

Д. т. н. **В. А. Соколов**¹ (✉), **М. А. Горбаненко**², к. т. н. **А. Б. Лисафин**²,
д. т. н. **М. Д. Гаспарян**³

¹ ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

² ООО «Технокерамика», Москва, Россия

³ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева», Москва, Россия

УДК 546.831-31:621.365.5

ВЫБОР ПЛАВИЛЬНОГО АГРЕГАТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПЛАВЛЕНОГО ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Приведены данные по получению плавленного и плавленного стабилизированного диоксида циркония из бадделеита и синтетического диоксида циркония в индукционных, плазменных и электродугowych печах. Обсуждены результаты и показаны перспективы карботермического получения диоксида циркония из циркона в электродуговой печи. Показано положительное влияние окислительного режима плавления в электродуговой печи на качество и процесс получения плавленного продукта. Приведены данные по получению плавленного диоксида циркония из циркона в плазменных печах.

Ключевые слова: плавленный диоксид циркония (ПДЦ), плавленный стабилизированный диоксид циркония (ПСДЦ), бадделеит, циркон, индукционная печь, плазменная печь, электродуговая печь, окислительная плавка, карботермия.

Диоксид циркония является наиболее широко используемым химическим соединением циркония, который в виде природного (бадделеита) и синтетического находит широкое применение в разных отраслях промышленности, главным образом для производства огнеупоров, технической керамики, абразивов. В последнее десятилетие значительно увеличилось применение диоксида циркония для производства материалов для электроники, кислородных сенсоров, пигментов для керамики, катализаторов и др. Крупной отраслью потребления диоксида циркония является атомная промышленность для получения ядерно-чистого металлического циркония (www.chmz.net).

Наряду с природным и синтетическим диоксидом циркония большой спрос имеют также его структурные модификации (моноклинная и кубическая, стабилизированная оксидами кальция или иттрия) в плавном виде. Так, по экспертным оценкам, мировое производство плавного диоксида циркония (ПДЦ) более 50 тыс. т; при этом доля стабилизированных марок не превышает 20 %.

Потребность России в ПДЦ из-за отсутствия собственного производства полностью осуществляется за счет импортных поставок. При этом потребителями ПДЦ являются предприятия стратегиче-

ски важных отраслей промышленности (атомной, авиационной, ракетно-космической, металлургической и др.). Поэтому создание отечественного крупнотоннажного производства ПДЦ является не только актуальной задачей, но и необходимой на случай возникновения непредвиденных внешне-экономических и внешнеполитических ситуаций. Исследования по получению ПДЦ достаточно широко проводились в СССР [1, 2] и продолжаются в России [3, 4]. Систематические комплексные исследования по разработке рациональных способов получения ПДЦ проводятся в НИТУ МИСиС [5–7], а также начиная с 2010 г. в ООО «Технокерамика» (г. Обнинск Калужской обл.).

Выбор метода плавления является определяющим для производства ПДЦ. При этом необходимо учитывать, что ПДЦ при использовании разных методов плавления можно получить либо в литой форме (отливка), либо в диспергированной (гранулы). Форма получения ПДЦ определяет его дальнейшее использование. Так, примером получения диоксида циркония в форме отливки являются плавнелитые огнеупоры с содержанием более 90 % ZrO_2 , которые являются конечным товарным продуктом. Плавный гранулированный диоксид циркония, кроме использования в качестве теплоизоляционного материала, является сырьевым полуфабрикатом для дальнейшей переработки и т. д.

Рассмотрение применяемых методов нагрева при получении ПДЦ позволит рационально с учетом требований к его качеству и объему производства определить вид плавильного агрегата. Основным методом плавления при получении



В. А. Соколов
E-mail: sokolov235@yandex.ru

ПДЦ переплавом синтетического диоксида циркония или бадделеитового концентрата является индукционная и электродуговая плавка.

Индукционная плавка основана на методе прямого ВЧ-нагрева и плавления оксидных материалов в холодном тигле. На рис. 1 показана схема холодного тигля периодического действия. Технологический процесс включает стартовый нагрев шихты (в данном случае порошкообразного ZrO_2 с добавками) до температуры плавления, наращивание первоначального объема расплава до заданного с последующей его кристаллизацией [8, 9].

Плавильно-кристаллизационные индукционные устройства периодического действия типа холодных тиглей применяют для синтеза моно-

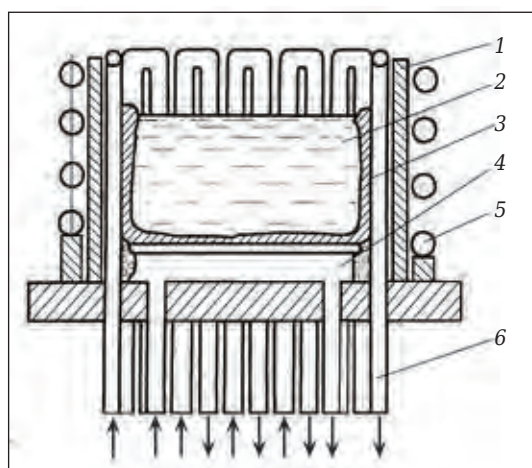


Рис. 1. Холодный тигель для плавления тугоплавких оксидных материалов: 1 — тигель; 2 — расплав; 3 — гарнисаж; 4 — индуктор; 5 — охлаждаемое дно; 6 — водоохлаждаемые трубки

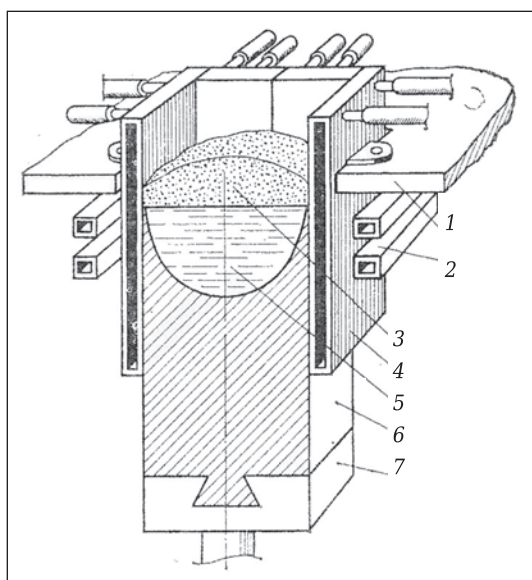


Рис. 2. Схема индукционного плавильно-кристаллизационного устройства с шахтой прямоугольного сечения: 1 — монтажная плита; 2 — индуктор; 3 — шихта; 4 — водоохлаждаемая секция плавильной шахты; 5 — ванна расплава; 6 — наплавленный блок; 7 — подвижной под

кристаллов ZrO_2 с разными добавками, для создания порошков термобарьерных защитных покрытий в авиакосмической промышленности, а также в ювелирной промышленности (фианиты) [10]. Требованиям к производству плавленных оксидных материалов наиболее полно отвечает индукционная непрерывно-последовательная наплавка слитков при использовании проходных плавильно-кристаллизационных устройств с перемещающимся подом (рис. 2).

Особенностями этого процесса являются непрерывное расплавление исходной шихты на поверхности ванны расплава и постоянная кристаллизация расплава в донной части ванны. Полученный слиток перемещается вниз из зоны плавления с помощью подвижного пода, на котором он закреплен. Удельные затраты электроплавки в данном случае значительно меньше, чем при плавке в холодных тиглях.

По технологии индукционной плавки в холодном тигле порошковый ПСДЦ — плавленный стабилизированный диоксид циркония (оксидом кальция или иттрия) производит предприятие «Технокерамика». Порошок ПСДЦ (рис. 3) содержит CaO (4,6 %), SiO_2 ($\leq 0,3$ %), Fe_2O_3 ($\leq 0,1$ %). На предприятии организован выпуск порошков фракций крупнее 5, 3–5, 1–3, 0,5–1, 0,2–0,5 мм и 40–100 мкм, а также тонкомолотый порошок (мельче 45 мкм) со средними размерами частиц 5–10 мкм.

Применение установок индукционного нагрева является экономически оправданным при использовании сырья с высокими требованиями к его чистоте (пример с фианитами), позволяющего выпускать высокорентабельную продукцию. Такая плавка характеризуется меньшими потерями шихтовых материалов, что очень важно при использовании дорогостоящего сырья. Однако недостатками использования таких установок для получения большого объема ПДЦ являются низкая производительность и трудности с получением диспергированных материалов.

Электродуговая плавка, источником тепловой энергии которой является электрическая дуга,

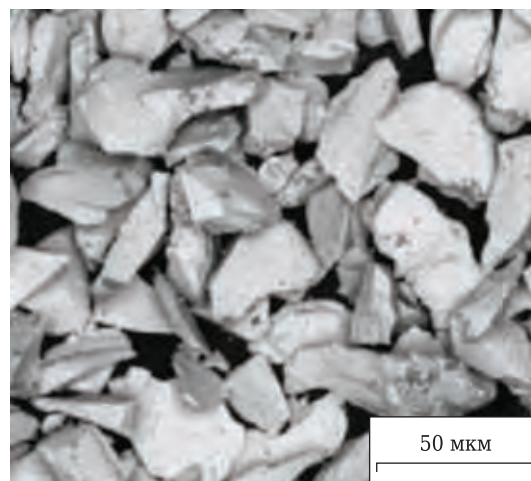


Рис. 3. Порошок ПСДЦ фракции 40–100 мкм

широко применяется в металлургии и производстве плавеных оксидных материалов [11, 12]. В результате концентрированного выделения энергии в малых объемах в электродуговых печах достигаются высокие температуры (2200–2700 °С), необходимые для плавки шихт на основе тугоплавких оксидов (ZrO_2 , Al_2O_3 , MgO и др.). Электрическая дуга обеспечивает также высокую скорость нагрева, повышенную производительность установки и в большинстве случаев требуемую чистоту выплавляемого материала. Электродуговой плавкой получают отливки плавленоливых огнеупоров с содержанием ZrO_2 до 94 % (огнеупор ER 1195) [13]. Кроме того, достоинством электродуговой плавки является возможность получения плавленого материала в диспергированном виде.

Для плавки тугоплавких оксидов применяют трехфазные электродуговые печи с графитовыми электродами и водоохлаждаемым корпусом. Для печей, предусматривающих слив расплава в литейную форму и получение отливок, а также грануляцию расплава, имеется механизм наклона печи (рис. 4). Используют также электродуговые печи с плавкой «на блок»: шихта плавится в изложнице, расположенной в кожухе перемещающейся тележки. Остывание отливки происходит в изложнице (рис. 5).

При плавке «на блок» из шихты, состоящей из бадделеита и мела, в трехфазной электропечи мощностью 400 кВ·А (изложница диаметром 900 и высотой 1200 мм) за 3 ч наплавляли блок массой 680 кг [1]. Электрический режим плавки: ток 3500–4000 А, напряжение 82 В. Выход плавленого материала 68 %, непроплава 32 %. Плавленый материал характеризовался темной окраской вследствие частичного восстановления ZrO_2 , нарушением его стехиометрии и образованием карбидов. Для восстановления стехиометрии ZrO_2 плавленый материал подвергали окислительному обжигу при 1500 °С, а затем измельчали в щековой и валковой дробилках до получения размеров зерен менее 2 мм. Химический состав измельченного материала фракции 0,5–2 мм после рассева и магнитной сепарации, %: ZrO_2 94,3, CaO 5,5.

ПСДЦ, стабилизированный оксидом кальция, получали также в однофазной электропечи мощностью 300 кВ·А плавкой бадделеитового концентрата с известняком. Плавку выполняли «на блок» при напряжении 88 В и расходе электроэнергии 2900 кВт·ч/т [12, с. 173, 174]. Данные о получении ПСДЦ приведены также в статьях [14, 15]. При этом указано, что производительность плавки «на слив» в 2–3 раза выше, чем плавки «на блок».

Плавка диоксида циркония из-за повышенной температуры плавления (2700 °С) представляет значительную трудность и требует высоких энергозатрат. Создание новых электродуговых установок типов ЭДП-450 и ЭДП-600М позволило получать ПДЦ в режиме окислительного плавления [16, 17]. Так, в электродуговой печи ЭДП-450 мощностью 450 кВ·А плавкой диоксида циркония

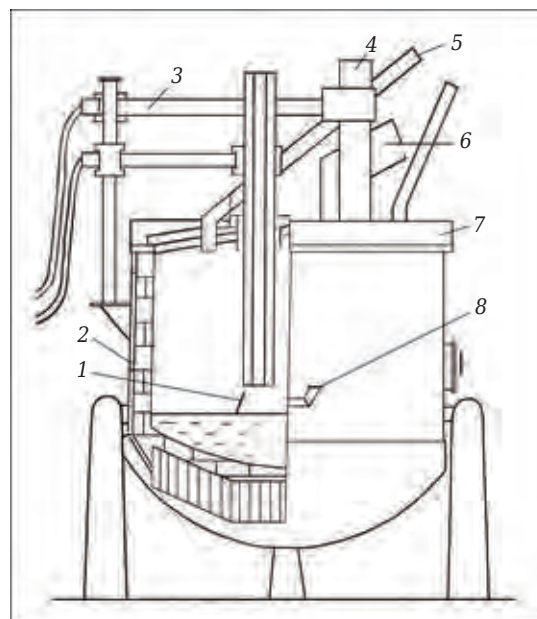


Рис. 4. Электродуговая печь для плавки «на слив»: 1 — дуга; 2 — корпус; 3 — электрододержатель; 4 — электрод; 5 — загрузка шихты; 6 — газоотвод; 7 — крышка; 8 — летка

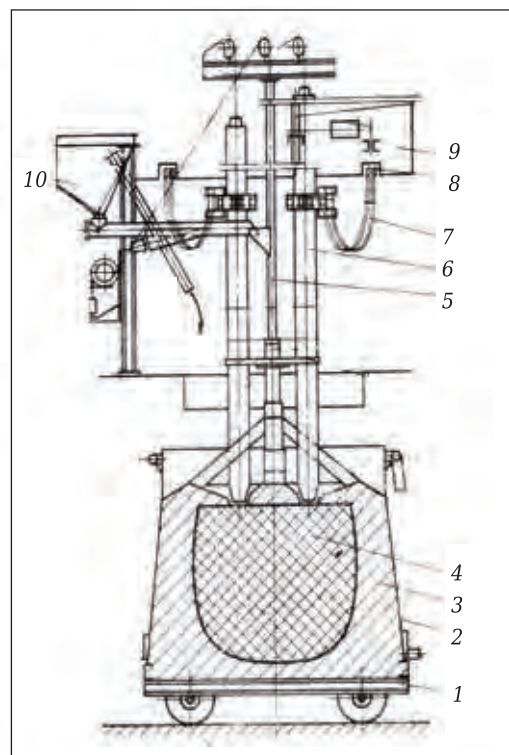


Рис. 5. Электродуговая печь для плавки «на блок»: 1 — тележка; 2 — кожух; 3 — изоляция; 4 — плавленый материал; 5 — труба для загрузки шихты; 6 — электроды; 7 — короткая сеть; 8 — подвод тока; 9 — кожух для удаления газов; 10 — бункер с шихтой

марки ЦрО-1 с карбонатом кальция квалификации ч. получали отливки массой до 32 кг (продолжительность плавки не более 60 мин). Состав кристаллической фазы полученного материала ВЦ-2, по данным рентгеноспектрального микро-

зондирования, %: ZrO_2 91,5–92,7, CaO 7,0–7,8, примеси 0,4 [18]. Структуру материала составляли кристаллы ZrO_2 кубической модификации размерами 0,15–0,35 мм, имеющие в плоскости шлифа полигональную изометрическую форму. Особенность этого материала — наличие опоясывающей кристаллической каймы шириной 0,002–0,003 мм вокруг зерен основной кристаллизации. Вероятно, это свидетельствует о присутствии небольших количеств ZrO_2 моноклинной модификации, на что указывают его слабые пики на рентгенограмме этого вещества. Однако высокую степень стабилизации ZrO_2 подтверждает график дилатометрических испытаний (рис. 6), на котором отсутствует петля гистерезиса, характерная для материалов бадделеитового состава. Следует отметить изменение окраски полученного материала от светло-серого до зеленоватого в результате специально подобранного режима окислительного плавления. В отличие от этого, по данным работы [1], при дуговой восстановительной плавке шихты на основе бадделеита и мела из-за нарушения стехиометрии ZrO_2 отливки приобретали окраску от темно-серой до черной. Поэтому для таких материалов был необходим дополнительный обжиг для восстановления стехиометрии ZrO_2 .

Модернизированная установка ЭДП-600М с улучшенными энергетическими характеристика-

ми позволила реализовать окислительный режим плавления и получение перегретого жидкотекучего расплава с возможностью его максимального слива из печи. Поэтому систематические исследования получения ПСДЦ проводили в электродуговой печи ЭДП-600М со сдвигающимися графитовыми электродами диаметром 100 мм. В качестве сырьевых материалов использовали бадделеитовый порошок марки ПБ-0 с содержанием ZrO_2 98,5 % и мел (ГОСТ 8253). После расплавления шихты расплав некоторое время выдерживали в печи, а затем сливали в графитовую форму с получением отливок массой до 50 кг. Была проведена также серия плавок с получением гранул и агрегатов ПСДЦ размерами от 1 до 10 мм (рис. 7).

По данным петрографического анализа, ПСДЦ имеет полнокристаллическую структуру из достаточно крупных кристаллов ZrO_2 . Отливки характеризуются более крупными кристаллами (0,40–0,60 мм) по сравнению с гранулами (0,20–0,40 мм). Кристаллическая фаза гранулированного ПСДЦ, по данным рентгеноспектрального микрозондирования, содержит 91,5–92,4 % ZrO_2 и 7,6–8,5 % CaO . Результаты рентгенофазового анализа подтвердили, что единственным кристаллическим соединением всех плавящихся отливок и гранул является ZrO_2 кубической модификации.

Приведенные примеры использования индукционного и электродугового нагрева свидетельствуют о возможности получения ПДЦ и ПСДЦ путем переплава достаточно дорогого порошкового сырья — бадделеита или синтетического ZrO_2 . Синтетический ZrO_2 , получаемый длительным и сложным гидрометаллургическим способом, является высокочистым и мелкозернистым порошком, который наиболее рационально использовать в производстве конструкционной и электронной керамики. Для производства большинства типов огнеупоров и технической керамики этот вид сырья является достаточно дорогим, что сдерживает их эффективное развитие. Поэтому для снижения затрат на сырье разрабатываются способы получения ПДЦ моноклинной и кубической модификации из цирконового материала, стоимость которого на порядок ниже, чем синтетического ZrO_2 . К основному способу получения ZrO_2 из циркона, имеющему практическую реализацию, относится электродуговая, плазменная и плазменно-индукционная плавка.

Основой плазменной и плазменно-индукционной плавки является диссоциация циркона, вводимого в зону высокой температуры (7000–9000 °С) плазменного реактора, в котором он диссоциирует на ZrO_2 и SiO_2 с последующим удалением SiO_2 гидрометаллургическим способом. Принципиальная аппаратурная схема опытно-промышленного производства получения ПДЦ из цирконового песка в плазменной печи показана на рис. 8 [19–21].

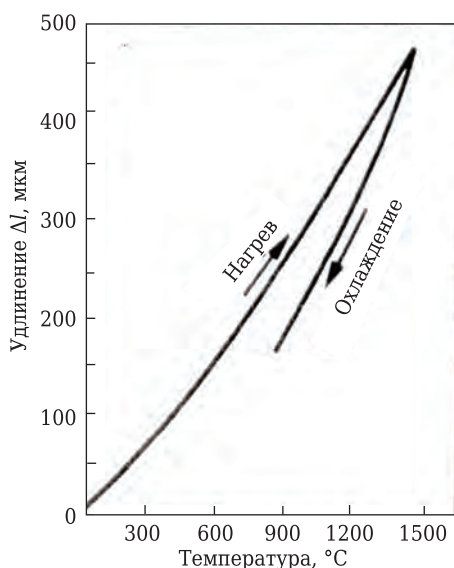


Рис. 6. Дилатометрическая кривая ПСДЦ ВЦ-2



Рис. 7. Гранулированный ПСДЦ

Цирконовый песок, измельченный до крупности 200 мкм, равномерно подается в плазменный разряд, создаваемый дуговым плазмотроном. За доли секунды пребывания в плазме происходят расплавление и практически полное (99 %) разложение циркона на оксиды:



После охлаждения и затвердевания продукт содержит сферические частицы моноклинного ZrO_2 , покрытого слоем аморфного кремнезема; последний вследствие повышенной реакционной способности избирательно выщелачивают 50 %-ным раствором едкого натра при 120 °С. После двухстадийного противоточного выщелачивания получают ZrO_2 с содержанием SiO_2 менее 1 % и раствор силиката натрия, являющийся полезным побочным продуктом. Диоксид циркония состоит из частиц, представляющих собой полые сферы диаметром 0,1–0,2 мкм. В зависимости от требований потребителя к продукту процесс можно сократить, применяя только одно выщелачивание. По данным [19], могут быть получены три вида продукта, содержащие 70 % ZrO_2 и 30 % SiO_2 , 96 % ZrO_2 и 4 % SiO_2 или 99 % ZrO_2 и 0,5 % SiO_2 . Другие примеры получения ПДЦ из циркона методом плазменного разложения приведены в публикациях [22–24]. Серьезными недостатками дуговых плазмотронов являются невозможность длительной непрерывной работы при мощности более 300 кВт, значительная эрозия электродов, использование аргона в качестве плазмообразующего газа.

Применение высокочастотных индукционных (ВЧИ) плазменных установок для получения ПДЦ представляется более эффективным по сравнению с дуговой плазменной техникой [4]. В

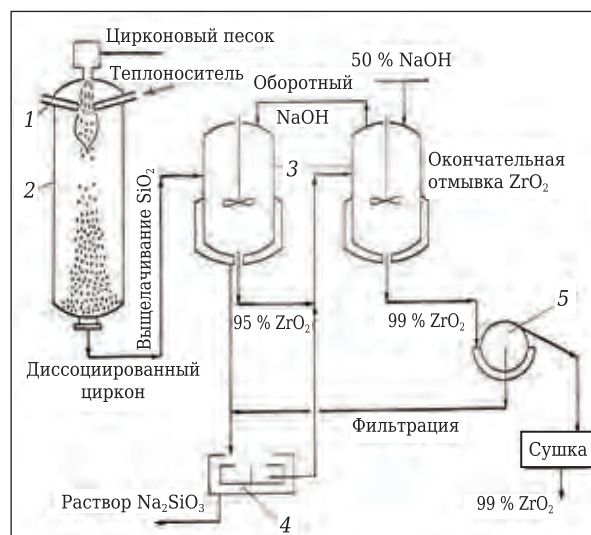


Рис. 8. Аппаратурная схема получения ПДЦ термическим разложением циркона в плазменном реакторе: 1 — плазмотрон; 2 — плазменный реактор; 3 — реактор-выщелачиватель; 4 — центрифуга; 5 — вакуум-фильтр

опытной ВЧИ-плазменной установке мощностью 1 МВ·А предприятия «Технокерамика» проведены эксперименты по термическому разложению циркона в воздушной плазме (рис. 9) [25]. На рис. 10 показана частица циркона после плазменной обработки, представляющая собой сферу, состоящую из матрицы диоксида циркония, пространство которой заполнено аморфным диоксидом кремния, обладающим повышенной реакционной способностью, что ускоряет процесс извлечения чистого диоксида циркония. Кроме того, проведены работы по обработке продуктов разложения цирконового концентрата, полученных в воздушной плазме, с последующим фтораммонийным

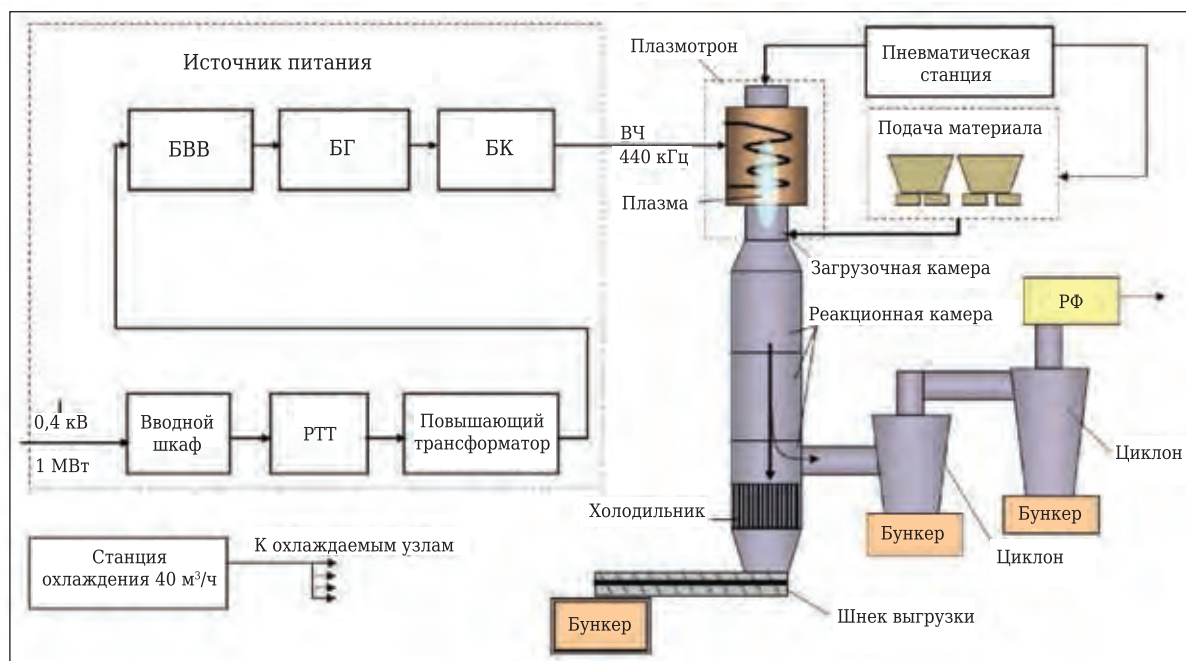


Рис. 9. Схема ВЧИ-плазменной установки

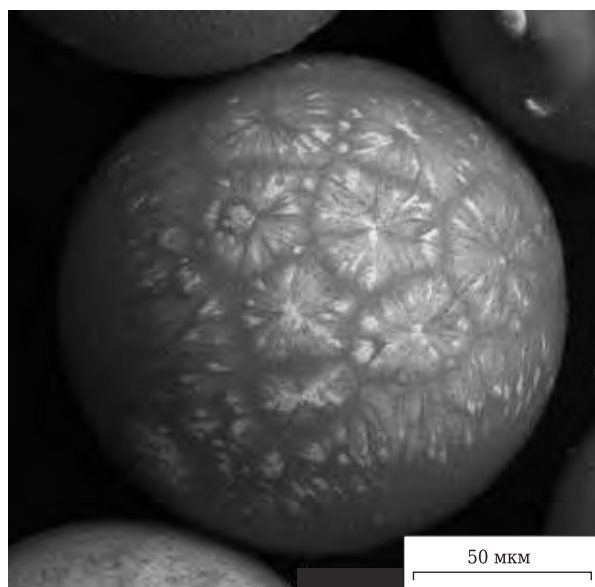


Рис. 10. Частица ZrO_2 после обработки циркона в струе ВЧИ-воздушной плазмы

извлечением и получением материала с содержанием ZrO_2 99,9 %. По технологии получения ZrO_2 фтораммонийной обработкой плазмодиссоциированного циркона, разработанной на предприятии «Технокерамика» совместно с Томским политехническим университетом, выпущены опытно-промышленные партии продукции ZrO_2 .

Электродуговая плавка получения ПДЦ методом карботермического разложения циркона основана на разложении циркона при высоких температурах на оксиды по реакции (1) и восстановлении выделенного SiO_2 до летучего монооксида SiO [26]:

$$SiO_2 + C \rightarrow SiO \uparrow + CO. \quad (2)$$

Монооксид кремния улетучивается из рабочей зоны печи и в дальнейшем окисляется до SiO_2 , частицы которого улавливаются в пылеуловителях. Для реализации карботермического разложения использовали электродуговые печи с плавкой «на блок» (см. рис. 3) и «на слив» (см. рис. 4). Для получения ПСДЦ из циркона (65–67 % ZrO_2) использовали восстановительную плавку «на блок», в процессе которой содержание SiO_2 снижалось от 33 до 0,5–0,9 % [12, с. 172, 173]. Шихта включала циркон, железные опилки и металлургический кокс. Выплавленный продукт измельчали, отмагничивали и прокаливали при 1400–1450 °С для разложения карбидов. Состав ПСДЦ, %: ZrO_2 94–95, CaO 4–5.

Реализация карботермического разложения циркона в электродуговой установке ЭДП-450 позволила на первом этапе снизить количество SiO_2 в цирконе почти в 3 раза и получить сырьевые полуфабрикаты с содержанием ZrO_2 более 80 %. При использовании окислительного режима плавления и литейного кокса в качестве углеродистого восстановителя был получен плавленый

продукт в виде агломератов размерами 10–15 мм [27]. Высокое содержание остаточного кремнезема в плавленом продукте объясняется значительным уносом и горением кокса в период загрузки в печь, что приводило к снижению его восстановительной функции. Достижение более высокой степени обескремнивания требует соответствующей коррекции технологии (изменение режима и условий плавки, повышение эффективности восстановителя, компактирование шихты и др.).

Следует отметить, что хотя по получению ПДЦ и ПСДЦ проводилось достаточно много исследований, их опытно-промышленная проверка в нашей стране не была завершена из-за ликвидации опытно-промышленной экспериментальной базы вследствие экономической ситуации в 90-е годы прошлого века. При выборе плавильного агрегата для промышленного производства ПДЦ и ПСДЦ необходимо учитывать многолетнюю практику применения электродуговых печей для получения плавленных оксидных материалов [11, 12]. За основу такого оборудования могут быть приняты электродуговые печи типов ДС-05, ДСПМ-1,5 и ОКБ 2126А [16], модернизированные в соответствии с требованиями к получаемому плавленому продукту и с масштабом производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Результаты проведенного анализа плавильных агрегатов свидетельствуют, что для создания опытно-промышленного производства ПДЦ и ПСДЦ из бадделеитового концентрата или синтетического ZrO_2 наиболее рационально использовать электродуговую печь с возможностью проводить режим окислительного плавления. Создание пилотной электродуговой установки на базе печи ДС-0,5 позволит выпускать в год методом переплава до 1000 т плавленного гранулированного ZrO_2 моноклинной модификации или ZrO_2 , стабилизированного оксидами кальция или иттрия. Такая продукция предназначена в первую очередь для основных потребителей — предприятий по производству огнеупоров, абразивов, керамики и пигментов. Для получения конструкционной и электронной керамики, кислородных сенсоров с повышенными требованиями к чистоте сырья возможно использование индукционных и плазменных установок с учетом экономической целесообразности.

2. Для получения ПДЦ и ПСДЦ из цирконового сырья возможны два варианта: электродуговой карботермический и плазменный с использованием гидрометаллургии. Применение электродуговой печи для карботермии циркона позволит организовать достаточно крупное производство (несколько тысяч тонн в год) ПДЦ или ПСДЦ. Однако это потребует специального плавильного оборудования, которое кроме высокой температуры процесса должно обеспечивать удаление боль-

ших количеств монооксида кремния; при этом необходима грануляция расплава при литье.

3. Использование плазменных установок позволит организовать среднетоннажное производство с выпуском отдельных партий ПДЦ и ПСДЦ. Выпускаемый при этом ZrO_2 обладает повышенной чистотой и имеет размер частиц, пригодный для использования в разных отраслях без дополнительного дробления и измельчения.

Библиографический список

1. **Karaulov, A. G.** Fusing baddeleyite in an electric arc furnace / A. G. Karaulov, A. D. Malyuk, V. G. Druzhinin, A. V. Oistrakh // *Refractories*. — 1983. — Vol. 24, № 2. — P. 208–210.

Карaulов, А. Г. Освоение плавки бадделейта в электродуговой печи / А. Г. Карaulов, А. Д. Малюк, В. Г. Дружинин [и др.] // *Огнеупоры*. — 1983. — № 4. — С. 34–36.

2. **Карaulов, А. Г.** Опыт плавки бадделейта в электродуговых печах ОКБ 955Н / А. Г. Карaulов, Т. Е. Сударкина, Я. Г. Гапонов [и др.] // *Огнеупоры*. — 1983. — № 6. — С. 21–24.

3. **Sokolov, V. A.** Preparation of fused stabilized zirconium dioxide / V. A. Sokolov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2015. — Vol. 56, № 2. — P. 119–121.

Соколов, В. А. О получении плавного стабилизированного диоксида циркония / В. А. Соколов // *Новые огнеупоры*. — 2015. — № 3. — С. 75–78.

4. **Лисафин, А. Б.** Разработка и исследование высокочастотной индукционной плазменной установки мощностью 1 МВА для новой технологии получения диоксида циркония из цирконового концентрата : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2017.

5. **Соколов, В. А.** Разработка рациональных методов получения диоксида циркония : тез. докл. Междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов (7–8 апреля 2016 г., Москва) / В. А. Соколов, С. В. Махов, Е. В. Богатырева // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 3. — С. 26, 27.

6. **Соколов, В. А.** Разработка экологически безопасного получения диоксида циркония из цирконового концентрата / В. А. Соколов, Е. В. Богатырева, С. В. Махов // *Материалы междунар. науч.-практ. конф. «Интенсификация гидрометаллургических процессов переработки природного и техногенного сырья. Технологии и оборудование»*, Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2018 г. — С. 302–304.

7. **Соколов, В. А.** О получении плавного стабилизированного диоксида циркония : тез. докл. Междунар. конф. огнеупорщиков и металлургов (3–4 апреля 2014 г., Москва) / В. А. Соколов // *Новые огнеупоры*. — 2014. — № 3. — С. 24.

8. **Александров, В. И.** Плавнение тугоплавких диэлектриков методом прямого ВЧ нагрева в «холодном» контейнере / В. И. Александров, В. В. Осико, В. М. Татаринцев [и др.] // *Неорганические материалы*. — 1973. — Т. 9, № 2. — С. 236–238.

9. **Petrov, Yu. B.** Induction melting of refractory oxide materials in cold crucibles / Yu. B. Petrov, A. V. Shkul'kov, I. V. Shurygina // *Refractories*. — 1980. — Vol. 21. — P. 536–541.

Петров, Ю. Б. Индукционная плавка в холодных тиглях окисных огнеупорных материалов / Ю. Б. Петров, А. В. Шкульков, И. В. Шурьгина // *Огнеупоры*. — 1980. — № 10. — С. 41–56.

10. **Кравчук, Д. И.** Особенности производства методом гарнисажа фианитов / Д. И. Кравчук, В. И. Кравчук // *Молодой ученый*. — 2015. — № 10 (90). — С. 236–239.

11. **Попов, О. Н.** Производство и применение плавнелитых огнеупоров / О. Н. Попов, П. Т. Рыбалкин, В. А. Соколов, С. Д. Иванов. — М. : Металлургия, 1985. — 256 с.

12. **Соколов, А. Н.** Плавные огнеупорные оксиды / А. Н. Соколов, У. Б. Ашимов, А. В. Болотов [и др.]. — М. : Металлургия, 1988. — 232 с.

13. Каталог SEPR Group. Refractory Products for Glass Furnaces. Fused cast refractories. Fused cast products. — 64 p.

14. **Kuznetsov, G. I.** Fused refractories: New developments and prospects / G. I. Kuznetsov, E. S. Borisovskii // *Refractories*. — 1994. — Vol. 35. — P. 389–391.

Кузнецов, Г. И. Плавные огнеупоры: новые разработки и перспективы использования / Г. И. Кузнецов, Е. С. Борисовский // *Огнеупоры*. — 1994. — № 12. — С. 2–4.

15. **Перепелицын, В. А.** Производство плавного диоксида циркония в ОАО «Первоуральский динасовый завод» / В. А. Перепелицын, А. М. Гороховский, А. В. Федорцева [и др.] // *Новые огнеупоры*. — 2016. — № 7. — С. 25–29.

16. **Sokolov, V. A.** Arc melting plant synthesizing and producing fusion-cast / V. A. Sokolov, M. D. Gasparyan, P. P. Mamochkin // *Refract. Ind. Ceram.* — 2009. — Vol. 50, № 3. — P. 185–188.

Соколов, В. А. Дуговые плавильные установки для синтеза и производства плавнелитых огнеупоров / В. А. Соколов, М. Д. Гаспарян, П. П. Мамочкин // *Новые огнеупоры*. — 2009. — № 6. — С. 15–18.

17. **Гаспарян, М. Д.** Опыт-промышленная установка ЭДП-600М для плавки тугоплавких оксидных материалов : сб. науч. тр. VI междунар. науч.-практ. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология» / М. Д. Гаспарян, В. А. Соколов. — М. : ИТЕП, НИТУ «МИСиС», 2012. — С. 117, 118.

18. **Sokolov, V. A.** Fuson-cast refractories in high-zirconia region of the ZrO_2 - SiO_2 -CaO system / V. A. Sokolov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2005. — Vol. 46, № 3. — P. 197–200.

Соколов, В. А. Получение плавнелитых огнеупоров в высокоциркониевой области системы ZrO_2 - SiO_2 -CaO / В. А. Соколов // *Новые огнеупоры*. — 2005. — № 3. — С. 37–40.

19. **Thorpe, M. L.** Electric-arc furnace turns zircon sand to zirconia / M. L. Thorpe, P. H. Wilks // *Chem. Eng. (New York)*. — 1971. — Vol. 78, № 26. — P. 117–119.

20. **Зеликман, А. Н.** Металлургия тугоплавких редких металлов / А. Н. Зеликман. — М. : Металлургия, 1986. — 440 с.

21. **Туманов, Ю. Н.** Плазменные, высокочастотные, микроволновые и лазерные технологии в химико-металлургических процессах / Ю. Н. Туманов. — М. : Физматлит, 2010. — 968 с.

22. **Wilks, P. H.** Arc-plasma dissociation of zircon / P. H. Wilks // *Chem. Eng. (New York)*. — 1975. — Vol. 82, № 24. — P. 56, 57.

23. **Barnett, G.** Zircon to zirconia from sand to high performance ceramics / G. Barnett, M. Houchin, D. Jenkins // *Mineralogy-Petrology Symposium*, Sidney, 6–8 February 1989. — Parkville, 1989. — P. 107–110.

24. **Evans, F. M.** The influence of quench rates on the microstructure and properties of plasma-dissociated zircon / F. M. Evans, J. P. Williamson // *J. Mater. Sci.* — 1979. — Vol. 14, № 3. — P. 680–686.

25. **Фарнасов, Г. А.** Диссоциация циркона после обработки в воздушной высокочастотной индукционной плазме / Г. А. Фарнасов, А. Б. Лисафин // *Физика и химия обработки материалов*. — 2015. — № 2. — С. 29–34.

26. **Соколов, В. А.** Разложение циркона плавкой в электродуговой печи / В. А. Соколов // *Цветные металлы*. — 2006. — № 7. — С. 59–63.

27. **Sokolov, V. A.** Melting zircon in electric-arc furnace — a method for preparing refractory materials and green semifinished products / V. A. Sokolov // *Refract. Ind. Ceram.* — 2014. — Vol. 55, № 3. — P. 191–193.

Соколов, В. А. Плавка циркона в электродуговой печи — метод получения огнеупорных материалов и сырьевых полуфабрикатов / В. А. Соколов // *Новые огнеупоры*. — 2014. — № 5. — С. 8–10. ■

Получено 24.11.20

© В. А. Соколов, М. А. Горбаненко, А. Б. Лисафин, М. Д. Гаспарян, 2020 г.