

III. Науково-організаційна діяльність

УДК 330.1

В. М. Крячек, О. Б. Згалат-Лозинский, Л. И. Чернышев

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ, ПРОИЗВОДСТВА И РЫНКА МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ НА ОСНОВЕ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ (ОБЗОР)

Розглянуто результати аналізу стану досліджень, виробництва та ринку виробів із матеріалів на основі нітриду кремнію. Показано властивості і переваги цих матеріалів та виготовлених із них виробів. Наведено сучасні технології, які забезпечують одержання високоцілних виробів із заданими функціональними характеристиками. Переліковано галузі застосування матеріалів та виробів із нітриду кремнію, а також головні їх виробники.

Ключові слова: нітрид кремнію, властивості, технологія, підшипник, застосування, виробники.

Ведущее место среди керамических конструкционных материалов занимает нитрид кремния — Si_3N_4 [1], который отличается невысокими плотностью, тепловым расширением, значительными твердостью, теплостойкостью, вязкостью, сопротивлением крипу до высоких температур. Этот материал сохраняет стабильность размеров при высоких температурах. По сравнению с широко распространенными материалами на основе SiC , ZrO_2 , Al_2O_3 нитрид кремния имеет более высокие сопротивление термоудару и прочностные характеристики, практически не уступая указанным материалам по твердости — таблица 1 [2].

Таблица 1

Характеристики монолитной керамики [2]

Керамика	Плотность, г/см ³	Предел прочности, МПа	Твердость, ГПа	Метод изготовления
Si_3N_4	3,14	700	14,1	Горячее прессование
Si_3N_4	3,23	>920	13,5	Спекание под давлением
SiC	3,15	–	–	Спекание
Al_2O_3	3,86	342	19,3	Спекание и горячее изостатическое прессование
Al_2O_3	3,97	359	–	Спекание
ZrO_2	6,05	425	12,1	Холодное изостатическое прессование и спекание
ZrO_2	6,10	780	12,8	Горячее изостатическое прессование

© Крячек Віктор Маркович, канд. техн. наук; Згалат-Лозинський Остап Броніславович, канд. техн. наук; Чернишев Леонід Іванович, канд. техн. наук — наукові співробітники Інституту проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

Нитрид кремния характеризуется также повышенной термостойкостью, высокой стойкостью к различным химическим средам, например, кислотам (HCl , H_2SO_4 , HNO_3 , H_3PO_4) и щелочам (NaOH). К достоинствам этого материала относится высокий модуль упругости, полное отсутствие магнетизма, электроизолирующая способность.

Интенсивные исследования в области синтеза порошка нитрида кремния и свойств полученных из него материалов начали с середины 50-х годов прошлого века проводиться в Институте проблем материаловедения НАН Украины практически одновременно с научными организациями США и Великобританией. Результаты исследований были опубликованы в 70-90-х годах в ряде монографий и сборников видных ученых Г. В. Самсонова, Т. Я. Косолаповой, Р. А. Андриевского, Г. Г. Гнесина и других [3].

В некоторых странах выполнялись специальные программы по исследованию свойств керамики из Si_3N_4 и разрабатывались рекомендации по её использованию. Так, в 90-х годах в Великобритании была реализована программа, направленная на применение деталей из этого материала в двигателях внутреннего сгорания. Изготовление роторов и подшипников из Si_3N_4 в турбонагнетателе, например, существенно повысило технические характеристики двигателя [4]. В эти же годы активно развивались работы по созданию керамических материалов для двигателей в Японии [5].

Улучшение механических свойств нитридной керамики, таких как прочность, трещиностойкость, твердость и износостойкость в узлах трения, достигается за счет увеличения плотности, уменьшения размера зерен и равномерного распределения структурных составляющих, в том числе с наноструктурными размерами, введением в матричный материал активирующих процесс спекания добавок. Эти добавки позволяют производить жидкофазное спекание при температурах 1700–2000 °С. Уплотнение улучшается, когда жидкая фаза формируется при более низких температурах и имеет более низкую вязкость. В качестве активаторов используют следующие оксиды (отдельно или в сочетании): MgO , Al_2O_3 ; Y_2O_3 , CaO , Sc_2O_3 , La_2O_3 , HfO_2 ; TiO_2 и оксиды некоторых других лантаноидов. Наилучших результатов удалось достигнуть при применении композиции Y_2O_3 – Al_2O_3 . Активирующие добавки вводят в нитридокремниевую матрицу в количестве 0,15–5,0% (мас.) и более [6–8].

Микроструктура керамических материалов на основе нитрида кремния является преимущественно поликристаллической с аморфной связующей фазой, которая состоит из активаторов спекания, размер сегрегации ее составляет менее 100 мкм.

Керамические композиты на основе нитридов относятся к материалам, зависящим от свойств исходных порошков и их дисперсности, методов и параметров технологии.

Нитрид кремния представляет собой термодинамически устойчивое соединение с преимущественно ковалентным типом химической связки Si–N, высокой твердостью и прочностью. Для нитридных порошков, особенно наноразмерных, характерна невысокая формуемость.

Качество изделий из материалов на основе нитрида кремния зависит от технологии изготовления деталей из них и соответствующего аппаратурного оформления. Основной задачей является необходимость получения максимально возможной плотности изделий и уменьшение объема необходимой механической обработки.

Для образования нанокристаллитов в керамическом материале необходимо перед спеканием сохранить в спрессованном порошке наноструктурное состояние, предотвращающее пластическую деформацию его частиц в процессе прессования и рост зерен при спекании.

Технология компактирования материалов из нитридных порошков включает прессование и их последующее спекание.

Для снижения пористости и предотвращения нежелательного укрупнения зерен стараются обеспечивать высокую плотность прессовок, что позволяет проводить их спекание при относительно низкой температуре $T < 0,5 T_m$ (T_m – температура плавления), которая еще не вызывает интенсивной рекристаллизации материала.

Для компактирования высокодисперсных и нанопорошков используют методы импульсного прессования, которые имеют ряд преимуществ по сравнению со статическими методами, обеспечивающими высокие скорости приложения нагрузок (5–10 м/с и выше) и, как следствие, малую продолжительность процесса уплотнения порошка (тысячные доли секунды). При этом, благодаря чрезвычайно высокому давлению достигается высокая плотность прессовок (близкая к 100%). В зависимости от источника энергии применяют взрывное, электрогидравлическое и электромагнитное прессование.

Еще одним способом формования керамических порошков является метод интенсивной пластической деформации — ИПД [10]. При этом практически отсутствует пористость материала и формируется наноструктура с размером зерен до 100 нм.

Для достижения больших деформаций материала используются различные методы, среди которых наиболее распространенными являются кручение под высоким квазигидро-статическим давлением и равноканальное угловое прессование [9, 10].

Отличием ИПД от других методов деформационной обработки материалов является формирование структур с высокоугловыми разориентировками, что в сочетании с наноразмерами зерен определяет необычные свойства таких материалов [9, 11].

Одним из способов, позволяющим снизить пристенное трение без внесения посторонних веществ в материал изделия, является применение механических колебаний. При этом эффективность процесса снижения пристенного трения растет с повышением частоты колебаний вплоть до ультразвукового диапазона [12, 13].

В НИЦ “Спектр” (НОИЦ НМНТ) Томского политехнического университета разработан и запатентован в ряде стран принципиально новый коллекторный способ прессования, при реализации которого существенно снижается неравноплотность изделий практически любых форм без применения пластификаторов.

Авторами ряда патентов предлагается несколько вариантов способов формования и пресс-формы для ее осуществления [14, 15].

В условиях промышленного производства изделий из технической керамики чаще всего используют несколько проверенных временем технологий спекания, зависящих от состава материала, геометрической конфигурации, размеров изделий и условий их работы.

Самым распространенным способом формования является одноосное горячее прессование в графитовых пресс-формах, позволяющее получать детали только простой формы. Более совершенным является процесс горячего изостатического прессования (ГИП), который выполняют в газостатах, что

позволяет получать более плотные и сложные по форме изделия. Несмотря на сложность и высокую стоимость использование ГИП более экономически выгодно, чем горячее прессование.

В некоторых случаях используют также технологию спекания пористых заготовок без давления или под давлением газа (10–20 МПа) чаще в азоте. Газ способствует уплотнению материала и препятствует разложению некоторых компонентов, входящих в его состав. Кроме всего, ГИП обеспечивает более высокую твердость материала, но меньшую прочность, чем спекание под давлением газа.

В обзоре [16] сооущается о сравнительно новом методе спекания с контролируемой скоростью уплотнения RCS (Rate Controlled Sintering). Эта технология основывается на структурно-ориентированном типе спекания, который позволяет существенно ограничивать рост зерен в сравнении с традиционным спеканием. В обзоре показано, что такой метод нелинейного изотермического спекания обеспечивает получение плотных, мелкозернистых материалов из ультрадисперсных и субмикронных порошков различных веществ и их композиций.

В настоящее время интенсивно развиваются электроимпульсные методы спекания порошков. Их принцип заключается в совместном воздействии на порошковый материал кратковременным (10^{-3} – 10^{-5} сек) мощным электрическим разрядом (от 1 до 100 кДж) и давлением. Материал в зоне воздействия разогревается до весьма высоких температур вплоть до состояния плазмы. При этом давление в зоне воздействия формирует необходимые свойства получаемых изделий. Широкий диапазон изменения электрофизических параметров воздействия на порошковый материал обуславливает многочисленность таких способов [17, 18].

Некоторыми из них (например, Spark Plasma Sintering (SPS)) можно изготавливать наноматериалы без характерного роста зерна [19].

Достоинствами электроимпульсных технологий являются экологическая чистота, высокая экономичность, проведение процесса спекания без создания вакуума или инертной атмосферы.

В последнее десятилетие получили значительное развитие исследования процесса спекания перспективных керамических материалов, в котором для нагрева используется сверхвысокочастотное излучение. Экспериментально показано, что при объемном, безинерционном сверхвысокочастотном нагреве (СВЧН) в 5–7 раз снижаются удельные энергозатраты, спеченные материалы имеют однородную дисперсную микроструктуру, и, как следствие, улучшенные механические и функциональные свойства [20, 21].

Во второй половине 50-х годов прошлого века в Великобритании и других странах начались исследования по использованию нитрида кремния в газовых турбинах. Однако, результатов, имеющих практическую значимость, получено не было. Позже, когда были получены высококачественные порошки, оптимизированы составы, условия и аппаратура для спекания, изделия и детали из Si_3N_4 начали применяться в энергетике, медицине, пищевой и химической промышленности, атомных электростанциях, военной технике и т.д.

Повышенная термостойкость в сочетании с повышенной термостабильностью позволяет использовать Si_3N_4 в тепловых двигателях: запальные свечи, форкамеры сгорания, втулки и направляющие, роторы турбокомпрессоров, в силовых деталях автомобильных двигателей, в газовых турбинах (в Японии они работают при рабочей температуре 1350 °С).

Уникальное сочетание свойств нитрида кремния позволило разработать и высокоэффективные режущие инструменты, промышленное производство которых начато в 1982 г. [1, 3].

Нитрид кремния используют при изготовлении деталей конструкционного и специального назначения: химически стойких клапанов, турбинных роторов и лопаток, свечей зажигания двигателей внутреннего сгорания, муфтах, соплах, массивных штампах, мелющих тел, шаров и внутренней облицовки шаровых мельниц, инденторов для твердомеров, накладок, вставок, направляющих.

Материалы на основе нитрида кремния применяются и в устройствах, где используются пары трения скольжения (втулках, подшипниках, уплотнителях и т. д.). Они обеспечивают узлам трения низкий коэффициент трения и высокую, в том числе высокотемпературную, износостойкость.

Среди керамических материалов именно Si_3N_4 оказался материалом с идеальной комбинацией свойств для достижения самых высоких характеристик гибридных подшипников [22–24].

По сравнению с традиционными стальными подшипниками подшипники с деталями из Si_3N_4 характеризуются большими преимуществами по срокам долговечности и усталостного разрушения шариков или роликов. Меньшая плотность керамики в сравнении со сталью существенно снижает динамическую нагрузку на контакты “шарик-обойма” в высокоскоростных подшипниках, например, в шпинделях металлообрабатывающих станков и газовых турбинах. Наиболее выгодно использование подшипников с телами качения из Si_3N_4 в условиях ограниченной смазки, экстремальных температур, высоких скоростей, ультравысоком вакууме и критических ситуациях, например, при кратковременном прекращении подачи смазки в авиадвигателях.

Керамика из Si_3N_4 сохраняет высокие механические характеристики и твердость до температуры 800 °С практически полностью, затем они снижаются совсем незначительно. Тела качения в подшипниках могут работать при температурах до 1100 °С. Высокая коррозионная стойкость в сочетании с нержавеющей сталью колец позволяет использовать такие гибридные подшипники в химии, медицине, пищевой промышленности.

Различная химическая природа материалов колец и тел качения исключает их заедание, поэтому гибридные подшипники могут работать в глубоком вакууме при температуре более 250 °С с минимальным количеством смазки.

Преимущества керамических подшипников проявляются при температурах выше 300 °С (до 1000 °С), в высокоскоростном режиме, при тяжелой нагрузке. Керамические шарики обеспечивают высокую долговечность в тех случаях, когда суммарные контактные напряжения от внешней нагрузки и центробежных сил превышают $2 \cdot 10^3$ МПа [25, 26].

Очень важное достоинство таких подшипников — высокая надежность в работе вследствие оптимальной защиты от электрокоррозии. Керамические гибридные подшипники характеризуются подходящими кинематическими характеристиками, уменьшая предварительный натяг без ущерба для жесткости. Они обеспечивают плавное, бесшумное вращение. Их долговечность значительно выше аналогичных стальных подшипников — от 2–3 до 100 раз, что существенно снижает затраты на управление и обслуживание (от 2 до 5 раз) [27, 28].

Максимальный эффект использования гибридных подшипников дает их применение в точных и навигационных приборах, военной технике, в гироскопах, а также в турбинах, компрессорах, обрабатывающих центрах [28].

Обзорные работы [29, 30] обобщают результаты экспериментов, проведенных с гибридными подшипниками за последнее десятилетие. Гибридные подшипники состоят, как известно, из металлического корпуса, изготавливаемого из высоколегированной подшипниковой стали, и керамических тел качения (шарики, ролики различной геометрической формы). Гибридные подшипники с керамическими телами качения могут эксплуатироваться в условиях смазки или без ее применения. Большинство смазок могут работать в подшипниках при температурах до 180 °С, а специально синтезированные смазки могут работать при температурах до 260 °С. Подшипники могут полностью изготавливаться и из керамического материала. Такие подшипники, называемые керамическими, по сравнению со стальными имеют износостойкость в 10 раз выше, срок службы в 3–10 раз больше, имеют массу на 40% меньше. Их использование позволяет значительно повысить частоту вращения вала, в несколько раз снизить расход смазки и охлаждающей жидкости. Керамические подшипники из Si_3N_4 коррозионно устойчивы, не обладают магнитными свойствами, являются хорошим изолятором [31].

Установлено, что при одинаковой аксиальной нагрузке и частоте вращения уровень вибрации керамического шарикоподшипника ниже, чем уровень вибраций гибридного подшипника [32].

Несмотря на значительно более высокую по сравнению с металлическими подшипниками стоимость, керамические и гибридные подшипники, детали которых изготавливают из нитрида кремния, более экономичны за счет меньшей массы, повышенной долговечности и за счет экономии смазки.

В ряде стран проводятся работы по улучшению функциональных свойств материалов на основе нитрида кремния, специально предназначенных для изготовления тел качения (шариков и роликов) гибридных подшипников с использованием нанотехнологий.

В настоящее время разработаны технологии получения не только нанопорошков нитрида кремния, но и нановолокон и нанотрубок, а также способы изготовления уникальных материалов с их использованием.

В связи с тем, что нитридная керамика отличается повышенной твердостью и хрупкостью, особое внимание уделяют механической обработке готовой продукции.

Дефектный слой, (глубина которого может достигать 100 мкм), образующийся в результате такой обработки изделия, удаляют шлифованием с последующим лаппингованием (полированием). Вместо традиционного алмазного шлифования применяют и другие методы финишной обработки [33, 34].

Окончательная обработка керамических шариков для подшипников требует больших затрат, которые достигают 2/3 всех расходов на производство. Поэтому в последнее время разрабатываются специальное высокопроизводительное оборудование для финишной обработки [35–37].

Сложности в процессе изготовления и окончательной обработки изделий могут сказаться на их качестве и, в первую очередь, как уже упоминалось, на появлении поверхностных трещин или других дефектов. Эти дефекты могут привести к разрушению дорогих узлов или машин и катастрофическим последствиям.

Поэтому очень важно контролировать те свойства керамических материалов, с помощью которых можно судить об их функциональных характеристиках. В работах [2, 38] подробно анализируются различные методы испытаний ряда керамических материалов, в т. ч. нитрида кремния, на трещиностойкость. Результаты этих испытаний представлены в таблице 2.

Результаты испытаний на трещиностойкость по различным методам (K_{IC} , МПа · м^{1/2}) [2]

Материал	Методы испытаний			
	Трехточечный изгиб (a/W = 0,5)	Четырехточечный изгиб (a/W = 0,2...0,3)	SEVNB	SENB
Si ₃ N ₄	5,50 ± 0,07	5,35 ± 0,16 (5)	5,17 ± 0,06	9,12 ± 0,29
Si ₃ N ₄ + 30% SiC + 3% MgO	2,27 ± 0,14	2,40 ± 0,16 (5)	2,27 ± 0,14	2,49 ± 0,16
SiC	2,45	2,66 ± 0,20 (4)	2,61 ± 0,18	4,42 ± 0,23
SiC + 50% ZrB ₂ + 10% B ₄ C	3,70 ± 0,08	3,53 ± 0,15 (4)	3,70 ± 0,08	6,24 ± 0,37
Al ₂ O ₃	3,50 ± 0,05	3,60 ± 0,06 (5)	3,57 ± 0,22 (135)	
ZrO ₂	5,70 ± 0,17	5,90 ± 0,19 (5)	5,14 ± 0,29	9,54 ± 0,47

* В скобках указано количество испытываемых образцов.

Одними из наиболее важных характеристик материалов, используемых в подшипниках качения, является также усталостная долговечность при контакте качения и вязкость разрушения.

Методы измерений этих характеристик материалов и деталей из нитрида кремния, а также не разрушающих способов их контроля подробно описаны в работах [39–43].

Из нитридной керамики изготавливают и композиционные (в том числе многослойные [44]) материалы, ее используют также в технологиях нанесения покрытий на стальные и другие изделия.

Для предотвращения или уменьшения микросвариваемости в устройствах, где металлические детали находятся в постоянном контакте, а также в подшипниках скольжения применяются покрытия из Si₃N₄, TiN, BN и других нитридов. Покрытия могут наноситься разными способами. Толщина слоя покрытия может находиться в пределах от 0,5 до 10,0 мкм, твердость составлять 10–15 ГПа.

В последнее время на изделия начали наносить нанокompозитные покрытия из материалов на основе нитридов.

Однако, наиболее масштабное применение находят однородные плотные материалы на основе нитрида кремния в гибридных и керамических подшипниках скольжения и качения. Из таких материалов изготавливают подшипники для работы при тяжелых режимах эксплуатации, при высоких температурах, в различных условиях.

В многочисленных информационных источниках сообщается об использовании таких подшипников в авиационной технике, в железнодорожном и автомобильном транспорте, металлообрабатывающих станках, сельскохозяйственных машинах, в насосах для откачки нефти из скважин, в буровых установках и другом нефтегазовом оборудовании.

Микроподшипники (минимальный диаметр нитридных шариков в которых составляет 0,5 мм) и прецизионные гибридные подшипники используют в офисной технике, роботах, рентгеновских установках, микроэлектронике а также в быстроходных центрифугах и гироскопах.

Имеется информация об успешном использовании гибридных подшипников с нитридокремниевыми деталями в американском космическом аппарате Shuttл, где они работали в турбокомпрессорах. Через эти подшипники подают жидкий водород и ракетное топливо [45].

Следует отметить, что если в первые годы применения гибридных подшипников они использовались в экстремальных или экзотических условиях и конструкциях, то сегодня они работают и в спортивных товарах — скейтбордах и роликовых коньках.

Промышленное производство гибридных подшипников в мире началось более 20 лет назад. Мировым лидером по производству подшипников является международная промышленная группа SKF-AB, представленная в 130 странах мира. Она одной из первых начала изготавливать гибридные подшипники с шариками из нитрида кремния [46, 47]. Среди первых производителей таких подшипников были также французская SNR Roulements [46–48], американская Torrington, немецкая Kugelfischer Georg Schafer AG [47, 49].

Одним из признанных мировых лидеров в разработке и производстве сверхпрецизионных подшипников, в том числе гибридных с шариками из нитрида кремния, является американская фирма The Barden Corporation, входящая в концерн FAG Kugelfischer Georg Schafer AG [28].

Центром технологии безоксидной керамики в США является корпорация Industrial Ceramics Corp. Она выпускает детали с применением нитрида кремния для автомобилей и космических аппаратов, в частности, для изготовления роторов для надувных турбокомпрессоров [50].

Среди американских фирм, изготавливающих из Si_3N_4 элементы шарикоподшипников, следует назвать также Cerbec, Ceradyn, The Timken Company. Они производят подшипники автомобилей для сельскохозяйственной, специальной и внедорожной техники, горнодобывающей промышленности, металлургии, железнодорожного транспорта и авиакосмической техники [47, 51, 52].

Французская компания SNR Roulements занимает пятую часть европейского рынка подшипников и является стратегическим партнером известных автопроизводителей. Кроме того, они применяются в скоростных поездах, робототехнике, текстильном оборудовании, сельском хозяйстве, аэрокосмонавтике [47].

Наибольшую активность в Европе в научно-исследовательских разработках в области гибридных подшипников и производстве проявляет Германия, которая занимает первое место в мире по количеству патентов. Производством продукции из материалов на основе Si_3N_4 занимается ряд фирм.

Концерн FAG Kugelfischer Georg Schafer AG в настоящее время занимает лидирующие позиции на рынке шариковых и роликовых подшипников для автомобильной, аэрокосмической, тяжелой промышленности и машиностроения.

Кроме того, он, а также фирма Produktionformation GmbH освоили производство шариков из Si_3N_4 для гибридных подшипников [53].

Компания INA вышла на второе место в мире по производству подшипников.

Особо долговечные керамические и гибридные подшипники выпускает фирма Kooyo Deutschland GmbH [54]. По объемам производства Kooyo занимает пятое место в мире среди подшипниковых гигантов.

Немецкая фирма Bayer-Tochter CFI GmbH изготавливает из Si_3N_4 различные детали (держатели, оболочки, болты, изоляционные втулки) с высокой твердостью и прочностью для подшипников скольжения сварочных

автоматов, которые обеспечивают точное позиционирование листового металла при точечной электросварке и обладают высокой долговечностью [55].

Японская компания NTN Corp. сегодня — это второй по величине в Японии производитель подшипников с самым широким ассортиментом подшипников. С 2008 года входит в группу NTN-SNR, объединившись с французским производителем подшипников SNR Roulements [47].

На украинском рынке предлагается большая номенклатура подшипников практически всех известных брендов подшипниковой индустрии мира: SNR Roulements, NTN Corp., The Timken Company, SKFAB, INA-Schaeffler KG, FAG-Schaeffler KG, NSK Ltd, Европейской порошковой корпорации и др. С этой продукцией конкурируют подшипники российских и украинских производителей.

Выводы

Керамические материалы на основе нитрида кремния утвердились на мировом рынке. Благоприятное сочетание физико-механических и эксплуатационных характеристик, которое обнаружено у материалов на основе нитрида кремния, сделало их многофункциональными и востребованными для широкого применения во многих отраслях промышленности, энергетике, космической, ракетной и авиационной, медицинской и военной технике, товарах для спорта.

Качество таких материалов и изделий постоянно улучшается за счет оптимизации состава и структуры, совершенствования технологии, освоения новых способов окончательной обработки готовой продукции и надежных методов ее контроля и аттестации. Наиболее масштабно материалы на основе нитрида кремния применяются для изготовления режущих инструментов и деталей узлов трения и качения — в подшипниках скольжения, гибридных и керамических подшипниках различного назначения.

В последние 20 лет промышленное производство материалов и изделий из нитрида кремния освоено многими фирмами различных стран. Номенклатура подшипников и других изделий постоянно пополняется новыми видами, которые вытесняют традиционную продукцию.

В Украине существует небольшое производство гибридных подшипников с применением нитридной керамики, в основном отечественный рынок заполнен импортной продукцией. Поэтому целесообразно активизировать в стране работы по созданию нитридной керамики на основе современных подходов к формированию составов, в том числе структуры и наноструктуры, и новых технологий изготовления изделий из них, организации промышленного производства. Решение этих задач позволит достигнуть конкурентного уровня соотношения качество продукции — его цена и выйти с нею на отечественный, а в перспективе и на мировой рынки.

Приведены результаты анализа состояния исследований, производства и рынка изделий из материалов на основе нитрида кремния. Показаны свойства и преимущества таких материалов и изготовленных из них деталей. Рассмотрены современные технологии, обеспечивающие получение высокоплотных деталей с заданными функциональными характеристиками. Перечислены области применения материалов и изделий из нитрида кремния, а также основных их производителей.

Ключевые слова: нитрид кремния, свойства, технология, подшипник, применение, производители.

The state of investigations, producing and market of silicon nitride parts is reviewed properties and main advantages of silicon nitride materials and parts produced from them are shaven. The enhanced technologies that ensure fabrication high-density parts from silicon nitride with specified properties are considered. The areas of practical application of silicon nitride materials and parts are listed.

Keywords: *silicon nitride, properties, technology, bearing, application, manufacture.*

1. *Инаиси Такэтоси.* Нитрид кремния // JETI: UAP. Energy and Technol. Intell. – 1988. – Vol. 36, No. 8. – P. 131–133.
2. *Гогоци Г. А.* Трещиностойкость современной керамики и керамических композитов. I. SEVNB-метод // Порошковая металлургия. – 2004. – № 7-8. – С. 54–65.
3. *Гнесин Г. Г.* Развитие неоксидных керамических материалов на основе карбида и нитрида кремния // Там же. – 1995. – № 7-8. – С. 24–31.
4. *UK programme on engine ceramics — Resulted announced* // Adv. Ceram. Rept. – 1990. – Vol. 8. – P. 9–11.
5. *Кавамура Хидэо.* Состояние развития керамических материалов для ДВС // Кикай-но кэнкю. – Sci. Mach. – 1990. – Vol. 42, No. 5. – P. 557–564.
6. *Okamoto Y.* Influence of phase transformation on grain growth rate of silicon nitride / Y. Okamoto, N. Hirotsaki, M. Ando et al. // J. ceram. soc. Jpn int. edition. – 1997. – Vol. 105. – P. 514–516.
7. *Abe Osami.* Кинетика уплотнения и формирования микроструктуры в керамике из нитрида кремния // Нагоя коге гидзюцу сикендзе хококу // Repts gov. ind. res. inst., Nagoya. – 1991. – Vol. 40, No. 1. – P. 29–44.
8. *Furrisa J.* Sinter and sinter — HIP of silicon nitride ceramics with yttria and alumina additious / J. Furrisa, F. Castro, M. Fluents // J. mater. sci. – 1989. – Vol. 24, No. 6. – P. 2047–2056.
9. *Валиев Р. З.* Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М.: Логос. – 2000. – 272 с.
10. *Александров И. В.* Исследование дефектной структуры нанокристаллических материалов // Вестник УГАТУ. – 2001. – № 1 (3). – С. 203–206.
11. *Красильников Н. А.* Формирование ультрамелкозернистой структуры в материалах после интенсивной пластической деформации // Там же. – 2002. – С. 207–211.
12. *Андреевский Р. А.* Порошковое материаловедение. – М.: Металлургия, 1991. – 205 с.
13. *Хасанов О. Л., Соколов В. М., Двилис Э. С. и др.* Ультразвуковая технология изготовления конструкционной и функциональной нанокерамики // Перспективные материалы. – 2002. – № 1. – С. 76–83.
14. *Пат. № 2225280 Российская Федерация.* Способ прессования изделий из порошковых материалов (варианты) и устройство для его осуществления / Э. С. Двилис, О. Л. Хасанов, В. М. Соколов, Ю. П. Похолков. – от 10.03.2004 – Патентообладатель. – Томский политехн. ун-т.
15. *Пат. № 005325 Евразийской патентной организации.* Способ прессования изделий из порошковых материалов и пресс форма для его осуществления / Э. С. Двилис, О. Л. Хасанов, В. М. Соколов, Ю. П. Похолков. – от 24.02.2005 – Патентообладатель. – Томский политехн. ун-т.
16. *Скорород В. В.* Спекание с контролируемой скоростью как способ управления микроструктурной керамики и подобных спеченных материалов (Обзор) / В. В. Скорород, А. В. Рагуля // Порошковая металлургия. – 1994. – № 3-4. – С. 1–10.
17. *Хасанов О. Л.* Метод коллекторного компактирования нано- и полидисперсных порошков: учебное пособие. – Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2009. – 102 с.
18. *Aayas E.* Spark plasma sintering of Si₃N₄–B₄C / E. Aayas, A. Katemtas, G. Arslan et all. // Nippon seramikkuu kyokai gakujutsi ronbunshi. – J. Ceram. Soc. Jap. – 2008. – Vol. 116, No. 1354. – P. 727–731.
19. *Otori M.* Basic research and industrial production using the spark plasma system (SPS) // Mater. sci. eng. – 2000. – A287(2). – P. 183–188.

III. Науково-організаційна діяльність

20. *Sutton W. H.* Microwave processing of ceramics-an overview // Microwave processing of materials III: Mater. res. soc. symp. proc. – Pittsburgh, PA, 1992. – Vol. 269. – P. 3–20.
21. *Katz J. D.* Microwave sintering of ceramics // Annu. rev. mater. sci. – Palo-Alto, CA, USA, 1992. – Vol. 22. – P. 153–170.
22. *Richerson D. W.* Evolution of applicaons of silicon nitride (Si₃N₄) — based materials / D. W. Richerson, P. Stephan // Mater. sci. forum. – 1989. – P. 17–21.
23. *Bayer O.* Use of ceramic in hybride bearings subjected to very high stresses / O. Bayer, E. Streit // Keramische Zeitschrift. – 2000. – Vol. 52, No. 11. – P. 1092–1094.
24. *Wang L.* Rolling contact silicon nitride bearing technology: A review of recent research / L. Wang, R. W. Snidle, L. Gu // Wear. – 2000. – Vol. 246, No. 1-2. – P. 159–173.
25. *Advances in bearing technology* // Des. eng. (GR. Brit.). – 1989. –No. 2. – P. 81, 83–84, 86, 89.
26. *Skopp A.* Tribological behaviour of silicon nitride materials under unlubricated sliding between 22 and 1000 °C / A. Skopp, M. Woydt, K.-H. Habig // Wear. – 1995. – Vol. 183, No. 181. – P. 571–580.
27. *Stoneburner M.* Hybrid ceramic bearings: More mettle than metal // Plant Engineering (Barrington, Illinois). – 2005. – Vol. 59, No. 8. – P. 71–72.
28. *WWW. bardenbearings.com.*
29. *Wang L.* Roling contact silicon nitride bearing technology: a review of recent research / L. Wang, R. W. Snidle, L. Gu // Wear. – 2000. – No. 246. – P. 159–173.
30. *Chao L. Y.* Development of silicon nitride for roling — contact application: a review / L. Y. Chao, D. K. Shetty, J. H. Adair et al. // J. mater. education. – 1997. – No. 17. – P. 245–303.
31. *Hannoosh J. G.* Ceramic bearings enter the mainstream // Des. News. – 1988. – Vol. 44, No. 22. – P. 224–225, 228, 233.
32. *Ohta H.* Vibrations of the all-ceramic ball bearing / H. Ohta, S. Satake // J. of Tribology. – 2002. – Vol. 124, No. 3. – P. 448–460.
33. *Schmitt-Thomas K. G.* Enfluss betriebsnaher thermischer belastung auf die eigenschaften von Y₂O₃-teilstabilisicrten ZrO₂ warmedammnschichten / K. G. Schmitt-Thomas, P. Steppe // Maschinenmarkt. – 1989. – Vol. 95, No. 28. – P. 30–32, 34.
34. *Kato K.* Tribology of ceramics: [PAP.] 5th int. congr. tribol., Helsinki, June 12–15, 1989: Eurotrib'89. // Wear. – 1990. – Vol. 136. – No. 1. – P. 117–133.
35. *Kang J.* Parameter optimization by Taguchi methods for finishing advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine / J. Kang, M. Hadfield // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: J. of Engin. Manuf. – 2001. – Vol. 215, No. 1. – P. 69–78.
36. *Kang J.* The polishing process of advanced ceramic balls using a novel eccentric lapping machine / J. Kang, M. Hadfield // Ibid. – 2001. – Vol. 219, No. 7. – P. 493–504.
37. *Umehara N.* A new apparatus for finiching large size/large batch silicon nitride balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing (MFP) / N. Umehara, T. Kirtane, R. Gerlich et al. // Int. J. machine tools manuf. – 2006. – Vol. 46, No. 2. – P. 151–169.
38. *Гогоци Г. А.* Трещиностойкость современной керамики и керамических композитов. II. EF-метод // Порошковая металлургия. – 2006. – № 7-8. – С. 39–49.
39. *Piotrowski A. E.* A novel test method to measure the fracture toughness of ceramic balls used in bearings / A. E. Piotrowski, M. J. O'Brien // Fatigue and fracture of engineering materials and structures. – 2006. –Vol. 29, No. 7. – P. 558–572.
40. *Eyzop B. L.* Contact fatigue of silicon nitride / B. L. Eyzop, S.Karlsson // Wear. – 2001. – Vol. 249, No. 3-4. – P. 208–213.
41. *Levesque G.* An investigation of partial cone cracks in silicon nitride balls / G. Levesque, N. K. Arakere // Int. J. solids structures. – 2008. – Vol. 45, No. 25-26. – P. 6301–6315.
42. *Разработка конструкционных и функциональных изделий из керамики* // Jeti: Jap. energy and technol. intell. – 1989. – Vol. 37, No. 8. – С. 43.
43. *Sun J. G.* Nondestructive inspection of ceramic bearing balls using phased array ultrasonics / J. G. Sun, E. R. Koehl, S. Steckenrides at al. // Ceram. engin. science proceed. – 2010. – Vol. 30, No. 2. – P. 233–240.
44. *Ершова Н. И.* Разработка горячепрессованного многослойного материала Si₃N₄–Y₂O₃–BN / Н. И. Ершова, И. Ю. Келина // Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов: Тез. докл. 12 Всесоюзной конференции (Обнинск, 26–28 ноября 1990). М. – Ч. I. — 1990. – С. 10–15.

45. *Gibson H.* Lubrication of Space Shuttle main engine turbopump bearings // *Lubrication engineering*. – 2001. – Vol. 57, No. 8. – P. 10–13.
46. *Vilnat M.* Proulements: L'innovation permanente // *Usine nouv...* – 1989. – No. 2224. – P. 42–47, 49–50.
47. *WWW.podshipnik.in.ua*
48. *Fur extremfalle* keramische walzlager fur besondere linsatz bedinguugen // *Konstraktionspraxis*. – 1992. – No. 8. – P. 88–91.
49. *WWW.inpap.lv*
50. *Technische keramik weltweit* // *Keramz*. – 1995. – Vol. 47, No. 9. – P. 698–701.
51. *Cerbec* silicon nitride bearing components // *Amer. soc. bull.* – 1995. – Vol. 74, No. 7. – P. 30–32.
52. *High-strength ceramic* // *Ocean Ind.* – 1990. – Vol. 25, No. 1. – P. 64–67.
53. *Produktinformation*. Проспект, 18S (нем.) / *Tehnische keramic traungen schweiz.* – 1998. – 16 s.
54. *WWW.koyo.de*
55. *Keramische walzlager popp matthias* // *VDT – Zeitschrift*. – 1993, Special No. 4. – P. 60–63.