. Mater.: Appl. Res. 2018. V. 9. P. 675–678. <https://doi.org/10.1134/S2075113318040123>
6. *Perevislov S.N., Bespalov I.A.* // Tech. Phys. Lett. 2017. V. 43. P. 720–722.
7. *Shikunov S.L., Kurlov V.N.* // Tech. Phys. 2017. V. 62. P. 1869–1876.
8. *Zhitnyuk S.V. et al.* // Glass Ceram. 2013. V. 70 (7–8). P. 247–254. <https://doi.org/10.1007/s10717-013-9554-1>
9. *Avrov D.D., Lebedev A.O., Tairov Yu.M.* // Semiconductors. 2016. V. 50 (4). P. 494–501.
10. *Shinozaki S.S., Carduner K.R.* // Proc. Conf. Advanced Materials'93. 1994. P. 857–861.
11. *Lebedev A.A. et al.* // Materials. 2021. V. 14 (17). P. 4976. <https://doi.org/10.3390/ma14174976>
12. *Сорокин О.Ю.* // Авиационные материалы и технологии. 2015. № 1 (34). С. 65–70. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2015-0-1-65-70>
13. *Boecker W.D.* // Ceramic Forum Intern. 1997. V. 74 (5). P. 244–251.
14. *Ивенин С.В.* // Инженерные технологии и системы. 2015. Т. 25 (4). С. 37–50. <https://doi.org/10.15507/0236-2910.025.201504.037>
15. *Гнесин Г.Г.* Карбидокремниевые материалы. 1977. Москва: Металлургия.
16. *Snead L.L., Katoh Y., Nozawa T.* // Compreh. Nucl. Mater. V. 4. 2012. P. 215–240. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-056033-5.00093-8>
17. *Samoilov V.M., Porodzhinskiy I.A.* // Inorg. Mater. Appl. Res. 2014. V. 5 (5). P. 540–544. <https://doi.org/10.1134/S2075113314050189>
18. *Maystrenko A.L., Kulich V.G., Tkach V.N.* // J. Superhard Mater. 2009. V. 31 (1). P. 12–23. <https://doi.org/10.3103/S1063457609010031>
19. *Verma A.R., Verma Q.R.* Polymorphism and Polytypism in Crystals. 1996. New York: Wiley.

Formation of Layers from Self-Bonded SiC Using Laser Radiation

S. A. Lysenko¹ *, N. N. Yuryshev¹, and N. P. Vagin¹

¹Lebedev Physical Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia

*e-mail: s.lysenko@mail.ru

Received July 11, 2022; revised July 30, 2022; accepted July 31, 2022

Abstract—The possibility of obtaining products from self-bonded silicon carbide using laser radiation in the absence of any additional impregnation with carbon-containing materials after siliconizing has been studied. It has been established that due to the control of thermal heating at each point of influence, it is possible to sequentially carry out all the necessary stages of the standard reaction sintering procedure in one cycle and change the traditional approach to the formation of such products using high-temperature heating furnaces. The quality of sintering was determined after etching of unreacted silicon by several laboratory methods. The main attention was paid to the study of bridges between particles from secondary SiC, both inside the layers and at their boundaries, since it is they that determine the strength characteristics of the created material and allow connecting the sintering regions to each other. After working out all the necessary stages of sintering for single-layer samples, an attempt was made to sequentially build up several layers, as well as to simulate the welding process of two pre-sintered samples.

Keywords: silicon carbide, self-bonded, reaction-sintered, SiC, SiSiC, RSC, laser synthesis, the effect of laser radiation on a substance, layer-by-layer growth of, laser welding