

Д. т. н. Ф. И. Пантелеенко¹, Н. А. Шмурадко¹, Жэн Пенчен²,
А. Ф. Пантелеенко¹, к. т. н. Е. Ф. Пантелеенко¹, В. Т. Шмурадко¹ (✉),
к. т. н. В. А. Кусяк³, к. т. н. Р. Ю. Попов⁴

¹ Белорусский национальный технический университет (БНТУ),
Минск, Республика Беларусь

² Yantai Huaheng Energy Conservation Technology Co. Ltd, Кунтай

³ Филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический
институт» (НИПИ), Минск, Республика Беларусь

⁴ Белорусский государственный технологический университет
(БГТУ), Минск, Республика Беларусь

УДК 666.76:669.21/23

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ПРОФИЛЬНЫХ КЕРАМООГНЕУПОРНЫХ СПЕЦИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДРАГМЕТАЛЛОВ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ШЛАМОВ. Сообщение 2*

В сообщении 1 рассмотрена и реализована аналитическая системно-дифференцированная принципиальная блок-схема создания профильных импортозамещающих алюмосиликатных материалов-изделий-спецтиглей, предназначенных для начального и поэтапного проведения химико-термического процесса (ХТП) извлечения драгметаллов. В сообщении 2 представлена материаловедческо-технологическая блок-схема физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии — структурирования как алюмосиликатных спецтиглей, так и периклазошпинелидных и форстеритсодержащих материалов-изделий (шерберов и купелей), предназначенных для заключительных этапов ХТП извлечения драгметаллов из минеральных техногенных шламов.

Ключевые слова: блок-схема, химико-термический процесс (ХТП), извлечение драгметаллов, техногенные шламы, керамоогнеупорные изделия, фазовая диаграмма состояния.

Согласно анализу проблемных химико-термических процессов (ХТП) и механизмов извлечения драгметаллов из минеральных техногенных шламов создана материаловедческо-технологическая концептуальная блок-схема разработки, исследования, создания и реализации (РИСР) физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии — структурирования керамоогнеупорных термо- и химически стойких импортозамещающих материалов, изделий и технологий производства спецтиглей, шерберов и купелей на основе алюмосиликат-

ных, периклазошпинелидных и форстеритсодержащих оксидных систем, обеспечивающих ХТП извлечения драгметаллов.

В рамках ранее выполненных разработок создана принципиальная системно-дифференцированная аналитическая блок-схема поэтапного материаловедческо-технологического передела минерального сырья в профильные материалы-технологии-изделия-инновационные производства [1–3]. Это позволило в настоящем исследовании определить и сформировать основные логистические блок-схемы последовательного превращения исходного техногенного минерального сырья в заданные термо- и химически стойкие огнеупорные материалы-изделия и технологии, обеспечивающие производство спецтиглей, шерберов и купелей для ХТП извлечения драгметаллов из минеральных шламов.

Согласно результатам микрорентгеноспектрального и фазового анализов зарубежных огнеупоров, используемых в технологии извлечения драгметаллов, установлено, что тигли имеют алюмосиликатный состав, а шерберы и

* Сообщение 1 опубликовано в журнале «Новые огнеупоры» № 4 за 2024 г.



В. Т. Шмурадко
E-mail: shvt1@tut.by

купели содержат периклаз. Кроме того, определены и реализованы наиболее вероятные химические и структурно-фазовые составы для спецтиглей: силлиманитовые, андалузитовые, кианитовые, корундовые, муллитовые, муллитокремнеземистые, муллитоглиноземистые, для шерберов и купелей магнезитопериклазофорстеритопшинелидные с примесями SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 и CaO .

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

При разработке материалов использовали экспериментально-аналитические методы исследования с комплексным применением научно-исследовательского и экспериментально-технологического лабораторного оборудования. Текущие МРСА, РФА и структурно-фазовые анализы исходных и технологически обработанных оксидных систем проводили на специализированном рентгеновском и электронно-оптическом оборудовании, исследования жидкостного трибохимического и механохимического помола — диспергирования, активирования, гомогенизации и образования золь-гелей, вызывающие реологические превращения в порошковых оксидных системах, выполняли в керамическом спецаттриторе А-5; этот класс оборудования предназначен для получения активированных высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (АВКВС) с заданной технологической реологией. Спецтигли формовали на установке сухого изостатического прессования (УСИП-100/300), шерберы и купели — на гидропрессах под давлением 50–300 МПа в специализированных технологических пресс-формах. Предварительную термообработку и подготовку к спеканию заготовок спецтиглей, шерберов и купелей проводили в сушильном вакуумном шкафу, высокотемпературную обработку заготовок — в электропечи согласно разработанным температурно-временным режимам и диаграммам спекания.

Основными фазовыми компонентами при разработке и создании профильных спецтиглей, шерберов и купелей являлись муллитокремнеземистые и муллитокорундовые твердые растворы — для спецтиглей, магнезитопериклазовые, магнезитопериклазошпинелидные и периклазофорстеритовые системы — для шерберов и купелей.

В производстве периклазовых материалов изделий используют в основном природный минерал — каустический магнезит (MgCO_3), из которого обжигом, спеканием или плавлением получают бесцветный кристаллический оксид магния (периклаз), являющийся единственным поликристаллическим оксидом с пикнометрической плотностью $\rho = 3,55 \pm 3,65 \text{ г/см}^3$. Он име-

ет структуру галита (типа периклаза), которая в зависимости от содержания примесей характерна для двухвалентных оксидов: CaO , BaO , MnO , FeO , SrO и др. При высоких температурах в MgCO_3 возникают катионные вакансии, на воздухе MgO стабилен; до температуры плавления (2825°C) полиморфные превращения отсутствуют. Как основной оксид он обладает высокой контактной устойчивостью к оксидам железа и основным металлургическим шлакам. Для производства огнеупоров периклаз получают при обжиге, спекании или плавлении каустического магнезита, гидроксидов, содержащихся в минеральном сырье в виде брусита $\text{Mg}(\text{OH})_2$, паст, получаемых из морской воды [4].

В качестве научной основы настоящего исследования принимали законы физики и химии твердого тела, коллоидной химии, физической химии и физико-химического анализа, представляющего химическую термодинамику и химическую кинетику техногенной переработки минерального сырья, принципы структурной инженерии, а также анализ профильных диаграмм состояния (рис. 1–7). Такой анализ позволяет с учетом эксперимента определять состав, структуру и свойства исходного и перерабатываемого минерального сырья, обеспечивающего выполнение последовательной экспериментально-аналитической разработки и создание заданных структурно-фазовых комплексов для профильных материалов-изделий: спецтиглей, шерберов, купелей.

Анализ фазовых диаграмм состояния

Системы $\text{MgO}-\text{FeO}$ (Fe_2O_3) показывают, что оксид магния образует непрерывный ряд твердых растворов (магнезиовюститов) с оксидом железа. Температура плавления таких растворов остается высокой ($\sim 2000^\circ\text{C}$) даже при 50 %-ном содержании в них FeO или Fe_2O_3 (см. рис. 1). В окислительной среде MgO и FeO образуют магнезиоферрит ($\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ с $t_{\text{пл}} = 1713^\circ\text{C}$). Под воздействием высоких температур периклаз и магнезиоферрит взаимно растворимы, при понижении температуры растворимость уменьшается (см. рис. 2). Присутствие твердого раствора магнезиоферрита в периклазе повышает энергию кристаллической решетки MgO , ускоряет его рекристаллизацию и спекание. Полученные периклазовые системы становятся стойкими к воздействию оксидов железа [4].

Магнезитовые изделия не могут работать при высоких температурах в контакте с алюмосиликатными и шамотными материалами, что обусловлено образованием в системе $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ легкоплавких эвтектик. Эти эвтектики содержат, например, около 20 % MgO , 18 % Al_2O_3 и 62 % SiO_2 и плавятся при 1355°C , что также характерно для инконгруэнтного плав-

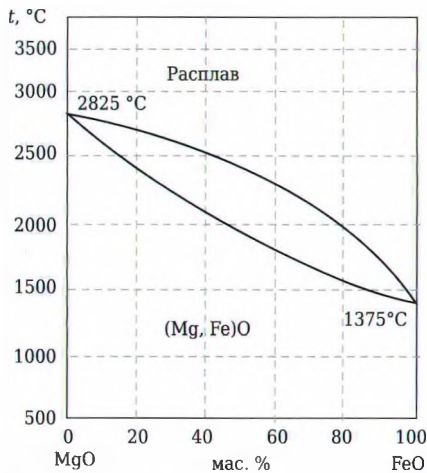


Рис. 1. Диаграмма состояния системы MgO-FeO [4]

ления кордиерита ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) при 1425°C (см. рис. 3).

Одновременное присутствие в магнезитовых материалах и изделиях оксидов кальция и кремния с молярными соотношением $\text{CaO}/\text{SiO}_2 < 2$ или $\text{CaO}/\text{SiO}_2 > 2$ отрицательно влияет на их огнеупорность. Например, в системе CaO-MgO-SiO_2 наиболее низкотемпературная эвтектика (8 мас. % MgO – 30,6 мас. % CaO – 61,4 мас. % SiO_2) плавится при 1320°C . Кроме того, $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ (диопсид), $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (монтichelлит), $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ (мервинит) и $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ (окерманит) не относятся к огнеупорным соединениям (см. рис. 4).

Фазовый и химический составы магнезитовых огнеупоров характеризуются количественным и относительным содержанием оксидов магния, кальция, кремния и железа в рассматриваемых и создаваемых системах. Отсюда следует, что формирование состава, структуры и свойств проектируемых магнезитовых огнеупоров и их температур службы начинается с анализа трех- и четырехкомпонентных диаграмм состояния $\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (рис. 4–6) [5]. В этих диаграммах в зависимости от фазового состава и соотношений CaO/SiO_2 с периклазом в равновесном состоянии могут находиться следующие соединения: трехкальциевый силикат $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($t_{\text{пл}} 2060^\circ\text{C}$), двухкальциевый силикат $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (2130°C), мервинит $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ (1436°C), монтichelлит $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (1430°C), форстерит $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ (1890°C), магнезиоферрит $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (1713°C), двухкальциевый феррит $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ (1449°C) [5].

Схема определения огнеупорных составов в системе CaO-MgO-SiO_2 показана на рис. 5. К высококачественным огнеупорам относятся материалы-изделия, образующие при температуре службы не более 10 % расплава. В разрабатываемых огнеупорных материалах и изделиях (специтглях, шерберах и купелях), эксплуатируемых до 1350°C , присутствие

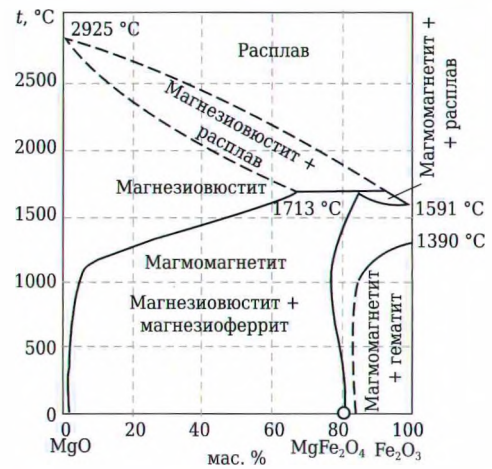


Рис. 2. Диаграмма состояния системы $\text{MgO-Fe}_2\text{O}_3$ [4]

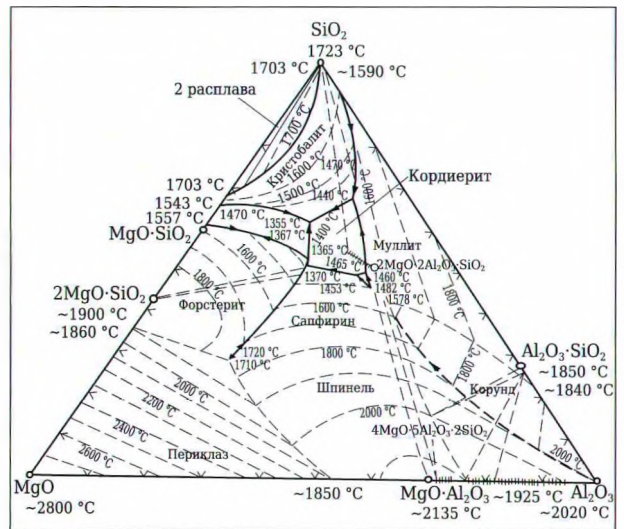


Рис. 3. Диаграмма состояния системы $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [4]

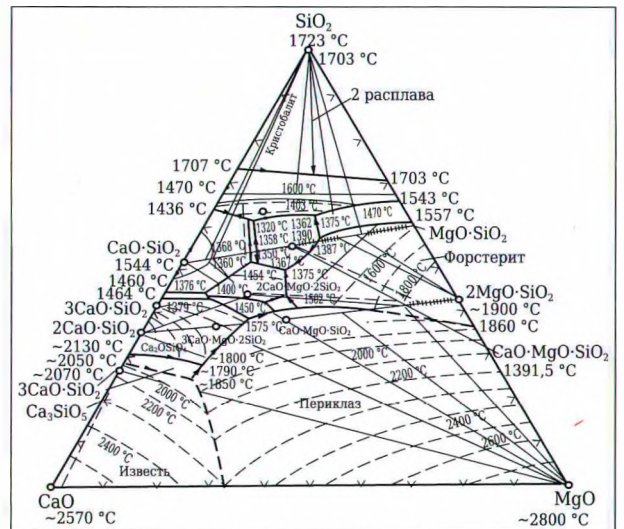


Рис. 4. Диаграмма состояния системы CaO-MgO-SiO_2 [5]

жидкой фазы при проведении ХТП технологического извлечения драгметаллов из шламов исключается. Извлечение драгметаллов из

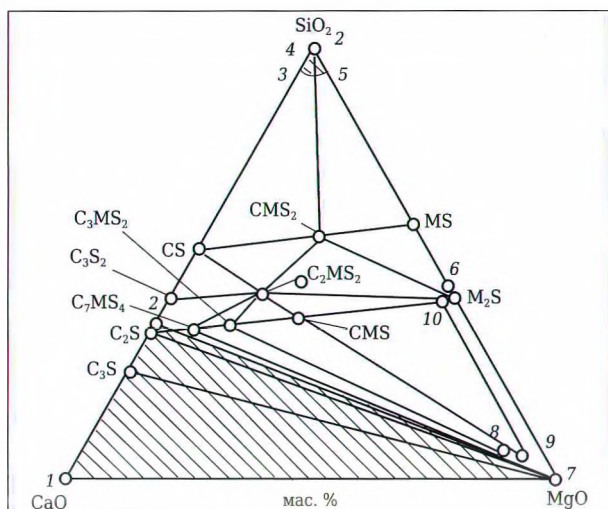


Рис. 5. Схема определения огнеупорных составов в системе CaO-MgO-SiO_2 (огнеупорная область заштрихована) [5]

техногенных минеральных шламов проходит по окислительно-восстановительным механизмам ХТП, протекающим постадийно в спецсплавах, формирующихся последовательно в спецтиглях, шерберках и купелях. Это исключает присутствие расплава в материале самих изделий при температуре службы 800–1250 °С.

При увеличении количества свободного CaO в химическом составе периклазовых систем повышаются пористость и температура деформации под нагрузкой, а предел прочности при сжатии и усадка при обжиге, наоборот, снижаются.

Содержание 3–5 % нестабилизированного двухкальциевого силиката приводит к разрушению (трещинообразованию) при спекании периклазовых изделий. Мервинит и монтчеллит способствуют спеканию магнезитовых изделий, что обусловлено их низкой температурой плавления (1430 °С). Следует отметить, что мервинит и монтчеллит значительно снижают температуру деформации под нагрузкой и увеличивают усадку изделий при спекании, поэтому их относят к нежелательным примесям в магнезитопериклазовых огнеупорах [5].

Использование форстерита в качестве связки в периклазовом материале шерберов и купелей приводит к повышению огнеупорности магнезитовых изделий, благодаря его высокой температуре плавления (1890 °С). Спекание периклазофорстеритовых материалов-изделий довольно затруднительно, поэтому в их составы вводят соответствующие количественные добавки, обеспечивающие спекание при температурах 1500–1700–1750 °С [1].

Присутствие в химическом составе магнезитового материала технологических добавок, в частности примесей оксидов железа, улучшает спекаемость изделий. При этом образуется магнезиоферрит, который, в свою очередь, формирует с периклазом твердые растворы вне-

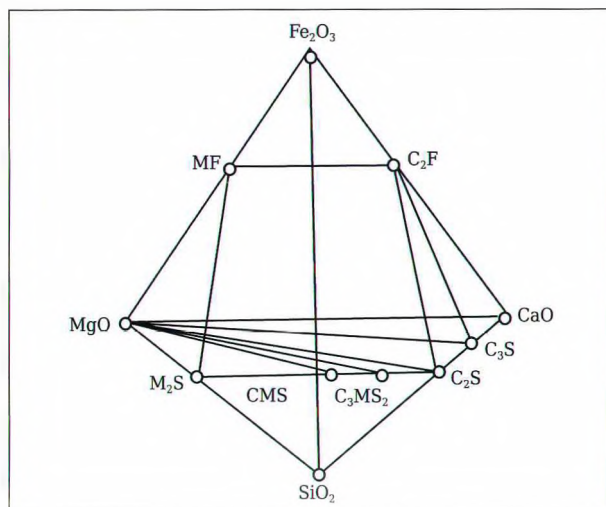


Рис. 6. Диаграмма состояния системы $\text{MgO-CaO-SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ [5]

дрения, что сопровождается некоторым ростом кристаллов периклаза. Следует отметить, что оксид железа незначительно влияет на температуру начала деформации под нагрузкой и на термостойкость магнезитовых изделий, если его содержание не превышает 10 %. Высокое содержание магнезиоферрита в магнезитовых материалах и изделиях нежелательно, поскольку при этом снижается их огнеупорность [5].

Для повышения термостойкости магнезитовых материалов и изделий в шихту вводят 3–6 % технического глинозема. В результате взаимодействия глинозема с периклазом образуется алюмомагнезиальная шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, которая обладает наивысшей прочностью среди двойных оксидных соединений и пониженным по сравнению с периклазом ТКЛР, что обеспечивает повышенную термостойкость магнезитовых материалов и изделий на шпинельной связке [1, 3].

Магнезиальная шпинель является единственным стабильным соединением в системе $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$, которое образует твердые растворы с избытком Al_2O_3 и в меньшей степени с MgO (см. рис. 7), повышая при этом огнеупорность и улучшая физико-химические и термодинамические свойства керамоогнеупоров, а также образует твердые растворы с периклазом. Так как в системе $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ легкоплавкие эвтектики отсутствуют, это определяет ее исключительное значение в технологии получения качественных огнеупоров. В области $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ температура плавления магнезиальной шпинели составляет 2135 °С [5]. Алюмомагнезиальная шпинель положительно зарекомендовала себя в технологии изготовления периклазошпинелидных шерберов и купелей и в последующем извлечении драгметаллов из минеральных шламов.

Для производства периклазовых керамоогнеупоров используют в основном природный

минерал — каустический магнезит MgCO_3 , из которого с применением ХТП получают бесцветный кристаллический оксид магния (MgO) — периклаз. Реакция термического разложения MgCO_3 начинается от 410°C , при 640°C процесс активизируется и завершается примерно при 1000°C . При этом размер частиц MgO достигает около 1 мкм . При 2000°C образуется спеченный магнезит — периклаз с размерами частиц $30\text{--}50\text{ мкм}$. Низкотемпературный магнезит, обожженный при $800\text{--}950^\circ\text{C}$, обладает высокими удельной поверхностью и реакционной способностью: с водой образует гидроксид магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$, обеспечивающий увеличение объема продуктов реакций примерно в 2 раза [4].

Мелкокристаллические магнезито-периклазовые системы при затворении их водными растворами солей MgCl_2 , MgSO_4 , CaCl_2 и другими образуют при 24°C самотвердеющие прочные керамические тела. Магнезито-периклазовые порошки тонкого помола с водными растворами MgCl_2 используют как связку в керамоогнеупорном производстве периклазовых и других материалов. Периклаз, являясь высокотемпературным спеченным магнезитом, твердеет при повышенной температуре ($65\text{--}85^\circ\text{C}$). Обогащенные магнезито-периклазовые порошковые системы с хлористым магнием ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — бишофит) или с $\text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ формируют керамоогнеупорные магнезитовые цементы и связки.

Основные магнезитовые материалы-изделия по фазовому составу содержат не менее 85% MgO . Технологической базой таких материалов является периклаз, полученный обжигом магнезита при $1600\text{--}2000^\circ\text{C}$, причем обжиг сопровождается рядом твердофазовых реакций MgO с примесными (сопутствующими) или вводимыми модифицирующими (легирующими) добавками: Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 и Cr_2O_3 , участвующими в формировании высокоогнеупорных служебных свойств периклазовых материалов. Следует отметить, что изначально обожженный периклаз должен быть спечен до максимально плотного состояния при более высоких температурах, чем температуры спекания и эксплуатации создаваемых материалов-изделий, обеспечивая тем самым стабильность их геометрических размеров и свойств.

Согласно материаловедческо-логистическим принципиальным подходам, разработанная технологическая блок-схема производства керамоогнеупоров на основе алюмосиликатных и магнезито-периклазовых составов включает следующие этапы.

Этап 1. Техногенная очистка минерального сырья от сопутствующих примесей, образующих легкоплавкие эвтектики, до требуемых структурно-фазовых стехиометрических состава

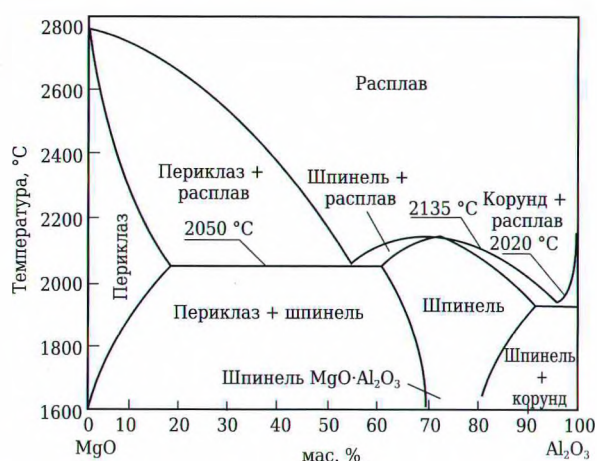


Рис. 7. Диаграмма состояния системы $\text{MgO}\text{--}\text{Al}_2\text{O}_3$ [4]

и соотношений, отвечающих стандартным уровням, установленным для керамоогнеупорных материалов и их производства.

Этап 2. Разработка и оптимизация физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии: структурирования техногенного минерального сырья на материаловедческо-технологических стадиях, реализующихся в рамках логистической системно-дифференцированной блок-схемы «состав — структура — свойство» — заданный «профильный материал» — разработанные «технология» — «изделия» — «инновационное импортозамещающее производство» — текущая «информационная поддержка и обеспечение разработки».

Этап 3. Разработка физико-химических процессов и механизмов сухого и жидкостного (трибохимического, механохимического) помола и физико-химического структурирования оксидных порошковых систем на ультрадисперсных и микро-, мезо-, макроразмерных уровнях, реализующих золь-гель процессы и механизмы коллоидной химии, обеспечивая тем самым создание активированных высококонцентрированных керамических вяжущих суспензий (АВКВС), являющихся эффективным материаловедческо-технологическим этапом и компонентом в керамоогнеупорном производстве.

Этап 4. Подготовка к формированию техногенных порошковых шихтовых систем: сушка при $80\text{--}250^\circ\text{C}$ после помола; введение связки, гомогенизация и гранулирование полифракционных шихтовых гетеросистем.

Этап 5. Формование (прессование, виброформование, шликерное литье) заготовок изделий из гранулированных полифракционных порошковых гетеросистем с АВКВС. Прессование спецтиглей на изостате (УСИП-100/300) в диапазоне давлений $50\text{--}75\text{--}100\text{--}125\text{--}150\text{ МПа}$,

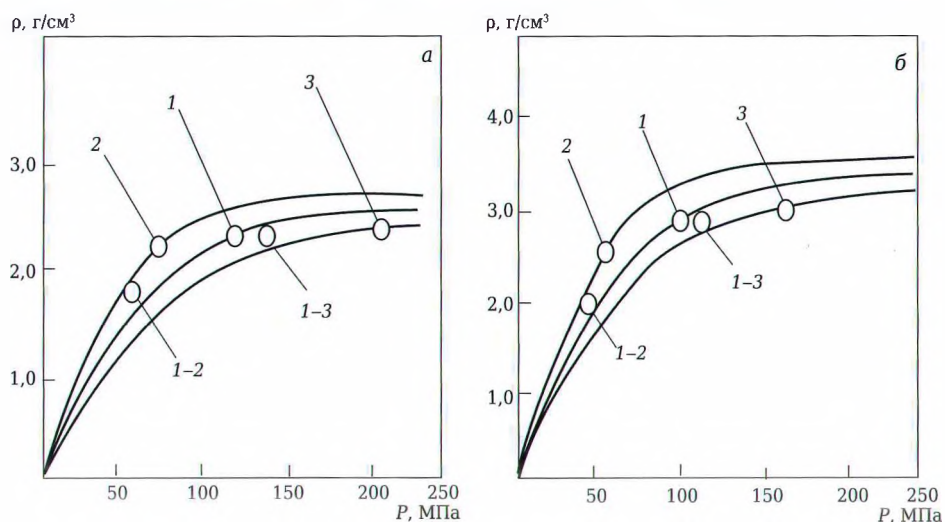


Рис. 8. Зависимость уплотняемости ρ порошковых систем от давления прессования P сырых (а) и спеченных (б) материалов-изделий на основе периклаза (1), периклазошпинелидных (2) и периклазофорстеритовых систем (3); 1–2 и 1–3 — зоны формирования кажущейся плотности периклазошпинелидных и периклазофорстеритовых систем

шерберов и купелей — в специализированных технологических оснастках на гидравлическом прессе при 50–300 МПа (рис. 8–10).

Этап 6. Предварительная термообработка — удаление органических и минеральных низко-

температурных фракций из сформованных заготовок изделий в вакуумном сушильном шкафу при 24–700 °С.

Этап 7. Высокотемпературная обработка обожженных заготовок изделий (рис. 11) из

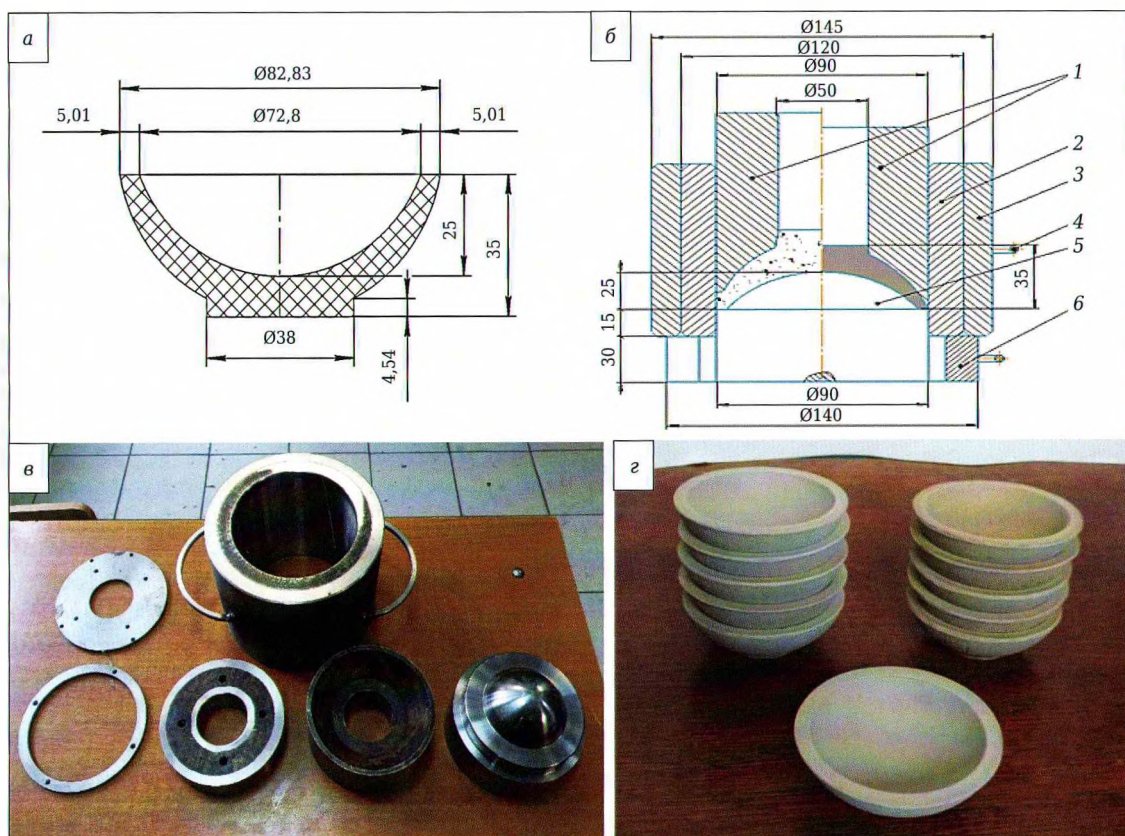


Рис. 9. Конструкция изделий — шербера (а), пресс-формы (б) и технологическая оснастка — пресс-форма (в) для формования заготовок шерберов (з): 1 — пуансон верхний; 2 — матрица; 3 — бандаж; 4 — ручка; 5 — пуансон нижний; 6 — кольцо упорное

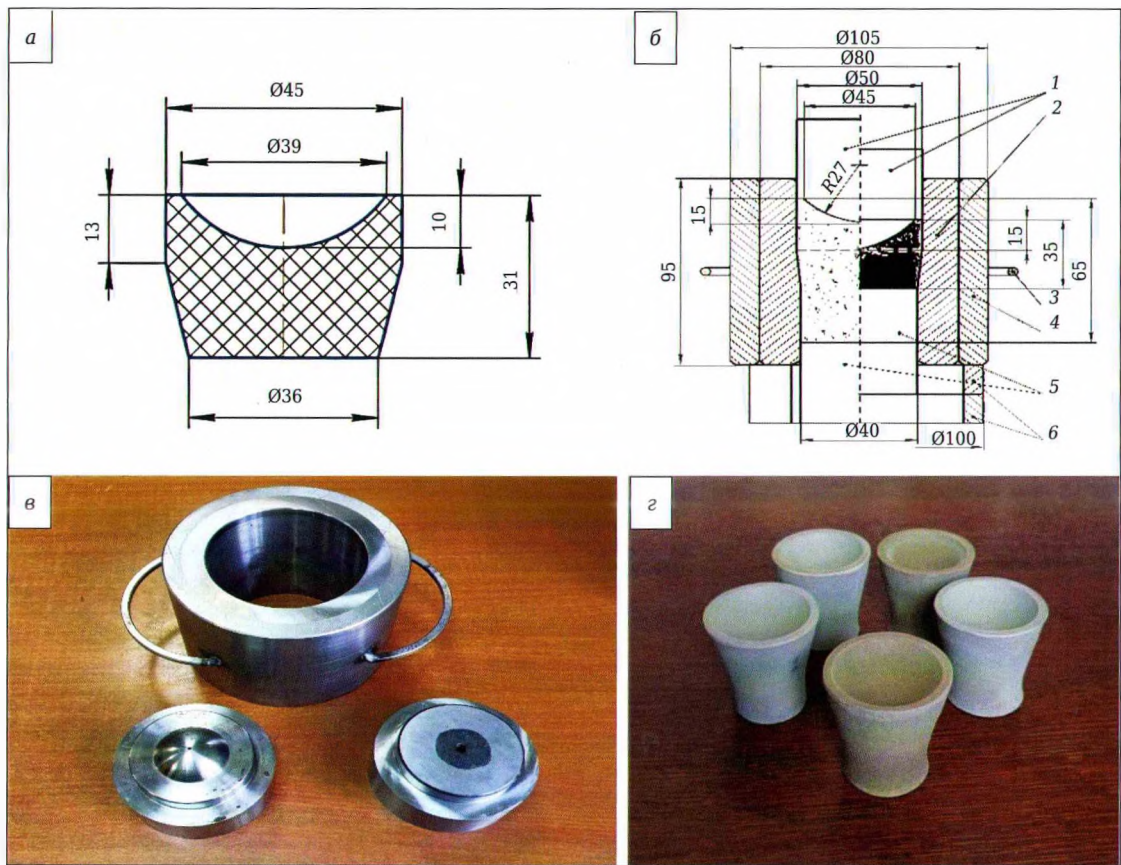


Рис. 10. Конструкция изделий — купели (а), пресс-формы (б) и технологическая оснастка — пресс-форма (в) для формования заготовок купелей (з): 1 — пуансон верхний; 2 — матрица; 3 — ручка; 4 — бандаж; 5 — пуансон нижний; 6 — кольцо упорное

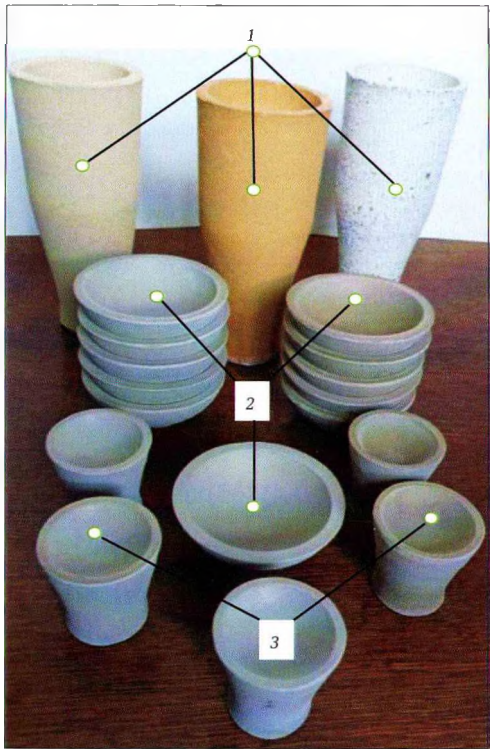


Рис. 11. Керамоогнеупорные изделия: специтгли (1), шерберы (2) и купели (3) для реализации химико-термических процессов и механизмов извлечения драг-металлов из техногенных минеральных шламов

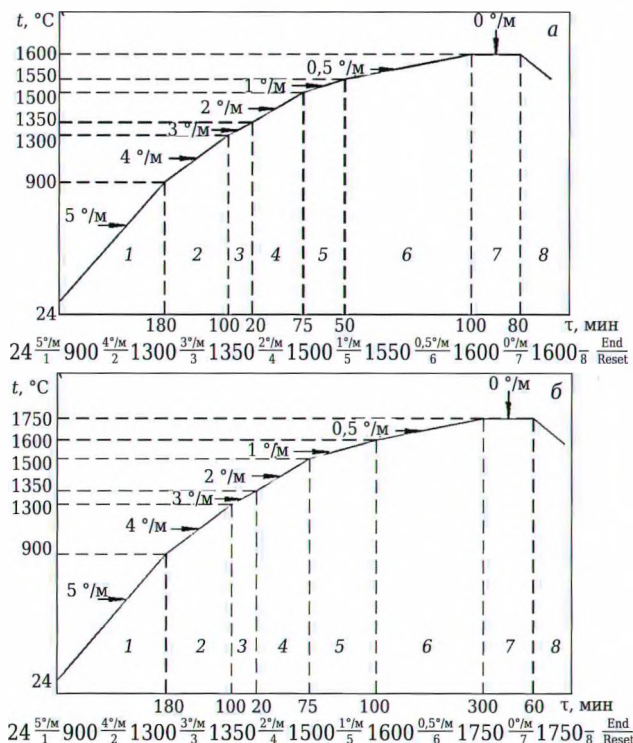


Рис. 12. Температурно-временные зависимости диаграмм спекания алюмосиликатных специтглей (а) и магнезитопериклазовых шерберов и купелей (б)

алюмосиликатных и магнезитопериклазовых оксидных систем, согласно разработанным температурно-временным режимам и диаграммам спекания (рис. 12), построенным с учетом эксперимента и физико-химического анализа фазовых диаграмм состояния (см. рис. 1–7).

Этап 8. Текущая механическая обработка и финишное чистовое шлифование в размер керамоогнеупорных изделий (при необходимости) на специализированном абразивно- и алмазно-шлифовальном оборудовании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и реализована принципиальная системно-дифференцированная блок-схема физико-химических процессов и механизмов структурной инженерии — структурирования

как алюмосиликатных спецтиглей, так и периклазошпинельных и форстеритсодержащих материалов-технологий-изделий (шерберов и купелей) из магнезитопериклазового минерального сырья — для завершающего технологического этапа извлечения драгметаллов из техногенных шламов.

* * *

Исследования проводили в рамках гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2025 год.

* * *

Исследования проводились в рамках НИР (задание 2.14 от 03.01.2024 г. ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Металлургия») и при поддержке гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2025 год (№15пр от 27 января 2025 г.).

Библиографический список

1. Разработка и исследование термокоррозионно-эрозионностойких огнеупорных материалов-изделий для металлургических процессов черных и цветных металлов : отчет о НИР (годовой) / БНТУ ; рук. Пантелеенко Ф. И.; отв. исполн. : Шмурадко В. Т. [и др.] — Минск, 2024. — 41 с.
2. *Shmuradko, V. T.* Physicochemical processes in wear-resistant corundum ceramic materials science and technology: nozzles for underground soil tunnelling rimmers / *V. T. Shmuradko, F. I. Panteleenko, O. P. Reut [et al.]* // *Refract. Ind. Ceram.* — 2016. — Vol. 57, № 4. — P. 378–383. <https://doi.org/10.1007/s11148-016-9988-4>.
3. *Шмурадко, В. Т.* Физико-химические процессы в материаловедении и технологиях износостойкой корундовой керамики: дюзы для риммеров подземной проходки грунтов / *В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут, Н. А. Руденская* // *Новые огнеупоры.* — 2016. — № 7. — С. 54–60.

3. *Шмурадко, В. Т.* Изделия из керамоогнеупорных материалов для металлургических процессов / *В. Т. Шмурадко, Ф. И. Пантелеенко, О. П. Реут [и др.]* // *Металлургия машиностроения.* — 2019. — № 2. — С. 24–27.
4. *Стрелов, К. К.* Технология огнеупоров / *К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин.* — 3-е изд., перераб. — М. : Металлургия, 1978. — 376 с.
5. *Стрелов, К. К.* Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / *К. К. Стрелов.* — М. : Металлургия, 1985. — 480 с. ■

Получено 08.05.25

© Ф. И. Пантелеенко, Н. А. Шмурадко, Жэн Пенчен, А. Ф. Пантелеенко, Е. Ф. Пантелеенко, В. Т. Шмурадко, В. А. Кусяк, Р. Ю. Попов, 2025 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



Metal & Steel / METEC 2025 — 14-я международная выставка металлургии и металлообработки




7–9 сентября 2025 г.
Египет, Каир

Under the auspices of




<https://www.metalsteelogy.com/>