

Д. г.-м. н. **В. А. Перепелицын**¹ (✉), д. т. н. **Ф. Л. Капустин**¹,
д. т. н. **О. Ю. Шешуков**², к. т. н. **А. В. Яговцев**¹, **Л. В. Остряков**³

¹ ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет», г. Екатеринбург, Россия

² ФГБУН «Институт металлургии УрО РАН», г. Екатеринбург, Россия

³ ОАО «Динур», г. Первоуральск Свердловской обл., Россия

УДК 666.76.001.8.002

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОГНЕУПОРОВ БУДУЩЕГО

Рассмотрены основные условия и критерии прогнозирования ассортимента огнеупорных материалов и изделий будущего. В качестве критериев развития огнеупоров предлагаются материаловедение, геохимия сырья, технологичность, экология и экономика их производства. Главным фактором, определяющим вещественный состав и ассортимент будущих огнеупоров, является оптимальное сочетание максимальных значений термоэнергоплотности (относительной износостойчивости) и минимальной себестоимости их производства.

Ключевые слова: аспекты прогнозирования огнеупоров, минеральное сырье, критерии выбора, энергоплотность, термоэнергоплотность.

В последние годы в отечественных и зарубежных периодических изданиях появились суждения о том, что в современной огнеупорной науке и практике возник своего рода кризис в связи с отсутствием на рынке новых высокоэффективных огнеупорных материалов и изделий, а также прорывных технологий их производства. Например, со времени начала широкого внедрения в пирометаллургию прогрессивных периклазоуглеродистых огнеупоров прошло уже более 30 лет.

Авторами настоящей статьи сделана попытка высказать свое частное мнение по главным направлениям развития огнеупорной подотрасли на основании комплексного прикладного и теоретического прогнозирования. Прикладное прогнозирование базируется в основном на историческом опыте и современных тенденциях технологического прогресса в огнеупорном производстве в неразрывной связи с практикой главных смежных высокотемпературных отраслей — потребителей огнеупорной продукции: черной и цветной металлургии, теплоэнергетики, стройиндустрии, машиностроения и др. Научной основой прогноза является теоретический поиск наиболее оптимальных векторов развития отрасли с учетом фундаментальных положений неорганического материаловедения.

Как известно, достоверность реализации любого прогноза возрастает с кратностью и глубиной анализа различных сторон, факто-

ров, условий и критериев возможной эволюции рассматриваемого объекта. В настоящей статье основное внимание уделено прогнозированию вероятного ассортимента новой перспективной огнеупорной продукции в ближайшие годы на основе анализа пяти существенных аспектов:

- материаловедческого (ассортимент высокоизносостойчивых огнеупоров);
- геохимического (доступность минерального сырья);
- технологического (энерго-, материало- и ресурсосберегающие способы получения исходного природного и синтетического сырья и целевого продукта);
- экологического (безопасные условия производства и применения огнеупоров);
- экономического (технично-экономическая целесообразность производства).

Ниже рассмотрены перечисленные аспекты прогнозного ассортимента огнеупорного производства, которое фактически не является автономной промышленностью, а выполняет второстепенную, но весьма важную обеспечивающую функцию для всех высокотемпературных отраслей: металлургии, энергетики, производства строительных материалов, химических продуктов, стекла, абразивов, керамики и др.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Вспомогательная роль огнеупорной промышленности предопределяет сильную зависимость ее от технологического развития главных отраслей — потребителей огнеупоров, в первую очередь от черной металлургии. Черная металлургия потребляет около 70 % всего объема производимых огнеупоров, причем наилучшего качества и наибольшей стоимости. Исторический опыт разви-



В. А. Перепелицын
E-mail: pva-vostio@bk.ru

тия огнеупорного производства показывает, что технический прогресс в нем всегда был и остается первым и главным ответом на запросы металлургов, особенно сталеплавильщиков. Поэтому и в ближайшей перспективе черная металлургия будет определять уровень развития многих футеровочных материалов и изделий.

Классическим примером оперативного производственного ответа огнеупорщиков на возросшие требования сталеплавильщиков является создание большой группы высокоизносостойчивых изделий и неформованных огнеупоров для МНЛЗ. Эта группа включает целую серию высокостойких огнеупоров нового поколения, преимущественно оксидоуглеродистого состава: периклазоуглеродистых, корундографитовых, алюмопериклазоуглеродистых, шпинельноуглеродистых, цирконистографитовых и др. [1–5]. Характерной особенностью вещественного состава всех новых высокоизносостойчивых огнеупоров является присутствие графита от 5 до 30 мас. % (7–47 об. %). Таким образом, в последние годы в огнеупорной промышленности в качестве главного технологического направления принята углеродизация [6–9].

Сейчас и в будущем возрастают темпы инноваций и модернизации во всех высокотемпературных отраслях экономики, что, как правило, приводит к интенсификации технологических процессов и повышению требований к служебным свойствам огнеупоров: расплавостойчивости, термopочности, термостойкости и др. Материаловедческий критерий выбора износостойких огнеупоров в первую очередь основан на температуре плавления, точнее, на огнеупорности исходных (сырьевых) материалов. Однако, как показала практика, часто более тугоплавкие минералы (соединения) заметно уступают по ресурсу менее тугоплавким веществам. Следовательно, не только температура плавления (огнеупорность) определяет реальную стойкость огнеупоров.

Каждый минерал или неорганическое соединение имеет более 30 физико-химических свойств, которые далеко не все имеют существенное значение для применения огнеупоров в экстремальных термодинамических условиях. Хорошо известен термодинамический критерий стойкости, учитывающий химическую прочность вещества:

$$\Delta G_T^0 = H_T^0 - T\Delta S, \quad (1)$$

где ΔG_T^0 — изобарно-изотермический потенциал (энергия Гиббса), кДж/моль; H_T^0 — энтальпия, кДж/моль; T — температура, К; ΔS — изменение энтропии, кДж/(град·моль). Наибольшей термодинамической прочностью, характеризующей сродством к кислороду, обладают оксиды BeO, CaO, MgO, Al₂O₃, La₂O₃ и др. [10–14].

Все существующие критерии выбора износостойчивых огнеупоров не принимают во внима-

ние главные кристаллохимические характеристики вещества, а именно атомные и ионные радиусы, параметры и объем элементарной ячейки, массу атомов и молекул, истинную плотность соединений, а также другие, которые в интегрированной форме можно выразить молярным (для соединений) или атомным (для элементов) объемом. Для технологических расчетов молярный или атомный объем является важнейшим кристаллохимическим свойством любого химического соединения или элемента. Величина этого кристаллохимического параметра представляет собой отношение массы макромолекулы или макроатома M к их истинной плотности ρ :

$$V_1 = M_1/\rho_1, \text{ см}^3/\text{моль}; V_2 = M_2/\rho_2, \text{ см}^3/\text{атом}, \quad (2)$$

где V_1 , M_1 , ρ_1 — молярные объем, масса и истинная плотность 1 грамм-моля (макромолекулы) минерала (неорганического соединения); V_2 , M_2 , ρ_2 — атомные объем, масса и истинная плотность 1 грамм-атома химического элемента.

Вторым кристаллохимическим свойством каждого неорганического вещества является молярная (для соединения) или атомная (для элементов) концентрация, величина которой обратна молярному или атомному объему:

$$C = 1/V = \rho/M, \text{ моль/см}^3. \quad (3)$$

Один из главных законов неорганического материаловедения [15] гласит, что с повышением молярной или атомной концентрации показатели многих физико-химических свойств вещества (твердость, температура плавления и др.) улучшаются. С позиций макрохимии каждое тугоплавкое неорганическое соединение целесообразно рассматривать с учетом трех главных свойств: температуры плавления, термодинамической прочности и кристаллохимического объема макромолекулы или макроатома. Термодинамическая прочность — это суммарная энергия химических связей атомов или ионов в макромолекуле (макроатоме), имеющих индивидуальный молярный или атомный объем.

Между термодинамикой и кристаллохимией любого вещества существует неразрывная функциональная взаимосвязь, которую можно выразить соотношением $E = \Delta G_T^0/V$, кДж/см³, впервые предложенным нами и названным энергоплотностью [16–18]. Энергоплотность — это суммарное количество физической и химической энергии (энергии связей атомов, ионов или молекул) в 1 см³ беспористого минерала (соединения). Энергоплотность прямо пропорциональна энергии Гиббса (изобарно-изотермический потенциал) и обратно пропорциональна молярному или атомному макрообъему для всех химических соединений неорганического состава. С увеличением значения E улучшаются показатели ряда физических свойств, уменьшается химическая активность, возрастают высокотемпературная

устойчивость, температура плавления и огнеупорность. Однако энергоплотность не учитывает температуру плавления вещества, т. е. уровень термической стабильности минерала (соединения).

Ранее нами было установлено [18, 19], что наиболее достоверным количественным оценочным критерием для прогнозирования относительной износостойчивости огнеупоров является термоэнергоплотность T_d , равная произведению энергоплотности E на температуру плавления $T_{пл}$ вещества:

$$T_d = ET_{пл} = (\Delta G/V)T_{пл} = (\Delta Gp/M)T_{пл}, \text{ кДж/град/см}^3, \quad (4)$$

где ρ — истинная плотность, г/см³; M — молярная (для соединений) или атомная (для элементов) масса, соответственно г/моль и г/атом.

Для расчета термоэнергоплотности химических элементов и бескислородных соединений вместо энергии Гиббса используем энергию атомизации, указанную в справочниках по свойствам неорганических веществ [12–14, 20, 21]. Расчетные величины энергоплотности и термоэнергоплотности наиболее часто применяемых сырьевых огнеупорных минералов приведены в табл. 1, из которой видно, что среди всех известных природных минералов и искусственных неорганических соединений наибольшей энерго- и термоэнергоплотностью и температурой стабильности в твердом состоянии обладают алмаз и графит ($T_d \approx 400 \cdot 10^3$ кДж/град/см³).

Расчетные значения E_d наиболее доступных сырьевых тугоплавких минералов снижаются в ряду: графит, муассанит SiC, цирконат кальция CaZrO₃, бадделит, периклаз, корунд, шпинель MgAl₂O₄, бонит CaO·6Al₂O₃, ларнит β-Ca₂SiO₄, декarbonизированный доломит CaO·MgO, известь

CaO, муллит 3Al₂O₃·2SiO₂, форстерит 2MgO·SiO₂, магнезиохромит MgO·Cr₂O₃, циркон ZrO₂·SiO₂, эсколаит Cr₂O₃, кварц, лешательерит (кремнеземистое стекло).

В первую группу наиболее износостойчивых тугоплавких минералов входят графит (первое место по величине термоэнергоплотности), карбид кремния, оксидные соединения и твердые растворы на основе диоксида циркония (ZrO₂, CaZrO₃), корунд и периклаз. Все эти шесть самых термоэнергоплотных материалов являются минеральной основой современных наиболее износостойчивых огнеупоров.

Вторая группа менее энергоплотных, но также относительно износостойчивых минералов представлена шпинелью, бонитом, ларнитом, декarbonизированным доломитом и известью. Еще в недалеком прошлом смолодоломитовые безобжиговые огнеупоры сохраняли доминирующее положение в футеровке сталеплавильных агрегатов. В настоящее время в ряде стран (Китай, Германия и др.) наблюдается своего рода ренессанс доломитовых (периклазоизвестковых) огнеупоров модифицированного композитного состава на основе последних достижений органической и неорганической химии. При этом доломитовая и особенно известковая футеровка ($T_{пл}$ соответственно 2370 и 2625 °C) обладает наиболее высокой рафинирующей способностью по отношению к большинству черных, благородных и других металлов. Постепенно расширяется также производство сравнительно новых бонитовых (гексаалюминат кальция) огнеупоров, имеющих ряд лучших служебных свойств в отличие от более высокоогнеупорных корундов, в частности меньшую теплопро-

водность, что снижает охлаждение стали в ковше [27]. Относительная износостойчивость минералов (материалов) второй группы значительно уступает стойкости огнеупоров первой. Например, показатель шлакоустойчивости муллита примерно в 3–10 раз ниже, чем у корунда одинаковой чистоты и пористости [21]. Аналогичная резкая количественная разница отмечается и у одного из наиболее расплавоустойчивых материалов — диоксида циркония (ZrO₂, стабилизированный Y₂O₃, CeO₂, CaO) в сравнении с корундом идентичного генезиса и аналогичной пористой текстуры.

Менее термоэнергоплотные материалы входят в состав третьей группы (динас и шамот). На основе запросов главных потребителей огнеупорщики будут разрабатывать и производить эффективный ассортимент продукции дифференциро-

Таблица 1. Термоэнергетические характеристики некоторых соединений системы MgO–CaO–Al₂O₃–Cr₂O₃–ZrO₂–SiO₂–C

Химическая формула	Соединение (минерал)	$T_d, 10^3$ кДж/град/см ³	$E,$ кДж/см ³	$T_{пл}, ^\circ\text{C}$
C	Графит*	397,9	104,7	3800
α-SiC	Карбид кремния*	285,3	100,8	2830
β-SiC		275,8	99,2	2780
ZrO ₂	Бадделит	142,8	52,9	2700
MgO	Периклаз	142,5	50,9	2800
α-Al ₂ O ₃	Корунд	125,9	61,4	2050
MgO·Al ₂ O ₃	Шпинель	117,6	55,1	2135
CaO·6Al ₂ O ₃	Бонит	106,6	57,6	1850
β-2CaO·SiO ₂	Ларнит	104,8	49,2	2130
CaO·MgO	Термообработанный доломит	104,1	42,3	2450
CaO	Известь	96,8	36,9	2625
MgO·SiO ₂	Форстерит	88,6	46,9	1890
MgO·Cr ₂ O ₃	Магнезиохромит	87,8	37,7	2330
Cr ₂ O ₃	Эсколаит	82,6	35,9	2265
SiO ₂	Кварцевое стекло	50,7	29,6	1713

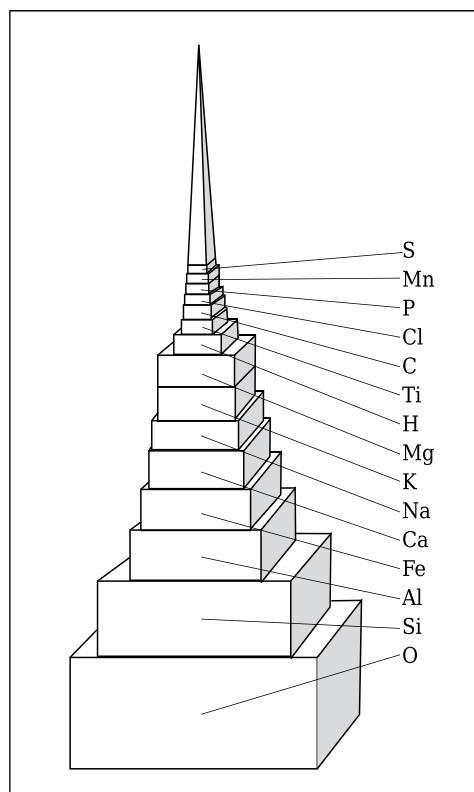
* Минералы не имеют температуры плавления, так как графит и карбид кремния примерно при 4500 и 2800 °C соответственно диссоциируют и превращаются в пар.

ванно, не только для каждой отрасли, но и для каждого отдельного теплового агрегата, а также для каждого участка (рабочей зоны) в нем. При этом ассортимент, геометрия и число марок огнеупорных изделий и особенно неформованных огнеупоров даже одного вещественного состава, но различного структурно-текстурного строения возрастут многократно.

ГЕОХИМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Геохимический аспект любого полезного ископаемого, в том числе и огнеупорного сырья, определяется прежде всего кларком — распространённостью химических элементов в трех доступных (на данном уровне цивилизации) геосферах: литосфере (земная кора), гидросфере и атмосфере (табл. 2–4). В настоящее время более 95 мас. % всех полезных ископаемых извлекаются из литосферы, состоящей в основном из восьми элементов: кислорода, кремния, алюминия, кальция, железа, натрия, калия и магния. На долю этих элементов приходится более 95 % массы земной коры (см. рисунок и табл. 2).

В будущем по мере истощения месторождений высококачественного сырья в верхних слоях литосферы увеличится получение ряда сырьевых материалов из гидросферных источников (океаническая,



Распространённость элементов в земной коре [11]

Таблица 2. Содержание наиболее распространенных элементов в земной коре [22]

Порядковый номер элемента	Название элемента	Содержание в земной коре, мас. %
8	Кислород	47,00
14	Кремний	29,50
13	Алюминий	8,05
26	Железо	4,65
20	Кальций	2,96
11	Натрий	2,50
19	Калий	2,50
12	Магний	1,87
1	Водород	0,15
22	Титан	0,045
6	Углерод	0,02
17	Хлор	0,02

Таблица 4. Средний химический состав атмосферы [22]

Газ	Химическая формула	Содержание	
		об. %	мас. %
Азот	N ₂	78,0900	46,5100
Кислород	O ₂	20,9500	23,1500
Аргон	Ar	0,9300	1,2800
Углекислый газ	CO ₂	0,0300	0,0460
Неон	Ne	0,0018	0,00125
Гелий	He	0,00052	0,000072
Метан	CH ₄	0,00022	0,00012
Криптон	Kr	0,00022	0,00012
Закись азота	N ₂ O	0,0001	0,00029
Водород	H ₂	0,00005	0,000003
Ксенон	Xe	0,000008	0,000036
Озон	O ₃	0,000001	0,000036

Таблица 3. Распространённость элементов в гидросфере [22] (главные ионы океанической воды)

Распространённость на 1 кг океанической воды при S* = 35,000 ‰ и Cl = 19,375 ‰					
Катионы			Анионы		
компонент	количество, г	эквивалент	компонент	количество, г	эквивалент
Na ⁺	10,7638	0,46806	Cl ⁻	19,3534	0,54582
Mg ²⁺	1,2970	0,10666	SO ₄ ²⁻	2,7007	0,05623
Ca ²⁺	0,4080	0,02035	HCO ₃ ¹⁻	0,1427	0,00234
K ⁺	0,3875	0,00991	CO ₃ ²⁻	0,0702	0,00234
Sr ²⁺	0,0136	0,00031	Br ¹⁻	0,0659	0,00083
			F ¹⁻	0,0013	0,00007
			H ₃ BO ₃	0,0265	–
Сумма	–	0,60529	Сумма	–	0,60529

* Соленость (содержание водорастворимых солей, мас. %).

морская, озерная вода, рассолы, рапа и др.). Получение магнезии из морской воды уже более 50 лет осуществляют ряд стран, не имеющих промышленных залежей магнезита и брусита. Из табл. 4 следует, что на долю азота и кислорода приходится в сумме 99,04 объема всей атмосферы, или 98,66 мас. %.

Запасы природного сырья следует рассматривать не только в земной коре (литосфера), но и в двух других геосферах: гидросфере и атмосфере (см. табл. 3, 4). Из гидросферы увеличится получение MgO для огнеупорной, металлургической и электротехнической промышленности.

Промышленные запасы ряда разновидностей магнезиально-силикатного и алюмосиликатного природного сырья третьей и частично второй групп практически неограниченные на ближайшие 50–100 лет. Запасы природного и техногенного энергоплотного огнеупорного сырья второй группы почти на 3 порядка превосходят запасы первой. С учетом многочисленных положительных свойств и специфических технических характеристик минералы второй группы значительно расширят ассортимент и объем производства огнеупоров даже в ближайшем будущем. С точки зрения геохимии наиболее доступными источниками всегда были и будут кремний, алюминий, азот и кислород, которые являются полифункциональным сырьем для металлического алюминия, силимина, нитрида и оксинитрида кремния, карбида кремния, а также целой серии сиалонов. В связи с высокой термоэнергоплотностью в будущем широкое развитие получат огнеупорные и конструкционные нитридкремниевые и сиалоновые материалы на основе системы $\text{Si-Al-O}_2\text{-N}_2\text{-RO-R}_2\text{O}_3$, а также бескислородные соединения из класса карбидов, нитридов (особенно AlN, TiN), оксинитридов, оксикарбидов и др.

Крупным резервным минеральным сырьем настоящего и будущего, безусловно, будут огромные запасы техногенных минеральных образований, в том числе содержащих тугоплавкие минералы [24, 25]. Среди последних наибольший практический интерес представляют алюминотермические шлаки — ценные побочные продукты от выплавки безуглеродистых ферросплавов и чистых металлов (ферротитан, феррохром, ферровольфрам, ферромolibден, металлический хром и др.). При комплексной безотходной переработке алюминотермических шлаков можно получить более 10 видов товарной продукции, в том числе мономинеральные фракции плавящихся легированных тугоплавких минералов: хромистой и титанистой шпинели $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$, $\text{Mg}(\text{Al}, \text{Ti})_2\text{O}_4$, хромистого и титанистого корунда $(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_3$, $(\text{Al}, \text{Ti})_2\text{O}_3$, а также главных фаз глиноземистого ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$) и высокоглиноземистого ($\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$) цемента. В России крупнейшим производителем алюминотермических шлаков является Ключевский завод ферросплавов [25].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

Термин технологичность включает количество и степень сложности всех стадий (операций) получения целевого продукта от добычи, переработки, обогащения, первичной (сырьевой) термообработки, дробления, измельчения, смешения, формования, сушки, вторичной термообработки полуфабриката. В качестве примера рассмотрим кианит, по суммарным запасам коренных месторождений которого Россия находится на первом месте в мире. Однако до сих пор ни одно из этих месторождений не эксплуатируется. Главная причина — сложная технологичность. До получения целевого товарного продукта, например высокоглиноземистого изделия ($\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 72$ мас. %), на основе кианита коренного месторождения необходимы многочисленные технологические переделы: цикл горных работ (буровзрывные работы, транспортирование, дробление, грохочение), обогащение в тяжелой суспензии или на концентрационном столе, сушка и обжиг концентрата (≥ 1400 °C), переработка обожженного концентрата, смешение его с добавкой глинозема, тонкое измельчение смеси, подготовка полифракционной шихты, гранулирование или брикетирование, формование, сушка и вторичный обжиг (изделия). Значительно технологически проще и дешевле получать кианит из техногенных россыпных месторождений [24]. При этом исключаются дорогие сложные буровзрывные работы, а получаемый концентрат будет иметь ненарушенную дроблением первичную природную монокристаллическую форму, т. е. кианит можно использовать как для заполнителя, так и для матрицы. Аналогичное сравнение можно сделать по коренным и россыпным месторождениям андалузита (ЮАР), циркона ZrSiO_4 , рутила TiO_2 , касситерита SnO_2 и других полезных ископаемых.

Как и руды многих металлов, нерудные полезные ископаемые, к которым относится природное огнеупорное сырье, по сложности технологии обогащения разделяются на две группы: легкообогащаемые и упорные. Естественно, что упорные руды, требующие для обогащения огромных энергетических затрат, будут перерабатываться только после истощения легкообогащаемых. Способы обогащения природного и техногенного минерального сырья непрерывно совершенствуются. Уже в настоящее время разработаны и применяются в обогащении прогрессивный способ рентгенорадиометрической сепарации нерудного сырья, например магнезита и кварцита, а также ферросплавных шлаков [25].

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

В настоящее время заметно возросли экологические требования к сырьевым материалам, технологии производства и применению всех

огнеупоров. В связи с ужесточением экологических нормативов произошло резкое снижение объемов производства хромосодержащих изделий для футеровки вращающихся печей, бионерастворимого минерального волокна, кремнеземистых материалов, а также хризотил-асбеста и применения ряда органических связующих. Для обжига портландцементного клинкера вместо периклазохромитовых изделий применяют периклазошпинельные. В ряде стран ограничены производство и применение бионерастворимого алюмосиликатного волокна, которое заменяется биорастворимым магнезиально-силикатным или другого состава [26].

Сейчас и в будущем не будет промышленного производства энергоплотных огнеупоров (кроме специальной функциональной керамики) на основе токсичных оксидов, например BeO , радиоактивных оксидов (ThO_2 , UO_2) и карбидов (ThC). Поэтому в будущем каждая разновидность огнеупорного и керамического сырья будет иметь развернутый экологический сертификат. Например, природный минерал циркон, как правило, имеет повышенную радиоактивность в связи с присутствием микровключения радиоактивного урансодержащего минерала бетафита, содержащего до 26 % UO_3 . В связи с экологической чистотой будет ограничено использование алюмохромофосфатного связующего (АХФС) и ортофосфорной кислоты H_3PO_4 , а также других токсичных неорганических и органических веществ.

ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

В современных остроконкурентных условиях производства выбор оптимального ассортимента продукции определяется главным соотношением цена : качество. При этом экономические показатели и качественные характеристики огнеупорной продукции находятся в определенной зависимости от всех рассмотренных выше аспектов. Оптимальные значения цены и качества имеют взаимно противоположные векторы оценки и эволюции, но в конечном итоге ассортимент огнеупорной продукции в настоящее время и в будущем будет определять интегральный экономический показатель производства и применения огнеупора. Интегральный (суммарный) экономический показатель должен иметь минимальное значение, что достигается макси-

мальной величиной термоэнергоплотности огнеупора, изготовленного из доступного дешевого сырья по ресурсосберегающей и экологически чистой технологии производства и применения материалов и изделий.

Ниже приведен перечень композитных систем наиболее термоэнергоплотных огнеупорных материалов будущего: C-SiC-ZrO_2 , $\text{C-SiC-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$, C-MgO-ZrO_2 , $\text{C-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, $\text{C-MgAl}_2\text{O}_4\text{-ZrO}_2$, C-CaO-ZrO_2 , C-CaO-TiO_2 , $\text{C-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$, $\text{C-SiC-Si}_3\text{N}_4$, $\text{Si-Al-O}_2\text{-N}_2$, $\text{C-Na}_2\text{O}\cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, C-SiC-ZrO_2 , C-SiC-SiO_2 , $\text{C-Na}_2\text{O}\cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{C-CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$, $\text{C-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, $\text{C-CaO}\cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$, $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$, $\text{C-Al}_2\text{O}_3\text{-3Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$, $\text{C-Al}_2\text{O}_3\text{-SiC}$, $\text{C-Al}_2\text{O}_3\text{-SiC-ZrO}_2$, $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогнозирование ассортимента перспективной огнеупорной продукции в ближайшем будущем сделано на основе комплексного анализа с позиций огнеупорного материаловедения, геохимии сырья, технологичности, экологии и экономики производства. Главным фактором, определяющим вещественный состав и ассортимент будущих огнеупоров, является оптимальное сочетание максимальных значений термоэнергоплотности (относительной износоустойчивости) и минимальной себестоимости их производства.

В настоящее время в технологии огнеупоров и керамики используют наиболее тугоплавкие неорганические вещества (~120 наименований), являющиеся различными соединениями всего 20 химических элементов Периодической системы Д. И. Менделеева. Однако существуют еще весьма значительные резервы в расширении ассортимента огнеупоров, так как, по нашим ориентировочным оценкам, в 20-компонентной системе этих элементов имеется более 200 бинарных и тройных соединений с температурой плавления выше 1550 °С. По данным А. С. Бережного [28], среди учтенных 750000 веществ лишь 340 соединений имеют температуру плавления выше 1500 °С, в том числе 317 относятся к бинарным веществам (оксиды, карбиды, нитриды, бориды и элементы). Исключительное значение для высокотемпературной техники будущего будут иметь вещества с температурой плавления выше 3000 °С. Однако количество таких соединений, известных в настоящее время, не превышает 20.

Библиографический список

1. *Очагова, И. Г.* Периклазоуглеродистые огнеупорные изделия / И. Г. Очагова // Обзор. информ. Черная металлургия. Сер. «Огнеупорное производство». — М., 1985. — Вып. 1. — 36 с.
2. *Антонов, Г. И.* Безобжиговые периклазоуглеродистые огнеупоры на фенольной связующей / Г. И. Антонов // Огнеупоры и техническая керамика. — 1998. — № 9. — С. 22–26.
3. *Белогурова, О. А.* Фазообразование в мулитографитовых огнеупорах / О. А. Белогурова, Н. Н. Гришин // Огнеупоры и техническая керамика. — 2010. — № 7/8. — С. 48–55.
4. *Мацуо, А.* Повышение качества периклазоуглеродистых огнеупоров для футеровки кислородных конвертеров / А. Мацуо, К. Ога-Сахара [и др.] // Тайкабуцу. — 1984. — Т. 36. — С. 644–647.

5. **Яговцев, А. В.** Исследование влияния состава цирконистографитового материала на его свойства / А. В. Яговцев, Н. В. Обабков, И. Д. Кашчев // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 17–20.

Yagovtsev, A. V. Study of effect of zirconia-graphite material composition on its properties / A. V. Yagovtsev, N. V. Obabkov, I. D. Kashcheev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 388–391.

6. **Хорошавин, Л. Б.** Углеродизация огнеупоров / Л. Б. Хорошавин, В. А. Перепелицын // Огнеупоры и техническая керамика. — 1999. — № 6. — С. 4–12.

Khoroshavin, L. B. Carbonization of refractories / L. B. Khoroshavin, V. A. Perepelitsyn // Refractories and Industrial Ceramics. — 1999. — Vol. 40, № 5. — P. 227–234.

7. **Кашчев, И. Д.** Оксидноуглеродистые огнеупоры / И. Д. Кашчев. — М. : Интермет Инжиниринг, 2000. — 265 с.

8. **Рялова, А. А.** Оптимизация состава бетона системы $Al_2O_3-SiC-C$: тезисы Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (19–20 марта 2015 г., Москва) / А. А. Рялова, И. Д. Кашчев, С. А. Поморцев // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 29.

9. **Ярушина, Т. В.** Шпинелеобразующие углеродсодержащие огнеупоры для футеровки сталеразливочных ковшей / Т. В. Ярушина, М. Ю. Латкин : тезисы Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (19–20 марта 2015 г., Москва) // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 31.

10. **Стрелов, К. К.** Теоретические основы технологии огнеупорных материалов / К. К. Стрелов, И. Д. Кашчев. — М. : Металлургия, 1996. — 608 с.

11. **Гасик, М. И.** Теория и технология электрометаллургии ферросплавов : учебник для вузов / М. И. Гасик, Н. П. Лякишев. — М. : Интермет Инжиниринг, 1999. — 764 с.

12. **Эллиот, Д.** Термохимия сталеплавильных процессов : справочник / Д. Эллиот, М. Глейзер, В. Рамакришна. — М. : Металлургия, 1969. — 256 с.

13. **Бережной, А. С.** Многокомпонентные системы окислов / А. С. Бережной. — Киев : Наукова думка, 1970. — 456 с.

14. **Верятин, У. Д.** Термодинамические свойства неорганических веществ : справочник / У. Д. Верятин, В. П. Мажеров, Н. П. Рябцев [и др.]. — М. : Атомиздат, 1965. — 416 с.

15. **Ристич, М. М.** Основы науки о материалах / М. М. Ристич. — Киев : Наукова думка, 1984. — 152 с.

16. **Перепелицын, В. А.** Прогнозирование электроизоляционных свойств оксидной и силикатной керамики / В. А. Перепелицын // Научно-технический прогресс в разработке и применении новых керамических материалов и изделий для электротехники (Керамика-86)

: тезисы докладов Всесоюзного научно-технического совещания. — М. : Информэлектро, 1986. — С. 2.

17. **Перепелицын, В. А.** Энергоплотность и энергопрочность силикатов и оксидов / В. А. Перепелицын // Высокотемпературная химия силикатов и оксидов : тезисы докладов 6-го Всесоюзного совещания. — Л. : Наука, 1988. — С. 13, 14.

18. **Перепелицын, В. А.** Энергоструктурные критерии улучшения качества периклаза / В. А. Перепелицын // Сб. науч. тр. ВостИО. — Свердловск, 1991. — С. 21, 22.

19. **Перепелицын, В. А.** Сырьевая база Урала для производства высокоизносостойчивых огнеупоров / В. А. Перепелицын // Огнеупоры на рубеже веков (XX–XXI) : сб. науч. тр. ВостИО. — Екатеринбург : Уральский госуниверситет, 2001. — С. 30–48.

20. **Ормонт, Б. Ф.** Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников / Б. Ф. Ормонт. — М. : Высшая школа, 1968. — 488 с.

21. **Полубояринов, Д. Н.** Высокоглиноземистые керамические и огнеупорные материалы / Д. Н. Полубояринов, В. Л. Балкевич, Р. Я. Попильский. — М. : Госстройиздат, 1960. — 232 с.

22. **Войткевич, Г. В.** Краткий справочник по геохимии / Г. В. Войткевич, А. Е. Мирошников, А. С. Поваренных, В. Г. Прохоров. — М. : Недра, 1970. — 280 с.

23. **Перепелицын, В. А.** Основы технической минералогии и петрографии / В. А. Перепелицын. — М. : Недра, 1987. — 255 с.

24. **Перепелицын, В. А.** Техногенное минеральное сырье Урала / В. А. Перепелицын, В. М. Рытвин, В. А. Коротеев [и др.]. — Екатеринбург : РИО УрО РАН, 2013. — 332 с.

25. **Перепелицын, В. А.** Ферросплавные алюминотермические шлаки / В. А. Перепелицын, В. М. Рытвин, С. И. Гильварг [и др.]. — Екатеринбург : Уральский рабочий, 2014. — 368 с.

26. **Лялин, В. К.** Биорастворимая волокнистая изоляция : тезисы Международной конференции огнеупорщиков и металлургов (19–20 марта 2015 г., Москва) / В. К. Лялин, Е. Н. Дёмин // Новые огнеупоры. — 2015. — № 3. — С. 27.

27. **Бюхель, Г.** Бонит — новый сырьевой материал, предлагающий новые возможности в производстве огнеупоров / Г. Бюхель, А. Б. Бур, Д. Гириш, Р. Рэгер // Новые огнеупоры. — 2006. — № 7. — С. 66–72.

28. **Бережной, А. С.** Некоторые статистические и другие закономерности для огнеупорных веществ / А. С. Бережной // Сб. научных трудов УкрНИИО. Вып. 5. — Харьков : Металлургиздат, 1961. — С. 5–26. ■

Получено 10.11.15

© В. А. Перепелицын, Ф. Л. Капустин, О. Ю. Шешуков, А. В. Яговцев, Л. В. Остряков, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



07a09 June 2016
São Paulo Expo | São Paulo - SP - Brasil
Exhibition: 11 a.m. to 8 p.m. | Congress: 9 a.m. to 6 p.m.

EXPO ALUMINIO 2016 — международная выставка по алюминию

7–9 июня 2016 г.

г. Сан-Паулу, Бразилия

www.expoaluminio.com.br