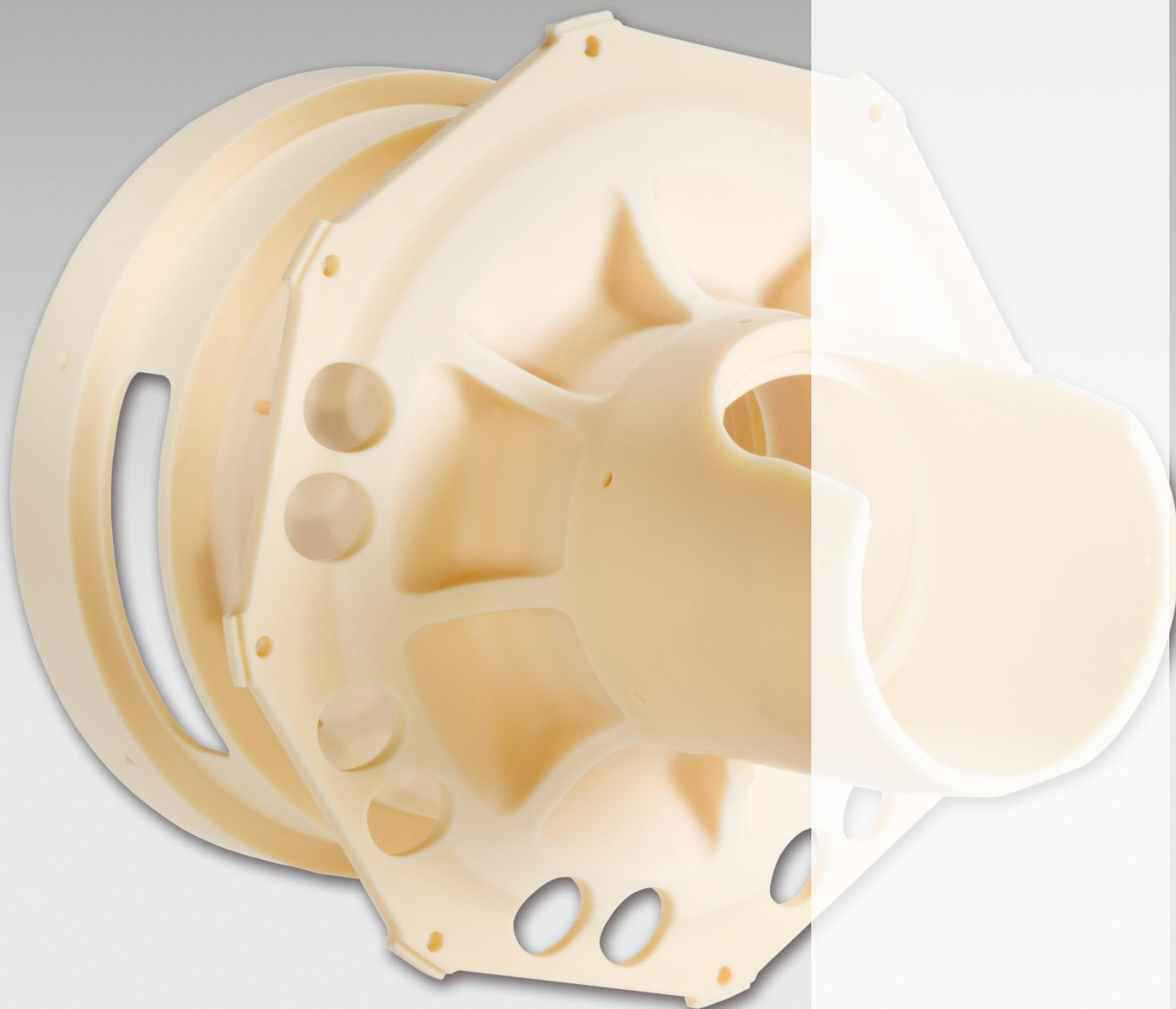


Техническая статья | Июнь 2014
Авторы: Майер Х., Рекцайгель А., Вильманн Г.

FRIALIT®-DEGUSSIT®
Оксидная Керамика

Конструирование с использованием керамики – производство и точность размеров без обработки



1. Введение

Изделия, произведенные из керамических материалов зачастую используются в качестве компонентов в производстве станков и оборудования, которые в свою очередь должны обладать определенной механической, термической и химической устойчивостью. Как следствие, инженеры-конструкторы зачастую сталкиваются с материалами, опыт работы с которыми у них мал или вообще отсутствует. В этой статье приводится обзор, который поможет преодолеть дефицит знаний.

Технологию производства керамики можно сравнить с технологиями порошковой металлургии, но при этом она обладает более неблагоприятными условиями для стабильности размеров и допусков в сравнении с металлическими компонентами. В статье приведены общие пределы допусков размеров и формы компонентов, сделанных из различных материалов и различным процессом формования.

2. Цели и задачи

Благодаря своим интересным техническим свойствам таким как выдающаяся твердость, превосходная устойчивость к истиранию и коррозии при высокой термостойкости и доступности необходимого сырья, использование керамических материалов на протяжении последних десятилетий превзошло ожидания. Керамические материалы используются в производстве электротехнического, медицинского оборудования, машиностроении и в электронике.

В данной статье не обсуждаются керамические материалы и их свойства. Цель статьи – предоставить всем пользователям и, в частности, инженерам-конструкторам информацию, необходимую для разработки конструкции детали в керамическом исполнении. Кроме того, в статье для облегчения понимания описываются ограничения, которые имеют керамические компоненты в процессе производства.

В данной статье представлены отличительные особенности:

- производства и стабильности размеров керамических компонентов без обработки
- реалистичности формы и допусков размеров, которые могут быть достигнуты после обработки
- принципов конструирования, установленных благодаря знанию процесса производства и учитывающих хрупкость или слабую сопротивляемость распространению трещин
- формальный подход к конструированию и дизайну керамических компонентов

3. Компоненты

Керамические компоненты редко выполняют полностью свои функции до тех пор, пока они не интегрированы в определенную систему, например, свечи зажигания в двигателях внутреннего сгорания, изоляторы в электрических щитках или корпусах, керамических глазки-нитенаправители в текстильном оборудовании, дисковых уплотнителях внутри смесителя, эндопротезы (биокерамика) внутри человеческого тела и др.

Не ссылаясь на специальные технологии соединения, знание допусков формы и размеров, обычно относящиеся к различным керамическим материалам, имеют фундаментальную важность для конструирования и разработки компонентов. Для этой цели важно знать пределы допусков без обработки после обжига, т.е. без сложной машинной обработки.

Керамические компоненты могут быть обработаны после обжига (спекания), но в абсолютном большинстве случаев это возможно только при помощи использования алмазного инструмента. Этот процесс является очень длительным, трудоемким и дорогостоящим. Поэтому механической обработки керамических компонентов лучше избегать или, хотя бы, свести ее к минимуму.

Инженер-конструктор должен в таком случае принять во внимание данный факт во время конструирования детали. Это, однако, может быть сделано правильно только в случае, если инженер-конструктор обладает информацией о возможностях и лимитах по допускам разных материалов и процесса формообразования.

4. Технологии изготовления

В табл. 1 показаны термины, используемые в технологиях производства металла и керамики. Предполагается, что значение этих терминов известно (объяснение некоторых важных терминов, используемых в технологии производства керамических компонентов приведены в приложении №7 и [1, 10-12]).

Значительная разница при производстве и конструировании компонентов из керамических материалов нежели чем из металлических всегда должна быть принята во внимание. Подобные различия, а также конечные ограничения при всем разнообразии форм и допусков по размерам и форме представлены здесь.

Технология производства	Общеприменимо для керамики	Применение
Предварительное или первичное формование	Формуется, но необходимо дополнительный процесс «обжига»	Все керамические продукты
Восстановление формы	Не возможно из-за отсутствия пластичности	----
Разрезание	Распил, шлифовка, полировка, притирка, заточка	Всегда необходимо в случае если требуется стабильность размеров. Возрастает при использовании силикатов, оксидной и не оксидной керамики
Соединение [5-7]	До обжига только керамика с керамикой. После обжига усадка, закупоривание, склеивание	Силикатная керамика (ручки для чашек, чайников) прокладки для труб с крышками, пайка твердым припоем оксидной керамики, металлокерамические соединения, прочие керамические материалы
Нанесение покрытия	Да	Глазурь, окисление SiC-материалов
Изменение свойств материала	Редко	Na-β-глинозем, отжиг в атмосфере в O ₂ [9], частично стабилизированный оксид циркония [13]

Таблица 1: Процесс производства керамики

Технология производства керамических компонентов очень схожа с технологиями порошковой металлургии. Основные стадии производственного процесса это: сырой материал, подготовка, формование, сушка, возможно, предварительный обжиг, обжиг (спекание) и конечная обработка.

Зачастую керамические детали подвергаются предварительному обжигу и сжатию. Этот процесс завершается на простом оборудовании (чистовая обработка) или нанесением покрытия (глазурь). Далее компоненты поступают в обжиг (процесс спекания), во время которой сжимаются путем усадки и одновременно повышается их механическая прочность. Прошедшие обжиг компоненты в конце режутся, шлифуются, полируются и притираются.

Ввиду того, что керамика является очень хрупкой, невозможно изменять ее форму в процессе производства, т.е. после формования, за исключением обработки после обжига, даже после которой общая конструкция керамики остается прежней. Обработка является длительным процессом, и к тому же, зачастую, она может производиться только с помощью алмазного инструмента. Поэтому в процессе разработки и планирования производства важно искать возможные решения, которые позволят избежать процесса чистовой обработки.

Это одна из причин, почему формы керамических компонентов не столь разнообразны в сравнении с компонентами из металла. Технологии соединения керамических компонентов

общеизвестны, в частности, методы соединения (не прошедших обжиг) частей и методы соединения деталей после обжига. Эти методы становятся все более значимыми.

Производственный этап, условно называемый «изменение свойств материала» значительно менее важен при производстве керамических компонентов в отличие от металлических. Этот производственный этап происходит с применением твердых электролитов таких как Na-β-оксид алюминия и мультифазных материалов, таких как частично стабилизированный оксид циркония.

Все это показывает, что имеющие решающее значения шаги при производстве керамики должны осуществляться до процесса обжига. «Зеленые» части (без обжига) имеют низкую твердость и с ними едва можно обращаться. В дополнение к невозможности изменения формы, низкая твердость «зеленых» деталей является второй причиной ограниченного разнообразия форм керамических компонентов.

В процессе формования, сушки и обжига происходит усадка керамического компонента. На усадку воздействуют различные производственные характеристики, такие как размер зерна, плотность не спеченного материала, влагосодержание, температура, время, скорость нагрева и др. Степень усадки в большинстве случаев определяется эмпирическим методом, т.е. серийными испытаниями. Величина линейной усадки зависит от материала и способа производства и в общем составляет примерно 30%.

В идеале компонент сжимается в процессе сушки и обжига в соответствии с аффинным преобразованием; условия размерные, углы и параллелизм инвариантны. Тем не менее, этого никогда не происходит по причине неоднородности и дисперсии сырья, деталей, процесса обжига и др. Можно сказать, что изменения компонента в некоторой степени неконтролируема. Поэтому точные допуски размеров и формы едва могут быть реализованы без конечной обработки. Общие способы формовки представлены в Таблице 2 в соответствии с частотой их применения.

Силикатная керамика используется в основном производится при помощи мокрого прессования и экструзии, а также шликерном литьем; оксидная керамика производится сухим прессованием, экструзией и литьем под давлением. Применение и требования имеют все более возрастающее значение в производстве не оксидной керамики. Эта высококачественная группа материалов показывают тенденцию к применению сухого и горячего прессования, а также к ГИП (горячее изостатическое прессование)

Процесс формования	Силикатная керамика (фарфор, глиняная)	Оксидная керамика (Al ₂ O ₃ , ZrO ₂)	Не оксидная керамика (SiC, Si ₃ N ₄)
Мокрое прессование	XXX		
Литье	XXX	XX	XX
Сухое прессование	X	XXX	XX
Изостатическое прессование	X	XXX	XX
Экструзия	XXX	XXX	X
Литье под давлением	X	XXX	XX
Горячее прессование (вкл. Изостатическое горячее прессование) *		X	XX

Таблица 2: процесс формования керамики

Легенда:
 X = редко применяется
 XX = обычный процесс
 XXX = используется в серийном производстве
 * вкл. процесс спекания (обжига)

Помимо процесса формования, усадка, возникающая при обжиге, в значительной степени влияет на свойства компонента (см. табл. 3). Сегодня процесс обжига силикатной и оксидной керамики может быть экономичным, благодаря использованию газовых печей. Максимальная температура обжига силикатной керамики – до 1500 °C, оксидной – до 1800 °C.

В отличие от этого, компоненты из не оксидной керамики всегда обжигаются в электрических печах в восстановительной атмосфере с использованием защитного газа (водород, азот, аргон) или в вакууме. Температуры до 2400 °C и частично в давлении. Частичное спекание производится под высоким давлением при температуре до 2400 °C. Т.к. среди материалов не оксидной керамики есть те, которые не подвергаются усадке в процессе обжига, то это позволяет достичь принципиально более точных допусков размеров и формы.

Группа материалов	Вид нагрева	Макс. температура	Линейная усадка	Критерии обжига	Особенности
Силикатная керамика	В основном газовый	1500 °C	До 20%	Непрерывный обжиг (в туннельной печи) В объемах партии (камерная печь)	
Оксидная керамика	В основном газовый	1800 °C	До 20%, 30% в крайних случаях	См. выше	ГИП для высококачественных компонентов
Не оксидная керамика	Электрический	2400 °C	До 20% На практике возможно 0%	Обжиг в объемах партии в вакууме или защитном газе	Реакция спекания без усадки нитрида кремния (RBSN) реакции спекания без усадки при инфильтрации, проникновения кремния с SiSiC

Таблица 3: методы обжига керамики

5. Допуски размеров и формы

Допуски размеров и формы керамических компонентов в основном зависят от таких производственных этапов как: формование, сушка и обжиг. Чем выше степень усадки, тем

нее точно соответствовать допуску. Данные и некоторые другие факторы отражены ниже (см. табл. 4).

Процесс формования	Допуски	
	Стандарт	Возможная на сегодня точность
Литье	от $\pm 5\%$ до $\pm 3\%$	$\pm 0,5\%$
Сухое прессование со свободно сыпучим гранулятом	от $\pm 2\%$ до $\pm 1\%$	$\pm 0,5\%$
Изостатическое прессование со свободно сыпучим гранулятом	$\pm 3\%$	$\pm 0,5\%$
Экструзия	от $\pm 5\%$ до $\pm 3\%$	$\pm 1,5\%$
Литье под давлением	$\pm 3\%$	$\pm 1,5\%$
Обработка резанием до и после спекания	$\pm 3\%$	$\pm 0,5\%$

Таблица 4: допуски компонентов после обжига

5.1 Сырье, керамическая масса или гранулят

Чистота, равномерное распределение зерен по размерам и со смесью, а также повторяемость являются важными факторами. Допуски с точностью $\pm 0,5\%$ в процессе сухого прессования могут быть достигнуты только после успешного распыления гранулята.

5.2 Допуски оснастки и процессы сжатия в оснастке

Неравномерное сжатие влечет за собой более высокие допуски.

5.3 Сушка

Неравномерное высушивание (в частности, экструдированных деталей) приводит к деформации «зеленых» (не спеченных) деталей.

5.4 Обработка резанием до и после спекания

Вид обработки и стабильность керамической массы влияют на точность процесса. (Параметры 5.1 и 5.4 определяют размеры и объемный вес формованного компонента перед обжигом).

5.5 Обжиг

Контроль температуры внутри печи в значительной степени влияет на формирование керамической структуры и усадку. Разница в программируемой температуре может привести к деформации компонента.

Стандартные определения и ограничения допусков для керамики установлены в DIN 40680; в основном это относится к материалам, применяемым в электроинженерии (см. также DIN 40685 [15]), но также может быть применен к другим материалам. DIN 40680 предоставляет основные допуски размеров и формы без конечной обработки, которые классифицированы по видам материала, способу производства и степени точности.

Степень точности может быть следующие: «грубо», «средне», «отлично». Компоненты с допусками размеров и формы со степенью «грубо» обычно не подходят для машиностроения. Как правило, производители керамики могут достичь более точных допусков размеров и формы, чем те что указаны в DIN 40680, не прибегая к конечной обработке. Тем не менее значительное улучшение точности возможно только при помощи обработки. DIN 17410 применяется как для электрокерамики, так и для керамических постоянных магнитов, известных как магнитотвердые ферриты, с указанием допустимых различий в прессе и вертикальном направлении прессуемых компонентов. Более точных допусков можно достичь путем шлифования.

Таблица 4 показывает общие и реалистичные допуски, получаемые без обработки керамических компонентов в зависимости от того или иного выбранного процесса формования. Как правило допуски для стандартных процессов значительно выше чем $\pm 1\%$. Новые прецизионные методы все чаще применяются в процессе формования, позволяя достичь допусков в $\pm 0,5\%$. Эта тенденция делает керамику более привлекательной за пределами ее традиционных сфер применения, таких как машиностроение, а исследования альтернативных материалов с высокотемпературными свойствами и/или хорошими износо- и коррозионно-стойкостью способствуют этому [16,17].

6. Выводы для конструирования

Технология производства керамических компонентов использует большие допуски размеров и формы нежели чем производство металлических частей. Допуски для серийного производства без конечной обработки часто больше чем $\pm 1\%$ (см. Табл. 4).

Достижение необходимых допусков зависит как от материала, так и от метода производства компонента (формования). Невозможно установить общепринятые правила. Нет и стандартных и общеприменимых правил, и пониманий по материалам, методам проверки достигаемых допусков. Все делается по усмотрению производителя. Тем не менее вся необходимая информация находится в открытом доступе. Существует две тенденции развития керамических компонентов и материалов:

1. Конечная обработка применяется все чаще, несмотря на высокую стоимость материалов для оксидной керамики, одновременно с этим конечная обработка всегда была чрезвычайно важным процессом в производстве не оксидной керамики
2. Методы производства, позволяющие достичь допусков от $\pm 0,5\%$ до $\pm 1\%$ были протестированы и в скором времени будут приняты для производства. Отчасти это позволяет достичь достаточных допусков для различных применений и создать условия для более экономичной конечной обработки

7. Приложение

Определения некоторых важных терминов, используемых в технологии производства керамики:

7.1 Сырье и керамическая масса

7.1.1 Порошковая технология для сырья.

Сырье, т.е. основные материалы для керамических изделий обычно используются в виде порошка или зерна. Они могут быть получены как из природных месторождений, так и синтезированы. Химическая чистота структуры (кристаллографической), размер и распределение зерна в синтетическом сырье воспроизводимы и поэтому диапазон свойств материала остается в пределах норм.

7.1.2 Подготовка

Методы для подготовки керамической массы по производственной формуле, т.е. составу смеси, – это помол, грануляция, смешивание и распылительная сушка.

7.1.3 Производственная формула

Формула, используемая для производства керамического материала, определяющая тип и процентный состав используемого сырья, а также добавок необходимых для процесса (вода, специальные добавки и т.д.).

7.1.4 Керамическая масса тела

Смесь, приготовляемая по производственной формуле для конкретного процесса формовки.

7.1.5 Гранулят

Жидкая, пористая или порошкообразная смесь, которая переходит в свободно сыпучее (текущее) состояние.

Процесс направлен на то, чтобы придать смесям, используемым в процессах, таких как сухое прессование, достаточный объем для свободной сыпучести (текучести) и постоянную объемную массу при наименьшем возможном насыпном объеме. Наилучшее возможное распределение зерен гранулята зависит от процесса формования и формы компонента; обычно размах распределения зерна составляет от 100 мкм до 2 мм. Наиболее важными методами являются распылительная сушка порошкообразных суспензий и дальнейшая грануляция сухого порошка.

7.2 Процесс формования

7.2.1 Сухое прессование

Смесь – свободно сыпучий неслипающийся гранулят – подается в форму и сжимается с двух сторон (осевое сжатие) до тех пор, пока не будет достигнута необходимая плотность сырья.

Преимущество: подходит для больших партий при использовании автоматических прессующих устройств.

Недостаток: осевое давление возможно только при достаточном уплотнении если соотношение высоты к диаметру прессующего элемента находится в допустимых пределах.

7.2.2 Изостатическое прессование

Прессуемая смесь сжимается со всех сторон; в обычном случае смесь заполняют и запечатывают в контейнер с эластичными стенками (напр. из резины). Затем все это прессуется в контейнере, заполненном водой.

Преимущества: наибольшее возможное сжатие даже для больших объемов керамической массы, гарантированное отсутствие растрескивания и деформации компонентов даже из-за усадки в результате обжига.

Недостатки: оснастки для данного вида прессования, как правило, очень сложные и долго изготавливаются; всегда требуется предварительная и конечная обработка. (Маленькие детали автоматически производятся большими партиями так называемым методом «сухого мешка»).

7.2.3 Экструзия

Пластичная, поддающаяся формованию керамическая масса производится путем смешивания порошка с добавками, например, жидкостями (в основном вода), а также, при необходимости, с другими добавками. Керамическая масса продавливается через матрицу и формируется в трубки или стержни.

Преимущество: производство осесимметричных деталей большой длины.

Недостаток: простые формы с довольно большими допусками.

7.2.4 Шликерное литье

Порошок смешивается с жидкостью (в основном с водой) и помещается в пористую форму, которая абсорбирует воду. Порошок оседает на стенках пористой формы (в основном из гипса), формируя твердое тело.

Преимущество: производство особо сложных крупных компонентов, литье со стержнями и покое литье.

Недостаток: сложный процесс для больших серий (автоматизирован лишь некоторых случаях).

7.2.5 Литье под давлением

Формуемая, термоустойчивая керамическая масса создается путем смешивания порошка с пластиком и пластичным материалом при высокой температуре. Смесь подается в металлическую форму, и керамическая масса выдавливается после остывания.

Преимущество: производство очень сложных компонентов малого размера, а также производство большими партиями.

Недостаток: невозможно производство крупно-объемных изделий, ограничение толщины стенки 5-10 мм.

7.2.6 «Зеленый»

В технологии производства керамики термин «зеленый» используется для обозначения сформованной керамической массы, но непрошедшей обжиг.

7.2.7 «Зеленая плотность»

Объемный вес «зеленой» керамической массы.

7.3 Сушка/обжиг

7.1.3 Сушка

Удаление влаги (в основном воды) из сформованной керамической массы

7.3.2 Предварительный обжиг («бисквитный обжиг»)

Нагрев сформованной керамической массы до температуры, при которой образуется конечная керамическая структура.

7.3.3 Обжиг

Нагрев сформованной керамической массы до температуры и плотности, при которых становится возможно требуемое взаимодействие с керамикой.

7.3.4 Горячее прессование

Одновременный нагрев и прессование позволяют производить уплотнение при сравнительно более низких температурах, чем при нагревании без давления. Для определенного типа керамических масс это единственный способ достичь высокой плотности (сырая плотность).

7.3.5 Горячее изостатическое прессование (ГИП)

Давление создается газом, нагретым до необходимой температуры.

Технология ГИП используются для уплотнения неплотных предварительно спеченных компонентов при отсутствии открытой пористости. В таком случае могут быть достигнуты идеальные свойства материала.

7.4 Обработка

7.4.1 «Зеленая» обработка (предварительная)

Обработка после формования и перед обжигом.

7.4.2 Чистовая обработка

Обработка после предварительного обжига (бисквитный обжиг) позволяет достичь минимальной стабильности обработки. Температура предварительного обжига устанавливается на таком уровне, чтобы избежать проявления усадки.

7.3.4 Конечная обработка

Обработка после окончательного обжига (обжиг при высоких температурах, спекание). Для керамики применяются алмазные инструменты или инструменты на основе карбида бора и карбида кремния.

Сноски:

- [1] Willmann, G.: Konstruieren mit Keramik – Werkstoffkennwerte. Fachber. f. Metallbearbeitung 62 (1985) 44 und Sprechsaal 117 (1984) 914
- [2] Pfeifer, K.: Bauteile aus Al₂O₃-Keramik und ihre Nachbearbeitung mit Diamantwerkzeugen. Industrie Diamanten Rdsch. 17 (1983) 222
- [3] Heimke, G.: Oxidkeramik in der Medizin. Industrie Diamanten Rdsch. 17 (1983) 49
- [4] Röttenbacher, R., Willmann, G.: Bearbeitung von Bauteilen aus reaktionsgebundenem SiSiC für den Wärmetauscher eines Sonnenkraftwerkes. Industrie Diamanten Rdsch. 15 (1981) 140
- [5] Erz, M., Hennicke, W.: Fügen von Keramik, Grundbegriffe. Science of Ceramics 11 (1981) 15
- [6] Fügen von Keramik. Internat. Koll. Baden-Baden, Dez. 1980. DVS-Bericht, Bd. 66, Dt. Verlag für Schweißtechnik
- [7] Popper, P.: The joining of industrial ceramics to metals. In (P. Vincenzini, ed.): Energy and Ceramics, S. 569, Elsevier Sci. Publ. Comp., 1980
- [8] Mayer, H.: Fügen von Oxidkeramik, cfi/Ber. DKG 85 (2008), No. 12, D23
- [9] Produktionsnahe Elektrolytentwicklung für Na/S-Batterien. a) G. Heimke, G. Willmann: BMFT-FB-T 79-57, Mai 1978; b) G. Heimke, H. Mayer, A. Reckziegel: BMFT-FB-T 82-065, Mai 1982
- [10] Salmang, H., Scholze, H.: Keramik, Bd. 2: Keramische Werkstoffe. Springer Verlag, 1983
- [11] Handbuch der Keramik, Verlag Schmid GmbH, Freiburg
- [12] Heuschkel, H., Müche, K.: ABC-Keramik. VEB Verlag für Grundstoffindustrie, 1975
- [13] Heuer, A.H. Hobbs, L.W. (ed.): Science and technology of zirconia: Advances in ceramics, Vol. 3. Amer. Ceram. Soc., Columbus, Ohio, 1981
- [14] DIN 40680: Keramische Werkstücke für die Elektrotechnik. Teil 1: Allgmeintoleranzen für Maße. Teil 2: Allgmeintoleranzen für Form
- [15] DIN 40685: VDE-Bestimmungen für keramische Isolierstoffe. Blatt 1: Einteilung, Anforderungen, Typen. Blatt 2: Prüfverfahren.
- [16] Popper, P.: Industrial Ceramics-Special, Technical or Engineering. Trans. J. Brit. Ceram. Soc. 82 (1982) 187
- [17] Altenpohl, D.: Materials in World Perspective. Springer Verlag, 1980

FRIATEC Aktiengesellschaft
Ceramics Division
Dipl.-Min. Helmut Mayer
Head of Development
Steinzeugstraße 50
68229 Mannheim, Germany
phone: +49 621 486-1406
fax: +49 621 486-251406
helmut.mayer@friatec.de
www.friatec.de

