

Д. т. н. В. Я. Дзюзер (✉)

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»,
г. Екатеринбург, Россия

УДК 666.76:666.1.031.22

СЛУЖБА ОГНЕУПОРОВ В ВАРОЧНОМ БАСЕЙНЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Приведены параметры работы высокопроизводительных стекловаренных печей тарного стекла. Определены условия службы футеровки варочного бассейна при удельном съеме 2,5–3,0 т/(м²·сут) и удельной выработке стекла за кампанию печи 7000–8000 т/м². Даны рекомендации по применению плавнелитых бадделеитокорундовых и вибролитых спеченных хромалюмоциркониевых огнеупоров в конструктивных элементах ванны.

Ключевые слова: стекловаренная печь, варочный бассейн, футеровка, бадделеитокорундовые огнеупоры, хромалюмоциркониевые огнеупоры, коррозионная стойкость.

При проектировании современных стекловаренных печей тарного стекла в качестве основного параметра рассматривают суммарную выработку стекломассы с 1 м² площади варочного бассейна (т/м²). Этот параметр определяют произведением удельного съема стекломассы с 1 м² площади ванны в сутки [т/(м²·сут)] на кампанию печи (сут). В зарубежной практике среднестатистическая суммарная удельная выработка составляет 7000 т/м². Она достигается при среднем удельном съеме 2,8 т/(м²·сут) и кампании печей до 6–8 лет. На лучших печах суммарная удельная выработка стекла превышает 10000 т/м², что обеспечивается кампанией печей 8–10 лет и удельным съемом 3,0–3,5 т/(м²·сут). В отечественной практике известны примеры кампании печей до 10 лет. Как правило, этот показатель достигается в результате проведения промежуточных ремонтов футеровки варочного бассейна и удельном съеме стекломассы 2,0–2,4 т/(м²·сут). В результате средняя суммарная удельная выработка стекла составляет 5000–6000 т/м².

Несоответствие основного параметра технической эффективности отечественных печей зарубежному уровню, как правило, предопределено качеством проектных решений. Стремление к удешевлению проекта приводит к необоснованным финансовым потерям в про-

цессе эксплуатации. В то же время современный дизайн печей не является гарантией экономической эффективности, если футеровка печных ограждений, и прежде всего варочного бассейна, не соответствует заявленным техническим параметрам печи. Для достижения продолжительной кампании печей при высоком удельном съеме стекломассы первостепенное значение имеет выбор рациональной структуры футеровки ванны. В прикладном плане признаком рациональной структуры является ее равномерный износ в течение кампании печи при заданных параметрах удельного и суммарного удельного съема. Рассмотрим условия службы и структуру футеровки варочного бассейна печей тарного стекла, рассчитанных на удельный съем 2,5–3,0 т/(м²·сут) и суммарную выработку стекла 7000–8000 т/м².

Кампанию стекловаренных печей тарного стекла лимитирует износ боковых стен ванны и перекрывных брусьев протока (рис. 1), футеровку которых выполняют плавнелитыми бадделеитокорундовыми изделиями, изготовленными методом окислительной плавки [1]. В основу состава бадделеитокорундовых огнеупоров положены фазовые отношения компонентов в системе Al₂O₃–ZrO₂–SiO₂; отсюда происходит альтернативное название огнеупоров — алюмоциркониевосиликатные (AZS). Применение AZS-огнеупоров обусловлено их высокими механической прочностью (200 МПа) и огнеупорностью (1700 °С), а также высокой коррозионной стойкостью в расплаве натрий-кальцийсиликатного стекла [2].

Коррозионная стойкость окислированных AZS-огнеупоров зависит от многих факторов [2–4]. К их числу относят содержание ZrO₂ (33,



В. Я. Дзюзер
E-mail: vdzuzer@yandex.ru

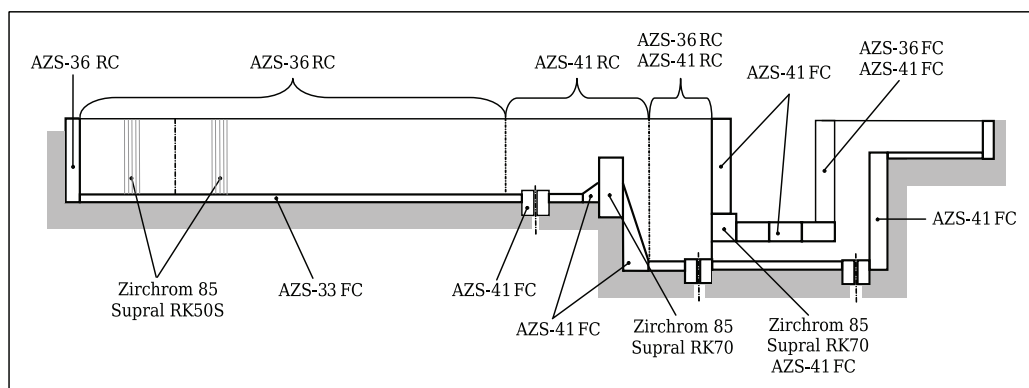


Рис. 1. Структура футеровки варочного бассейна стекловаренной печи

36 и 41 мас. %) и кажущуюся плотность. При высоких температурах (1550 °С) коррозионная стойкость изделий AZS-36 и AZS-41 в 1,1 и 1,3 раза соответственно превышает стойкость изделий марки AZS-33. При 1350–1400 °С содержание ZrO_2 не оказывает существенного влияния на коррозионный износ огнеупора [3].

Плотность изделий зависит от количества ZrO_2 и способа заливки расплава в форму. Для футеровки варочного бассейна используют изделия с редуцированной усадочной раковинной (RC) и полнотелые изделия без усадочной раковины (FC). Наименьшую плотность (3,7 т/м³) имеют изделия марки AZS-33 FC, наибольшую (4 т/м³) — блоки из AZS-41 FC. Очевидно, что стоимость AZS-огнеупоров возрастает с увеличением содержания ZrO_2 и плотности. В частности, стоимость огнеупора AZS-41 FC в 1,5 раза выше, чем у AZS-33 FC. Общими требованиями к качеству AZS-огнеупоров являются их однородная текстура и окислительный процесс плавления шихты. Этим условиям удовлетворяют огнеупоры SEFPRO, REFEL, MOTIM и других фирм.

В боковых стенах ванны максимальный износ огнеупоров наблюдается в горизонтальном направлении на уровне зеркала стекломассы. Растворение огнеупора в расплаве — это типичный гетерогенный процесс, протекающий на границе раздела твердой (огнеупор) и жидкой (расплав) фаз. При этом лимитирующей стадией процесса является диффузия расплава к реакционной зоне и отвод продуктов коррозии в жидкую фазу. Это означает, что наибольшее сопротивление массопереносу при растворении огнеупора создает диффузионный пограничный слой на его поверхности. При этом можно считать, что на границе с твердым телом жидкая фаза соответствует насыщенному раствору. Тогда движущей силой процесса диффузии является разность содержания растворенного вещества в насыщенном растворе (равновесная концентрация c^* , кг/м³) и в объеме жидкой фазы (текущая концентрация c , кг/м³): $\Delta c = c^* - c$.

Кинетику процесса растворения можно описать уравнением [5]

$$-\frac{dM}{d\tau} = \beta F \Delta c, \quad (1)$$

где M — масса растворенного вещества, кг; τ — время, с; β — коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с; F — площадь контактной поверхности твердого тела, м².

В случае мелких частиц, для которых число Рейнольдса $\leq 0,2$, значение β определяют из условия

$$Nu_m = 2r\beta/D = 2,$$

из которого следует, что

$$\beta = D/r, \quad (2)$$

где Nu_m — диффузионное число Нуссельта; D — коэффициент молекулярной диффузии растворенного компонента в жидкой фазе, м²/с; r — радиус частиц, м.

С учетом выражения (2) уравнение (1) имеет вид

$$-\frac{dM}{d\tau} = \frac{D}{r} F \Delta c. \quad (3)$$

При замене радиуса частиц на толщину диффузионного пограничного слоя выражение (3) преобразуется в известную формулу Навье – Нернста [6, 7]:

$$\frac{dM}{d\tau} = \frac{D}{\delta_N} F \Delta c, \quad (4)$$

где $dM/d\tau$ — скорость разъедания огнеупора, кг/с; δ_N — толщина диффузионного слоя Нернста, м.

В формуле (4) влияние температуры на скорость растворения огнеупора ($dM/d\tau$) учитывают через температурную зависимость коэффициента молекулярной диффузии, формализованную, например, известными уравнениями Аррениуса или Стокса – Эйнштейна. В качественной интерпретации эта зависимость может быть выражена соотношением $D \sim D_0 T^{1,5}$ или $D \sim D_0 T^{1,75}$ (D_0 — предэкспоненциальный множитель) [5], из которого следует, что чем выше температура

стекломассы, тем выше скорость растворения огнеупора. В свою очередь, величина δ_N зависит от скорости конвекции. Чем она больше, тем меньше толщина диффузионного слоя и выше скорость коррозии огнеупора. Таким образом, скорость коррозии огнеупора находится в прямой зависимости от удельного сжема стекломассы, увеличение которого предполагает повышение температуры варки и скорости стекла в поверхностном слое конвекционных потоков [8, 9].

Из практики известно, что износ окружки боковых стен (на уровне зеркала стекломассы) по периметру ванны не является равномерным. Наибольшей коррозии подвержены участки стен, контактирующие с расплавом, нагретым до температуры выше 1400 °С. Причем повышение температуры стекла на каждые 50 °С приводит к удвоению скорости коррозии огнеупора [3]. Понятно, что для футеровки высокотемпературных участков ванны (1400–1550 °С) обосновано применение изделий марки AZS-41. Для других участков представляется возможным использовать огнеупоры с меньшим содержанием ZrO_2 .

Таким образом, при выборе марки AZS-огнеупора с различным содержанием ZrO_2 следует исходить из распределения температуры на поверхности ванны при заданной величине удельного сжема стекломассы. Понятно, что подобная информация может быть получена только математическим моделированием тепловой работы печей [9]. Используем результаты моделирования тепловой работы стекловаренной печи с подковообразным пламенем производительностью 280 и 320 т/сут [10, 11]. Печь предназначена для варки окрашенного тарного стекла. Глубина ванны в зонах варки и освещения 1,2 и 2,0 м соответственно. Печь отапливается природным газом с низшей рабочей теплотворной способностью 8000 ккал/м³ без применения дополнительного электроподогрева стекломассы. Расчеты выполнены для оптимальной длины факела, равной длине рабочего пространства печи, и температуры подогрева воздуха 1300 °С. При 280 т/сут удельный сжем стекла и удельный расход теплоты равны соответственно 2,55 т/(м²·сут) и 1090,0 ккал/кг [10], при 320 т/сут — 2,92 т/(м²·сут) и 1000 ккал/кг [11].

Двумерные поля температур поверхности ванны, приведенные в публикациях [10, 11], аппроксимированы одномерными зависимостями (рис. 2). При удельном сжеме 2,55 т/(м²·сут) распределение температуры по длине ванны характеризуется средней и максимальной температурой 1380 и 1494 °С соответственно. Средняя температура поверхности стекломассы в зонах варки и освещения равна 1374 и 1391 °С соответственно. При удельном сжеме 2,92 т/(м²·сут) средняя и максимальная температура поверхности ванны повышается до 1412 и 1518 °С соответственно. Как следствие, средняя температура

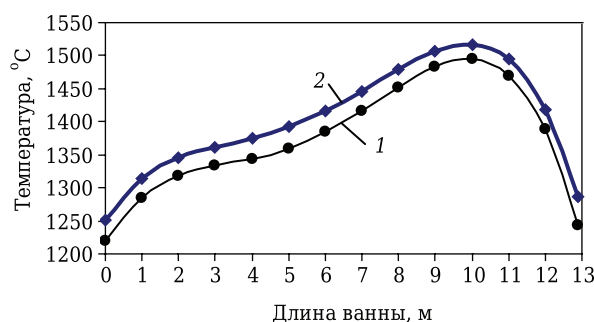


Рис. 2. Распределение температуры поверхности стекломассы по длине ванны: 1 — удельный сжём 2,55 т/(м²·сут); 2 — то же 2,92 т/(м²·сут)

поверхности в зонах варки и освещения повышается до 1405 и 1427 °С соответственно.

Обратимся к структуре футеровки варочного бассейна. Кладку боковых стен ванны выполняют однорядным (без горизонтальных швов) палисадным брусом толщиной 250 мм. Плотность вертикальных швов обеспечивают алмазной шлифовкой боковых поверхностей блоков. Как правило, футеровку боковых стен зоны варки выполняют изделиями AZS-36 RC, зоны освещения — изделиями AZS-41 RC [1]. В то же время результаты расчета температуры поверхности ванны (см. рис. 2) свидетельствуют о том, что применение огнеупора AZS-41 RC может быть ограничено участком стены (длина ~ 2 м), примыкающим к блокам барботажа и переливного порога (см. рис. 1). Остальная часть ванны может быть выполнена огнеупорами AZS-37 RC. Правильность выбора этих огнеупоров подтверждает опыт эксплуатации стекловаренных печей № 1 и 2 Орехово-Зуевской стекольной компании, предназначенных для варки темно-зеленого и коричневого стекла с максимальной производительностью 260 т/сут. Показатели работы печей приведены в монографии [9].

Печь № 1 была остановлена для замены двух средних перекрывных блоков протока после 8,5 года эксплуатации и производства 653000 т стекла. Суммарный удельный сжём за этот период работы составил 6377 т/м². Ремонт протока производился с частичным сливом стекломассы и снижением температуры в печи до 1200 °С. Это позволило визуально оценить износ окружки боковых стен ванны. Несмотря на работу печи в широком диапазоне удельного сжема стекломассы [2,2–2,5 т/(м²·сут)] окружка имела равномерный износ (большой в зоне освещения) без видимых раковин на поверхности брусьев и их стыков. Остаточная толщина боковых стен по уровню зеркала стекломассы позволила продлить кампанию печи на 1,5 года и довести суммарную удельную выработку стекла до 7500 т/м². Следует отметить, что последующая остановка печи не была связана с физическим состоянием ее футеровки. В печи № 2 удельный сжём стекло-

массы находился в пределах 2,1–2,4 т/(м²·сут). В течение 10-летней эксплуатации футеровка ванны и протока не подвергалась горячему ремонту.

Служба огнеупоров в горизонтальном протоке печей № 1 и 2 различалась температурой стекломассы и скоростью ее движения. В печи № 1 максимальная температура стекла на выходе из протока достигала 1350 °С, скорость при максимальном удельном съеме была равна 5,1 мм/с. В печи № 2 температура стекломассы в протоке не превышала 1330 °С при максимальной скорости 4,7 мм/с. Приведенные параметры являются типичными для печей с удельным съемом стекломассы до 2,5 т/(м²·сут).

Состояние конструктивных элементов протока печи № 1 после 8,5 года эксплуатации характеризуется разной степенью износа. Наименьший износ (не более 15 % толщины) имеют опорные блоки под перекрывными брусьями, изготовленные из огнеупоров AZS-36 RC плотностью 3,75 т/м³. Эксплуатационную целостность сохранили вертикальные боковые поверхности протока. Передняя, обращенная к ванне стенка протока выполнена из огнеупоров AZS-41 FC. Ее коррозионный износ на уровне зеркала стекломассы не превышает 50 % толщины бруса, что соответствует износу окружки по периметру ванны. Задняя, обращенная к выработочному каналу стенка протока, выполненная из огнеупоров AZS-36 RC, имеет равномерный износ по высоте брусьев. При этом остаточная толщина брусьев составляет не менее 70 % от первоначального размера. Величина коррозионного износа вертикальных поверхностей протока соответствует среднестатистическим данным для печей тарного стекла [2].

Наибольшей коррозии были подвержены перекрывные брусья протока, выполненные из огнеупоров AZS-41 FC. Проектная толщина первого, обращенного в ванну бруса составляла 425 мм. В результате коррозии нижняя поверхность бруса имела характерный арочный профиль. Остаточная толщина бруса, определенная по верхней точке арки, не превышала 150 мм. Последующие три блока имели начальную толщину 325 мм. Их коррозионный износ приближался к 95 %. Поэтому продолжительное аварийное отключение воздушного охлаждения наружных поверхностей брусьев привело к утечке стекломассы из протока. Правоммерно предположить, что разрушение средних перекрывных брусьев во многом обусловлено износом первого, обращенного в ванну бруса, в результате чего коррозионному воздействию расплава были подвержены как нижняя поверхность средних брусьев, так и боковая.

Интенсивный износ перекрывных брусьев протока обусловлен в основном вертикальной ячеистой коррозией, под которой понимают вертикально вверх направленное сверлящее разъедание огнеупора газовым пузырьем [12, 13].

Скорость вертикальной ячеистой коррозии перекрывных блоков протока в 1,3–1,6 раза выше скорости коррозии окружки ванны [2]. Сверлящее разъедание начинается с момента захватывания (или выделения) газового пузырька трещиной, сколом или порой нижней поверхности огнеупора [3, 14]. Источником образования пузырей в протоке является огнеупор, поэтому его склонность к пузыреобразованию в контакте с расплавом является важнейшей эксплуатационной характеристикой материала. Для ее количественной оценки огнеупоры подвергают лабораторному тестированию. По шкале 0–10 наиболее низкий индекс пузыреобразования при 1180 °С имеют высококачественные оксидированные полнотелые AZS-огнеупоры. Например, для огнеупора фирмы SEFPRO марки ER 1711 RT (41 % ZrO₂) он равен 1–2 [14].

При конструировании протока следует учитывать режимные параметры расплава, влияющие на эксплуатационный износ огнеупоров. Отмечается [2], что скорость вертикальной ячеистой коррозии в основном определяется температурой расплава и практически не зависит от производительности печи, т. е. скорости движения стекла в канале. В то же время коррозию перекрывных брусьев протока связывают [4, 14] с воздействием как высоких температур, так и активных конвективных потоков стекла в канале. Другими словами, коррозионный износ огнеупора обусловлен сочетанием вертикальной ячеистой коррозии с химическим взаимодействием огнеупора с расплавом, интенсивность которого возрастает с увеличением скорости движения стекломассы. Несмотря на то что зависимость скорости коррозии перекрывных брусьев протока от режимных параметров расплава носит качественный характер, она представляет полезной для проектирования протока.

Практика свидетельствует, что достижение суммарной удельной выработки стекла, превышающей 7000 т/м², при использовании перекрывных блоков протока, изготовленных из плавнелитого бадделитокорундового огнеупора, является проблематичным. Поэтому в качестве альтернативы плавнелитым AZS-огнеупорам рассматривают хромсодержащие огнеупоры. Химическая инертность и устойчивость оксида хрома к воздействию агрессивных силикатных расплавов послужили основой для создания спеченных керамических огнеупоров, базирующихся на четверной системе Cr₂O₃–Al₂O₃–ZrO₂–SiO₂ (см. таблицу) [14–16]. При 1450 °С коррозионная стойкость вибролитых спеченных хромалюмоциркониевых огнеупоров в 2,5 раза превосходит стойкость плавнелитых изделий марки AZS-41 FC [14]. Поэтому, несмотря на относительно высокую стоимость, применение хромалюмоциркониевых огнеупоров в протоке представляется экономически обоснованным.

Характеристика спеченных вибролитых хромалюмоциркониевых огнеупоров

Показатели	Supral RK50S* ¹	Supral RK70* ¹	Zirchrom 85* ²
Массовая доля, %:			
Cr ₂ O ₃	53,0	72,5	85,0
TiO ₂	—	—	2,0
ZrO ₂	4,4	6,0	8,0
Al ₂ O ₃	37,0	13,5	3,5
SiO ₂	1,8	5,0	1,0
прочие	—	—	0,5
Кажущаяся плотность, г/см ³	3,77	3,8	4,05
Открытая пористость, %	15,5	18	17
Температура деформации под нагрузкой, °C	>1700	1700	>1700
Предел прочности при сжатии, МПа	110	110	160
Термостойкость, теплосмены	25	15	—
Термическое расширение при 1500 °C, %	1,2	1,1	1,0
Теплопроводность при 1000 °C, Вт/(м·K)	3,4	3,2	~2,7
* ¹ RHI GLAS GmbH (Германия).			
* ² SEFPRO (Франция).			

В то же время следует отметить некоторые эксплуатационные особенности спеченных огнеупоров с высоким содержанием оксида хрома, ограничивающие их применение в стекловаренных печах. Речь идет об окрашивании стекломассы оксидом хрома и устойчивости огнеупоров к термомеханическим напряжениям. Оксид хрома является продуктом химической коррозии огнеупора. Его растворение в расплаве бесцветного стекла приводит к закрашиванию стекломассы. Поэтому представляется правомерным ограничить применение спеченных хромалюмоциркониевых огнеупоров в печах для варки окрашенных стекол. Известные примеры успешного применения хромалюмоциркониевых огнеупоров в печах для варки бесцветного стекла, в частности изделий марок Zirchrom 85 и Supral RK70 [14, 15], следует рассматривать как локальный производственный опыт, который не может гарантировать отсутствие закрашки расплава оксидом хрома в условиях работы других печей.

Устойчивость к термомеханическим напряжениям является ключевым критерием для выбора зоны установки хромалюмоциркониевых огнеупоров в стекловаренных печах. Известно, что значительные температурные градиенты могут развить высокий уровень термомеханических напряжений I рода, что может привести к растрескиванию блоков и тем самым спровоцировать ускорение как вертикальной ячеистой коррозии огнеупоров, так и химической.

Применительно к перекрывным блокам потока наименьшие температурные градиенты свойственны первому, обращенному к ванне брусу. Две продольные поверхности бруса контактируют со стеклом, две другие поверхности примыкают к огнеупорным блокам. В то же время наружная поверхность средних перекрывных брусьев охлаждается вентиляторным воздухом. Интенсивность охлаждения задается суммарным коэффициентом теплоотдачи, равным примерно

310 Вт/(м²·K). Для сравнения: коэффициент теплоотдачи на охлаждаемой поверхности окружки боковых стен ванны находится в пределах 210–225 Вт/(м²·K). При температуре стекломассы в протоке 1350–1400 °C и скорости охлаждающего воздуха 100 м/с наружная поверхность блоков имеет температуру 74,2–75,4 °C. При толщине блока 300 мм градиент температуры в поперечном сечении составляет 4,25–4,42 °C/мм. При отключении охлаждения температура наружной поверхности возрастает до 314,8–322,9 °C, а градиент температуры снижается до 3,45–3,59 °C/мм. Правомерно предположить, что условия эксплуатации средних перекрывных блоков, характеризующиеся высоким уровнем температурных градиентов, создают предпосылки для растрескивания блоков и ускоренной коррозии огнеупора. С учетом вышеизложенного, а также удовлетворительного состояния вертикальных поверхностей протока из огнеупоров AZS-41 FC после выработки 7500 т/м² применение вибролитых спеченных хромалюмоциркониевых огнеупоров в протоке может быть ограничено первым перекрывным брусом. В этом случае представляется возможным применение в печах для варки бесцветного стекла огнеупоров Zirchrom 85 и Supral RK70, содержащих более 0,5 % оксида железа.

Наряду с протоком экстремальные условия службы свойственны огнеупорам в переливном пороге (см. рис. 1). В процессе эксплуатации степень коррозии порога не поддается визуальному и инструментальному контролю, в то время как его износ приводит к изменению условий протекания тепломассообменных процессов в ванне [9]. Результат этого — ухудшение качества стекла и снижение производительности печи. Коррозионный износ огнеупоров в пороге обусловлен сочетанием относительно высокой температуры (~1350 °C) и скорости движения стекломассы, обтекающей преграду. У левой стенки порога (со стороны загрузки ванны шихтой) образуется локальный контур циркуляции расплава. Его

интенсивность многократно превышает расход среды в поверхностном слое контура сыпочно-го цикла [9, 10]. Например, при удельном съеме стекломассы $2,55 \text{ т}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут})$ массовый расход расплава, омывающего окружающую ванну до порога, составляет $9,9 \text{ кг/с}$. У левой стенки порога расход среды характеризуется величиной $103,5 \text{ кг/с}$. Для сравнения: расход стекла через проток равен $3,24 \text{ кг/с}$. Еще большему коррозионному износу подвержена правая стенка порога, контактирующая с циркуляционным потоком выработочного цикла. Расход среды во внешнем контуре потока достигает 324 кг/с . Интенсивное движение стекломассы вдоль поверхностей порога приводит к уменьшению толщины диффузионного слоя и повышению скорости растворения огнеупора в расплаве.

Практика свидетельствует о том, что применение огнеупора AZS-41 FC в пороге не обеспечивает его физическую целостность в течение кампании печи, составляющей 5–6 лет. Это предопределяет целесообразность использования хромалюмоциркониевых огнеупоров Zirchrom 85 и Supral RK50S в этом конструктивном элементе варочного бассейна. При этом кладку порога фасонными блоками (см. рис. 1) выполняют из изделий AZS-41 FC. В период эксплуатации порог находится ниже уровня стекла, поэтому огнеупоры в пороге не подвержены значительным термическим напряжениям, которые могли бы привести к образованию трещин. Это также свидетельствует о целесообразности применения спеченных хромалюмоциркониевых огнеупоров в переливном пороге.

Интенсивный износ угловых брусьев кармана из огнеупоров AZS-41 FC обусловлен не столько температурой ($1250\text{--}1300^\circ\text{C}$) и конвекцией стекломассы, сколько наличием на поверхности расплава щелока — продукта неполного восстановления сульфата натрия, входящего в состав содосульфатной шихты. Образование щелока обусловлено временной зависимостью реакций силикатообразования. Его появление в виде «лужицы» на поверхности ванны в районе загрузочных карманов представляется вполне прогнозируемым явлением. В больших количествах щелок чрезвычайно агрессивен по отношению к футеровке на уровне зеркала стекломассы. Щелок характеризуется малым поверхностным натяжением и небольшой вязкостью, поэтому в зоне контакта с «лужицей» огнеупоры подвергаются значительной эрозии. Более высокая коррозионная стойкость спеченных хромалюмоциркониевых материалов предопределяет их применение в угловых брусках кармана (см. рис. 1).

Одной из ключевых проблем высокопроизводительных стекловаренных печей является обеспечение эксплуатационной стойкости пода ванны. В многослойной структуре футеровки пода [17] особая роль отводится донной плит-

ке, контактирующей с расплавом стекла. Ее разведение обусловлено сверлящим действием (сверху вниз) каплей расплавленного металла [18], присутствие которого в ванне связано с загрязнением боя стекла, который является одним из компонентов шихты. К сопутствующим факторам, влияющим на коррозионный износ плитки, относят высокую температуру придонного слоя расплава и относительно высокую скорость среды в конвекционных потоках сыпочно-го и выработочного циклов. В зоне варки (до порога) средняя температура стекла на дне ванны составляет $1300\text{--}1330^\circ\text{C}$. В зоне освещения (за порогом) она повышается до $1340\text{--}1350^\circ\text{C}$. Расход среды в придонном слое зоны варки и освещения составляет $9,9$ и 324 кг/с соответственно. Защитный слой пода ванны выполняют полностью бадделеитокорундовой плиткой с содержанием ZrO_2 33 %. Толщина плитки варьируется от 75 до 150 мм. Наиболее типичной является толщина 120 мм. Плотность изделий, как правило, превышает $3,7 \text{ т/м}^3$. В качестве примера можно привести плитки марок ER 1681 Dalle TJ и Refel 1532 FVP кажущейся плотностью $3,72 \text{ т/м}^3$.

В поде варочного бассейна размещают блоки для установки термопар, барботажных сопел и электродов. Эти конструктивные элементы футеровки ванны подвержены интенсивной коррозии. Для их изготовления применяют огнеупоры AZS-41 FC кажущейся плотностью не менее 4 т/м^3 . Кроме того, наружная поверхность блоков подвергается интенсивному воздушному охлаждению, параметры которого соответствуют охлаждению перекрытых блоков протока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Условия службы футеровки варочного бассейна высокопроизводительных стекловаренных печей свидетельствуют о возможности дифференцированного подхода к выбору материалов. Проблема заключается в том, что проектирование структуры футеровки предполагает учет всей совокупности взаимосвязанных параметров, определяющих работу конкретной печи. В их числе не только химический состав стекла, удельная производительность и кампания печи, но и режимные параметры технологического процесса. Поэтому обоснованный подход к разработке футеровки предполагает предварительное математическое моделирование тепловой работы печи.

Сложность проблемы заключается в неоднозначности требований к рациональной структуре футеровки. С одной стороны, это выбор материалов, позволяющих минимизировать стоимость строительства печи, с другой — это обеспечение эксплуатационной стойкости футеровки в течение кампании печи. На наш взгляд, применение принципа компромисса, свойствен-

ного разработке оборудования, применительно к плавильным агрегатам непрерывного действия представляется не вполне обоснованным. Первичным является создание футеровки, сбалан-

сированный износ которой обеспечивает безопасную эксплуатацию печи в течение кампании при сохранении проектных параметров технической эффективности.

Библиографический список

1. **Дзюзер, В. Я.** Электроплавные AZS-огнеупоры для высокопроизводительных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2013. — № 7. — С. 50–52.
2. **Dzyuzer, V. Ya.** Electrofused AZS refractories for high-capacity glass-founding furnaces / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and Industrial Ceramics. — 2013. — Vol. 54, № 4. — P. 304–306.
3. **Аксельрод, Л. М.** Служба огнеупоров : справ. изд. / Л. М. Аксельрод [и др.] ; под ред. И. Д. Кашеева, Е. Е. Грищенко-ва. — М. : Интермет Инжиниринг, 2002. — 656 с.
4. **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.
5. **Гуляев, Ю. А.** Контактные взаимодействия стекло-массы с огнеупорами в стекловаренных печах / Ю. А. Гуляев, О. М. Пустыльников, Ю. В. Раев // Glass Russia. — 2013. — № 5. — С. 26–33.
6. **Коган, В. Б.** Теоретические основы типовых процессов химической технологии / В. Б. Коган. — Л. : Химия, 1977. — 592 с.
7. **Wagner, C.** The dissolution rate of sodium chloride with diffusion and natural convection as rate-determining factors / C. Wagner // J. Phys. Chem. — 1949. — Iss. 53. — P. 1030–1033.
8. **Cooper, A. R.** Kinetics of solution in high viscosity liquids: Sodium chloride-glycerol / A. R. Cooper, W. D. Kingery // J. Phys. Chem. — 1962. — Iss. 66. — P. 665–668.
9. **Ботвинкин, О. К.** Исследование процесса стеклообразования в интервале температур 1400–1700 °C / О. К. Ботвинкин, Т. Б. Жузе // Стекло и керамика. — 1971. — № 1. — С. 12, 13.
10. **Дзюзер, В. Я.** Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей : монография / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. — М. : Теплотехник, 2009. — 340 с.
11. **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.
12. **Дзюзер, В. Я.** Граничные условия для расчета футеровки стекловаренной печи с инновационными параметрами технической эффективности / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий // Новые огнеупоры. — 2015. — № 12. — С. 9–12.
13. **Dzyuzer, V. Ya.** Boundary conditions for designing the lining of a glass-founding furnace with innovative parameters to improve technical efficiency / V. Ya. Dzyuzer, V. S. Shvydkii // Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 56, № 6. — P. 597–600.
14. **Busby, T. S.** Simulative studies of upward drilling / T. S. Busby, J. Barber // J. Am. Ceram. Soc. — 1966. — Iss. 49. — P. 441–446.
15. **Löffler, J.** Physikalische und chemische Reaktionen die in Glaswannen zur Ausbildung von Spülfugen oder zum Lochfraß führen / J. Löffler // Glastech. Ber. — 1965. — Bd 38, № 10. — S. 398–405.
16. **Citti, O.** High chrome Refractories for severe wear areas in soda-lime glass melters / O. Citti, T. Champion, T. Azencot [et al.] // Glass Worldwide. — 2014. — Iss. 51. — P. 60–64.
17. **Dietrich, M.** Chrome corundum: an alternative to isostatically pressed products / M. Dietrich, S. Postrach // RHI Bulletin. — 2013. — № 2. — P. 27–30.
18. Огнеупорные материалы для стекольной промышленности // Проспект фирмы RHI GLAS GmbH. — www.rhi-ag.com/.
19. **Дзюзер, В. Я.** Основы разработки теплоизолированного пода стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Новые огнеупоры. — 2014. — № 9. — С. 31–34.
20. **Dzyuzer, V. Ya.** Basis for the development of the heat-insulating floor of a glassmaking furnace / V. Ya. Dzyuzer // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 444–447.
21. **Brückner, R.** Die zu Erosionen an Modellsubstanzen und feuerfesten Stoffen führenden Grundmechanismen der Grenzflächenkonvektion / R. Brückner // Glastech. Ber. — 1967. — Bd 40, № 12. — S. 451–462. ■

Получено 28.06.18
© В. Я. Дзюзер, 2018 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

НК АWT 2018 – международная выставка по термообработке

16–18 октября 2018 г. Германия, г. Кёльн

НК 2018

HärtereiKongress

HeatTreatmentCongress

Тематика:

- термическая обработка
- технологические цепочки
- применение закалки
- неразрушающий контроль компонентов
- термообработка и технологии легких металлов
- последние инновации в области материалов и термообработки
- инжиниринг, производство и технологические процессы

www.expomap.ru