

ЭЛЕКТРОПЛАВЛЕННЫЕ AZS-ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Изложены параметры технической эффективности современных стекловаренных печей для производства тарного стекла. Приведена структура огнеупорных и теплоизоляционных материалов, используемых в кладке стекловаренных печей. Сформулированы требования к качеству электроплавных алюмоциркониевосиликатных (AZS) огнеупоров для высокопроизводительных стекловаренных печей. Приведена рациональная структура AZS-огнеупоров для кладки горячей зоны футеровки стекловаренной печи производительностью 280 т/сут.

Ключевые слова: стекловаренные печи, бадделеитокорундовые огнеупоры, удельный съём стекломассы.

Современные отечественные регенеративные стекловаренные печи, предназначенные для варки тарного стекла, характеризуются высоким уровнем энергоэффективности и удельной производительности. Затраты теплоты на варку не превышают 4800 кДж/кг сваренной стекломассы, а выработка стекла за кампанию печи достигает 5000 т/м² площади варочного бассейна. Последний показатель обеспечивается при удельном съеме стекломассы 2,3 т/(м²·сут) и кампании печей до 6 лет. Благодаря высокотемпературному подогреву воздуха, предназначенному для сжигания топлива (до 1300 °С), и низким потерям теплоты в окружающую среду (не более 10 %) КПД печей достигает 45–50 %. В то же время суммарная выработка стекла на лучших зарубежных печах составляет 8000 т/м², что соответствует удельному съему стекломассы не менее 2,7 т/(м²·сут) и кампании печей 8 лет. При этом удельный расход теплоты на стекловарение не превышает 4500 кДж/кг, а КПД печей достигает 60 % [1].

Одним из важнейших условий создания стекловаренных печей с мировым уровнем технической эффективности является применение высококачественных огнеупорных и теплоизоляционных материалов. В футеровке варочной части печи, выработочного канала и регенератора используется широкая гамма изделий (табл. 1). Среди них наиболее дорогостоящими являются электроплавные бадделеитокорундовые огнеупоры, материальная доля которых не превышает 15 %, а стоимость составляет около 40 % от общих затрат на огнеупорные и теплоизоляционные материалы.

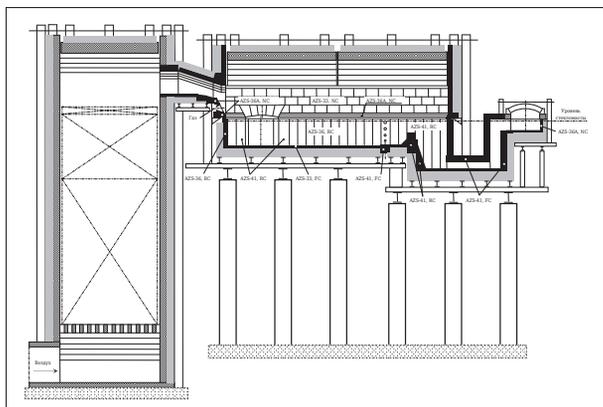
Электроплавные AZS-огнеупоры применяются для горячей зоны футеровки конструк-

тивных элементов печей, контактирующих с расплавом стекла и высокотемпературными (~1600 °С) продуктами горения топлива и дегазации шихты (см. рисунок). Следует отметить, что кампания стекловаренных печей лимитируется износом бадделеитокорундовых изделий.

При выборе AZS-огнеупоров для элементов горячей зоны футеровки основное внимание уделяется их коррозионной стойкости и склонности к образованию пороков, нерастворимых в расплаве стекла. Коррозионная стойкость электроплавных AZS-огнеупоров в основном зависит от содержания в них диоксида цир-

Таблица 1. Структура материалов для кладки стекловаренной печи производительностью 280 т/сут

| Изделия | Количество, т | Доля, % |
|--------------------------------------|---------------|---------|
| <i>Огнеупорные</i> | | |
| Динасовые | 109,0 | 4,45 |
| Шамотные | 448,9 | 18,31 |
| Муллитовые | 223,1 | 9,10 |
| Периклазовые | 1020,9 | 41,65 |
| Бадделеитокорундовые | 317,2 | 12,94 |
| Цирконовые | 30,2 | 1,23 |
| Керамические | 119,4 | 4,87 |
| Итого | 2268,7 | 92,55 |
| <i>Теплоизоляционные</i> | | |
| Динасовые | 9,1 | — |
| Шамотные | 79,8 | — |
| Муллитокремнеземистые | 39,9 | — |
| Муллитокорундовые | 12,0 | — |
| Пендиатомитовые | 39,5 | — |
| Муллитокремнеземистые волокнистые | 2,3 | — |
| Итого | 182,6 | 7,45 |
| Всего | 2451,3 | 100 |



Продольный разрез стекловаренной печи с подковообразным пламенем: ■ — AZS-огнеупоры; ▨ — прочие огнеупоры; ▩ — теплоизоляция

кония (33, 36 и 41 %) и плотности. Плотность изделия определяется как содержанием ZrO_2 , так и способом заливки расплава в форму. По расположению усадочной раковины изделия подразделяются на блоки с нормальной (NC), редуцированной (RC) усадочной раковины и без усадочной раковины (FC). Понятно, что наименьшую плотность имеют изделия AZS-33 типа NC (табл. 2), в которых пустоты (раковины) сконцентрированы со стороны отливки блока. Наибольшей плотностью характеризуются блоки AZS-41 типа FC. Следует отметить также, что их стоимость практически в 2 раза выше стоимости изделий AZS-33 типа NC. Несмотря на схожесть химического и минерального составов промышленных марок AZS-огнеупоров, их эксплуатационные свойства могут существенно различаться. Это связано с качеством сырьевых компонентов шихты, режимом ее плавления и особенностями технологического процесса изготовления огнеупоров [2].

Из всех примесей, содержащихся в бадделеитокорундовых изделиях, наиболее вредное влияние на коррозионную стойкость огнеупоров оказывает углерод. Присутствие углерода в плавных изделиях обусловлено применением сырья с примесями углеродсодержащих соединений, использованием графитовых электродов и восстановительным режимом плавления. Повышенное содержание углерода в расплаве (0,12—0,14 %) при восстановительной плавке увеличивает пористость изделий и, как следствие, уменьшает их стойкость к коррозионному воздействию стекломассы. По сравнению с окислительным режимом плавки на 100—150 °C снижается температура выделения стеклофазы и увеличивается склонность огнеупора к образованию пузырей при контакте с расплавом стекла. Снижение механической прочности изделий повышает в них количество трещин и посечек [3].

Таблица 2. Усредненные значения плотности электроплавных AZS-огнеупоров

| Огнеупор | Кажущаяся плотность, т/м ³ , огнеупора | | |
|----------|---|------|------|
| | NC | RC | FC |
| AZS-33 | 3,50 | — | 3,70 |
| AZS-36 | 3,60 | 3,75 | 3,85 |
| AZS-36A* | 3,65 | — | 3,90 |
| AZS-41 | 3,70 | 3,85 | 4,00 |

* С пониженным содержанием стеклофазы (13—14 %).

Независимо от зоны применения (газовая среда или расплав стекла) на эксплуатационные характеристики AZS-изделий сильно влияет их уровень окисления. В варочном бассейне плохо или неравномерно окисленный огнеупор склонен к выделению пузырей, дестабилизирующих границу раздела трех фаз (газ — расплав — огнеупор). Ускоренная коррозия огнеупора в контактной зоне способствует увеличению выделения в стекломассу газообразных, стекловидных и кристаллических пороков. Снижение вязкости стеклофазы, а также высокое содержание примесей углерода, оксидов железа и титана усиливают последствия некачественного окисления огнеупора. В рабочем пространстве печи некачественно окисленный огнеупор склонен к повышенному выделению стеклофазы. Генерируемые продукты «выпотевания» стекают в стекломассу. Сложный химический состав этих продуктов затрудняет их растворение в расплаве, и они в виде пороков (высокоглиноземистая свиль, цирконовые камни и др.) остаются в стекле. Поэтому для кладки ответственных элементов рабочего пространства печи используют окисленные бадделеитокорундовые изделия с пониженным содержанием стеклофазы (13—14 %).

Состояние поверхности AZS-изделий также имеет самое непосредственное отношение к их коррозионной стойкости. Сквозные трещины и поверхностные дефекты (паутина, микротрещины, сколы, поверхностные царапины) являются очагами заведомо ускоренной коррозии. Серьезную опасность для службы огнеупоров представляют трещины, образующиеся в них при первичном разогреве печи. Благодаря капиллярным силам стекломасса проникает даже в волосные трещины, пограничные плоскости которых кажутся полностью совмещенными. Это способствует расширению трещин и в конечном счете полному растрескиванию бруса. Образование трещин при первичном нагреве неразрывно связано с остаточными внутренними напряжениями в изделии. Сам про-

Таблица 3. Структура AZS-огнеупоров для стекловаренной печи производительностью 280 т/сут

| Марка огнеупора | Количество, т, огнеупора типа | | | Итого | |
|-----------------|-------------------------------|-------|------|-------|-------|
| | NC | RC | FC | т | % |
| AZS-33 | 97,4 | — | 52,6 | 150,0 | 47,29 |
| AZS-36 | — | 60,3 | 5,0 | 65,3 | 20,59 |
| AZS-36A | 41,5 | — | — | 41,5 | 13,08 |
| AZS-41 | — | 42,2 | 18,2 | 60,4 | 19,04 |
| Итого | 138,9 | 102,5 | 75,8 | 317,2 | 100 |

цесс изготовления плавлено-литых огнеупоров (литье — охлаждение) генерирует внутренние напряжения внутри застывшего и охлажденного блока. Минимизация поля внутренних напряжений — одна из важнейших задач в производстве бадделеитокорундовых изделий.

Неравномерный износ огнеупорной футеровки и зависимость стоимости AZS-изделий от их плотности и содержания диоксида циркония определяют дифференцированный подход к применению плавлено-литых бадделеитокорундовых огнеупоров в кладке печи. При этом учитываются условия эксплуатации печи, характеризующиеся удельным съемом стекломассы и плановым межремонтным периодом [2]. Основная цель рациональной схемы футеровки заключается в обоснованном снижении потребления дорогостоящих изделий AZS-41 типов RC и FC. Реализация этой цели становится возможной при наличии достаточной информации о полях температуры на ограждающих поверхностях кладки, а также о структуре и интенсивности конвекционных потоков в варочном бассейне. Результаты математического моделирования тепловой работы стекловаренной печи использованы автором статьи [4] при разработке проекта печи с удельным съемом стекломассы 2,55 т/(м²·сут), удельным расходом теплоты 4520 кДж/кг и плановой кампанией 8—9 лет.

Данные табл. 3 свидетельствуют о том, что в структуре использованных в проекте AZS-огнеупоров доминируют изделия AZS-33 (47,29%), большая часть которых приходится на блоки толщиной 200 мм типа NC, установленные в боковых стенах рабочего пространства печи. Изделия типа FC представлены донной плиткой толщиной 120 мм в варочном бассейне и толщиной 75 мм в выработочном канале (см. рисунок). Наиболее изнашиваемые элементы рабочего пространства (зуб подвесных боковых стен, опорные блоки влетов и горелочная структура воздушных каналов), а также боковые стены выработочного канала выполнены из изделий AZS-36A типа NC. В боковых стенах ванны в зоне варки (до порога) установлены блоки AZS-36 типа RC толщиной

250 и высотой 1400 мм. Периметр заглубленной части варочного бассейна (зона осветления) выполнен палисадами толщиной 250 и высотой 2200 мм из изделий AZS-41 типа RC. Этот материал использован для изготовления переливного порога и примыкающих к нему фасонных блоков. Барботажные блоки, проток и угловые брусья загрузочных карманов, изготовленные из изделий AZS-41 типа FC, составляют 5,74% от общего количества бадделеитокорундовых огнеупоров.

В заключение следует отметить, что оксидированные электроплавленные AZS-огнеупоры, характеризующиеся высокой огнеупорностью (~1700 °C) и коррозионной стойкостью к воздействию агрессивных сред, являются безальтернативным материалом для горячей зоны футеровки стекловаренных печей. Для снижения стоимости печных ограждений представляется целесообразным использование принципа рациональной схемы бадделеитокорундовых изделий в кладке печи. В интервале температур службы (1300—1600 °C) AZS-огнеупоры характеризуются высокой теплопроводностью — 5,2—7,7 Вт/(м·К). Для снижения тепловых потерь в окружающую среду наружная поверхность кладки требует установки эффективной теплоизоляции.

Библиографический список

1. **Дзюзер, В. Я.** Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М.: Теплотехник, 2009. — 340 с.
2. **Дзюзер, В. Я.** Огнеупоры для варочной части стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2008. — № 5. — С. 24—32.
3. **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.
4. **Дзюзер, В. Я.** Моделирование тепловой работы высокопроизводительной стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков // Стекло и керамика. — 2012. — № 9. — С. 23—27. ■

Получено 11.04.13
© В. Я. Дзюзер, 2013 г.