

Новые разработки в области технологий и изделий из карбида и нитрида кремния

G. Wotting*, **W. Martin***, **K. Berroth****, **H. U. Kessel*****

* FCT Hartbearbeitungs GmbH/ Sonneberg,

** FCT Ingenieurkeramik GmbH/ Rauenstein,

***FCT Systeme GmbH/ Rauenstein

Доклад на ежегодной конференции Немецкого керамического общества, проходившей в марте 2007 г. в Дрездене

Реферат

Описаны текущие разработки в области высокоэффективной керамики, связанные, в частности с безоксидными материалами: карбидом и нитридом кремния. Помимо уже известных изделий для различных областей техники, технический прогресс в других областях ведет к постоянному росту требований к свойствам и рабочим характеристикам керамических материалов и изделий из них, в т.ч. к росту точности и сложности готовых компонентов. Для соответствия этим требованиям производители должны быть готовы к действиям на сложной местности, и к приобретению соответствующего оборудования. Благодаря долгосрочной стратегии формирования группы фирм **FCT** с прицелом на производство крупногабаритных изделий, оборудование, необходимое для выпуска таких изделий, имеется у родственных фирм группы FCT, или производится такими фирмами, что позволяет постоянно расширять границы возможного. В статье рассказывается об имеющихся технологических возможностях, инновациях и спектре производимых изделий из вышеуказанных материалов.

Введение

Хотя возложенные на современную керамику большие надежды во многом не оправдались, изделия из высокоэффективных керамических материалов заняли центральное место во многих областях техники. Соответствующие разработки не носят прорывного характера, как ожидалось при создании компонентов для автомобилестроения, а представляют собой результат постоянных, длительных работ, сопряженных с относительно долгими прикладными испытаниями [1]. Вопрос о регулярном применении изделий из высокоэффективной керамики ставится только после того, как будут доказаны их технические и/или экономические преимущества, но и после внедрения такие изделия находятся в постоянной конкуренции с другими материалами или конструктивными решениями.

По мере технического прогресса постоянно растут требования к различным конструкционным элементам, и обычные металлические компоненты вынуждены работать на пределе свойств. Именно в возможности соответствия новым требованиям скрыт потенциал высокоэффективной керамики по расширению областей её применения. При этом, речь идет не только о технических свойствах, но также о размере, точности и сложности изделий. В результате, производители технической керамики постоянно вынуждены расширять границы возможного. Благодаря уникальности состава фирм в группе FCT, которая объединяет разработчика специального оборудования для спекания (компания «FCT Systeme GmbH» или FCT-S) и двух производителей керамики (фирмы «FCT Ingenieurkeramik GmbH» (или FCT-I) и «FCT Hartbearbeitung GmbH» (или FCT-H)), данная группа обладает максимальными предпосылками для соответствия предъявляемым требованиям, поскольку обладает компетенцией в области материалов и технологий, и изначально ориентируется на сегмент крупногабаритных изделий.

В подразделениях FCT представлена полная технологическая цепочка – от подготовки порошков до механической обработки, что является необходимым условием для производства, ориентированного на выпуск сложнопрофильных и крупногабаритных

изделий – от прототипов до серий среднего объема. Ниже описываются технологическое оснащение и инновации, а также новая, интересная продукция на основе, преимущественно, двух материалов: карбида и нитрида кремния.

Технологические инновации

С момента разработки первых специализированных высокотехнологичных установок для спекания безоксидной керамики в 1980-х гг в этой области достигнут существенный прогресс, особенно в том, что касается размеров, сложности и управляемости соответствующих установок (компрессионного) спекания и горячего прессования. Новейшей инновационной технологией в данной области является спекание с активацией электрическим полем (FAST), которое кратко представлено ниже, хотя оно и не используется для производства описанных новейших разработок из Si_3N_4 или SiC [2]. Данный процесс основан на модифицированном методе горячего прессования, при котором импульсы электрического тока вместо внешнего нагревателя пропускаются напрямую через элементы пресс-формы и уплотняемый материал (см.рис.1 и 2).

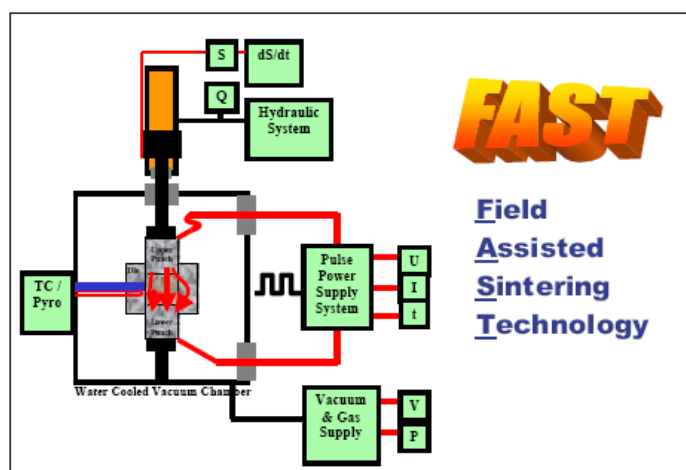


Рис.1 Принцип метода SPS/FAST



Рис.2 Внутри работающей FAST-установки

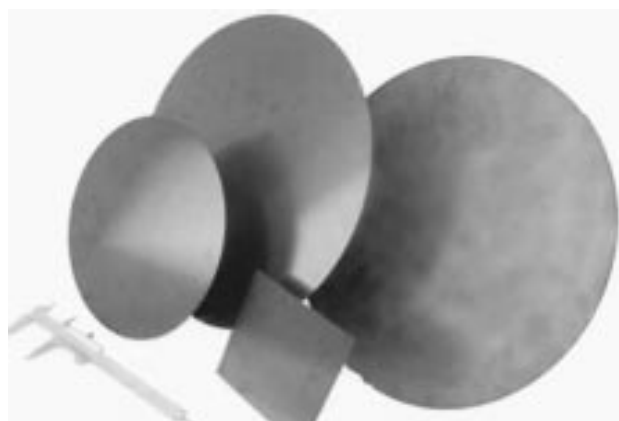


Рис.3 Пластины из горячепрессованного Si_3N_4 (HPSN) диаметром до 400 мм, и вырезанные из них подложки с минимальной толщиной 0,25 мм



Рис.4 Индукционные печи для спекания в инертной атмосфере с полезным объемом 700 и 1000 л., с системами термического отжига и охлаждения путем циркуляции газа.

С помощью импульсов тока инициируется т.н. «эффект искровой плазмы» („Spark-Plasma-Effekt“), существенно ускоряющий нагрев и сокращающий длительность цикла. При этом можно подавить рост зерна и возникновение равновесных состояний, что позволяет получить материалы с ранее недостижимыми свойствами. Благодаря кратковременности циклов (чаще всего - до нескольких минут) можно экономично производить эти материалы в

виде заготовок простой геометрии или в виде изделий с предварительными контурами. В качестве примеров можно назвать материалы с субмикронной или наномасштабной структурой, композитные градиентные материалы, или сочетания материалов, не поддающиеся уплотнению другими методами. Достоинства новой технологии наиболее ярко видны при получении субмикронных, плотных Si_3N_4 -материалов с регулируемым содержанием остаточного α - Si_3N_4 и выдающимися трибологическими свойствами, TiB_2 -BN-композитов, оксидной керамики с армированием н.к.SiC, композитов cBN-WC-Co для технологий обработки резанием, биофункциональные материалы с высокой прочностью (например « ZrO_2 -гидроксипатит»), прозрачные керамики и многослойные системы, например, для калильных свечей, а также сплавы на основе Ti и Al, и прочие композиционные материалы. Подробнее – см.ист.[2]. Современные разработки направлены на сочетание метода сухого прессования и FAST- консолидации с целью получения изделий в практически готовом виде, в основном, таких, которые предъявляют повышенные требования к материалу матрицы пресс-формы.

Параллельно с этим развиваются и классические технологии горячего прессования: современные установки, имеющиеся в фирме FCT-I, позволяют выпускать многослойные (10 и более слоев) диски диаметром до 400 мм. Такая продукция предъявляет высочайшие требования к однородности температуры и управляемости установок, чтобы гарантировать однородные механические и термические воздействия по всему полезному объему и добиться однородной плотности конечного продукта [3]. Такая технология позволила получить в т.ч. пластины из Si_3N_4 диаметром 380 мм, с толщиной 1 мм и менее, которые применяются в электронике (см.рис.3), а также другие изделия, например, прокатные ролики, которые обходятся при этом дешевле, чем при обычных методах изостатического прессования, механической обработки в сыром виде, с последующим (компрессионным) спеканием.

Для серийного выпуска изделий, например, фильтров макрочастиц для дизелей из SiC, разработаны и изготовлены печи непрерывного действия с максимальной температурой 2500°C , которые позволяют производить до 350 000 изделий в месяц. Оборудованные системой шлюзов печи позволяют создавать вакуум на начальной стадии обработки, имеют сегмент прокаливания/пиролиза, и дают возможность создавать в высокотемпературной зоне управляемое давление инертного газа до 10 бар, что позволяет использовать их в серийном производстве изделий из Si_3N_4 . Для производства крупногабаритных изделий из SiC и Si_3N_4 разработаны и изготавливаются печи для спекания в инертном газе с полезной емкостью 700 и 1000 л. и максимальной температурой до 2500°C . Последний тип печей, который в группе FCT получил внутреннее обозначение „C2“, представляет собой вертикальные печи с индукционным нагревом и квадратным сечением (см.рис.4), позволяющие спекать до 1 тонны фильтров для дизелей за 24 ч, с принудительным охлаждением путем циркуляции гелия через внешний теплообменник. Печь „C1“ с полезным объемом 700 л. оборудована «куполom охлаждения» (Kuhldom), в который перемещаются спеченные изделия для ускоренного охлаждения путем циркуляции гелия через внешний теплообменник. Указанные печи соответствуют современным требованиям по защите окружающей среды, и оснащены системой термического дожигания, что позволяет реализовать одноцикловую технологию, при которой удаление связующего/пластификатора, спекание и быстрое охлаждение проводятся в рамках одного процесса в одной печи. Наличие и управляемость таких установок, обеспечивающих высокую однородность температур в области свыше 2000°C и возможность работы в управляемой атмосфере, позволяют экономично выпускать крупногабаритные детали из SiC- и Si_3N_4 , которые находят все больший спрос на рынке (примеры приводятся ниже).

Данные установки имеются в группе FCT и могут сдаваться в аренду (т.е. для оказания услуг внешним заказчикам).

Разработка и модификация материалов

Спеченный карбид кремния

Компания FCT-H выпускает спеченный SiC в стандартном качестве (S-SiC), со средней прочностью ок. 450 МПа в интервале от 20 до ~1400°C и не уступает по качеству продукции конкурентов. Кроме того, этот материал обладает другими, типичными для S-SiC свойствами: высокой твердостью, теплопроводностью и стойкостью к износу и окислению. Материал отличается выдающимися трибологическими свойствами при трении скольжения, а также стойкостью к коррозии практически ко всем химическим веществам во всем диапазоне значений pH. В результате комплексного анализа дефектов материала, ведущих к разрушению, с помощью модифицированной технологии получен материал с повышенной прочностью, получивший название «высокопрочный SiC» („High- Strength“, HS-SiC). Он обладает улучшенной прочностью – ок. 550 МПа, и модулем Вейбулла ок. 14. В основе указанных значений лежит анализ свыше 100 образцов из множества партий, и потому результаты обладают высокой статистической достоверностью (см.рис.5). Все прочие свойства остаются на типичном для S-SiC уровне.

Интересны также результаты исследования стандартного S-SiC-материала, проведенные в независимой внешней организации. Как показывает совокупность значений в таблице 1, среднее значение прочности при сгибе соответствует результатам собственных тестов. Кроме того, получили также подтверждение данные по прочности на растяжение, которые редко оцениваются из-за сложности метода. Значение прочности при растяжении оказалось неожиданно высоким - существенно традиционного уровня в 1/3 - 1/2 от прочности при сгибе. С точки зрения механики разрушения, это можно объяснить тем, что кривая распределения дефектов в спеченном материале смещена в сторону исключительно малых размеров дефектов, поэтому эффект объема проявляется лишь ограниченно, что ведет к сближению значений. С прикладной точки зрения это позволяет проектировать изделия для растягивающих нагрузок с существенно меньшим запасом прочности, чем требовалось ранее.

Спеченный нитрид кремния

Компания FCT-I производит ряд стандартных сортов нитрида кремния, которые хорошо зарекомендовали себя в различных областях применения, что уже неоднократно отмечалось в публикациях [4, 5]. Поскольку растет интерес к крупногабаритным изделиям, возникает проблема их экономичного производства, чтобы добиться приемлемых для клиента цен. Это касается, в частности, таких изделий для технологий алюминиевой промышленности, как погружные нагреватели, трубки электролизеров и дозирующих систем, которые выпускаются с длиной до 1,25 м и имеют ресурс в 20 раз выше, чем у трубок из литой стали или в 5 раз выше, чем у титаната алюминия. Суровые условия эксплуатации таких изделий иллюстрируются на рис.14, на примере трубки погружного излучательного нагревателя. Другой пример подобных изделий – представленный ранее сложнопрофильный корпус камеры для орбитальных систем фотосъемки (см.рис.15). Эти изделия можно произвести с приемлемыми издержками только при условии использования дешевого сырья, что повышает важность подготовки порошков для спекания, поскольку необходимо избегать появления ведущих к разрушению дефектов, таких как неоднородность смеси, присутствие недоразмолотых зерен, металлические и иные примеси, а также чрезмерная твердость пресс-порошков. Поскольку изделия подвергаются, преимущественно механическим, термомеханическим и термохимическим нагрузкам, при их разработке большее значение имеет не абсолютное значение прочности, а разброс

значений и надежность материала (высокие значения статистики Вейбулла). Сорт „FSN1“ имеет значение модуля Вейбулла $m \geq 18$ и соответствует требованиям надежности.

Представляют интерес также достигнутые в компании FCT-I в последние годы улучшения соотношений свойств Si_3N_4 -материалов. Здесь можно отметить материалы с пониженным содержанием спекающих добавок, обладающие повышенной высокотемпературной прочностью и стойкостью к окислению; композиты с дополнительными кристаллическими фазами, придающими специальные свойства. Прежде всего стоит упомянуть композиты с порошковым армированием: $\text{TiN-Si}_3\text{N}_4$, которые обладают улучшенными трибологическими свойствами, особенно при сухом трении [6]. При концентрации TiN от ~30%об. такие материалы также обладают достаточной электропроводностью, что позволяет проводить их электроэрозионную обработку. Это позволяет получать изделия сложной геометрии, которые невозможно произвести с помощью обычных методов формования и обработки [7]. Еще один пример новых разработок – материалы на основе Si_3N_4 с добавками BN или ZrO_2 , которые существенно влияют на смачиваемость материала расплавами металлов, в т.ч. стали, что особенно важно, в т.ч. в технологиях тиксотропнойковки (Thixoschmieden) [8].

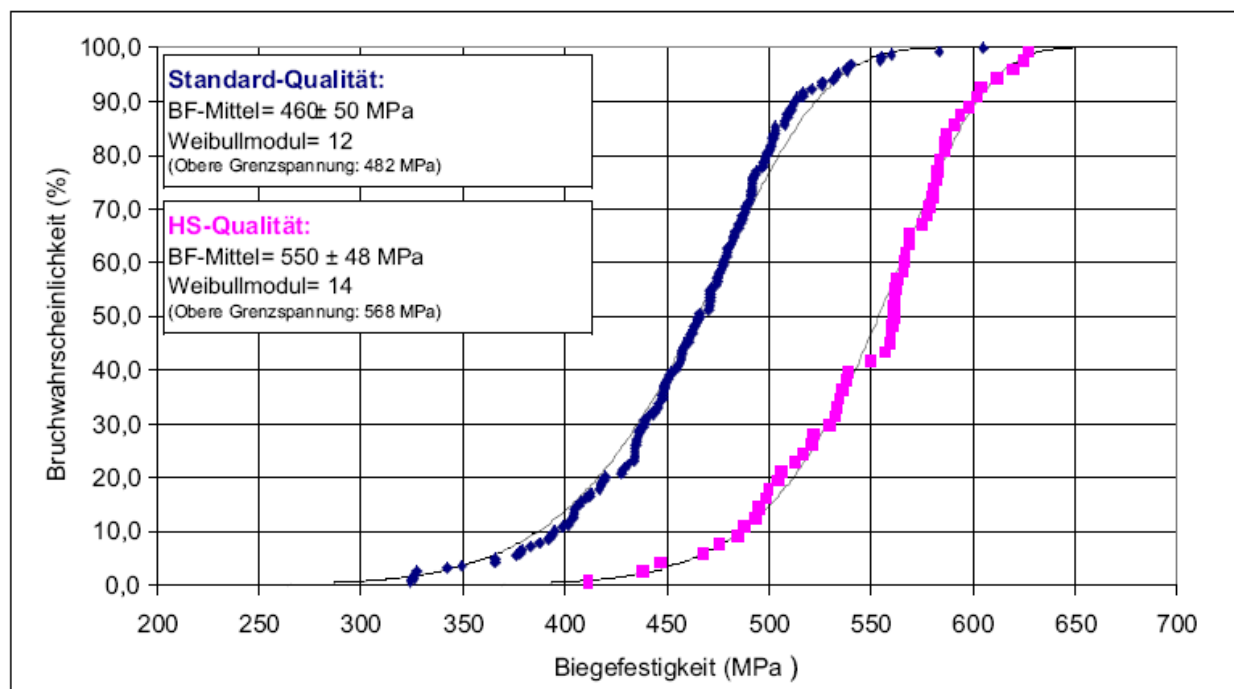


Рис.5 Распределение прочности и прочностные показатели стандартного S-SiC и «высокопрочного» HS-SiC-производства компании FCT-H

Таблица.1 Значения прочности при сгибании и при растяжении стандартного материала S-SiC производства FCT-H, по результатам исследования Фраунгоферовского института механики материалов (FhG-IWM), г.Фрайбург.

Материал:	Карбид кремния	S-SiC
Метод испытания:	Изгиб по 4 точкам, 40/20мм	Растяжение $\varnothing 12/6 \times 120$ мм
Прочность, 20°C [МПа]	438 ± 44	338 ± 45
Параметр Вейбулла s_0 [МПа]	456	356
Модуль Вейбулла при 20°C	11	9
Модуль упругости, 20°C [ГПа]	384 ± 18	402 ± 7

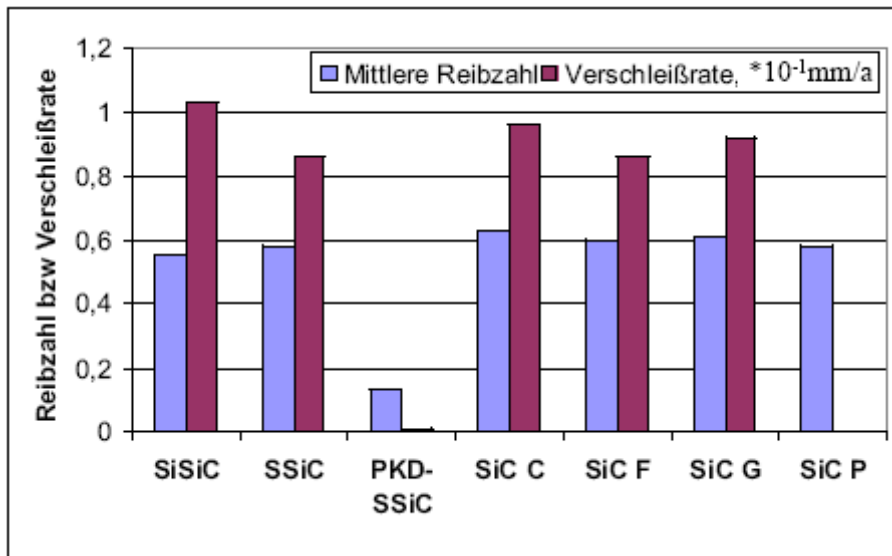


Рис.6 Средние коэффициенты трения и износа различных монокристаллических SiC-материалов и спеченного SiC с поликристаллическим алмазным покрытием (PKD-SSiC) при сухом трении в азоте при относительной влажности <2%.

Модификация материалов и изделий

Благодаря хорошим трибологическим свойствам и выдающейся стойкости к коррозии SiC широко применяется в подшипниках скольжения и уплотнениях. Его недостаток проявляется при чистом сухом трении, когда детали сильно перегреваются, что может привести к саморазрушению или к риску термоудара при возобновлении подачи перекачиваемого продукта. Для решения этой проблемы испытывались многочисленные модификации материала, но приемлемого универсального решения найти не удалось. Новейшие разработки показывают, что покрытие из поликристаллического алмаза (PKD) потенциально способно решить эти проблемы. Для проверки характеристик данного покрытия, проводились сравнительные трибологические испытания SiSiC-материала и различных промышленных SiC-материалов, в т.ч. с улучшенной стойкостью к сухому трению, в сопоставлении с образцом SSiC с PKD-покрытием. Специальные сорта SiC, обозначенные индексами C, F, G и P, имеют, согласно данным производителей, улучшенные трибологические свойства: материал C имеет бимодальную структуру с зерном 10 - 1500 μm , материал F – мелкозернистую однородную структуру с зерном ок. 5 μm . Структура материала G также бимодальная, с зерном от 10 до 1000 μm , и содержит графитовые включения, улучшающие показатели в условиях сухого трения. Материал P с зерном ок. 5 μm имеет аналогичную структуру с материалом F, но содержит дополнительно поры диаметром 50 - 200 μm . В этих порах должна накапливаться смазка, улучшающая характеристики при наступлении сухого трения.

Для максимально близкой имитации реальных условий и получения адекватных данных проводились испытания в трибометре *Wazui* в конфигурации «кольцо-диск» со стационарным кольцом из одноименного материала (диаметр 48 мм) и вращающимся диском. Рабочая поверхность кольца и диска полировалась до шероховатости Ra 0,1 μm .

На рис.6. представлены значения коэффициентов трения и износа, полученные в результате испытаний на сухое трение в азоте при относительной влажности < 2 %, скорости трения 0,1 м/с и контактном усилии 0,3 N/мм². Подробнее испытания описаны в ист.[9]. При указанных условиях (минимальная влажность, азотная атмосфера) практически все монокристаллические SiC-материалы (кроме образца с покрытием) имели сопоставимо высокий коэффициент трения, при среднем воспроизводимом значении на уровне от 0,55 до 0,63.

Стоит отметить, что графитсодержащий материал SiC - G не показал пониженного трения и графитовые включения не привели к снижению трения в описанных условиях эксперимента. У пористого материала P отмечены отдельные падения коэффициента трения, не отражающиеся на среднем значении, но свидетельствующие о влиянии пор. Качественно иное воздействие оказывает алмазное покрытие, которое на всем протяжении эксперимента уменьшает тепловыделение в трибосопряжении. К аналогичным результатам привела оценка износа, который был достаточно высоким у всех материалов в описанных условиях эксперимента, за исключением образца SiC с алмазным покрытием, который практически не имел заметного износа. По пористому материалу SiC P трудно сделать однозначные выводы, поскольку часть изношенного материала забила в поры и не могла быть удалена оттуда. Поскольку в этом случае возможна неверная интерпретация данных, соответствующий результат был опущен. Все прочие образцы SiC при довольно высоких нагрузках показали довольно высокие линейные коэффициенты износа и рост шероховатости поверхности, что не позволяет длительно использовать их в условиях сухого трения. У всех образцов SiC коэффициент износа отличался в пределах $\pm 0,1$ мм/а, что несопоставимо с ростом износостойкости на порядок величины при нанесении на SiC поликристаллического алмазного покрытия.

Разработка волоконно-армированных SiC-композиов для систем сцеплений, дисков и колодок для тормозов преследует прямо противоположные цели. Здесь требуются: высокая износостойкость, стабильно высокий коэффициент трения, практически не зависящий от влажности среды, а также гарантированно высокий уровень надежности изделий. Все эти свойства успешно реализованы в C/C-SiC-тормозах для спортивных автомобилей, которые уже неоднократно описаны в литературе. Кроме того, подобные материалы применяются в узкоспециализированных областях: системы экстренного торможения для лифтов, «башен падения» (конструкции для экспериментов с невесомостью), аварийные ползуны (Crash-Schlitten) (см.рис.7), где подобные вкладыши все шире применяются благодаря их хорошим фрикционным свойствам и стойкости к повреждениям.

Все перечисленные меры в конечном итоге служат для модификации рабочих характеристик материала с целью выполнения системных требований, и создания технических или экономических преимуществ для клиента. Эти цели являются необходимой предпосылкой для создания новых изделий на основе специализированных керамических материалов.

Новые, инновационные изделия и компоненты

В промышленной практике постоянно растет спрос на материалы с высокой стойкостью к коррозии и абразивному износу, например, для производства электронных компонентов, а также в пищевой и фармацевтической промышленности. При этом существует тенденция к росту масштабов нового оборудования и соответствующему увеличению размеров керамических изделий. Реализация данной тенденции зависит от наличия соответствующего технологического оборудования, в частности, печного, где уже существуют упомянутые выше выдающиеся технические решения. Долгое время считалось, что изделия из SiC- и Si₃N₄-можно получить только с определенными предельными размерами, что связано с медленным высокотемпературным прогревом крупногабаритных изделий и развитием сильных термомеханических напряжений в процессе спекания и усадки. Для определения предельно возможных размеров SiC-изделий проводилось внутреннее исследование, результаты которого представлены ниже.

Крупногабаритные SiC-компоненты

Для определения предельных технологически возможных размеров SiC-компонентов в специально подобранных условиях спекались заготовки с постепенным увеличением их

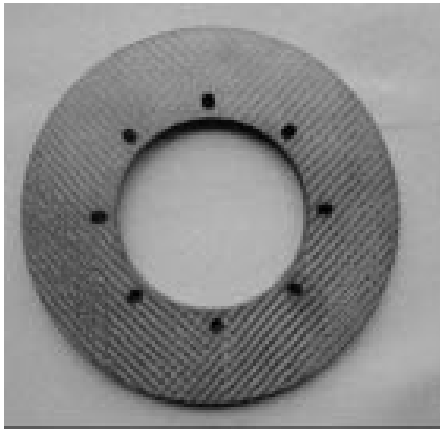
размеров; критерием успеха в экспериментах была выбрана плотность $> 3 \text{ г/см}^3$. Этапы исследования иллюстрируются на рис.8. Предельные размеры дисков, которые удалось спечь до плотности свыше 3 г/см^3 без трещин, составили: диаметр ок.500 мм, при толщине 70 мм, причем данные габариты соответствуют предельным возможностям технологического оборудования, но не пределу спекаемости материала. Помимо указанных испытаний, ранее уже неоднократно спекались различные крупногабаритные и сложнопрофильные компоненты. Примеры приводятся ниже:

• **Активные и пассивные SiC-компоненты для систем подготовки порошков**

Роторы с сложной конфигурацией направляющих и активаторов мелющих тел, а также статоры и/или футеровки мельниц с диаметром до 400 мм все шире применяются в размольном оборудовании для уменьшения износа и количества примесей в обрабатываемых материалах, а также для повышения производительности и тонины помола. Современные инновационные конструкции мельниц описываются в ист.[10]. На рис.9 показана заготовка футеровки до спекания и после окончательной обработки, а также опытный образец ротора мельницы для высокоскоростной активации мелющих тел. По этим снимкам можно судить о том, насколько высоки успехи в спекании крупногабаритных SiC-изделий без трещин и деформаций при усадке, и насколько сложнопрофильные изделия можно получать при наличии высокоэффективной механической обработки заготовок в сыром виде. SiC крайне перспективен для применения в высокоэффективном размольном оборудовании из-за своей высокой теплопроводности, поскольку позволяет эффективно отводить из системы теплоту, способствующую росту износа. Успешно зарекомендовали себя втулки на вал из SiC, а также втулки из Si_3N_4 для каландров в оборудовании для переработки чувствительных к примесям паст для электронной промышленности, а также для производства пигментов, красителей, и продуктов питания. Подобные изделия выпускаются мелкими сериями, и имеют следующие параметры: диаметр до 400 мм, высота до 900 мм, толщина стенок 15 - 20 мм (рис.10). После чистовой обработки изделия имеют слегка сферическую, тонкошлифованную внешнюю поверхность, и хонингованную цилиндрическую внутреннюю поверхность, при допусках по форме и высоте порядка нескольких микрон.

• **износостойкие SiC-компоненты для технологического оборудования.**

При ремонте транспортной инфраструктуры, например, железнодорожных или трамвайных рельсов, помимо сильного нагрева, образуется горячая агрессивная пыль/стружка, которую необходимо собирать, предотвращая свободный разлет. Разработанные для этого приспособления отличались недостаточной стойкостью к абразивному износу и коррозии, и обладали малым ресурсом. Опыты со спеченным SiC показали его высокую перспективность для данного применения. В таких приспособлениях используется комбинация перфорированной SiC-трубки с аксиальными отверстиями (см.рис.11a) высотой 700 мм, и уголка на 90° с удлиненным осевым плечом (рис.11b), которая клеивается в стальную конструкцию (рис.12). Уникальность разработки заключается в том, что каналы цилиндрической трубки прорезаются не путем сверления или иной обработки сырой заготовки, а непосредственно при формовании. Такой простой способ изготовления позволяет выпускать эти изделия с приемлемыми затратами.



a)



b)

Рис.7 a,b: Элементы сцепления и тормозных колодок из C/C-SiC с высоким коэффициентом трения, не зависящим от уровня влажности.

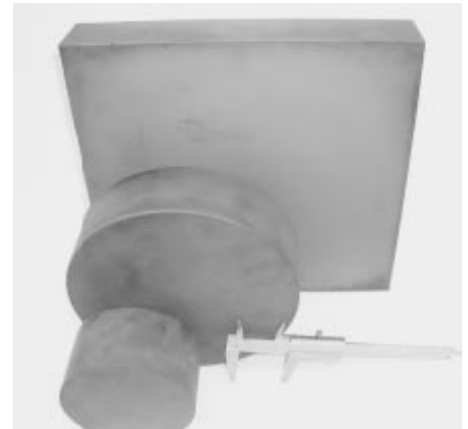


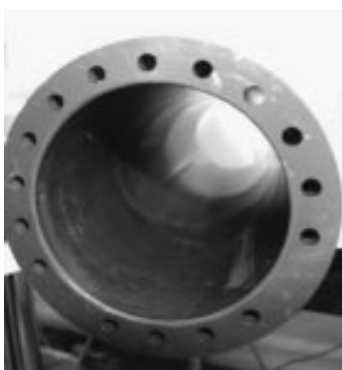
Рис. 8 SiC-изделия с габаритами до 400 x 400 x 60 мм – для определения максимального размера спекаемых изделий.



Рис.9 (слева): Футеровка мельниц из SiC: прессованная и обработанная в сыром виде, а также готовая – после спекания и чистовой обработки (D=400 мм) **(справа):** рабочий образец ротора мельницы с активаторными вставками (D=200 мм)



Рис. 10 Втулка каландрового вала из SiC или Si₃N₄ с размерами: диаметр до 400 мм, высота до 900 мм



a)



b)

Рис.11 a,b Стойкие к абразивному износу и коррозии детали аспирационной системы из SiC; деталь слева имеет сквозные каналы охлаждения.



Рис.12 Аспирационный блок системы шлифования рельсов со склеенными SiC-элементами.

Крупногабаритные изделия из Si₃N₄

Сложность и размеры изделий из Si₃N₄ в последние годы существенно повысились; подробный обзор различных областей применения приводится в ист.[4, 5]. Относительно новый продукт, который удалось реализовать путем объединения усовершенствованной технологии горячего прессования и компетенции компании FCT-H в области механической

обработки, - это представленные на рис.3 диски из HPSN (нитрида кремния) диаметром до 400 мм. Указанные изделия путем специальной шлифовки доводятся до толщины 1 мм, что позволяет впоследствии вырезать из них изделия произвольной геометрии с помощью лазера. Возможна и более тонкая шлифовка с конечной толщиной изделия до 0,25 мм. Указанные размеры составляют предел возможностей технологии, хотя электронная промышленность, которая активно потребляет указанные изделия по причине высокой прочности, жесткости и близкого к кремнию термического расширения, заинтересована в дальнейшем увеличении диаметров дисков. Из множества других областей применения стоит отметить два дополнительных примера, демонстрирующие возможные габариты и сложность формы изделий из Si_3N_4 .

•Изделия из Si_3N_4 для литья алюминия

Огромный рост производительности и мощности установок для литья алюминия, например, в производстве блоков двигателей, требуют использования термостойких и коррозионноустойчивых компонентов: чехлы термопар, подъемные и дозирующие трубки, и т.п. Этим требованиям прекрасно соответствуют изделия из Si_3N_4 , существенно превосходящие конкурирующие материалы; их ресурс в 20 раз превышает ресурс стальных трубок, и в 5 раз больше ресурса изделий из титаната алюминия. Благодаря осуществленным разработкам и существенному улучшению экономических параметров технологии, такие изделия теперь можно получать (с приемлемыми затратами) с высотой до 1,25 м. Примеры трубок показаны на рис.13; на рис.14 иллюстрируются сложные условия работы таких изделий на примере погружных излучательных нагревателей.

•Корпус фотокамеры из Si_3N_4

К наиболее ярким производственно-технологическим достижениям последних лет относятся, несомненно, уже описанные корпуса фотокамер из Si_3N_4 и соответствующая платформа носителя для корпуса (см.рис.15) [5]. При взгляде на это изделие возникают сомнения в возможности её изготовления из керамики: конструкция имеет множество отверстий, фланцев и различную толщину стенок. При использовании для орбитальной фотосъемки такие изделия испытывают перегрузки до 20 g при взлете и посадке летательного аппарата, что требует от изделий высокой прочности, жесткости и усталостной прочности, а также малого термического расширения при низком весе. Для такого применения особенно хорошо подходит керамика, в частности, по механическим свойствам, - нитрид кремния. Данное изделие представляет собой типичный пример того, как технические требования (стремление к росту точности камер) предъявляют новые требования к керамике и стимулируют к расширению границ технологических возможностей. Для минимизации потребностей чистовой обработки, особенно с учетом усадки после высокоточной обработки сырой заготовки, а также с профилактикой возможной деформации, требуется спекать такие изделия без трещин и деформаций с применением самой передовой технологии, что и позволяет осуществить высокотехнологичное оборудование компании FCT.



Рис.13 Подъемные трубы из Si_3N_4 с диаметром до 150 мм и длиной до 1,25 м.(в сыром и спеченном виде)

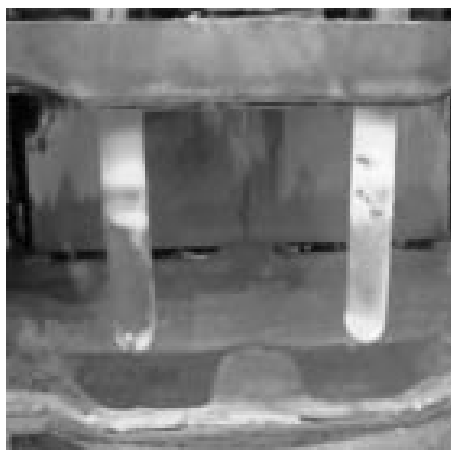


Рис.14 Излучательные нагреватели из Si_3N_4 в действии



Рис.15 Плита основания и корпус камеры из Si_3N_4 с диаметром ок.430 мм.

Заключение и перспективы будущего

Приведенные примеры можно дополнить множеством других высокосложных разработок, которые проводятся совместно с клиентами на условиях конфиденциальности. Все они позволяют продемонстрировать, что при осуществлении последовательных технологических разработок и инвестиций в соответствующее оборудование можно раздвинуть пределы технических возможностей. Предпосылкой для расширения возможностей и расширения областей применения является готовность компании к приобретению или созданию соответствующего технологического оборудования на всех стадиях технологической цепочки. Центральную роль играет наличие соответствующего оборудования для спекания. Потребности рынка меняются в сторону растущей сложности, точности и габаритов керамических изделий, позволяющих реализовать новые, инновационные и эффективные (либо экономичные) изделия или технологии, и в этом заключается значительный потенциал развития высокоэффективной керамики. Помимо крупносерийного производства необходимы также вложения в изготовление вышеуказанных изделий, которые зачастую нужны в небольших количествах. Потребителю важно помнить, что такие изделия сами по себе не являются чрезмерно дорогими: при соблюдении определенных условий и реалистичных требований к шероховатости и допускам по форме и положению, такие изделия могут производиться с приемлемой себестоимостью и ценой. Для реализации таких издержек необходимо использовать все имеющиеся возможности для их экономии, начиная с использования максимально дешевого сырья до максимально точного формования и обработки сырых заготовок, чтобы свести к минимуму дорогостоящую чистовую обработку; также необходимо надежное спекание заготовок - без трещин и деформаций. Только путем оптимизации отдельных технологических этапов можно добиться минимального брака при производстве мелких серий крупногабаритных изделий, и обеспечить прибыльность такого производства. Помимо требований к размерам, точности и сложности керамической продукции, рынок предъявляет постоянно растущие запросы к свойствам материалов и изделий. И здесь по постоянная работа с материалами и технологиями обработки позволяет улучшить надежность и спектр свойств, даже у ставших классическими материалов, например, у спеченного SiC (SSiC). Прочие инновации, например, нанесение алмазных покрытий, также позволяют повысить потребительскую ценность изделий и их выгодность для клиента.

В совокупности все эти аспекты показывают возможности расширения границ возможного для таких материалов как SiC и Si₃N₄ и изделий из них, а также потенциал развития новых областей применения этих материалов. Крайне полезно также следить за развитием других областей техники, например – технологий соединения, чтобы учитывать их в постановке задач для собственных разработок. Только так можно обеспечить серьезный вклад керамических изделий в инновационный процесс и общий технический прогресс.

Библиография

- [1] Wotting, G., Pohlmann, H.J.: Siliciumcarbid- und Siliciumnitrid-Werkstoffe: Aus Hochschulentwicklungen wurden Anwendungen, cfi/Ber.DKG **79** (2002) [5] D17-D22
- [2] Kessel, H.U., Hennicke, J., Schmidt, J., Weigardner, T., Kieback, B.F., Herrmann, M., Rathel, J.: Feldaktiviertes Sintern "FAST" – ein neues Verfahren zur Herstellung metallischer und keramischer Sinterwerkstoffe; Tagungsband 25. Pulvermetallurgisches Symposium, Hagen, 2006
- [3] Berroth, K.: Industrielle Hei.presstechnik; cfi/Ber.DKG **79** (2002) [4] D22- D24
- [4] Berroth, K., Martin, W.: Wear Protection in Powder Processing with SSiC and Si₃N₄ Components; cfi/Ber.DKG **81** (2004) [8] E16-E18
- [5] Berroth, K.: Komplexe Strukturen aus Hochleistungskeramik, cfi/Ber.DKG **82** (2005) [13, 91
- [6] Blugan, G., Hadad, M., Janzak-Rusch, J., Kuebler, J., Graule, T.: Fractography, Mechanical Properties, and Microstructure of Commercial Silicon Nitride- Titanium Nitride Composites; J. Am. Ceram. Soc. **88** (2005) 925-933
- [7] Wotting, G., Pfeiffer, W.: „Bruchzah durch Verzahnung“; Leitfähige, elektroerosiv bearbeitbare SiN-Keramik; KEM 11/2005
- [8] Behrens, B. A.: Abschlussbericht des BMBF-Verbundprojektes „Thixoformingtechnologie für hochschmelzende Stahlwerkstoffe“, Verlag PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen, 2005; ISBN 3-936888-81-7
- [9] Wotting, G., Drachsler, H., Klaffke, D., Wasche, R., Prectl, W.: Mangelschmierungs- und Trockenlauffähigkeit von SiC- und Si₃N₄-Werkstoffen und –Kompositen, Dichtungstechnik, Heft 2, 11/06, S.75-78 (Teil 1)
- [10] Hofmann, S.: Tailoring Nanoparticles for Diverse Applications, cfi/Ber.DKG **82** (2005) [10] E20
- [11] Wotting, G.: „Keramische Hochleistungswerkstoffe für die Dichtungstechnik“, in: ISGATEC (Hrsg.), Jahrbuch der Dichtungstechnik 2004, Huthig Verlag, 2003, S.242-259
- [12] Wotting, G.: „Grundlagen der Werkstoffauswahl und Qualifizierung“, in: „Keramische Komponenten für das Spritzgießen und Extrudieren“, Tagungsband zum Abschluss-Symposium des BMBF-Projekts, Selb, 2005, S.48-63