

Лекция 14

4. Энергоэффективные материалы ограждающих конструкций

Керамические материалы

К керамикам относятся неорганические поликристаллические материалы, получаемые из сформованных минеральных масс (глины и их смеси с минеральными добавками) в процессе высокотемпературного (1200–2500 °С) спекания.

Общие сведения о керамиках

В мире современных материалов керамике принадлежит заметная роль, обусловленная широким диапазоном ее разнообразных физических и химических свойств. Керамика не окисляется и устойчива в более высокотемпературной области, чем металлы, например температура плавления карбида гафния (3930 °С) на 250 °С выше, чем у вольфрама. У распространенных керамических материалов (оксидов алюминия, магния, тория) термическая устойчивость намного превышает устойчивость большинства сталей и сплавов. Модуль упругости керамических волокон на порядок выше, чем у металлов.

В семействе керамик легко можно найти материалы как с большими, так и малыми (даже отрицательными) значениями коэффициента термического расширения. Также широк спектр материалов, среди которых есть и диэлектрики, и полупроводники, и проводники (сравнимые по проводимости с металлами), и сверхпроводники. Важнейшими компонентами современной конструкционной керамики являются оксиды алюминия, циркония, кремния, бериллия, титана, магния, нитриды кремния, бора, алюминия, карбиды кремния и бора, их твердые растворы и разнообразные композиты.

Перспективность керамики обусловлена многими факторами, среди которых наиболее важны следующие:

1. Керамика отличается исключительным многообразием свойств (многофункциональностью) по сравнению с другими типами материалов (металлами и полимерами). Среди видов керамики всегда можно найти такие, которые с успехом заменяют металлы и полимеры, тогда как обратное возможно далеко не во всех случаях.

2. Важным достоинством керамики является высокая доступность сырья, в том числе для получения бескислородной керамики типа карбидов и нитридов кремния, циркония или алюминия, заменяющих дефицитные металлы.

3. Технология получения конструкционной керамики, как правило, менее энергоемка, чем производство альтернативных металлических материалов. Например, затраты энергии на производство технической бескислородной керамики типа нитрида кремния значительно ниже, чем в производстве важнейших металлических конструкционных материалов.

4. Производство керамики, как правило, не загрязняет окружающую среду в такой мере, как металлургия, а сами керамические материалы позволяют принимать экологически оправданные технологические и технические решения. Примером может служить получение водорода высокотемпературным электролизом воды в электролизерах с керамическими электродами и электролитами.

5. Получение керамики обычно более безопасно, чем производство альтернативных металлических материалов (благодаря отсутствию процессов электролиза, пирометаллургии, воздействия агрессивных сред), а керамика со специальными электрическими свойствами позволяет создать высокоэффективные противопожарные системы и системы предупреждения взрывов (электрохимические детекторы, или сенсоры).

6. Керамические материалы по сравнению с металлами обладают более высокими коррозионной стойкостью и устойчивостью к радиационным воздействиям, что обуславливает долговечность керамических конструкций в агрессивных средах. В этой связи следует упомянуть, что попытка замены магнитной керамики в качестве элементов памяти ЭВМ на полупроводниковые интегральные элементы не удалась в космических аппаратах, так как оказалось, что полупроводниковые элементы под действием радиации перестают нормально функционировать.

7. Керамические материалы обладают большей биологической совместимостью, чем металлы и полимеры, и это позволяет использовать их в медицине как для имплантации искусственных органов, так и в качестве конструкционных материалов в биотехнологии и генной инженерии.

8. Использование керамики открывает возможность для создания разнообразных по свойствам материалов в пределах одной и той же химической композиции. Любое, даже самое малое керамическое изделие состоит из огромного числа кристаллитов (рис. 2), размер, форма и относительное расположение которых определяют их свойства. Отсюда

возникает перспектива дальнейшей микроминиатюризации приборов с использованием керамических элементов.

Интерес к конструкционной и функциональной керамике в последние годы настолько возрос, что можно говорить о своеобразном керамическом ренессансе как важнейшей тенденции современного материаловедения. Причины этого возрождения обусловлены многими обстоятельствами, и прежде всего возможностью создания новых материалов с необходимыми свойствами.

В керамической технологии используют главным образом каолины и глины, а также чистые оксиды. Под каолинами и глинами понимают природные водные алюмосиликаты с различными примесями, способные при замешивании с водой образовывать пластичное тесто, которое после обжига необратимо переходит в камневидное состояние.

Керамические изделия изготавливают способами пластического формования и полусухого прессования с последующей сушкой и спеканием.

При нагреве глины во время спекания в ней начинают последовательно происходить химические и физико-химические процессы, приводящие к полному и необратимому изменению ее структуры:

- 1) удаление химически связанной воды (500–600 °С);
- 2) разложение обезвоженной глины на оксиды (800–900 °С);
- 3) образование новых водостойких и тугоплавких минералов (1000–1200 °С);
- 4) образование некоторого количества расплава из легкоплавких компонентов глины (900–1200 °С);
- 5) образование прочного камневидного материала за счет связывания твердых частиц образовавшимся расплавом.

Состав керамики образован многокомпонентной системой, включающей:

кристаллическую фазу (более 50%) – химические соединения и (или) твердые растворы. Кристаллическая фаза является основой керамики и определяет значения механической прочности, термостойкости и других основных свойств;

• *стекловидную (или аморфную) фазу* (1–40%) – прослойки стекла, химический состав которого отличается от химического состава кристаллической фазы. Стекловидная фаза ухудшает механическую прочность и тепловые показатели, однако стеклообразующие компоненты (глинистые вещества) облегчают технологию изготовления изделий;

• *газовую фазу* – газы, находящиеся в порах. По структуре порового пространства различают керамику с открытыми, т.е. сообщающимися с внешней средой, и закрытыми порами. Наличие даже закрытых пор ведет к снижению механической и электрической прочности, росту электрических потерь.

Керамика – изотропный материал, так как представляет собой поликристаллическое вещество с мелкими беспорядочно расположенными кристаллами. Керамику с анизотропией свойств получают на основе монокристаллов. Сегнето- и пьезокерамику получают при сохранении остаточной поляризации.

Свойства керамических материалов

Свойства керамик определяются ее составом, структурой и пористостью. К *основным свойствам* керамических материалов относятся:

- плотность 1800–3900 кг/м³ и более;
- водопоглощение – для пористой керамики 6–20% по массе (12–40% по объему), а для плотной – 1–5% по массе (2–10% по объему);
- теплопроводность в зависимости от пористости и химического состава 0,8–1,16 Вт/(м·К). Сравнительно высокая теплопроводность у керамики на основе Al₂O₃ и, особенно на основе BeO;

- $\sigma_{\text{раст}}=30\text{--}300$ МПа, $\sigma_{\text{сж}}=3000$ МПа и более;
- твердость, близкая к твердости алмаза;
- высокая хрупкость;
- высокое электрическое сопротивление, отличные диэлектрические свойства;
- водо-, химическая, коррозионная и жаростойкость.

Состав керамики образован многокомпонентной системой, включающей:

кристаллическую фазу (более 50%) – химические соединения и (или) твердые растворы.

Кристаллическая фаза является основой керамики и определяет значения механической прочности, термостойкости и других основных свойств;

- *стекловидную* (или *аморфную*) *фазу* (1–40%) – прослойки стекла, химический состав которого отличается от химического состава кристаллической фазы. Стекловидная фаза ухудшает механическую прочность и тепловые показатели, однако стеклообразующие компоненты (глинистые вещества) облегчают технологию изготовления изделий;

- *газовую фазу* – газы, находящиеся в порах. По структуре порового пространства различают керамику с открытыми, т.е. сообщающимися с внешней средой, и закрытыми порами. Наличие даже закрытых пор ведет к снижению механической и электрической прочности, росту электрических потерь.

Способами воздействия на свойства керамических изделий являются химико-термическая обработка и использование покрытий, в том числе *глазури*.

Глазурь – защитно-декоративное стекловидное покрытие на керамике, закрепленное обжигом.

Прочность керамики с таким покрытием повышается на 15–20%, что связано со сжимающими напряжениями в поверхностном слое, которые возникают из-за разницы температурных коэффициентов линейного расширения керамики и глазури. Однако глазурь увеличивает электрические потери, поэтому ее не применяют в высокочастотной электрической керамике.

Изделия из керамики соединяют друг с другом теми же материалами, что и ситаллы: стеклокристаллическим цементом с последующей термической обработкой, клеями и замазками на основе эпоксидной смолы и жидкого стекла, а также металлизацией с последующей пайкой.

Классификация керамических материалов

Керамику классифицируют *по вещественному составу, составу кристаллической фазы, структуре и назначению.*

По вещественному составу разновидностями керамики являются *фаянс, полуфарфор, фарфор, терракота, керметы, корундовая и сверхтвердая керамика* и так называемая *каменная масса.*

Фаянс, полуфарфор и фарфор получают на основе жгущихся белых глин, каолинов, кварца и полевого шпата, взятых в различных соотношениях. Они обладают различной пористостью, что определяет механические свойства и водопоглощение. Водопоглощение фаянса 10–12%, предел прочности при сжатии обычно до 100 МПа. Полуфарфор по сравнению с фаянсом имеет более спекшийся черепок (водопоглощение 3–5%), и его прочность выше ($\sigma_{сж}=150\text{--}200$ МПа). Фарфор отличается еще большей плотностью (водопоглощение 0,2–0,5%) и прочностью ($\sigma_{сж}$ до 500 МПа), что позволяет изготавливать из него тонкостенные изделия.

Терракота – керамические изделия (облицовочные плиты, архитектурные детали, посуда и т.д.) с пористым черепком, обычно красного, коричневого или кремового цветов.

Керметы (керамико-металлические материалы) – искусственные материалы, получаемые спеканием металлических и керамических порошков, сочетающие свойства металлов и керамических веществ. Изделия из кермета – детали турбин и авиационных двигателей, режущий инструмент и др.

Корундовая керамика (минералокерамика) – это керамика на основе спеченного оксида алюминия, содержащего не более 2% примесей.

Сверхтвердая керамика – композиционный материал, получаемый на основе нитрида бора.

По составу кристаллической фазы различают керамику из чистых оксидов (Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , BeO , CaO и др.) и бескислородную (SiC , TiB_2 , ZrB_2 , BN , Si_3N_4 , $MoSi_2$).

По структуре (характеру строения черепка) керамика делится на *плотную* ($\rho=1-2\%$) и *пористую* ($\rho=15-20\%$). Пористые керамики поглощают более 5% воды (по массе), а плотные 1–4% по массе или 2–8% по объему. Пористую структуру имеют кирпич, блоки, черепица, дренажные трубы и др.; плотную – плитки для полов, канализационные трубы, санитарно-технические изделия.

К числу новых по структуре керамических материалов следует отнести *волокнистые керамические материалы*, получаемые спеканием, например, аморфного кварцевого волокна. Керамику с плотной структурой используют в качестве вакуумной, пористую и волокнистую – как термоизоляционный материал и материал для высокотемпературных жидкостных и газовых фильтров.

По назначению керамику делят на *конструкционную, инструментальную, техническую и бытовую*.

Конструкционная керамика производится как *строительная и машиностроительная*.

В строительстве конструкционную керамику используют как долговечный материал, стойкий против износа, нагрева и агрессивных сред. По назначению ***строительные керамические материалы*** и изделия делят следующие виды:

1. Кирпич обыкновенный, кирпич и камни пустотелые и пористые, крупные блоки и стеновые панели из кирпича и камней.

Основные свойства керамических кирпичей:

• плотность сплошного кирпича – 1600–1900 кг/м³;

• теплопроводность сплошного кирпича – 0,7–0,82 Вт/(м·°C);

• по плотности и теплотехническим свойствам керамические

кирпичи делят на три группы:

эффективные – с высокими теплотехническими свойствами плотностью не более 1400–1450 кг/м³; *условно-эффективные* – плотностью 1450–1600 кг/м³; *обыкновенный кирпич* – плотностью свыше 1600 кг/м³;

• водопоглощение кирпича марки выше 150 должно быть не менее 6%, а других марок – не менее 8% (это требует определенной пористости кирпича, иначе он станет слишком теплопроводным и будет плохо сцепляться со строительным раствором);

предел прочности на сжатие определяет марку – 250, 300 и т.д.;

- морозостойкость кирпича должна быть не менее 15 циклов попеременного замораживания и оттаивания (предусмотрены и более высокие марки по морозостойкости – Р 25, 35 и 50). Кирпич не должен иметь механических повреждений и сквозных трещин. На одном кирпиче допускается не свыше двух *отбитостей ребер* и *углов* размером по длине ребра не более 15 мм. На отдельных кирпичах может быть допущена одна сквозная трещина протяженностью не более 30 мм по ширине кирпича.

Керамический кирпич применяют преимущественно для кладки стен зданий, изготовления сборных стеновых панелей, кладки печей и дымовых труб.

2. Пустотелые камни, балки и панели из пустотелых камней.

Пустотелые элементы перекрытий включают:

- камни для армокерамических балок плотностью не более 1300 кг/м³;
- камни для часторебристых перекрытий плотностью не более 1000 кг/м³;
- камни для накатов плотностью до 1000 кг/м³.

3. Кирпич и камни керамические лицевые, ковровая керамика, плитки керамические фасадные.

Фасадные керамические изделия применяют для облицовки фасадных поверхностей стеновых панелей, блоков, цоколей зданий, лоджий, для отделки архитектурных элементов фасада зданий – поясов, карнизов – и создания декоративных панно. Для отделки сборных конструкций на заводах используют *коврово-мозаичные плитки* размерами 48x48 и 22x22 мм толщиной 2–4 мм, *плитки типа «кабанчик»* размером 120x65x7 мм, *типа брекчи* – ковры, набранные из плиточного боя. Для облицовки готовых кирпичных и бетонных стен применяют глазурированные и неглазурированные крупноразмерные (250x140x10 мм) и цокольные (150x75x7 мм) плиты. Эти плиты должны иметь спекшийся черепок и водопоглощение не более 5%.

Лицевые кирпичи и керамические камни применяют для кладки и одновременной облицовки наружных и внутренних стен зданий, возводимых из штучных изделий (кирпича, камня). Подобрав состав керамической массы и, регулируя режим отжига, можно получить кирпич белого, кремового, коричневого цветов. Выпускают *лицевые кирпичи* и *керамические камни* с гладкой, а также рельефной или офактуренной лицевой поверхностью. На лицевой грани не допускаются трещины и отколы.

Керамические облицовки относятся к числу наиболее экономичных наружных облицовок.

4. Плиты и плитки для стен и полов.

Керамические плитки для внутренней облицовки внутренней облицовки стен изготавливаются с пористой структурой, лицевая поверхность их покрывается глазурью,

которая придает плиткам водонепроницаемость и стойкость против воздействия слабых растворов кислот и щелочей.

Для внутренней облицовки стен выпускают разнообразные по форме плитки:

квадратные (150x150 мм),

прямоугольные с прямыми кромками (150x100 и 150x75 мм).

Плитки изготавливаются плоскими, рельефными, орнаментированными, с цветными рисунками.

Керамические плитки для полов изготавливают из тугоплавких и огнеупорных каолиновых глин с различными добавками и, если требуется, окрашивающих примесей. Полы из керамических плиток практически водонепроницаемы, характеризуются малой истираемостью, не дают пыли, легко моются, стойки к действию кислот и щелочей. Недостатком плиток является большая теплопроводность (полы холодные), не позволяющая применять их в жилых помещениях. Плитки изготавливают квадратные, прямоугольные, шестигранные, восьмигранные, треугольные; длина граней 50–150 мм и толщина 10–13 мм.

Керамические санитарно-технические изделия изготавливают из фаянса, полуфарфора и фарфора.

Из фаянса преимущественно методом литья производят унитазы, умывальники, смывные бачки, ванны и др. Полуфарфор и фарфор применяются для производства более тонкостенных изделий.

Поверхность санитарно-технических изделий обязательно покрывается глазурью, что придает им водонепроницаемость. Изделия санитарно-технической керамики белые, иногда светло-желтые, должны иметь правильную форму, ровную, гладкую и чистую поверхность без искривлений, равномерно покрытую глазурью; они должны быть хорошо обожжены.

5. Керамическая черепица. Керамическая черепица должна выдерживать не менее 25 циклов попеременного замораживания и оттаивания в насыщенном водой состоянии.

6. Дренажные и канализационные трубы.

Дренажные трубы производят из кирпичных высокопластичных глин.

Для этих труб водопоглощение черепка допускается не более 15%, морозостойкость – не ниже 15 циклов. Промышленность выпускает *гладкие неглазурованные трубы без раструбов* или *глазурованные с раструбом и перфорацией на стенках*. Применяют трубы при мелиоративных работах, а также при осушении.

Канализационные трубы изготавливают из пластичных огнеупорных или тугоплавких глин. Они должны выдерживать гидростатическое давление не менее 0,2 МПа. Водопоглощение черепка труб: не более 9% для I сорта и 11% для II сорта. Поверхность

труб снаружи и внутри покрывают кислотостойкой глазурью. Длина канализационных труб 800–1200 мм, внутренний диаметр 150–600 мм. Эти трубы на одном конце имеют раструб. Канализационные трубы применяют для отвода сточных и щелочных вод.

7. Теплоизоляционные, огнеупорные, кислотоупорные и другие изделия.

Для высокотемпературной теплоизоляции различных промышленных печей и тепловых агрегатов используют волокнистые керамические материалы – *алюмосиликатные волокна*, обладающие высокой прочностью, термической стойкостью и малой теплопроводностью.

Волокнистые керамические материалы способны по сравнению с кремнеземными (близкими по свойствам) материалами длительно выдерживать температуры 1650–1700 °С, не боятся примесей и обладают в 2–2,5 раза более высокой прочностью. Основными недостатками, сдерживающими применение волокнистых материалов, являются низкие прочность и коррозионная стойкость и заметное пылевыведение, что требует использования специальных объемных и поверхностных покрытий (высокотемпературные коррозионно-стойкие терморегулирующие покрытия).

Керамические огнеупорные изделия получают отливкой из расплава или обжигом минеральной смеси. Большинство керамических огнеупорных изделий (*огнеупоров*) – это керамика на основе SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO , а так же на основе SiO , Si_3N_4 и других бескислородных соединений. Возможные температуры эксплуатации оксидов, карбидов, боридов и нитридов 1600–2500 °С, жаропрочных сталей и сплавов – 800–120 °С, молибдена – 1500 °С, вольфрама – 1800 °С. Наибольшее распространение в строительстве и промышленности строительных материалов получили кремнеземистые и алюмосиликатные огнеупорные изделия.

Керамические огнеупорные изделия классифицируют *по огнеупорности, пористости, химикоминеральному составу и способу изготовления.*

По огнеупорности керамические огнеупорные изделия могут быть *огнеупорными* (1580–1770 °С), *высокоогнеупорными* (1700–2000 °С) и *высшей огнеупорности* (более 2000 °С). В зависимости от пористости керамические огнеупорные изделия подразделяются на *особо плотные огнеупоры*–пористость менее 3 %, *высокоплотные огнеупоры*–пористость 3–10 %, *плотные огнеупоры*–пористость 0–20 %, *обычные огнеупоры*–пористость 20–30 %, *легковесные огнеупоры (теплоизоляционные)* – пористость 45–85 %.

Керамические огнеупорные изделия применяют для строительства промышленных печей, топок и аппаратов, работающих при высокой температуре.

К химически стойкой керамике относится глиношамотная керамика с грубозернистой структурой, а также фарфор. Керамические кислотоупорные изделия

должны обладать *кислотостойкостью*, которая характеризует их нерастворимость в кислотах (за исключением плавиковой кислоты) и щелочах. Такие изделия изготавливают из глин, не содержащих примесей, понижающих химическую стойкость (карбонаты, гипс, серный колчедан и т.п.).

К керамическим кислотоупорным изделиям относят:

- *кислотоупорный кирпич* марок 150–250 кислотостойкостью не менее 92–96%, водопоглощением не более 8–12 %, термостойкостью не менее двух теплосмен;
- *плитки кислотоупорные и термокислотоупорные* марки 300 кислотостойкостью 96–98 %, водопоглощением не более 6–9 %, термостойкостью не менее 2–8 теплосмен;
- *трубы и фасонные части* к ним марок 300–400 кислотостойкостью не ниже 97–98%, водопоглощением не более 3–5%. Кислотоупорный кирпич и плитки служат для футеровки башен и резервуаров на химических предприятиях, а также печей для обжига серного колчедана, для устройства полов в цехах с агрессивными средами и т.п. Керамические кислотоупорные трубы применяют для перекачки неорганических и органических кислот и газов при разрежении или давлении до 0,3 МПа.

8. Дорожный (клинкерный) кирпич. *Дорожный кирпич* вырабатывают из тугоплавких глин, обжигая их до спекания. Дорожный кирпич имеет марки 400, 600 и 1000. Его водопоглощение должно быть 2–6%, морозостойкость–50– 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Дорожный кирпич можно применять для мощения дорог и тротуаров, устройства полов промышленных зданий, кладки канализационных коллекторов.

9. *Керамзит. Заполнители для легких бетонов*

Искусственный пористый заполнитель типа гравия для легких бетонов. Размер зерен 5–40 мм. Получают обжигом легкоплавких вспучивающихся глин.

Из машиностроительной керамики изготавливают поршни и головки блоков цилиндров (Si_3N_4), свечи зажигания (Al_2O_3), лопасти газовых турбин (MoS_2), вакуумстойкий смазочный материал (MoS_2) и др.

Как *инструментальный материал* используется *корундовая и сверхтвердая керамика*.

Корунд известен в технике природными и синтетическими разновидностями. Природные разновидности корунда – рубин, сапфир, топаз, аквамарин, синтетические – корундовая керамика, среди изделий которой – микролит и электрокорунд. Наиболее распространенное корундовое изделие–*микролит* (марка ЦМ-332) – получают спеканием при 1710–1750 °С смеси тонкомолотого технического глинозема и оксида магния. Микролит по свойствам превосходит другие инструментальные материалы: плотность – до 3960 кг/м³; $\sigma_{сж}$ =5000

МПа, твердость – 92–93 HRA. Он обладает значительно большей красностойкостью (до 1200 °С), твердостью и режущей способностью, чем быстрорежущие стали и твердые сплавы.

Резцы с пластинками из микролита используют для обработки сталей, чугунов, цветных металлов, неметаллов (графита, дерева, пластмасс и др.). Из микролита изготавливают также фильеры, сопла песко- и дробеструйных аппаратов, волокна и другие детали, работающие на истирание при наиболее высоких температурах. Недостатки микролита – высокая хрупкость и затрудненность крепления пластинок к державкам.

Электрокорунд (корракс) – корундовая керамика из спеченного оксида алюминия с добавками Cr^{3+} , Fe^{3+} , получаемая плавкой в электрических печах глиноземсодержащего сырья, имеющего не более 2% примесей.

Электрокорунд по твердости уступает лишь алмазу и имеет температуры плавления 1750–2050 °С. Электрокорунд широко используют в светотехнике (вместо нитей накаливания), в приборостроении (часовые камни и др.), в лазерах как излучающий элемент, в теплотехнике как огнеупорный материал и для изготовления литейных форм и стержней.

Сверхтвердые керамические материалы – композиционные керамические материалы, получаемые введением различных легирующих добавок и наполнителей в исходный *нитрид бора*. Структура таких материалов образована прочно связанными мельчайшими кристаллитами и, следовательно, они являются синтетическими поликристаллическими материалами.

Нитрид бора (*боразан*), имеющий алмазоподобное строение, является заменителем алмаза, стоек к окислению до 2000°С (алмаз начинает окисляться при 800°С).

К группе сверхтвердых керамических материалов относятся *комполит 01 (эльбор-Р)*, *комполит 02 (белбор)*, *комполит 10 (гексанит-Р)*, а также *поликристаллический нитрид бора*.

Сверхтвердые керамические материалы используются для изготовления режущих пластин к инструментам для чистовой обработки труднообрабатываемых материалов и закаленной стали (более 55 HRC).

К *технической керамике* относятся *электро- и радиотехническая керамика*, *керметы*, *абразивные керамические материалы*, *пенокерамика* и др.

По электрическим свойствам керамику подразделяют на *собственно электротехническую*, применяемую при частотах до 20 тыс. Гц, и *радиотехническую*, используемую преимущественно при высоких (более 20 тыс. Гц) частотах.

Электротехническая керамика по области применения делится на *изоляционную* (установочную), *конденсаторную* (сегнетоэлектрики) и *пьезокерамику*.

Изоляционная керамика должна иметь низкие потери, хорошие электроизоляционные свойства и прочность. Ведущую роль играет электрофарфор, в котором основные виды кристаллов представляют муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ и SiO_2 . Изоляционная керамика применяется для изготовления изоляторов, колодок, плат, каркасов катушек и др.

Конденсаторная керамика должна иметь большую диэлектрическую проницаемость, малые потери и температурный коэффициент. Основу конденсаторной низкочастотной сегнетокерамики составляют твердые растворы титанатов бария (BaTiO_3 с добавками Zr-CM1), кальция (CaTiO_3) и стронция ($\text{SrTiO}_3\text{-T-7500}$), а также станнат стронция ($\text{SrSnO}_3\text{-BK-1}$) для варикондов. Высокочастотная конденсаторная керамика изготавливается на основе рутила TiO_2 (тиконд Т-80), титанатов кальция ($\text{CaTiO}_3\text{-тиконд Т-150}$), циркония ($\text{ZrTiO}_3\text{-термоконд Т-20}$) и станнатов (станнатная керамика) кальция CaSnO_3 и магния, MgSnO_3 и др. Использование конденсаторной керамики увеличивает надежность работы и теплостойкость конденсаторов и уменьшает их размеры.

Пьезокерамика – керамические материалы с пьезоэлектрическими свойствами. Структура пьезокерамики – твердые растворы на основе титанита бария (ТБС и ТБКС), ниобата бария (НБС) и ниобата и титаната свинца (НТС). Для НТС продольный пьезомодуль d_{33} до $7 \cdot 10^{-10}$ К/Н, $\epsilon=400\text{--}1700$, максимальная температура эксплуатации 250°C .

Пьезокерамику применяют для устройств генерации и приема ультразвука; датчиков давления, ускорения, вибрации, в системах зажигания двигателей, в трансформаторах и др.

В качестве радиотехнической высокочастотной керамики используется радиофарфор (муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), корундомуллитовая керамика КМ-1 (муллит и корунд Al_2O_3), ультрафарфор ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ и Al_2O_3), алюминоксид Al_2O_3 , стеатит $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, цельзиан $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, поликор и микропит.

Миниатюризация электронной, вычислительной и СВЧ аппаратуры потребовала создания материалов с тангенсом угла диэлектрических потерь $0,0001\text{--}0,0002$, в частности нитридов бора и кремния и композиций на их основе. Причем имеется много возможностей варьирования их свойств путем изменения химического состава и структуры, а также технологии получения изделий.

Абразивные керамические материалы (абразивы) – вещества повышенной твердости, применяемые в массивном или измельченном состоянии для механической обработки (шлифования, резания, истирания, заточки, полирования и т.д.) других материалов. Естественные абразивные материалы – *кремень, наждак, пемза, корунд, гранат, алмаз* и др.; искусственные абразивные материалы – *электрокорунд, карбид кремния, боразон,*

эльбор, синтетический алмаз и др. По убыванию абразивной способности эти материалы располагаются так: синтетический алмаз, кубический нитрид бора, карбид бора, карбид кремния, карбид титана и электрокорунд. В настоящее время разрабатываются новые абразивные материалы на основе боридов и карбидов переходных металлов, а также типа *белбора*.

Основные характеристики абразивных материалов: твердость, прочность и износ, размер и форма абразивного зерна, абразивная способность, зернистость. С увеличением прочности этих материалов улучшается сопротивляемость усилиям резания, так как сопротивление сжатию у них в несколько раз больше, чем сопротивление растяжению. Прочность абразивных материалов на растяжение и сжатие снижается с повышением температуры шлифования.

Измельченный и классифицированный абразивный материал называют *шлифовальным*. Зернистость шлифовальных материалов определяется размером абразивных зерен, т.е. группой материалов по ГОСТ 3647–80: шлиф-зерно, шлифпорошки, микрошлифпорошки и тонкие микрошлифпорошки. Обозначение зернистости дополняют индексами В, П, Н и Д, которые характеризуют процентное содержание (массовую долю) основной фракции (36–60%).

Абразивные керамические материалы используются как в несвязанном виде (порошки, пасты, суспензии), так и в связанном (бруски, шлифовальные шкурки, круги, головки и др.).