

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

УДК 666.762.2:666.1.031.2/6.043.1

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОИЗОЛИРОВАННОГО СВОДА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ СТЕКЛОВАРЕННОЙ ПЕЧИ

Сформулированы требования к качеству диасового огнеупора и мертеля, предназначенных для кладки свода высокопроизводительных стекловаренных печей. Приведен расчет арочного свода шириной пролета 9 м с использованием только клиновых изделий. Определены требования к эффективности тепловой изоляции свода. Разработана оригинальная структура тепловой изоляции, основанная на использовании формованных и неформованных изделий. При средней температуре нагрева свода 1486 °С удельный тепловой поток в окружающую среду равен 544 Вт/м², что на 33,4–57,6 % ниже показателей известных технических решений по тепловой изоляции свода стекловаренных печей.

Ключевые слова: стекловаренная печь, арка свода, огнеупор, тепловая изоляция, термическое сопротивление, тепловой поток.

Свод рабочего пространства является одним из основных конструктивных элементов стекловаренной печи. В высокопроизводительных печах тарного стекла (300–450 т/сут) рабочая температура свода достигает 1580–1600 °С, а ширина пролета составляет 9–11 м. Арочный свод выполняется с центральным углом 60°. В зависимости от длины рабочего пространства он разбивается на секции длиной 4–6 м, разделенные между собой температурными швами. Кладка секций ведется вперевязку с использованием прямых и клиновых кирпичей. Для перевязки швов применяются полуторные изделия.

Конструкция свода стекловаренной печи имеет ряд отличительных признаков, несвойственных печам другого технологического назначения [1]. Во-первых, арка свода имеет один замковый ряд, расположенный по продольной оси печи. Во-вторых, в современных стекловаренных печах металлическая обвязка печи обеспечивает жесткость конструкции секций свода без опоры пятовых кирпичей на продольные стены рабочего пространства. В-третьих, свод стекловаренной печи подвергается обязательной тепловой изоляции, эффективность которой характеризуется относительно высоким термическим сопротивлением кладки — $R = 1,07 \div 1,70 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$ и низкими потерями теплоты в окружающую среду — $q = 816,8 \div 1282,1 \text{ Вт/м}^2$ [2]. Понятно, что боль-

шему значению R соответствует меньшая величина q .

В то же время стремление повысить энергоэффективность печей и довести их кампанию до 9–10 лет предполагает дальнейшее совершенствование конструкции свода. Речь идет как о повышении его эксплуатационной надежности, так и о энергоэффективности холодной футеровки. Сложность поставленной задачи предусматривает комплексный подход к ее реализации. Остановимся на трех аспектах проблемы: качестве огнеупорных изделий и мертелей, совершенствовании конструкции свода и разработке энергоэффективной структуры его тепловой изоляции.

Несмотря на наличие в газовой среде рабочего пространства паров сульфатов щелочных металлов для кладки свода стекловаренной печи используется стекольный диас. Его преимущество по сравнению с альтернативным электроплавленным бадделеитокорундовым огнеупором обусловлено высоким сопротивлением деформации ползучести (пластической деформации), относительно низкой теплопроводностью диаса, а также полной растворимостью продуктов разрушения огнеупора в расплаве стекла. Высококачественный стекольный диас характеризуется сбалансированным химическим составом, в котором массовая доля SiO₂ составляет не менее 96 %, а содержание Fe₂O₃ не превышает 0,5 %. В качестве примера можно привести продукцию Красноармейского диасового завода (марка ДСК), чешской фирмы MSLZ a.s. (Disil-DSS и Disil-DSA) и немецкой фирмы «RHI Glas GmbH» (Stella GGS). Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что эти марки



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

Таблица 1. Характеристика стекольного динасового огнеупора

Показатели	ДСК	Disil-DSS	Disil-DSA	Stella GGS
Массовая доля, %:				
SiO ₂	96,0	96,0	96,2	96,5
CaO	2,5	–	–	2,5
Fe ₂ O ₃	0,40	0,45	0,50	–
Al ₂ O ₃	0,40	0,50	0,28	–
Кажущаяся плотность, кг/м ³	1880	1830	1850	1860
Температура деформации под нагрузкой, °С	1650	1660	1670	1650
Предел прочности при сжатии, МПа	40	38	35	40
Термическое расширение (1000 °С), %	1,30	1,40	1,45	1,30 (700 °С)

Таблица 2. Характеристика динасовых мертелей

Показатели	Марка мертеля	
	Q 97 ¹	Stellamur GLS ²
Массовая доля, %:		
SiO ₂	97,50	95,50
Fe ₂ O ₃	0,15	0,10
Температура применения, °С	1650	1680
Размер зерна, мм, не более	0,5	0,3
Жидкость для затворения	H ₂ O	H ₂ O

¹ Фирмы MŠLZ a.s.
² Фирмы «RHI Glas GmbH».

огнеупора по химическому составу и другим свойствам близки друг к другу. Их применение лимитируется лишь эксплуатационной температурой свода, которая не должна превышать 1620 °С.

Стойкость динасового свода в значительной степени определяется газоплотностью кладки. При неплотной кладке наблюдается диффузия паров щелочей через швы. По мере проникновения газов в более холодную область кладки происходит их конденсация. Последствием взаимодействия жидкой фазы с огнеупором является образование свищей и каверн. В результате развития этого процесса в своде по швам кладки образуются сквозные прогары. Отсюда вытекают повышенные требования к геометрии изделий и качеству мертеля. Известно, что швы являются таким же важным элементом огнеупорной кладки, как и кирпичи. Шов динасового свода — это связующий шов с временно подвижной связью, поэтому его роль не ограничивается только связующей функцией. В определенной мере швы следует рассматривать как компенсаторы усилия сжатия, которому подвергаются огнеупорные изделия при первичном нагреве кладки. При нормативной толщине шва 2 мм отклонение линейных размеров изделий не должно превышать ± 1 мм. Для изделий с большими допусками на линей-

ные размеры обязательно заводская стендовая сборка свода с имитацией кладочных швов или калибровка кирпичей по плюсовым и минусовым допускам.

Как отмечалось выше, разрушение динасовой кладки начинается по ее швам. Отсюда понятен интерес к качеству мертелей, используемых для приготовления раствора. Очевидно, что химический состав мертеля должен соответствовать материалу огнеупора. Это касается содержания как основного вещества, так и примесей. Особое внимание необходимо обращать на гранулометрический состав мертеля. Для приготовления раствора следует использовать тонкодисперсный мертель с размером зерна не более 0,5 мм. Этим условиям соответствуют мертели, приведенные в табл. 2.

На наш взгляд, при разработке свода с большой шириной пролета следует отказаться от практики применения прямых кирпичей. На конкретном примере рассмотрим расчет конструктивных параметров свода, в кладке которого используют только торцевые двусторонние клиновые изделия. В качестве исходных данных принимается ширина пролета $S = 9000$ мм, центральный угол $\alpha = 60^\circ$, толщина свода и шва $h = 450$ и $d = 2$ мм соответственно (рис. 1). Из практики проектирования стекловаренных печей можно отметить воз-

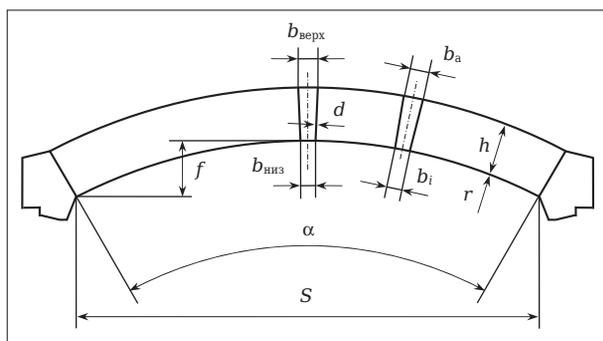


Рис. 1. Расчетная схема к определению геометрических параметров свода

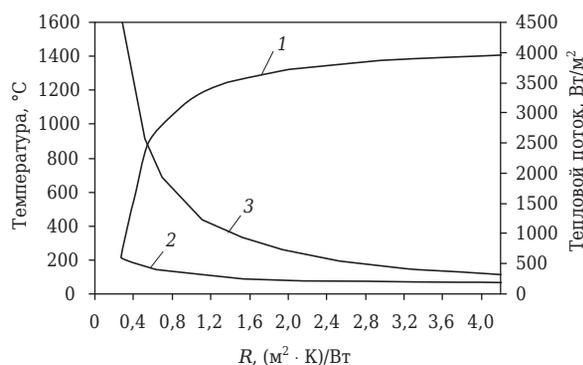


Рис. 2. Влияние термического сопротивления R кладки свода на наружную температуру огнеупорного кирпича (1) и холодной футеровки (2), а также тепловой поток в окружающей среде (3)

возможность изменения ширины пролета в пределах ± 100 мм.

Радиус нижней дуги свода r находится по уравнению

$$r = \frac{S}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{9000}{2 \cdot 0,5} = 9000 \text{ мм.} \quad (1)$$

Предварительно принимается меньший размер толщины клина $b_i = 100$ мм. Тогда общее количество кирпичей в своде n_{Σ} :

$$n_{\Sigma} = \frac{\pi \alpha r}{180(b_i + d)} = \frac{3,14 \cdot 60 \cdot 9000}{180(100 + 2)} = 92,4. \quad (2)$$

Поскольку количество кирпичей в своде должно быть нечетным, то для дальнейшего расчета принимается $n_{\Sigma} = 93$ шт. Из уравнения (2) определяется соответствующее этому условию новое значение $r = 9063$ мм. Далее находится больший размер толщины клина:

$$b_a = \frac{(r + h)(b_i + d)}{r} - d = \frac{(9063 + 450)(100 + 2)}{9063} - 2 = 105,06 \text{ мм.}$$

Точное значение разности толщин клинового кирпича равно $l_k = b_a - b_i = 5,06$ мм. При этом количество клиновых кирпичей в своде

$$n_{\text{кл}} = \frac{\pi h \alpha}{180 l_k} = \frac{3,14 \cdot 450 \cdot 60}{180 \cdot 5,06} = 93,$$

что равно общему количеству кирпичей в кладке. Принимая $b_a = 105$ мм и $b_i = 100$ мм, переходим к расчету толщины замкового изделия (в мм):

$$b_{\text{верх}} = \frac{\pi \alpha (r + h)}{180} - [(b_a + d)(n_{\Sigma} - 1) + d] = \frac{3,14 \cdot 60(9063 + 450)}{180} - [(105 + 2)(93 - 1) + d] = 111,$$

$$b_{\text{низ}} = \frac{\pi \alpha r}{180} - [(b_i + d)(n_{\Sigma} - 1) + d] = \frac{3,14 \cdot 60 \cdot 9063}{180} - [(100 + 2)(93 - 1) + 2] = 100.$$

Таким образом, для замкового клина $b_a - b_i = 11$ мм. Следует отметить, что параметры толщины замка соответствуют практическим требованиям к этому изделию [1].

В завершение расчета с использованием формулы (1) выполняется корректировка ширины пролета $S = 9063$ мм и определяется стрела подъема арки свода:

$$f = \frac{S}{2} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{4} = \frac{9063 \cdot 0,268}{2} = 1214 \text{ мм.}$$

Как правило, результаты расчета геометрических параметров свода проверяются компьютерным моделированием раскладки изделий в арке. При этом учитывается техника установки кирпичей в арке относительно друг друга и опорной поверхности опалубки свода. Целесообразность тепловой изоляции динасового свода продиктована как проблемой энергоэффективности, так и температурными условиями службы огнеупора. Термическое расширение стекольного динаса характеризуется рядом особенностей, обусловленных модификационными эффектами. Основное расширение динаса происходит при 700 °С, а конечное расширение заканчивается при 1350 °С [3]. Наружная температура неизолированного свода, характеризуемого $R = 0,28$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт, составляет 222 °С (рис. 2). В этом случае более 1/3 толщины кирпича находится в температурном интервале, при котором происходит основное термическое расширение огнеупора. Полное завершение процесса термического расширения динаса происходит при $R \geq 2,5$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}$)/Вт (см. рис. 2). Эта величина R принимается за ос-

Таблица 3. Характеристика теплоизоляционных изделий и неформованных материалов

Показатели	LEGRAL 55/0 ¹	LUBISOL Si-Seal ²	LUBISOL #2-SL ²	ALSIFLEX®-1260/130 ³
Массовая доля, %:				
SiO ₂	90,0	92,2	> 72,0	53–58
Al ₂ O ₃	3,0	1,8	< 13,0	42–47
Кажущаяся плотность, кг/м ³	590	1920	400	130
Температура применения, °С	1500	1620	1400	1110–1160
Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре, °С:				
400	0,22	1,15 (20 °С)	0,08 (20 °С)	0,09
600	0,25	1,32 (500 °С)	0,13 (500 °С)	0,12
800	0,28		0,18 (1000 °С)	0,18
1000	0,31			0,28

¹ Фирмы «RHI Glas GmbH».
² Фирмы «Lubisol Engineering Co.», Болгария.
³ Фирмы «Promat GmbH», Германия.

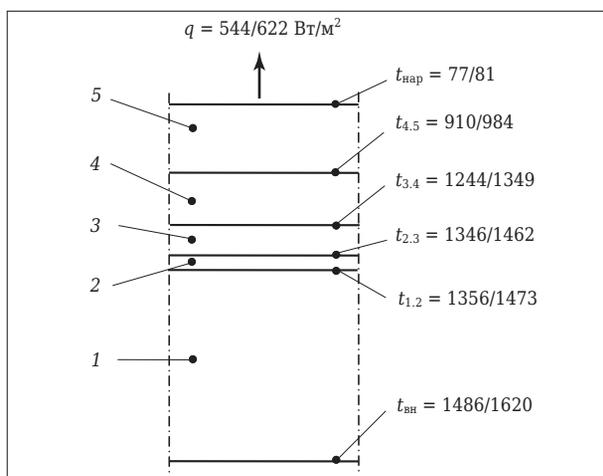


Рис. 3. Результаты расчета теплопередачи через теплоизолированный свод: 1 — Stella GGS — 450 мм; 2 — LUBISOL Si-Seal — 30 мм; 3 — LEGRAL 55/0 — 64 мм; 4 — LUBISOL #2-SL — 114 мм; 5 — ALSIFLEX®-1260/130 — 152 мм; $t_{вн}$, $t_{нар}$, $t_{1,2}$ – $t_{4,5}$ — температура внутренней поверхности свода, наружной поверхности тепловой изоляции и между слоями кладки соответственно, °С; в числителе и знаменателе дроби — параметры при $t_{вн}$ 1486 и 1620 °С соответственно

нову при разработке структуры тепловой изоляции свода.

Учитывая реверсивный режим отопления стекловаренных печей, тепловая изоляция рассчитывается при средней температуре внутренней поверхности свода 1486 °С [4]. Кроме того, выполняется поверочный расчет на пригодность изделий, используемых в холодной футеровке, к эксплуатации при локальном нагреве свода до 1620 °С. Тепловая изоляция свода выполняется после завершения первичного разогрева печи до 1500–1520 °С. Предварительно внешняя поверхность свода подвергается тщательной герметизации, исключающей

диффузию печных газов через футеровку. Герметизация свода может быть выполнена динасовым мертелем с добавлением в водный раствор 20 % (сверх 100 %) 45 %-ной технической ортофосфорной кислоты. При этом на свод последовательно наносятся два слоя обмазки толщиной до 5 мм каждый [5].

На рис. 3 показана структура тепловой изоляции, в которой герметизация свода выполнена огнеупорным бетоном LUBISOL Si-Seal, характеризующимся хорошей адгезией к поверхности нагретой динасовой кладки [6]. Толщина слоя 30 мм обеспечивает герметичность внешней поверхности свода и целостность обмазки при последующем повышении температуры огнеупорной кладки, обусловленном установкой теплоизоляционных слоев холодной футеровки. На герметизированный свод укладывается на плашку слой легковесного динаса LEGRAL 55/0, главное назначение которого в холодной футеровке заключается в создании необходимых температурных условий для применения последующих слоев тепловой изоляции. Основное термическое сопротивление тепловой изоляции создается слоем неформованного материала LUBISOL #2-SL и тремя слоями рулонного керамического волокна ALSIFLEX®-1260/130. Для защиты внешней поверхности холодной футеровки от шихтовой пыли она покрывается стеклотканью или тонким алюминиевым листом. Характеристика изделий, использованных при изоляции свода, приведена в табл. 3.

Разработанная структура тепловой изоляции свода характеризуется суммарным термическим сопротивлением кладки (при 1486 °С) 2,59 (м²·К)/Вт. При этом тепловые потери через свод составляют 544 Вт/м², а наружная

температура холодной футеровки 77 °С. Результаты расчета теплопередачи при 1620 °С свидетельствуют о том, что все использованные в холодной футеровке изделия могут эксплуатироваться при локальном перегреве свода (см. рис. 3 и табл. 3). Следует также отметить, что удельная нагрузка тепловой изоляции на огнеупорную кладку 103,1 кг/м² значительно ниже известных технических решений в этой области, для которых этот параметр составляет 183,6–296,3 кг/м² [2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке теплоизолированного свода стекловаренных печей с шириной пролета до 11 м необходимо использовать высококачественный стекольный динас с массовой долей

SiO₂ не менее 96 % и Fe₂O₃ не более 0,5 %. Допуски на линейные размеры изделий не должны превышать ± 1 мм. Химический состав мертелей должен соответствовать составу огнеупорных изделий, а размер зерна не превышать 0,5 мм. При конструировании свода следует отказаться от традиционного сочетания прямых и клиновых кирпичей в арке. Формирование арки свода только клиновыми изделиями обеспечивает существенное повышение ее эксплуатационной надежности и создает условия для последующей тепловой изоляции. По сравнению с известными техническими решениями по тепловой изоляции свода разработанная энергоэффективная структура холодной футеровки обеспечивает снижение тепловых потерь в окружающую среду на 33,4–57,6 %, а наружной температуры кладки на 14,3–36,3 °С.

Библиографический список

1. **Ижорин, М. Н.** Сооружение промышленных печей. Т. II. Строительство печей: справочное издание / М. Н. Ижорин, Ю. П. Сторожков; под ред. М. Н. Ижорина. — М.: Теплотехник, 2006. — 720 с.
2. **Дзюзер, В. Я.** Анализ конструктивных схем тепловой изоляции свода стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2010. — № 7/8. — С. 76–79.
3. **Дзюзер, В. Я.** Первичный разогрев стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2007. — № 10. — С. 28–32.
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.

5. **Дзюзер, В. Я.** Требования к качеству и рациональное использование динаса в высокотемпературных стекловаренных печах / В. Я. Дзюзер // Огнеупоры и техническая керамика. — 2004. — № 4. — С. 31–38.

6. **Луцканов, С.** Модернизированная изоляция свода экономит топливо / С. Луцканов // Стекло и керамика. — 2009. — № 10. — С. 23. ■

Получено 22.05.14

© В. Я. Дзюзер, 2014 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ИНСТИТУТ ПОРОШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ



5-й международный научно-технический симпозиум

«ПОРИСТЫЕ ПРОНИЦАЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ТЕХНОЛОГИИ И ИЗДЕЛИЯ НА ИХ ОСНОВЕ»

Симпозиум посвящен 85-летию со дня основания Национальной академии наук Беларуси

30–31 октября 2014 г. **Минск – Раков, Беларусь**

Секции симпозиума

1. Пористые порошковые материалы: теоретические и экспериментальные исследования процессов их получения
2. Проницаемые материалы: свойства, технологии получения
3. Эффективные области использования пористых материалов
4. Новые пористые и проницаемые материалы, оборудование и процессы с их применением

Контакты:
Адрес: 220005, Беларусь, г. Минск, ул. Платонова, 41, Институт порошковой металлургии
Телефоны: +375 (17) 290-99-93, +375 (17) 290-95-64 • Факс: (017) 292-82-42 • E-mail: info50@mail.ru