

3. Кононов М. И., Турецкий Я. М. Получение распыленного воздухом железного порошка с заданными характеристиками // Порошковая металлургия. — 1979. — Вып. 8. — С. 8—12.

4. Вознесенский В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. — М.: Финансы и статистика, 1981. — 263 с.

5. Кононов М. И., Турецкий Я. М. Влияние формы и пористой структуры частиц железного порошка на его характеристики // Порошковая металлургия. — 1981. — Вып. 8. — С. 1—4.

6. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование экспериментов при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976.

УДК 669.018.95

Е. С. ГОЛУБЦОВА, канд. техн. наук,
Б. А. КАЛЕДИН, канд. техн. наук (БГПА)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СИАЛОНОВ

Наиболее важные критерии перспективного применения конструкционной керамики — высокая прочность (>1000 МПа), повышенная надежность (модуль Вейбулла > 20), трещиностойкость (достигается армированием керамики различными волокнами и нитевидными кристаллами) и сопротивление ползучести (достигается исключением межзеренных фаз, являющихся причиной вязкого течения керамики при повышенных температурах) [1—3]. Кроме этого, сиалон обладает совокупностью свойств, обеспечивающих высокое сопротивление воздействию шлаков, различных расплавов, термических ударов и других физико-механических нагрузок. Малое термическое расширение, высокие термостойкость, прочность и кислотоустойчивость обуславливают значительные возможности использования этого материала в различных конструкциях и устройствах [4]. Благодаря этим свойствам сиалонсодержащие огнеупоры находят применение в футеровке доменных печей и установок [5].

По сравнению с SiC сиалон обладает более высокими прочностью при изгибе, трещиностойкостью, стойкостью к термическим ударам. Отмечено [6], что получение сиалонов в огнеупорах, содержащих SiC, способствует повышению их прочностных свойств, особенно при высоких температурах.

Авторами [7] разработана технология сиалонсодержащих карбидокремниевых огнеупоров для футеровки шахт доменных печей. Исследованиями данной работы установлено, что сиалонсодержащие карбидокремниевые огнеупоры обладают высокой стойкостью к воздействию шлаков и рекомендуются для футеровки нижней части шахты, распара и заплочиков доменной печи. При испытании этих материалов в расплавленном чугуна отмечен небольшой износ: 0,006—0,02 г/(см² · ч). Потеря массы у них на 1—2 порядка меньше, чем у карбидокремниевых материалов со связкой из нитрида кремния, которые за 45 мин при 1500 °С теряют 0,9 % массы. Взаимодействие расплава чугуна со связкой из сиалона не обнаружено, лишь по краям отдельных зерен SiC наблюдается тонкая (до 300 мкм) каемка из FeSi. Проникновение чугуна в огнеупор также не наблюдалось.

Горячим прессованием при 1700 °С получена керамика из смесей порошков различных огнеупоров из Al₂O₃, нитрида бора, стабилизированного 3,5 % CaO, диоксида циркония, глинозем-графита и магнезита, карбида кремния. Физические свойства огнеупорных материалов могут быть улучшены за счет добавления порошков сиалонов в исходную смесь. Однако анализ результатов по коррозионной стойкости свидетельствует о том, что для исследованных материалов введение сиалона нецелесообразно для огнеупоров, используемых в чугуно- и сталелитейном производстве. Основным препятствием является их высокая стоимость, поэтому преимущества, достигаемые при использовании огнеупоров с добавками сиалонов, должны оцениваться с точки зрения экономичности в каждом конкретном случае [8].

В зависимости от состава исходных материалов в системе Si—Al—O—N кроме сиалона образуются другие соединения (Si₃N₄, Si₂ON₂, AlN), которые также обладают высокой устойчивостью к воздействию восстановительных газов, щелочей и шлаков. Кислотоустойчивость клинкера горячего прессования, как видно из рис. 1, повышается вместе с увеличением доли Al₂O₃. Для получения только β'-фазы, не содержащей X-фазы, целесообразно добавлять AlN. В этом случае при избытке нитрида алюминия могут возникать его различные модификационные соединения, которые получают в большом количестве при добавках алюминия в кремнезем и вулканический пепел при последующем нагреве в среде азота [9], что позволяет существенно повысить свойства этих материалов.

β'-сиалон, полученный методом шликерного литья, также может быть использован для изготовления огнеупорных изделий.

В данном случае максимальные значения прочности при изгибе 660 МПа, вязкость разрушения 5,7 МПа · м^{0.5} и линейный ко-

эффицент термического расширения $3,4 \cdot 10^{-6} T^{-1}$ имела керамика с $z = 0,5$ [10].

Для уменьшения трещин в крупногабаритных изделиях при формовании и обжиге в керамику на основе SiAlON предложено вводить 0,1–10 % глинистых минералов, например каолинита, накрита и диккита; минералы увеличивают пластичность смеси. При формовании благодаря пластичности смеси уменьшается образование трещин. Эти добавки также способствуют уменьшению трещинообразования при обжиге [11].

Возможно использование сиалонов в качестве абразивных материалов, например для обработки цветных металлов и сплавов [12]. Метод горячего прессования позволяет синтезировать β -сиалоны, абразивная способность которых сравнима со свойствами

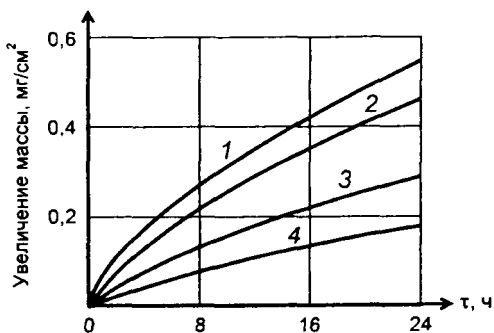


Рис. 1. Зависимость между временем окисления сиалона и количеством добавок Al_2O_3 , вводимых в поток кислорода при $1370^\circ C$ и давлении 0,1 МПа, % (по массе)

Таблица 1

Абразивная способность $\Delta\beta'$ -сиалонов, синтезированных методом горячего прессования, и некоторых других абразивных материалов [13]

Материал	Размер фракции, мкм	Δ , г
Сиалон: $z = 4,0$	100–160	0,035
	63–100	0,025
$z = 3,0$	100–160	0,024
	63–100	0,019
$z = 1,5$	100–160	0,035
	63–100	0,030
$z = 0,5$	100–160	0,007
	63–100	0,005
Зеленый карбид кремния*	100–160	0,061
Зеленый электрокорунд ЭБ-10*	100–160	0,040
Карбонитрид титана $TiC_{0,5}N_{0,5}$ **	100–160	0,030

* Плавленные зерна

** Конгломерат

образцов на основе тугоплавких соединений. В таблице 1 [13] показана абразивная способность $\Delta\beta'$ -сиалонов и некоторых других абразивных материалов. С ростом z ($0,5 < z < 4,0$) абразивные свойства сиалонов уменьшаются, но путем подбора смесей исходных шихт и режимов синтеза их можно менять.

Обладающий высокими механическими свойствами композиционный материал из α - и β -сиалонов показал высокую стойкость к эрозии при обработке частицами SiC и Al_2O_3 по сравнению с другими керамическими материалами. Микротвердость и вязкость разрушения композиционного материала составили соответственно 23 ГПа и $7,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ [14].

Далее, о влиянии различных сред на износ сиалоновых материалов. В работе [15] исследовано влияние воды на износ керамических изделий из Al_2O_3 , SiC, сиалона и ZrO_2 (в том числе стабилизированного (ЧСДЦ)). Авторами отмечено, что скорости износа всех видов керамики заметно ниже на воздухе, чем в жидкости (в воде и ди-2 этилгексилсебанате); на воздухе поверхности этих материалов защищены тройным слоем загрязнений и остатков органических веществ, но в жидкости формирование такого слоя не происходит. Следует отметить, что скорости износа всех упомянутых выше керамических материалов в воде ниже, чем в сложном диэфире, а добавление воды к диэфиру уменьшает скорости износа Al_2O_3 , SiC и сиалоновой керамики (вследствие трибохимических реакций).

Существуют и другие области применения сиалоновой керамики. Так, авторами [16] предложена электропроводная сиалоновая керамика с высокой прочностью при изгибе и способностью к обработке электрическим разрядом. Порошки силицидов Ti и Zr в определенном соотношении смешивают с порошками Si_3N_4 , Al_2O_3 и AlN. Полученную массу формуют и обжигают в течение 1 ч при $(1600 \pm 50)^\circ\text{C}$ при нормальном или повышенном давлении в среде азота, а затем 2 ч при $1700\text{—}1840^\circ\text{C}$. Из полученной керамики изготавливали фильеры для протяжки проволоки.

Реакционное спекание в среде азота позволяет получить конструкционную керамику на основе сиалонов с прочностью при изгибе 1500 МПа при 20°C и 1235 МПа при 1200°C [17].

Из порошка, полученного из суспензии $\alpha\text{-Si}_3\text{N}_4$ в растворе изопропилата алюминия, изготовлена методом горячего прессования керамика на основе β -сиалона с прочностью при изгибе $810\text{—}970 \text{ МПа}$ при 20°C [18].

После отжига дефектов (1200°C ; 1 ч; воздух), появляющихся в результате механической обработки, прочность повышалась до $1300\text{—}1600 \text{ МПа}$.

Из β -сиалона состава $\text{Si}_z\text{Al}_6\text{O}_8\text{N}_8$ (где $1 \leq z \leq 4,2$) получена прозрачная керамика с применением горячего прессования (1500—1850 °С; 1—1000 МПа; азот; выдержка до 20 ч) [19]. В интервале длин волн 3—5 мкм при толщине образца 0,6 мм светопропускание составляло ~50 %.

Важным направлением применения конструкционных керамических материалов является создание теплонапряженных элементов и узлов газотурбинных двигателей (ГТД) и двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [20].

Использование керамических деталей в ГТД дает возможность повысить на 10—30 % удельный расход топлива, сократить потребление дефицитных дорогостоящих металлов (никеля, кобальта, вольфрама и др.), применять низкосортные виды топлива. Это вызвано тем, что керамика за счет хорошей огнеупорности позволяет значительно повысить температуру газа на входе в турбину без охлаждения, в то время как суперсплавы выдерживают температуру не выше 1000—1050 °С [21].

К числу деталей, изготовление которых из керамики наиболее перспективно, относятся роторы турбокомпрессоров, форкамеры, поршни, гильзы цилиндров, вихревые камеры сгорания, детали клапанов, подшипники и т. д. [22].

Преимущество керамических роторов перед металлическими в турбокомпрессорах дизельных двигателей заключается в следующем:

- меньшая инерционность и лучшая приемистость при низких скоростях;

- меньшая толщина стенки корпуса турбокомпрессора в связи со снижением массы вращающегося ротора;

- сокращение расхода дефицитных металлов (хрома, никеля, молибдена);

- более высокая температура применения;

- потенциальное сокращение стоимости при массовом производстве.

Наилучшие результаты по сравнению с Si_3N_4 , SiC и частично стабилизированным ZrO_2 и нержавеющей сталью 21—2N при динамометрических испытаниях и в легковых автомобилях показали клапаны двигателей внутреннего сгорания, изготовленные из сиалоновых материалов VMS—653. Они имеют меньший износ, повышенные динамические характеристики, что позволяет увеличить мощность двигателей внутреннего сгорания [23].

По прочности керамика на основе сиалонов, как правило, уступает керамике на основе нитрида кремния на 15—20 %, но почти на порядок превосходит ее по стойкости к окислению при

1400 °С. Имея более низкую теплопроводность, керамика на основе сиалонов обладает лучшей теплоизолирующей способностью по сравнению с керамикой на основе нитрида кремния. Поэтому она является наиболее подходящим материалом для адиабатических двигателей.

Детали дизельного двигателя из сиалоновой керамики имели износ меньше 1 мкм после 60 тыс. км пробега [24]. Наконечники сварочных аппаратов из сиалона выдерживают более 5 млн операций без видимых признаков износа.

Спеченный β -сиалон [25] плотностью 3,23 г/см³, прочностью при изгибе 900 МПа при ~ 20 °С и 600 МПа при 1200 °С и трещиностойкостью 5,8 МПа · м^{0,5} используется в автомобильных двигателях, газовых турбинах, прижимных роликах, режущем инструменте, а также в устройствах, контактирующих с расплавленным металлом. После 50 ч выдержки при 1300 °С увеличение массы изделий составляет 0,5 мг/см².

Перспективен для изготовления деталей тепловых двигателей двухфазный керамический материал β' -сиалон-алюмоиттриевый гранат с общей формулой $Y_3Al_{5z}Si_7O_{12z}N_4$, где $z \approx 4$, и температурой образования стеклофазы ~ 1650 °С [26].

Матрицы на основе сиалона предлагают дисперсно армировать 5—50 об. % нитрида ниобия [27]. Образцы, полученные методом горячего прессования, имели прочность при изгибе 400—700 МПа и $K_{Ic} = 10—17$ МПа · м^{0,5}, которые мало изменялись от 20 до 1500 °С. Ротор из этой керамики проработал при температуре газов от 1300 до 1500 °С в течение 1000 ч без видимых изменений при скорости 30 тыс. об/мин.

Высокотемпературные свойства сиалоновой керамики, применяемой для высокотемпературных двигателей, могут быть улучшены путем кристаллизации стеклофазы. В зависимости от состава продуктами кристаллизации могут стать $Y_2Si_2O_7$ или $Y_3Al_5O_{12}$ (алюмоиттриевый гранат); в последнем случае содержание стеклофазы уменьшается до минимума. Рекристаллизованная сиалоновая керамика вплоть до 1200 °С сохраняет прочность (400 МПа) неизменной; даже при 1400 °С материал имеет 75 % от прочности при ~ 20 °С [28].

Как отмечалось, сиалоновые фазы допускают замещение более половины атомов Si и N атомами Al и O с сохранением кристаллической решетки β -нитрида кремния, что может быть использовано для управления свойствами при создании инструментальной керамики. Как правило, сиалон имеет физические свойства, сходные с нитридом кремния, в частности низкий КТЛР. β' -фаза с $z = 3$ имеет

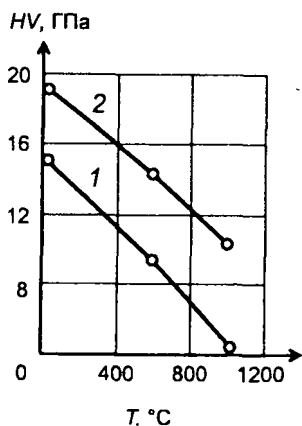


Рис. 2. Изменение твердости HV при повышении температуры для β -сиалона (1) и композиции 50 % α - и 50 % β -сиалона (2)

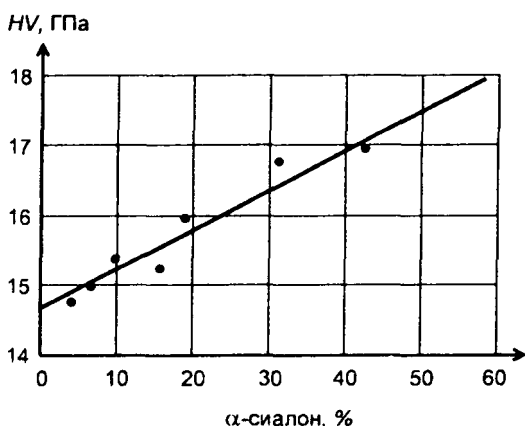


Рис. 3. Зависимость твердости HV от состава композиции α - и β -сиалона

КТЛР $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, в то время как β -нитрид кремния $-3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При этом химические свойства меняются в сторону оксида алюминия [29].

В настоящее время внимание исследователей нацелено на использование α -сиалоновых материалов для режущей керамики, имеющих более высокие твердость и прочность при повышенных температурах по сравнению с материалами на основе β -сиалонов (рис. 2, 3) [30].

α - и β -сиалоны идеально совмещаются друг с другом, и их композиции могут быть изготовлены с различным соотношением из соответствующих смесей оксидных и нитридных порошков [31, 32].

Перспективы использования композиций α - и β -сиалонов в качестве инструментального материала связаны с тем, что такие материалы характеризуются повышенной твердостью при равной с β -сиалонном прочности и эта разница сохраняется до высоких температур.

Дальнейшее исследование этого класса материалов позволит обеспечить получение такого исходного состава, который в начальный момент спекания обладает высокой пластичностью, позволяющей проводить уплотнение без внешнего давления только за счет капиллярных сил, и в то же время после прохождения всех реакций образуется материал, обеспечивающий минимальную деформируемость до температур, сопоставимых с температурами спекания.

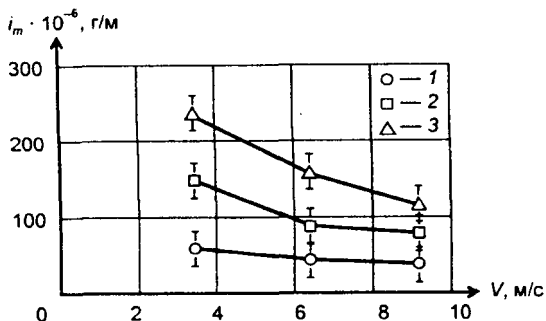


Рис. 4. Приведенный массовый износ i_m сиалона в контакте с чугуном в зависимости от скорости скольжения v при нагрузке: 1 — 710 Н; 2 — 1200 Н; 3 — 1600 Н

Во всем мире интенсивно изучается поведение керамики в парах трения с керамикой и металлами. Исследования контактной выносливости стальных и керамических головок клапанов двигателей внутреннего сгорания в месте контакта с толкателем показали, что головки из керамики на основе сиалона не повредились даже после 1000 ч испытаний, в то время как на поверхности стали образовывались микропиттинги глубиной до 20 мкм, а на поверхности керамики из частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ) — 5 мкм после 400 ч испытаний [33].

Отличную износостойкость в сочетании с низким коэффициентом трения в отсутствие антифрикционных присадок к маслу показали толкатели из сиалона в узле сопряжения кулачкового вала с толкателем в двигателях внутреннего сгорания. В толкателях из ЧСДЦ происходило образование ямок, которые увеличивали трение и износ [34].

Влияние условий трения (скорость, нагрузка) на величину и вид износа было исследовано на примере керамики Si—Al—O—N (два блока) в контакте с чугуном (диск) [35].

Результаты, показанные на рис. 4, свидетельствуют о том, что чем выше нагрузка, тем выше скорость износа. Причем с увеличением скорости трения износ уменьшается до некоторого предела, а потом этот эффект исчезает, комбинированное влияние на износ нагрузки и скорости можно объяснить изменением соотношения механизмов изнашивания: хрупкого разрушения и пластической деформации, доля которых в общем балансе изменяется с изменением условий эксплуатации.

Так, фрикционный нагрев, увеличивающийся с повышением скорости, должен увеличить долю пластической деформации, а

повышение нагрузки — вероятность хрупкого растрескивания материала. Соотношение механизмов изнашивания тем очевидней, чем выше контактная нагрузка. Наблюдаемый порог влияния скорости связан, вероятно, с тем, что после него механизм пластической деформации становится доминирующим и материал как бы размазывается по дорожке трения.

Наиболее эффективным, хотя и наиболее дорогостоящим и технологически сложным является армирование керамики керамическими волокнами или нитевидными кристаллами. Углеродное волокно повышает работу разрушения керамики на основе нитрида кремния, в том числе сиалонов, в 250 раз, а вязкость разрушения — примерно в 4 раза.

Перспективна разработка в области инструментальных материалов — упрочнения материалов монокристалльными волокнами («усами») карбида кремния. Оценки разных работ [36, 37] указывают на важную роль образования мостиков между противоположными берегами трещины. Возможно также рассеяние энергии при выдергивании волокон из матрицы и отклонение трещин. Кроме того, введение «усов» потенциально способно значительно улучшить высокотемпературную прочность керамики.

Армированные инструментальные материалы обладают износостойкостью керамики, прочностью и термостойкостью твердых сплавов. Волокна служат для рассеивания механической ударной нагрузки и снижения термической за счет повышения теплопроводности.

Трещино- и износостойкий керамический инструментальный материал, разработанный [38], включает 5—45 % нитевидных кристаллов SiC, 3—20 % (в пересчете на Zr) соединения Zr, остальное β -сиалон ($\text{Si}_{6-z}\text{Al}_z\text{O}_2\text{N}_{6-z}$, где $0 < z \leq 1$), содержащий Zr, Si, Al, O, N, а также примеси Y, Mg, Ca и PЗЭ. Предусмотрено нанесение на данный материал покрытия Al_2O_3 толщиной 0,1—5 мкм с промежуточным слоем толщиной меньше 3 мкм из AlN или AlON. Данный материал рекомендован для скоростной обработки резанием стали, чугуна, сплавов на основе никеля, алюминия, титана.

Сообщается о получении композиционного керамического материала с матрицей из сиалона, армированной нитевидными кристаллами SiC с $K_{Ic} = 56 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$ [39].

Предлагаются и другие технологии получения армированных SiC, TiN, а также боридами сиалоновых материалов [40—46].

Авторами [47] предложен керамический материал на основе α - и β -сиалонов, предназначенный для вкладышей режущих инструментов с высокими вязкостью разрушения и инертностью. Материал содержит межзеренную прослойку и необязательно инерт-

ную огнеупорную фазу. При этом предложенная керамика имеет поверхностный слой со значительным содержанием алюминия и кислорода.

Как известно [48], замена твердого сплава на нитрид кремния позволяет сократить время резания на 90 %, а общую стоимость обработки — на 84 % за счет увеличения скорости резания до 1000 м/мин. Однако существенным недостатком этой керамики является низкая стойкость к окислению, что отсутствует у сиалонов. Резцы из сиалонов ($\sigma_{изг} \geq 900$ МПа, НРС 89–91) имеют низкий износ и хорошие характеристики при резании стали по сравнению с резцами из Si_3N_4 . Твердость сиалонов можно повысить до НРС 93 путем изготовления их из смеси α - и β -сиалонов, дисперсионно упрочненной боридами [46].

Сиалоновая керамика ($\alpha + \beta$), разработанная совместно фирмами «Shinagawa Refractories Co., Ltd.», «Research Development Corp. of Japan» и Национальным институтом исследования неорганических материалов, используется для изготовления режущих инструментов, роликов, горелок, лопаток, матриц для экструзии и волочения, установок для выплавки металлов [49]. Состав керамики $\text{Me}_x(\text{Si}, \text{Al})_{12}(\text{O}, \text{N})_{16}$, где $x = 0-2$. Если Me — это Y , то $x = 0,2-0,3$. Керамика имеет плотность 3,22 г/см³, прочность при изгибе 900–1200 кПа, модуль упругости $3,1 \cdot 10^5$ кПа, ТКЛР — $3,2-3,4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$, трещиностойкость 6,3–8,0 МН/м^{3/2}.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Wilczewska Teresa, Smolik Halina.* Siалony — tworzywa z grupy ceramiki specjalnej // Mater. Ogniotr. — 1989. — Vol. 41, № 4. — P. 90–93.
2. *Brook R. J.* The potential and problems of engineering ceramics (abstract) // High temperature Alloys: Their Exploitable Potential: Proc. Petten. Int. Conf., 15–17 Oct. 1985. — London; New York, 1987. — P. 503–505.
3. *Drew R. A. L.* Silicon nitride and sialon ceramics — a review // Can. Met. Quart. — 1988. — Vol. 27, № 1. — P. 59–64.
4. Сиалонсодержащий материал на основе овручского кварцита, алюминиевой пудры и кокса / Н. В. Питак, Р. М. Федорук, Р. М. Хмеленко и др. // Огнеупоры. — № 6. — 1992. — С. 5–6.
5. *Keran Corley L., Brown Roy W.* World report on silicon carbide blast furnace refractories // Iron and Steel Eng. — 1987. — Vol. 64, № 12. — P. 35–42.
6. *Morrison F. C. R., Maher P. P., Hendry A.* In-situ formation of sialons in refractories containing silicon carbide // Trans. And J. Brit. Ceram. Soc. — 1989. — Vol. 88, № 5. — P. 157–161.
7. Сиалонсодержащие карбидокремниевые огнеупоры / Н. В. Питак, Р. М. Федорук, Р. М. Хмеленко и др. // Огнеупоры. — 1992. — № 5. — С. 6–8.

8. *Ferguson P., Fletcher F. J., Taylor R. J., While S. I.* Research and development into high performance refractory materials incorporating sialon ceramics, and sialon ceramic coatings // *Technical Ceramics: Proc. Final Contractors Meet. Res. Area «Techn. Ceram.»*, Commiss. Eur. Commun., Directorate — Gen. Sci., Res. and Dev., Brussels, 9—11 Dec., 1986. — London; New York, 1988. — P. 43—50.

9. Огнеупоры и их применение / Под ред. Я. Инамур — М.: Metallurgy, 1984. — 418 с.

10. *Suzuki Suguru, Nasu Takakuni, Hayama Seiji.* Ozawa masakumi mechanical and thermal properties of β -sialon prepared by slip casting method // *J. Amer. Ceram. Soc.* — 1986. — Vol. 79, № 6. — P. 1685—1688.

11. Заявка 1249649 Японии, МКИ⁴ С 04 В35/00/Саяно Акио, Нумадзири Юити; К. К. Тосиба. — N 63—74712; Заявл. 30.03.88; Опубл. 04.10.89 // Кокай токк кохо. Сер. 3(1). 1989. — 64. — С. 261—265.

12. Абразивная способность β -сиалонов, синтезированных методом горячего прессования / Г. П. Швейкин, Ю. А. Смольников, Т. А. Тимошук и др. // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 1999. — № 5. — С. 20—22.

13. *Швейкин Г. П.* Карботермическая переработка лейкоксена Ягерского нефтетитанового месторождения // Проблемы создания специальных видов керамики на основе природного сырья. — Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 1994. — С. 13—19.

14. *Wada Shigetaka, Watanabe Haoyoshi, Ukyo Yoshio* // Фунтай оёби фум-мацу яким. *J. Jap. Soc. Powder and Powder Met.* — 1990. — Vol. 37, № 7. — P. 1074—1077.

15. *Lancaster J. K., Mashal V. A.-H., Atrins A. G.* The role of water in the wear of ceramics // *J. Phys. D.* 1992. — Vol. 25, № 1A. — P. A205 — A211.

16. Заявка 2157169 Японии, МКИ⁵ С04 И 35/58, В21 С 3/02 / Накано Такэхито, Идэ Хидэо, Носэ Тэцуро, Мацубаяси Сигэхару; Син. Ниппон Сэйтэцу к. к. — № 63-309823; Заявл. 09.12.88; Опубл. 15.06.90 // Кокай токк кохо. Сер. 3(1). — 1990. — 36. — С. 391—395.

17. *Sorrel G. G.* // *J. of the Australian Ceramic Society.* — 1983. — 19. — № 2. — P. 48—67.

18. *Kishi Kazushi, Umabayashi Seiki, Tani Eiji, Kobayashi Kazuo, Nakamura Hiroshi.* Некоторые свойства β -сиалона и композита β -сиалон—SiC, отожженных под высоким давлением // *J. Ceram. Soc. of Japan.* — 1987. — Vol. 95, № 4. — P. 450—452.

19. Пат. 4438051 США, МКИ С04 В35/58, НКИ 264/12. Process for producing a translucent β -sialon sintered product / National Institute for Researches of Inorganic Materials / Mitomo M., Moriyoshi Y., Sakai T. a. a. № 387779. Заявл. 14.06.82. Опубл. 20.03.84.

20. *Godfrey D. J.* The use of ceramics in diesel engines // *Nitrogen Ceramics: Proc. NATO Adv. Study Inst., Canterbury, 1976.* — Nordhoff—Leyden, 1977. — P. 647—652.

21. *Келин Ю. И.* Керамика в двигателестроении // *Огнеупоры.* — 1992. — № 4. — С. 34—35.

22. *Mitomo Matoru, Tajuma Yo.* Sintering, properties and applications of silicon nitride and sialon ceramics // ниппон сэрамиккусу кэкай гакудзюцу ромбунси // *J. Ceram. Soc. Jap.* — 1991. — Vol. 99, № 10. — P. 1014—1025.

23. *Wills Roger R., Southam Robert E.* Ceramic engine valves // *J. Amer. Ceram. Soc.* — 1989. — Vol. 72, № 7. — P. 1261—1264.
24. *Perry J.* Ceramics as everyday engineering components // *Refractories Journal.* — 1985. — № 6. — P. 6—9.
25. Sintered β -sialon // *Techno Jap.* — 1989. — Vol. 22, № 5. — P. 105.
26. *Spacle C. J., Jameel N. S., Thompson D. P.* The fabrication of two phase β' -sialon — YAG ceramics // *Ceram. Compon. Engines: Proc. 1-st Int. Symp., Hakone, Oct. 17—19, 1983.* — London; New York, 1986. — P. 343—349.
27. Заявка 60-33263 Японии, МКИ C04B 35/56.35/58. Керамический конструкционный материал. К. к. Хитати сэйсакус // Т. Миси, Ю. Такэда, К. Нагаяма и др. 58-137710; Заявл. 29.07.83; Оpubл. 20.02.85.
28. Sialon ceramics for high temperature engines; an illustration of grain boundary engineering / *Butler E., Lumby R. J., Szweda A., Lewis M. N.* // *Ceram. Compon. Engines: Proc. 1-st Int. Symp., Hakone, Oct. 17—19.1983.* — London; New York, 1986. — P. 159—169.
29. *Lumby R. J., North b., and Taylor A. J.* // *Ceramics for High—Performance Applications: II* / Ed. by J. Burke, E. Lenoe, and R. N. Katz. — Brook-Hill, Chestnut Hill, Mass. — 1978. — P. 893—906.
30. Керамические инструментальные материалы / Г. Г. Гнесин, И. И. Осипова, Г. Д. Ронталь и др.; Под ред. Г. Г. Гнесина. — Киев: Техника, 1991. — 338 с.
31. *Cao G. Z., Metselaar R.* α -sialon ceramics // *Klei/Glas/Keram.* — 1988. — Vol. 9, № 7. — P. 186.
32. Пат. 5413972 США, МКИ⁶ C04 B35/58. Sialon composites and method of preparing the same Hwang Chinman J., Beaman Donald R., Susnitsky David W.; The Dow Chemical Co. — № 178377; Заявл. 23.12.93; Оpubл. 09.05.95; НКИ 501/98.
33. *Asnani M., Southam R. E., Wills R. R.* / *SAE Technical Paper Series.* — 1987, № 870419. — P. 1—9.
34. *Benson J., Eyre T. S.* The use of ceramic finger followers in O. H. C. systems // *British Ceramic Proceedings.* — 1986. — № 37. — P. 303—326.
35. *Conway J. C., Panborn R. N., Cohen P. H. et al.* Dry sliding wear behavior of an Si—Al—O—N ceramics // *Wear.* — 1988. — Vol. 126, № 1. — P. 79—90.
36. *Dauchier M., Bernhart G., Bonnet C.* Properties of silicon carbide Based-ceramic composites // *30th Nat. CAMPE Symp. And Exhib., Anaheim, Calif., March 19—21, 1985.* — Vol. 30. Covina. Calif. — 1985. — P. 1519—1525.
37. Пат. 4816428 США, МКИ⁴ C 04 B35/58. Process for producing high strength β -sialon-silicon carbide composite / Kishi Kazushi, Umebayashi Seiki, tani Eiji Kobayashi Kazuo; Agency of Industrial Science and Technology. — № 8024343; Приор. 14.02.85, № 6027828 (Япония): НКИ 501/89.
38. Заявка 63156701 Японии, МКИ⁴ C 04 B 35/58 / Окуно Коясу, Ватанаба Сити; ниппон Токусю тог к. к. — № 61-291632; Заявл. 09.12.86; Оpubл. 29.06.88 / Кокай токк кохо. — Сер. 3(1). — 1988. — 33. — P. 475—482.
39. *Jack K. H.* Sialon tool materials // *Towards Improved Performance tool Mater. Proc. Int. Conf., Teddington, 28—29 Apr. 1981, London, 1982.* — P. 122—126.

40. Wang H., Cheng Y.-B., Muddle B. C., Cao L., Yen T. S. Microstructure and mechanical properties of nanoscale SiC/Ca α -SiAlON composites // J. Mater. Sci. — 1997. — 32, № 12. — P. 3263—3269.
41. Заявка 375271 Япония, МКИ⁵ С 04 И 35/58¹ / Циудо Якухиро, Йонэдзавэ Такэюки Цугэ Якихико; К. к. Тосиба. — ¹¹ -329510. Заявл. 21.12.89; Опубли. 29.03.91 // Кокай токк кохо. Сер. 3(1). — 1991. — 16. — С. 433—440.
42. Пат. 4826791 США, МКИ⁴ С 04 В 35/58 Silicon carbide — alpha prime sialon / Mehrotra Pankaj K., Peters Klaus— Markus, Swiokla Joyce L.; Kennametal Inc. — № 56096; Заявл. 29.05.87; Опубли. 02.05.89; НКИ 501/89.
43. Nordberg Lars-Olov. α -sialon ceramics and Y- α -SiAlON composites; composition, microstructures and properties // Chem. commun.: Univ. Stockholm. — 1987. — № 2. — P. 1—124.
44. Li Quang, Cao Lian, Jiang Dayu, Zhang Cheng, Yan Dongshen. Preparation of β -SiAlON / nano-SiC composites // J. Mater. Sci. Lett. — 1977. — Vol. 16, № 19. — P. 1620—1621.
45. Ронталь Г. Д., Федосеев В. В., Шапиро Л. Д. и др. Области применения керамического лезвийного инструмента из силинита—Р // Новые сверхтвердые материалы: Прогрессивные технологии их применения: Тез. докл. Всесоюзн. конф., Киев, 9—12 сент. 1985 г. — Киев: Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1985. — С. 184—185.
46. Заявка 59-232970 Япония, МКИ С 04 В 35/58. Керамика на основе сialона с высокой износостойкостью. Мицубиси Киндзоку к. к. / К. Нисигаки, Т. Ясудзима, А. Танасэ и др. № 58-83783; Заявл. 13.05.83; Опубли. 27.12.84.
47. Пат. 4880755 США, МКИ⁴ С 04 В 35/58 / Mehrotra Pankaj K., Swiokla Joyce L.; Kennametal Inc. — № 333716; Заявл. 03.04.89; Опубли. 14.11.89.
48. Blum S. L., Kalos Stephen H., Wachtman J. B. Cutting Tools, heat engine ceramics begin growth curve // Ceram. Industrie (USA). — 1985. — Vol. 125, № 7. — P. 22—24, 36.
49. $\alpha + \beta$ type sialon ceramics // New Mater. Dev. Jap. 1987. — Tokyo, 1987. — P. 117—120.

УДК 669.714

А. М. МИХАЛЬЦОВ, канд. техн. наук (БГПА)

ПОЛУЧЕНИЕ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ИЗ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА

Республика Беларусь располагает ограниченной сырьевой базой. В небольших количествах имеются железные и полиметаллические руды. Концентрация металлов в них невелика, и разработка месторождений экономически нецелесообразна. Вместе с тем на ряде производств образуются отходы, содержащие значительные количества железа, хрома и некоторых цветных металлов. Это