

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л. Ф. Папко, Ю. Г. Павлюкевич

ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Рекомендовано

*учебно-методическим объединением высших учебных заведений
Республики Беларусь по химико-технологическому образованию
в качестве пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 1-48 01 01 «Химическая
технология неорганических веществ, материалов и изделий»
специализации 1-48 01 01 06 «Технология стекла и ситаллов»,
1-48 01 01 10 «Технология эмалей и защитных покрытий»*

Минск 2008

УДК 666.1.031.29:666.76 (075.8)

ББК 35.41я7

П17

Рецензенты:

кафедра металлургических технологий

Белорусского национального технического университета;
ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории
стекла УП «НИИСМ» кандидат технических наук *С. С. Акулич*

Все права на данное издание защищены. Воспроизведение всей книги или ее части не может быть осуществлено без разрешения учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Папко, Л. Ф.

П17 Огнеупоры для стекловаренных печей: пособие для студентов специальности 1-48 01 01 «Химическая технология неорганических веществ, материалов и изделий» специализации 1-48 01 01 06 «Технология стекла и ситаллов», 1-48 01 01 10 «Технология эмалей и защитных покрытий» /Л. Ф. Папко, Ю. Г. Павлюкевич. – Минск : БГТУ, 2008. – 100 с., [5] л. цв. ил.

ISBN 978-985-434-836-0

Пособие содержит сведения о составах, свойствах и технологии получения современных огнеупорных материалов для стекловаренных печей. Рассмотрены факторы, влияющие на износ огнеупоров, приведены рекомендации по рациональному выбору огнеупоров для кладки ванн стекловаренных печей.

УДК 666.1.031.29:666.76(075.8)

ББК 35.41я7

ISBN 978-985-434-836-0

© УО «Белорусский государственный технологический университет», 2008

© Папко Л. Ф., Павлюкевич Ю. Г., 2008

ПРЕДИСЛОВИЕ

В пособии приведены сведения об огнеупорных материалах и изделиях, нашедших широкое применение для кладки стекловаренных печей.

Учебный материал по огнеупорам для стекловаренных печей представлен в небольшом объеме в учебном пособии «Химическая технология стекла и ситаллов», изданном под редакцией Н. М. Павлушкина в 1983 году. В последние десятилетия существенно расширилась номенклатура огнеупорных материалов и изделий. Разработка и применение новых видов огнеупоров позволили предприятиям стекольного производства существенно повысить межремонтный период эксплуатации стекловаренных печей.

Данное пособие содержит сведения о составах, свойствах и технологии получения современных огнеупоров для стекловаренных печей, выпускаемых ведущими мировыми производителями огнеупорных изделий. На основе анализа свойств данных материалов, а также факторов, влияющих на их коррозию в процессе службы, разработаны рекомендации по рациональной кладке печей.

Приведены сведения о теплоизоляционных материалах и рекомендации по тепловой изоляции стекловаренных печей, что позволяет существенно повысить технико-экономические показатели их работы.

Приведенный в пособии материал необходим для изучения важных разделов курсов «Химическая технология стекла и ситаллов», «Теплотехнические установки и агрегаты предприятий производства стекла», а также при курсовом и дипломном проектировании.

Раздел 1, подраздел 2.1 подготовлены доцентом Л. Ф. Папко, подраздел 2.2 и приложения – доцентом Ю. Г. Павлюкевичем.

Выносим благодарность рецензенту кандидату технических наук С. С. Акуличу за ценные замечания и рекомендации по тепловой изоляции стекловаренных печей, высказанные при рецензировании пособия.

ВВЕДЕНИЕ

Основным технологическим агрегатом в производстве большинства промышленных стекол является ванная стекловаренная печь. Эффективность ее эксплуатации, которая характеризуется общей и удельной производительностью, продолжительностью межремонтной кампании, удельным расходом топлива, качеством вырабатываемых стеклоизделий, определяет эффективность производственной деятельности стекольного предприятия.

Для футеровки крупных печей листового стекла расходуется 1,0–4,0 тыс. т различных огнеупорных материалов. Длительность межремонтного периода эксплуатации ванн печей в зарубежной практике 7–10 лет. При проведении горячего ремонта срок службы стекловаренных печей может достигать 15 лет. Проведение капитального ремонта печи не только требует больших трудовых и материальных затрат, но и приводит к прекращению выпуска продукции на 1,5–2 месяца.

Ввиду отсутствия природного сырья огнеупоры в Республике Беларусь не производятся. Предприятиям стекольной промышленности нашей страны необходимо импортировать огнеупорные изделия из стран СНГ, прежде всего России, и дальнего зарубежья.

Анализ службы огнеупорных материалов в промышленных ванн стекловаренных печах показал, что срок их непрерывной эксплуатации лимитируется не общим состоянием огнеупорной кладки, а разрушением ее отдельных конструктивных элементов, к числу которых относятся стены варочного бассейна в зонах варки и максимальных температур; проток; дно варочного бассейна; стены пламенного пространства и горелки; свод варочной части печи; насадки регенераторов в зонах максимальных температур. Основные факторы, которые отрицательно влияют на износ огнеупорных материалов, – неправильный выбор огнеупоров, изменение режимов работы, конструкционные ошибки.

Кладку большинства конструктивных элементов стекловаренных печей выполняют из плавленолитых огнеупорных материалов различного состава. Это обеспечивает существенный рост эксплуатационных показателей стекловаренных печей.

Чтобы повысить срок службы стекловаренной печи, необходимо проводить дифференцированную кладку ее конструктивных элементов. Для кладки элементов, которые наиболее активно разрушаются в процессе варки стекла, используют наиболее качественные (и, соответственно, более дорогие) огнеупорные изделия. Для рациональной

кладки стекловаренной печи требуются огнеупорные изделия широкого ассортимента.

В настоящее время производителями огнеупоров в России, США, Франции, Венгрии и ряде других стран выпускаются огнеупорные изделия с высокой температурой применения, устойчивостью к агрессивному действию компонентов стекла и шихты, сложной конфигурации; разработки в этой области продолжаются. При создании новых марок огнеупоров используются оксиды с повышенной температурой плавления – ZrO_2 , Cr_2O_3 , MgO . Основной задачей при этом является увеличение срока эксплуатации стекловаренных печей. Перспективны разработки волокнистых и композиционных огнеупоров на основе волокнистых материалов. Футеровка промышленных печей волокнистыми огнеупорами уменьшает капитальные вложения на сооружение печей, обеспечивает сокращение расхода топлива на 20–30%.

1. ОГНЕУПОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1. Классификация огнеупорных материалов

Огнеупорами называются неметаллические материалы, предназначенные для использования в условиях высоких температур в различных теплотехнических агрегатах и имеющие огнеупорность не ниже 1580°C.

Огнеупорность – способность материалов противостоять, не расплавляясь, воздействию высоких температур.

Огнеупорные материалы подразделяются на изделия, имеющие определенную геометрическую форму и размеры, и неформованные огнеупоры, выпускаемые в виде порошков или масс.

Огнеупорные изделия в соответствии с ГОСТ 28874 классифицируются по разным признакам:

по степени огнеупорности они разделяются на огнеупорные (1580–1770°C), высокоогнеупорные (1770–2000°C), высшей огнеупорности (>2000°C);

по форме и размерам – на прямые и клиновые нормальных размеров; фасонные простые, сложные, особо сложные и крупноблочные; специальные промышленные и лабораторные;

по кажущейся пористости на восемь типов: особо плотные – менее 3%; высокоплотные – 3–10%; повышенной плотности – 10–16%; уплотненные – 16–20%; среднеплотные – 20–30%; низкоплотные – более 30%; высокопористые – от 45 до 75%; ультрапористые – свыше 75%;

по минералогическому составу огнеупоры разделяются на типы и группы, представленные в табл. 1;

по способу упрочнения огнеупорные изделия классифицируются на бетонные, с огнеупорным заполнителем, гидратационным или химическим связующим и добавками, приобретающие заданные свойства в результате твердения при нормальной температуре или при температуре не выше 600°C; безобжиговые, приобретающие заданные свойства при термообработке не выше 600°C; обожженные до спекания в процессе обжига; горячепрессованные, подвергнутые спеканию при прессовании; плавнелитые изделия;

по способу формования – на изделия пластического формования, полусухого прессования; литые и вибролитые из текучих масс; горячего прессования; плавнелитые; пиленные из отлитых блоков или из естественных горных пород.

Таблица 1

Классификация огнеупорных изделий по минералогическому составу

Тип	Группа	Содержание определяющих компонентов, мас. %
1. Кремнеземистые	На основе кварцевого стекла	SiO ₂ не менее 98
	Динасовые (тридимитокристаллитовые)	SiO ₂ больше 93
	Кварцевые	SiO ₂ не менее 85
2. Алюмосиликатные	Полукислые	Al ₂ O ₃ от 14 до 28
	Шамотные	Al ₂ O ₃ от 28 до 45
	Муллитокремнеземистые (силлиманитовые)	Al ₂ O ₃ от 45 до 62
	Муллитовые	Al ₂ O ₃ от 62 до 72
	Муллитокорундовые	Al ₂ O ₃ от 72 до 95
3. Глиноземистые	Корундовые	Al ₂ O ₃ больше 95
	Корундовые с добавками	Al ₂ O ₃ не менее 85
4. Глиноземоизвестковые	Алюминаткальциевые	Al ₂ O ₃ больше 65 CaO от 10 до 35
5. Высокомагнезиальные	Периклазовые	MgO не менее 85
6. Магнезиально-силикатные	Периклазофорстеритовые	MgO от 65 до 85 SiO ₂ не менее 7
	Форстеритовые	MgO от 50 до 65 SiO ₂ от 20 до 45
	Форстеритохромитовые	MgO от 45 до 60 SiO ₂ от 15 до 30 Cr ₂ O ₃ от 5 до 15
7. Магнезиально-шпинелидные	Периклазохромитовые	MgO не менее 60 Cr ₂ O ₃ от 5 до 20
	Хромитопериклазовые	MgO от 40 до 60 Cr ₂ O ₃ от 15 до 35
	Хромитовые	MgO не менее 40 Cr ₂ O ₃ больше 30
	Периклазошпинелидные	MgO от 50 до 85 Cr ₂ O ₃ от 5 до 20 Al ₂ O ₃ до 25
	Периклазошпинельные	MgO больше 40 Al ₂ O ₃ от 5 до 55
	Шпинельные	MgO от 25 до 40 Al ₂ O ₃ от 55 до 70

Тип	Группа	Содержание определяющих компонентов, мас. %
8. Магнезиально-известковые	Периклазоизвестковые	MgO от 50 до 85 CaO от 10 до 45
	Периклазоизвестковые стабилизированные	MgO от 35 до 75 CaO от 15 до 40
	Известковопериклазовые	MgO от 10 до 50 CaO от 45 до 85
9. Известковые	Известковые	CaO не менее 85
10. Хромистые	Хромоксидные	Cr ₂ O ₃ не менее 90
	Высокохромистые	Cr ₂ O ₃ от 60 до 90
11. Цирконистые	Оксидциркониевые	ZrO ₂ больше 85
	Бадделеитокорундовые	ZrO ₂ от 20 до 85 Al ₂ O ₃ не более 65
	Цирконовые	ZrO ₂ больше 50 SiO ₂ больше 25
	Оксидцирконийсодержащие	ZrO ₂ до 20
12. Оксидные	Оксидные	BeO, MgO, ZrO ₂ , CaO, Cr ₂ O ₃ , SnO ₂ и др. – не менее 97
	Оксидсодержащие	Оксинитриды, оксикарбиды и др. – не менее 97
13. Углеродистые	Графитированные	C больше 96
	Угольные	C больше 85
	Углеродсодержащие	C от 4 до 40
14. Карбидокремниевые	Карбидокремниевые	SiC более 70
	Карбидкремнийсодержащие	SiC от 15 до 70
15. Бескислородные	Бескислородные	Нитриды, карбиды, силициды и другие бескислородные соединения – не менее 50

Примечание. Огнеупоры типов 5, 6, 7 и 8 называют магнезиальными.

1.2. Технические требования к огнеупорам

Выбор огнеупоров определяется их свойствами, важнейшими из которых являются следующие:

1) способность выдерживать длительные термические и механические нагрузки при температуре службы;

2) стеклоустойчивость, т. е. способность противостоять агрессивному воздействию расплавленной стекломассы и шихты;

3) постоянство объема огнеупора при температуре службы;

4) достаточная термостойкость – в процессе эксплуатации разность температур между наружными и внутренними слоями огнеупора может составлять 1000°C ;

5) точность размеров при больших габаритах, высокое качество поверхности;

6) теплофизические свойства: температурный коэффициент линейного расширения, который является показателем термостойкости; теплопроводность, которая зависит главным образом от пористости.

Огнеупорность определяется по стандартной методике на специальных образцах – пироскопах, имеющих форму усеченной пирамиды высотой 30 мм со сторонами нижнего и верхнего оснований 8 и 2 мм соответственно. Огнеупорность равна той температуре, при которой вершина пироскопа, изготовленного из испытуемого огнеупорного материала, касается основания вследствие деформации. Эту температуру определяют стандартным пироскопом, который устанавливается вместе с испытуемым.

Размягчение и деформация огнеупорного материала происходят в результате плавления отдельных компонентов огнеупора и их взаимодействия между собой. Появление жидкой фазы в огнеупорном материале приводит к деформации под действием собственного веса.

Высокотемпературная прочность характеризует сопротивление огнеупоров деформации под нагрузкой при высоких температурах. Испытания проводят по стандартной методике на цилиндрических образцах высотой 50 мм и диаметром 36 мм. Образец нагревают в электропечи при нагрузке 0,2 МПа.

При испытаниях определяют следующие показатели: температуру уменьшения образца на 0,6% (температуру начала деформации); температуру уменьшения высоты образца на 4%; температуру уменьшения образца на 10 и 20%.

По показателям температуры начала деформации под нагрузкой определяется максимальная температура применения (температура службы). Это важный показатель огнеупорных изделий, так как в кладке стекловаренной печи они испытывают значительные механические нагрузки. Температура деформации под нагрузкой зависит от следующих факторов:

плотности изделий – чем меньше пористость, тем выше температура деформации;

количества стекловидной фазы – чем выше содержание стекловидной фазы и ниже ее вязкость, тем больше различие между огнеупорностью и температурой службы;

минералогического состава и температуры плавления кристаллических фаз.

Как следует из графика деформации образцов различных огнеупоров, изделия из динаса начинают деформироваться при температуре, близкой к температуре их огнеупорности (рис. 1). Это связано с образованием в них развитого кристаллического сростка тридимита. В отличие от динаса периклазовый огнеупор при огнеупорности 2300°С имеет температуру службы 1550°С. Изделия из шамота начинают деформироваться при температуре более низкой, чем температура огнеупорности, однако они характеризуются более пологой кривой размягчения, что позволяет при кратковременном превышении температуры службы сохранить устойчивость кладки печи.

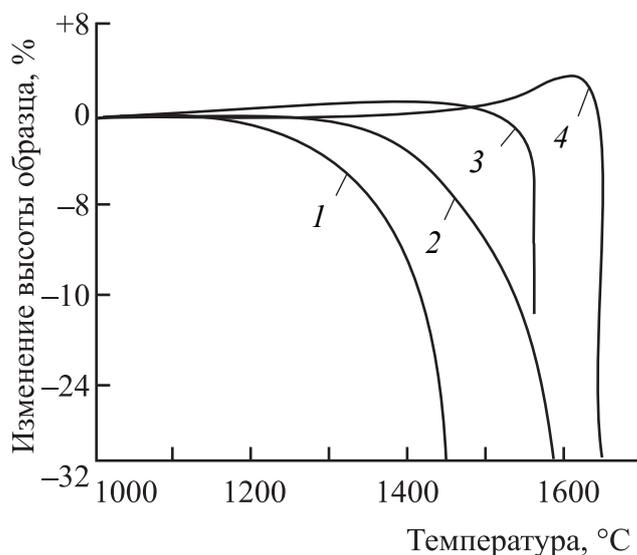


Рис. 1. График деформации образцов огнеупоров под нагрузкой при их нагреве:
1 – шамот класса Б; 2 – шамот класса А;
3 – периклаз; 4 – динас

Термостойкость огнеупорных материалов – способность противостоять резким изменениям температуры без разрушения. Термостойкость огнеупоров определяется двумя методами. По первому методу проводят одностороннее нагревание изделия при температуре горячего конца 1300°С с выдержкой в течение одного часа; холодный конец изделия имеет комнатную температуру. Затем изделие резко охлаждают в проточной воде, погружая горячий конец в воду на 50 мм. Термостойкость выража-

ют числом теплосмен, вызвавших потерю массы изделия, равную 20%. По второму методу изготавливают кольцо, которое нагревают изнутри. Термостойкость выражают перепадом температур, при котором кольцо разрушится. Термостойкость определяется температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), механической прочностью, теплопроводностью, теплоемкостью материалов, их фазовым составом. Например, динасовые изделия выдерживают 1–2 теплосмены, периклазовые – 1–3, а шамотные – до 50 теплосмен.

Постоянство объема. В процессе эксплуатации огнеупоров при высоких температурах происходит постепенное изменение их фазового состава за счет перекристаллизации, диффузионных процессов и дополнительного спекания. Эти процессы сопровождаются необратимыми изменениями объема изделия вследствие усадки или расширения в процессе службы.

Большинство огнеупоров характеризуется дополнительной усадкой, которая нарушает плотность швов кладки стен или свода стекловаренной печи. Увеличение объема в процессе службы характерно для динаса и связано с превращением кварца в тридимит или кристобалит. Значительное изменение объема огнеупорного изделия недопустимо, так как это приводит к увеличению швов, нарушению связи между изделиями и даже разрушению кладки. Поэтому величина дополнительного роста или усадки нормируется в зависимости от вида и назначения изделия.

Стеклоустойчивостью огнеупорных материалов называют их способность противостоять агрессивному воздействию компонентов шихты и стеклорасплава. От стеклоустойчивости огнеупоров зависят срок службы стекловаренных печей и качество вырабатываемого стекла. Используются динамические и статические методы коррозионных испытаний, которые можно подразделить на следующие группы:

- статическое испытание образцов в тигле с ограниченным объемом стекломассы при неподвижных образцах, тигле и расплаве;

- статическое испытание Г-подобных образцов, помещенных в стекловаренную печь;

 - динамическое испытание с вращением образцов в стекломассе;

 - динамическое испытание с неподвижными образцами и вращением тигля со стекломассой;

 - динамическое испытание с неподвижными образцами и принудительной циркуляцией стеклорасплава.

При динамических методах стеклоустойчивость оценивают в процентах уменьшения объема образца после испытания. При статическом

испытании скорость разрушения характеризуется изменением линейных размеров образца. Часто проводят сравнительные испытания огнеупорных материалов различных марок, в таком случае оцениваются относительные показатели стеклоустойчивости.

Пористость огнеупоров определяет их устойчивость к коррозии, прочность и склонность к деформации. Характеризуется показателями кажущейся пористости, которые составляют от нуля для плавящихся изделий до 60–75% у теплоизоляционных материалов.

Электропроводность огнеупорных материалов играет важную роль при футеровке электрических печей. Большая часть огнеупоров, за исключением углеродистых и карбидокремниевых, при низких температурах являются диэлектриками. При высоких температурах с появлением жидкой фазы электропроводность огнеупоров существенно повышается.

Теплофизические свойства огнеупорных материалов, такие как теплопроводность, теплоемкость, ТКЛР, являются важными показателями, оказывающими большое влияние на эффективность работы стекловаренной печи. Показатели теплофизических свойств ряда огнеупоров приведены в табл. 2. В связи с существенным влиянием пористости материалов на показатели эффективной теплопроводности указаны величины кажущейся плотности.

Таблица 2

Теплофизические свойства огнеупоров

Огнеупорные изделия	Теплопроводность, Вт/м·К, при температуре, °С			Теплоемкость, кДж/кг·К, при температуре, °С			Плотность, г/см ³	ТКЛР, α·10 ⁶ К ⁻¹
	20	500	1000	20	500	1000		
Шамотные	1,16	1,34	1,51	0,83	1,0	1,08	2,0	4,6–6,0
Динасовые	1,16	1,40	1,63	0,79	0,96	1,0	1,9	11–13
Периклазовые	5,82	4,66	3,5	0,92	1,08	1,19	2,6	13–15
Корундовые	29,1	10,04	5,82	0,83	1,0	1,08	9,2	8–8,8
Бакоровые	–	3,95	3,7	1,33	2,4	2,95	3,7–4	6–7,5

Теплопроводность огнеупорных материалов оказывает большое влияние на эффективность работы стекловаренной печи. Огнеупорная кладка стекловаренных печей служит изолятором тепла и должна обладать минимальной теплопроводностью. В тех случаях, когда нагрев происходит через стенку тигля, огнеупорный материал служит проводником тепла и поэтому должен иметь по возможности большую теплопроводность.

Теплоемкость огнеупорных изделий является показателем расхода тепла на нагрев кладки печи и особенно важна при расчете насадки регенераторов.

Тепловое расширение огнеупорных материалов в теплотехнических установках учитывается путем создания в кладке специальных температурных швов.

1.3. Технология огнеупорных изделий

По технологии огнеупоры можно подразделить на керамические (изделия пластического формования, полусухого прессования, литые и вибролитые из текучих масс, горячего прессования) и плавленолитые.

1.3.1. Керамические огнеупоры

Наиболее старым способом изготовления керамических огнеупоров является *пластическое формование*, которое сейчас используется в ряде случаев для производства шамотных огнеупоров. При этом изделия формуют из массы, состоящей из 50–65% непластичных компонентов и 50–35% связующей глины. Влажность массы составляет 15–20%, что вызывает повышенную усадку при сушке и обжиге и, как следствие, невысокую точность геометрических размеров готовых изделий.

Большую часть огнеупорных изделий изготавливают методом *полусухого прессования*. При использовании данного метода влажность массы составляет 5–10%, доля непластичных компонентов – 80–95%. Давление прессования превышает 30 МПа. Для изготовления высококачественных изделий в качестве связующего вместо глины или каолина используют органические добавки типа сульфитно-спиртовой бражки или декстрина. Усадка массы при сушке и обжиге незначительна, точность геометрических размеров готовых изделий удовлетворительна.

При изготовлении изделий крупногабаритных, сложной конфигурации используют пневматическое трамбование и вибропрессование. Влажность масс при этом составляет менее 5%. Готовые изделия отличаются высокой точностью размеров.

При использовании метода полусухого прессования нельзя получить изделия сложной конфигурации, а также особо плотные изделия. Для формования тонкостенных и крупногабаритных изделий сложной конфигурации используют *иликерное литье* в пористые формы. Влажность литейного шликера составляет до 25%, в его состав вводятся органические либо неорганические разжижители в количестве

0,1–2%. Изделия, изготовленные шликерным литьем из мелкодисперсных компонентов, тщательно сушат и обжигают при высокой температуре.

Для получения особо ответственных огнеупорных изделий используют *изостатическое прессование*. Исходные компоненты готовят из водных суспензий по способу распыления, в пресс-порошок вводят только органические связующие (декстрин, этиленгликоль, этилсиликат). При прессовании создается всестороннее равное давление, благодаря чему получают плотные и однородные изделия. Изостатическое прессование заменяет шликерное литье при изготовлении крупногабаритных изделий сложной конфигурации.

Легковесные огнеупорные изделия изготавливают по описанным выше технологиям. При этом пористая структура формируется различными способами.

1.3.2. Плавленолитые огнеупоры

Основными стадиями технологического процесса изготовления плавленолитых огнеупоров являются приготовление шихты и литейных форм, получение расплава, заливка расплава в литейные формы, отжиг и механическая обработка изделий.

Приготовление шихты ведется аналогично приготовлению стекольных шихт на автоматизированных дозировочно-смесительных линиях.

Для заливки расплава используют чаще всего песчаные формы, которые собирают из прессованных и высушенных пластин, изготовленных из кварцевого песка с добавлением в качестве связующего жидкого стекла. Собранную форму помещают в термоящик, засыпают теплоизоляционным материалом и подают на заливочную площадку у дуговой печи. Хотя песчаные формы одноразовые, технология их изготовления наиболее экономична.

При производстве изделий из расплавов с температурой более 2000°C используются многооборотные графитовые и металлические сборные формы. В отличие от песчаных такие формы обеспечивают гораздо большую точность геометрических размеров отливок.

Плавление шихты производят в дуговых печах периодического действия при температуре до 2500°C. Корпус печи охлаждается водой, т. е. происходит футеровка печи оплавленной шихтой. При восстановительном режиме плавления электроды погружены в расплав, покрытый слоем шихты; при окислительном режиме достигается устойчивое горение дуги длиной 3–5 см между графитовыми элект-

родами и расплавом. Окислительное плавление по сравнению с восстановительным обеспечивает намного более высокое качество огнеупоров по таким важнейшим показателям, как плотность и минимальное содержание углерода. Это обуславливает повышение коррозионной стойкости огнеупора и резкое снижение склонности к образованию пузырей при контакте с расплавом стекла. Для варки качественных стекол необходимо использовать огнеупоры только окислительного плавления.

Заливка расплава в формы производится через летку путем наклона печи при температуре 1750–2400°C. Затвердевание расплава в форме происходит в результате его кристаллизации. Размеры и форма кристаллов, обусловленные скоростью охлаждения расплава, а также их преимущественная ориентация в отливке в значительной мере определяют структуру и текстуру изделия. По мере охлаждения расплава и его кристаллизации происходит усадка с уменьшением объема на 10–13%, что обуславливает образование усадочных раковин, пористости и других дефектов на 1/3–1/2 толщины изделия.

В начальный период охлаждения за счет интенсивной теплоотдачи от расплава к форме в отливке формируются мелкокристаллические зоны, постепенно переходящие в среднекристаллические. Эти зоны характеризуются повышенной плотностью и концентрацией высокотемпературных компонентов состава, что обеспечивает высокие эксплуатационные показатели материала. В отличие от плотных зон внутренние (центральные) участки отливок с расплавом, обогащенным плавнями и примесями, формируют крупнокристаллическую зону с пустотами и повышенной пористостью. Усадочные раковины в отливках располагаются вблизи участка поступления расплава, под прибыльной надставкой, и могут занимать 20–40% объема отливки, что приводит к ее выбраковке.

Для повышения плотности отливок при заливке расплава применяют литейные формы с увеличенной прибыльной надставкой, объем которой достигает 70–110% от объема изделий, либо заливают брус намного большего объема с последующей обрезкой литниковой и пористой частей на станке с алмазным инструментом.

Отжиг изделий. Основная задача этой технологической операции – снизить температуру изделия до температуры окружающей среды со скоростью, исключающей вероятность его разрушения или появления трещин, сколов углов, ребер и других дефектов. На практике используют два способа охлаждения (отжига): естественный (неуправляемый) и искусственный (регулируемый). Естественный отжиг осуществляется непосредственно в термоящике в течение 7–18 суток в зависимости от мас-

сы отливки. Применяют также способ охлаждения изделий в естественных условиях, заключающийся в высвобождении изделия из форм после выдержки в течение 30–60 мин, переносе его в другой термоящик и засыпке большим количеством изоляционного материала.

Регулируемый отжиг изделий проводят по заданному режиму в туннельной печи. Перед установкой в туннельную печь изделия извлекают из термоящика и высвобождают из литейной формы. Продолжительность отжига в зависимости от размеров и массы изделий составляет 2,5–4 суток. Температурная кривая по длине печи рассчитывается для каждого вида огнеупора.

Остывшие изделия обрабатываются алмазным инструментом – срезается припуск, шлифуется поверхность. Эксплуатационные показатели плавленолитых огнеупоров зависят от состояния поверхности и точности геометрических размеров.

1.4. Кремнеземистые огнеупоры

Динас – наиболее распространенный кремнеземистый огнеупор, содержащий не менее 93% кремнезема (здесь и далее химический состав указан в мас. %). Изготавливается по керамической технологии из природных кварцитов, состоящих из β -кварца. Запасы кварцитового сырья в России для производства динаса практически неограниченны. Имеются месторождения кварцитов на Украине.

В производстве динаса важно учитывать превращения, которые претерпевает кварц при обжиге. Порядок фазовых превращений, соответствующих диаграмме Фенера, не реализуется, их последовательность и завершенность определяется наличием минерализаторов. При получении динаса для стекловаренных печей в качестве минерализатора используется СаО, который вводится известковым молоком.

Технологическая схема производства динаса включает следующие стадии:

- дробление кварцитов до кусков размером 30–50 мм и помол до частиц размером 3–0,088 мм;

- смешение динасовой шихты, состоящей из смеси зернистого и тонкомолотого кварцита, динасового боя, известкового молока, сульфитно-спиртовой бражки (отход целлюлозного производства) и других добавок;

- полусухое прессование при давлении порядка 100 МПа;

- сушка до влажности 1–1,2% и обжиг при температуре 1430°C с выдержкой при максимальной температуре 30 ч.

Поскольку β -кварц характеризуется наибольшей плотностью в ряду модификаций кремнезема, то при обжиге динаса из-за модификационных превращений происходит уменьшение плотности и соответственно увеличение размеров и пористости изделий. Для уменьшения пористости динаса его обжигают при медленном нагреве: скорость подъема температуры в интервале 20–900°C составляет от 10 до 20°C/ч, далее она уменьшается от 8 до 1°C/ч. Скорость охлаждения также невелика.

В технологии динаса важное значение имеет скорость перехода одной модификации кремнезема в другую. Превращение высокотемпературных форм различных модификаций кремнезема протекает с трудом, так как эти модификации существенно отличаются по кристаллической структуре. Превращение кварца в кристобалит начинается с поверхности зерен кварцита и заметно ускоряется в присутствии примесных катионов. В присутствии минерализатора при температуре 1350–1430°C имеется достаточное количество расплава, в котором растворяется кварц и метастабильный кристобалит. Одновременно из расплава выделяется тридимит.

Качество динаса определяется содержанием в нем тридимита. Это связано с тем, что переход из высокотемпературной в низкотемпературные модификации (и наоборот) тридимита в процессе службы огнеупора сопровождается небольшим изменением объема, в то время как при переходе α -кварц \leftrightarrow β -кварц и α -кристобалит \leftrightarrow β -кристобалит происходит скачкообразное изменение объема соответственно на 0,82 и 4,9% (табл. 3). Тридимит имеет самый низкий показатель ТКЛР в ряду модификаций кремнезема.

Динас, содержащий много кварца, не пригоден для кладки стекловаренных печей. В процессе службы при высоких температурах происходит перерождение кварца в тридимит и кристобалит, что сопровождается увеличением размеров динаса и, как следствие, созданием высоких напряжений.

Мономинеральный динас на практике не удается получить. После обжига образуется материал, содержащий 60–80% γ -тридимита, 10–20% β -кварца, 10–30% β -кристобалита, 8–15% стеклофазы. β -Кварц характеризуется наибольшей плотностью в ряду модификаций кремнезема, поэтому при обжиге динаса из-за модификационных превращений происходит уменьшение плотности и, соответственно, увеличение размеров (на 3–4%) и пористости изделий. Показателем степени тридимитизации динаса является его истинная плотность: чем меньше плот-

ность, тем выше качество динаса. При производстве динасовых огнеупоров необходимо обеспечить одинаковую степень перерождения партии изделий, предназначенных для кладки стекловаренной печи.

Таблица 3

Изменение объема модификаций SiO₂

Модификации кремнезема	Температура превращения, °С	Объемный эффект превращения, %
β-Кварц ↔ α-кварц	573	±0,82
α-Тридимит ↔ β-тридимит	117	±0,20
β-Кристобалит ↔ α-кристобалит	180–270	±4,9
β-Тридимит ↔ α-тридимит	163	±0,20
α-Кварц ↔ α-тридимит	870	+16,0
α-Кварц ↔ кремнеземистое стекло	1610	+15,5
Кремнеземистое стекло ↔ α-кристобалит	1728	-0,9

Перерождение остаточного кварца в тридимит и кристобалит при температурах варки стекла вызывает необратимое расширение динасовых изделий, составляющее от 0,2 до 2%.

Динасовые изделия характеризуются высокой температурой начала деформации под нагрузкой (рис. 1). Тридимит в динасе образует кристаллический каркас (сросток), который незначительно растворяется в жидкой фазе при высоких температурах. Поэтому динас деформируется только при 1650–1670°С, когда начинает плавиться кристаллический каркас из тридимита. При этом деформация динаса происходит в узком интервале температур (10–15°С). Высокой температуре деформации динаса способствуют также медленное нарастание количества жидкой фазы при нагревании и большая вязкость расплава. Присутствие в динасе неперерожденного кварца снижает температуру начала деформации.

Термическая стойкость динасовых изделий, определяемая при нагревании до 1300°С с последующим охлаждением в воде, составляет всего 1–2 теплосмены. Низкая термостойкость динаса связана с модификационными превращениями кристобалита при 180–270°С, которые сопровождаются скачкообразным увеличением объема материала, что, в свою очередь, вызывает нарушение его структуры и образование трещин. В интервале температур 500–600°С происходит расширение вследствие превращения β-кварца в α-кварц. Величина расширения динаса при этом определяется количеством неперерожденного кварца. Кроме

того, термостойкость снижается из-за многофазности динаса – напряжения возникают из-за различия величин ТКЛР кварца, тридимита и кристобалита, неодинакового объемного расширения при переходе низкотемпературных модификаций в высокотемпературные. Поэтому динас не должен подвергаться резкому охлаждению ниже температуры 600°C. Это исключает применение динасовых материалов в тех конструктивных элементах печей, которые подвергаются резким колебаниям температуры, например печей периодического действия. Модификационные превращения кремнезема в динасе необходимо учитывать при выводке печи.

По химическим свойствам динас является кислым огнеупором, поэтому щелочные компоненты шихты и стеклорасплава взаимодействуют с ним при высоких температурах с образованием менее огнеупорных силикатов. С увеличением плотности динаса его стеклоустойчивость возрастает.

Химический состав динаса, %: SiO₂ – 94–98, CaO – 2–3, Al₂O₃ – 0,4–1,5, TiO₂ – около 1, Fe₂O₃ – 0,4–1,7.

Свойства динаса:

огнеупорность, °С	1690–1730
температура начала размягчения, °С, не ниже	1600–1650
кажущаяся плотность, г/см ³ , не более	1,7–2
истинная плотность, г/см ³	2,32–2,38
пористость, %	20–22
предел прочности при сжатии, МПа	20–40
теплопроводность, Вт/м·К	1,75–2,2

Высокая температура деформации под нагрузкой динаса позволяет использовать его в высокотемпературных печах при изготовлении нагруженных частей кладки. Динас используют для кладки сводов, стен пламенного пространства и горелок стекловаренных печей.

ГОСТ 3910 «Изделия огнеупорные динасовые для кладки стекловаренных печей» предусматривает следующие марки:

ДСУ – изделия динасовые уплотненные для кладки наиболее ответственных участков верхнего строения печи с максимальной температурой 1600°C (содержание SiO₂ не менее 96%);

ДСО – изделия динасовые для кладки наиболее ответственных участков верхнего строения печи (SiO₂ не менее 95%);

ДС – изделия динасовые для менее ответственных участков печи с максимальной рабочей температурой до 1530°C (SiO₂ не менее 94%).

Высокое качество имеют динасовые изделия марки ДСК, выпускаемые в соответствии с техническими условиями. Они предназначены

ны для кладки наиболее ответственных участков верхнего строения печи. Динас марки ДСК отличается пониженным содержанием Fe_2O_3 (не более 0,4%), нормированным содержанием Al_2O_3 (не более 0,4%) и остаточного кварца (1,3%), что обеспечивает повышенные показатели прочности и коррозионной стойкости.

Свойства основных огнеупорных изделий, в том числе динасовых, представлены в табл. П1.1.

Динасовые огнеупоры европейских производителей, например марки STELLA фирмы «Didier-Werke AG» (Германия), содержат не менее 96,5% SiO_2 , не более 0,5% Fe_2O_3 . Характеристики данных огнеупоров: температура начала деформации – не ниже 1650°C; истинная плотность – не более 2,34 г/см³; открытая пористость – 19,5%; предел прочности при сжатии – 35–40 МПа.

Огнеупоры из плавленого кремнезема представляют собой непрозрачное кварцевое стекло, содержащее 99,3–99,6% SiO_2 , 0,1–0,3% Al_2O_3 . Сырьем для его получения являются обогащенные кварцевые пески. Кварцевый брус получают плавлением обогащенного кварцевого песка в электрических печах сопротивления вокруг стержневого нагревателя из графита. При температуре 2000°C вязкость стеклообразного кремнезема высока, а дальнейшее повышение температуры ведет к испарению. Поэтому литье расплава кремнезема невозможно. Формование изделий производят прессованием высоковязкой стекло-массы после извлечения электрода. Огнеупоры по способу получения называют плавленопрессованными.

Свойства плавленого кремнезема: плотность – 2,06–2,18 г/см³; кажущаяся пористость – 0–5%; ТКЛР – $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; теплопроводность – от 1,66 Вт/м·К при 200°C до 4,56 Вт/м·К при 1000°C. Преимущества таких огнеупоров: высокая чистота материала (содержание оксида железа менее 0,1%); высокая термостойкость; постоянство объема; высокое электросопротивление, высокая кислотостойкость. Недостатком плавленого кварца является кристаллизация при температурах выше 1150°C с выделением кристобалита. При охлаждении кварцевого бруса происходит его разрушение из-за изменения объема при модификационных переходах кристобалита.

Для получения кварцевых тиглей наплавленное в электрических печах кварцевое стекло переносят в форму и раздувают сжатым воздухом или вакуумируют. Одним из способов является наплавление кварцевого стекла во вращающейся центробежной форме.

Огнеупорный припас из плавленого кремнезема (сосуды, шибера, мешалки и др.) могут быть получены по керамической технологии из

измельченного кварцевого стекла. Наплавление заготовок из кварцевого стекла осуществляют в плазменном реакторе. Изделия из измельченного кварцевого стекла формуют шликерным литьем, центробежным формованием, полусухим прессованием и обжигают при температуре 1100–1200°C.

Огнеупорные изделия из кварцевого стекла содержат 98% SiO₂ и имеют следующие характеристики:

кажущаяся плотность, г/см ³ , не более	1,8–1,9
открытая пористость, %	10–20
ТКЛР, $\alpha \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$	0,5
термостойкость, теплосмены	50–52

1.5. Алюмосиликатные огнеупоры

Наиболее распространенным видом огнеупоров являются алюмосиликатные огнеупоры. Алюмосиликатные огнеупорные изделия делятся на четыре вида: полукислые; шамотные; высокоглиноземистые, изготовленные керамическим способом; высокоглиноземистые, изготовленные литьем из расплава.

Структура, свойства и область применения алюмосиликатных огнеупорных материалов зависят от содержания Al₂O₃ и SiO₂. Характеристики огнеупоров возрастают с ростом содержания Al₂O₃, что обусловлено образованием соединений с более высокими температурами плавления.

Шамотные огнеупоры занимают первое место в производстве огнеупоров (65–70% от всего объема). Их широкое распространение обусловлено доступностью и низкой стоимостью, хорошей термической устойчивостью (до 50 теплосмен), небольшой усадкой при обжиге. Данные изделия используют для кладки бассейнов ванн печей (донный брус), пилотелей, регенераторов, отдельных элементов горшковых печей.

К шамотным относятся изделия с содержанием Al₂O₃ от 28 до 45%, к полукислым – с содержанием Al₂O₃ 15–25% и SiO₂ более 65%. Шамотные и полукислые огнеупоры состоят из мелких кристаллов муллита 3Al₂O₃ · 2SiO₂, кристаллических модификаций кремнезема (кварца, кристобалита) и стеклофазы со значительным содержанием Al₂O₃.

Сырьем для производства шамотных огнеупоров являются огнеупорные глины и каолины, содержащие водный каолинит Al₂O₃ · 2SiO₂ · 2H₂O. После прокаливания (600–800°C) получают безводный каолинит, состоящий из 46% Al₂O₃ и 54% SiO₂. Лучшими огнеупорными глинами (огнеупорность более 1580°C, возрастает с ростом содержания Al₂O₃) являются Веселовская, Новорайская (Донецкая обл., Украина), Лат-

ненская (Воронежская обл., Россия); лучшие каолины – месторождений Украины (Просьяновское, Глуховецкое).

Глину, каолин или их смеси обжигают на шамот во вращающихся печах при температуре 1200–1350°C. Шамот играет роль отошителя в керамических массах для огнеупоров и в отличие от других отошителей (например, кварцевых песков) не снижает огнеупорность и другие свойства изделий. В зависимости от способа формования керамические массы для огнеупоров содержат 60–85% шамота, остальное – огнеупорная глина. Многошамотные массы состоят из 85% шамота и 15% связующей глины.

Стеклобрус для ванн печей (донный и стеновой) формируют методом полусухого прессования (влажность около 5%) или пневматического трамбования. При изготовлении шамотных изделий используют также пластическое формование (влажность 20–22%). Конечная температура обжига шамотных изделий составляет 1300–1450°C и зависит от температуры спекания глин.

Горшки для варки стекла в печах периодического действия изготавливаются следующими методами: пластическим формованием, пневматическим трамбованием (дном вверх), шликерным литьем.

Свойства алюмосиликатных огнеупоров зависят как от состава, так и от способа формования. Минимальные значения пористости (18–20%) и усадки, максимальная прочность (в 3 раза выше) обеспечиваются при непластичном формовании.

Шамотные огнеупоры разделяют по огнеупорности на три класса: класс А имеет огнеупорность не ниже 1690°C, класс Б – 1650°C, класс В – 1630°C.

Температура начала деформации под нагрузкой (температура приложения) шамотных изделий составляет 1250–1450°C. Шамотные изделия характеризуются плавным пластическим характером деформации – ее интервал составляет 200–250°C (рис. 1). Образец не разрушается при испытаниях, а лишь деформируется. Это связано с тем, что в шамотных изделиях с повышением температуры непрерывно увеличивается количество жидкой фазы и повышается ее вязкость вследствие растворения в ней кремнезема и глинозема. Широкий интервал деформации шамотных огнеупоров позволяет сохранить устойчивость кладки печи при кратковременном превышении температуры.

При длительной службе в печах шамотные огнеупоры дают дополнительную усадку, причем при температурах, превышающих температуру их обжига, кладка деформируется и теряет строительную прочность.

Термостойкость шамотных огнеупоров зависит от состава масс, способа формования, температуры обжига, структуры изделий и может изменяться в широких пределах – от 7 до 50 теплосмен. С увеличением содержания шамота в составе масс термостойкость изделий повышается и у многошамотных изделий может достигать 150 теплосмен.

Шамотно-каолиновые огнеупоры по технологии производства мало отличаются от шамотно-глинистых. Сырьем для их производства служат каолины. В зависимости от огнеупорности сырья каолиновые изделия делятся на два класса: класс 0 – огнеупорность не ниже 1750°C; класс А – не ниже 1730°C. Каолиновые огнеупоры обладают высокой термостойкостью – до 26 теплосмен; температура начала деформации составляет 1450–1550°C, температура разрушения 1600–1650°C.

Составы и свойства алюмосиликатных огнеупоров представлены в табл. 4.

Стеклоустойчивость алюмосиликатных огнеупоров снижается с ростом содержания в составе стекла оксидов щелочных и щелочноземельных металлов.

Таблица 4

Составы и свойства алюмосиликатных огнеупоров

Огнеупоры	Содержание основных компонентов, %	Температура службы, °С	Плотность, г/см ³	Пористость, %	Доп. усадка, %
Полукислые	Al ₂ O ₃ 15–28 SiO ₂ 66–82	1300–1400	1,6–2,3	18–25	±(0–2)
Шамотные	Al ₂ O ₃ 28–45 SiO ₂ 51–66	1350–1450	2,5–2,7	15–20	–(0–2)
Шамотно-каолиновые	Al ₂ O ₃ 40–45 SiO ₂ 52–57	1450–1550	2,3–2,5	12–15	–(0–1)
Муллитовые	Al ₂ O ₃ 60–75 SiO ₂ 21–40	1500–1700	2,2–2,8	12–30	–(0–1)
Корундовые	Al ₂ O ₃ 95–99	1700–1900	3,7–3,9	13–20	–(0–1)

По ГОСТ 7151 «Изделия огнеупорные алюмосиликатные крупноблочные для стекловаренных печей» выпускаются огнеупоры следующих марок для кладки дна и бассейна стекловаренных печей, каналов студочных и выработочных частей:

ШСУ-33, ШСУ-36, ШСУ-40 – шамотные уплотненные с содержанием Al₂O₃ не менее 33, 36 и 40% соответственно;

ШСП-40 – шамотные повышено-плотные с содержанием Al₂O₃ не менее 40%.

По ГОСТ 390 выпускаются шамотные изделия общего назначения марок ША, ШБ, ШАК с температурой применения 1350–1400°C. По ГОСТ 20901 и техническим условиям изготавливаются изделия, предназначенные для кладки регенераторов, марок ШВ-37, ШН-38, ШВ-42 с температурой применения не ниже 1330, 1400 и 1500°C соответственно. Свойства огнеупоров приведены в табл. П1.1.

Высокоглиноземистые огнеупоры содержат более 45% Al_2O_3 и в зависимости от содержания глинозема подразделяются на муллитокремнеземистые (силлиманитовые), содержащие 45–62% Al_2O_3 ; муллитовые (62–72% Al_2O_3); муллитокорундовые (72–90% Al_2O_3).

Муллитовые огнеупоры изготавливают из смеси технического глинозема и огнеупорной глины. При изготовлении керамических высокоглиноземистых огнеупоров применяется высокоглиноземистый шамот, который получают из минералов силлиманитовой группы, природного гидратированного глинозема или смеси глины и глинозема. Пластическое формование изделий не применяется; используются методы полусухого прессования, шликерного литья и изостатического формования. Температура обжига – до 1700°C.

Высокоглиноземистые огнеупоры отличаются от шамотных большим содержанием тугоплавких фаз (муллита, корунда), меньшим количеством стеклофазы и более высокой температурой ее размягчения. В связи с этим они характеризуются большей огнеупорностью, температурой службы под нагрузкой, химической устойчивостью, термостойкостью, малой пористостью и усадкой в процессе службы (табл. 4). Их используют для кладки различных участков печи и регенераторов.

В табл. 5 представлены характеристики муллитокремнеземистых (МКРС), муллитовых (МЛС), муллитокорундовых (МКС) и корундовых (КС) огнеупоров, выпускаемых в соответствии с ГОСТ 24704 и предназначенных для кладки стекловаренных печей.

Муллитовые огнеупоры являлись первыми плавленными изделиями, используемыми в стекольной промышленности. Однако в настоящее время плавнелитые муллитовые изделия практически не выпускаются. Это связано с тем, что при воздействии щелочных компонентов в виде паров, пыли или расплава происходит разложение муллита на корунд и стеклофазу. Этот процесс сопровождается уменьшением объема изделий, что создает значительные напряжения. Поэтому дальнейшее развитие производства плавнелитых огнеупоров пошло в направлении создания материалов, не содержащих муллит.

Составы и свойства высокоглиноземистых огнеупоров

Показатели	Марка огнеупора				
	МКРС-45	МЛС-62	МЛС-72	МКС-90	КС-95
Массовая доля, %:					
Al ₂ O ₃ , не менее	45	62	72	90	95
Fe ₂ O ₃ , не более	1,8	1,5	1,5	0,8	0,6
Температура службы, °С	1400	1450	1500	1660	1680
Кажущаяся плотность, г/см ³	2,25	2,30	2,40	2,85	3,10
Пористость открытая, %	24	24	24	24	24
Предел прочности при сжатии, МПа	20	25	30	50	40
Доп. линейная усадка, %	–	0,4	1,0	–	–

1.6. Глиноземистые огнеупоры

К глиноземистым огнеупорам относят в первую очередь корундовые изделия, которые содержат не менее 95% Al₂O₃. Технология производства керамических корундовых и муллитовых огнеупоров не имеет принципиальных отличий. Свойства корундовых огнеупоров представлены в табл. 4 и 5.

Для некоторых элементов кладки стекловаренных печей достаточно широко, особенно за рубежом, используют специальные огнеупорные материалы, изготавливаемые эффективными методами керамической технологии (изостатическое прессование, шликерное и виброшликерное литье, горячее прессование). При производстве керамических огнеупоров используются связующие (глина). Высококачественные огнеупоры получают спеканием при температурах порядка 1600°С чрезвычайно тонких реакционно-активных порошков без добавления связующего. Формуются изделия методом изостатического прессования.

Подготовка порошка требует больших затрат, поэтому спеченные огнеупоры применяются только в местах, подвергающихся максимальной нагрузке. Такие огнеупоры практически не содержат стеклофазу, что обуславливает их высокую прочность и стеклоустойчивость.

По данной технологии выпускаются корундовые огнеупоры с 94–99,5% Al₂O₃ плотностью 3,3–3,8 г/см³ и открытой пористостью

0,5–11%. Чистый глинозем спекается очень трудно, поэтому в сырьевую массу добавляется небольшое количество SiO_2 и щелочноземельных оксидов. Вследствие этого при спекании получают стеклофазу, которая уменьшает прочность под нагрузкой таких огнеупоров.

Глиноземистые плавнелитые огнеупоры содержат более 92% Al_2O_3 . Сырьем для производства огнеупоров служат бокситы и технический глинозем. Плавку шихты ведут при температуре 1960–2100°C. Основные технологические стадии изготовления плавненных огнеупоров приведены выше.

ОАО «Подольскогнеупор» (Россия) изготавливает электроплавненные корундовые изделия КЭЛ-93, КЭЛ-95 (Кор-95), применяемые для футеровки выработочных каналов питателей. Аналогичны по химическому составу огнеупоры следующих марок и производителей: Jargal (фирма SEPR, Франция); Monofrax (фирма «Carborundum», США); Korvisit (фирма «Motim», Венгрия).

В зависимости от вида и количества вводимых в шихту добавок получают глиноземистые огнеупоры различного типа (табл. 6).

Таблица 6

Характеристика корундовых плавнелитых огнеупоров

Тип и марка	Химический состав, %	Фазовый состав, об. %	Плотность, г/см ³	Пористость, %
α-Глиноземистые: Кор-95 Monofrax А Korvisit	Al_2O_3 92,2–98,5 SiO_2 0,25–2,0 Примеси 0,7–0,9	α-Глинозем 92–94 β-Глинозем 2–4 Стеклофаза 4–6	3,76–3,84	2,0–6,0
α-β-Глиноземистые: Monofrax М Jargal М	Al_2O_3 94,5–95,0 SiO_2 0,4–0,5 R_2O 4,0–4,5 Примеси 0,4–0,5	α-Глинозем 44–45 β-Глинозем 53–54 Стеклофаза 1,5–2	3,40–3,54	1,5–2,0
β-Глиноземистые: Monofrax Н Jargal Н	Al_2O_3 92,0–93,3 R_2O 5,9–7,0 Примеси 0,8–1,0	β-Глинозем 98–99 α-Глинозем 1–2	3,12–3,26	2,5–4,0

При использовании в качестве исходного сырья технического глинозема и кварцевого песка получают α-глиноземистые огнеупоры, основной кристаллической фазой которых является корунд α- Al_2O_3 . Они обладают высокой прочностью, но низкой термостойкостью. Из расплавов, содержащих 5–7% R_2O (Na_2O), получают

β -глиноземистые огнеупоры, которые характеризуются повышенными пористостью и термостойкостью. α - β -Глиноземистые огнеупоры получают при содержании Na_2O 3,6–4,0%. Они отличаются малой термостойкостью, но низкой пористостью.

Глиноземистые огнеупоры содержат незначительную долю стеклофазы, например в огнеупоре Monofrax она практически отсутствует. Это обуславливает минимальную склонность к образованию пузырей при контакте со стекломассой и высокую коррозионную стойкость огнеупоров в расплавах малощелочных стекол.

Глиноземистые огнеупоры имеют высокую температуру применения, составляющую 1750–1850°C. При контакте с расплавом они мало размягчаются, однако в присутствии Na_2O в составе стеклорасплава α - Al_2O_3 (корунд) может перейти в β - Al_2O_3 , который представляет собой в данном случае алюминат натрия. Это приводит к увеличению объема и, как следствие, образованию трещин. С другой стороны, β -глиноземистые огнеупоры, содержащие щелочные компоненты, при контакте с SiO_2 из расплава вследствие выделения Na_2O превращаются в корунд. В результате происходит сильная усадка, что также вызывает разрушение огнеупора.

Корундовые электроплавленные огнеупоры характеризуются низким содержанием стеклофазы.

1.7. Цирконистые огнеупоры

Плавнелитые бадделеитокорундовые огнеупоры (бакоры) являются наиболее распространенным материалом для кладки бассейнов стекловаренных печей и особо ответственных участков верхнего строения печи. Существенным отличием бадделеитокорундовых огнеупоров является их высокая стеклоустойчивость, огнеупорность, прочность.

Первый патент на плавнелитые огнеупоры получен в начале 20-го века, а производство плавленых огнеупоров освоено в 30-х годах. Первые плавленые огнеупоры – муллитовые и бакор-20. Использование плавнелитых огнеупоров для кладки бассейнов стекловаренных печей взамен шамотных позволило повысить температуру варки от 1300 до 1500–1600°C и, соответственно, существенно повысить производительность печей.

Бадделеитокорундовые огнеупоры относятся к системе Al_2O_3 – ZrO_2 – SiO_2 . Область наиболее распространенных составов бакорных

огнеупоров, содержащих от 30 до 42% ZrO_2 , определяется положением тройной эвтектики с температурой плавления 1765°C.

Сырьевыми материалами для производства бакоров являются цирконовый концентрат, технический глинозем, бокситы, алиты. Технология изготовления плавнелитых огнеупоров изложена в разделе 1.3 и включает плавку шихты в дуговой электропечи, слив расплава в формы, отжиг и механическую обработку изделий.

Фазовый состав бакора включает кристаллы корунда и бадделеита ZrO_2 , полученных в результате совместной кристаллизации. При затвердевании расплава наблюдается следующая последовательность выделения кристаллических фаз: бадделеит → эвтектическая смесь корунда с бадделеитом → корунд. С увеличением содержания ZrO_2 выделяются отдельные кристаллы бадделеита.

Основными поставщиками электроплавляемых огнеупоров являются ОАО «Подольскоогнеупор», ОАО «Щербинский завод электроплавляемых огнеупоров» (Россия). Огнеупорные плавнелитые бадделеитокорундовые изделия для стекловаренных печей выпускаются по ГОСТ 23053 под маркой Бакор: БК-33, БК-37 и БК-41 с содержанием основного компонента (диоксида циркония) 33, 37 и 41% соответственно. Кроме плавнелитых огнеупоров предприятие выпускает формованные огнеупоры на основе электроплавляемых порошков следующих марок: БКТ – бадделеитокорундовые термостойкие и БКВ – бадделеитокорундовые виброформованные.

С повышением содержания ZrO_2 увеличивается коррозионная устойчивость бакоровых огнеупоров. Так, увеличение количества ZrO_2 от 33 до 41% повышает коррозионную стойкость при температуре варки в 1,3–1,5 раза. Характеристики огнеупоров марки Бакор приведены в табл. П1.1.

Одним из недостатков бакоров является их химическая и минералогическая неоднородность. Концентрация ZrO_2 , соотношение кристаллической и стеклофазы изменяются по объему бруса. Максимальное содержание стеклофазы (до 20–25%) – в глубине бруса, так как кристаллизация идет с поверхности. Наиболее тугоплавкий ZrO_2 кристаллизуется быстрее и скапливается в нижней зоне бруса. При этом формируется мелкокристаллическая зона с повышенной плотностью. Внутренние участки отливок с расплавом, обогащенным плавнями и примесями, затвердевают с формированием крупнокристаллической зоны с пустотами (раковинами). Усадочные раковины в отливках располагаются вблизи участка поступления расплава и могут занимать 20–40% объема. Условия охлаждения отливки определяют характер ее

кристаллизации, состав стекловидной фазы, структуру материала, а следовательно, и его свойства.

На рис. 2 схематично представлена макроструктура бакоров при различных вариантах заливки огнеупорных блоков.

При обычном наполнении (NC) усадочные раковины образуются на $1/3$ – $1/2$ толщины изделия. Путем особого расположения литникового отверстия и формы при заливке получают брус с ориентированной (OC) усадочной раковиной. Если заливается брус namного большего объема с последующей обрезкой литниковой и пористой частей на станке с алмазным инструментом, получают блоки с небольшой усадочной раковиной в торце (RC) либо без усадочной раковины (FC) – цельнонаполненные (высокоплотные).

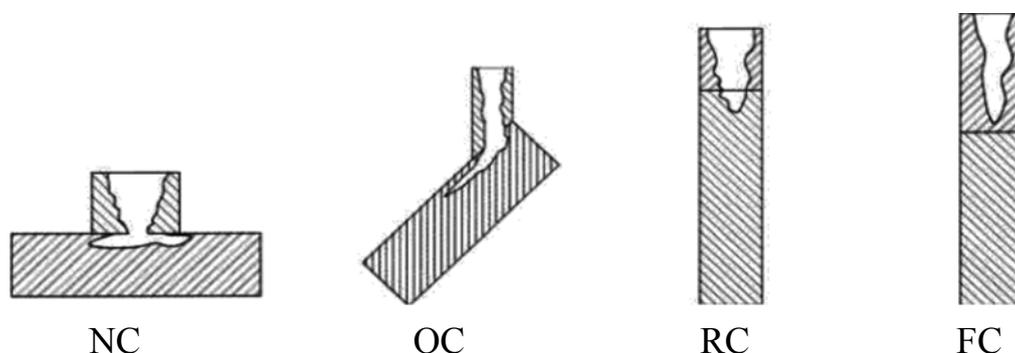


Рис. 2. Макроструктура бакоров при различных вариантах заливки:

NC – нормальная усадочная раковина; OC – ориентированная раковина;
RC – редуцированная раковина; FC – без усадочной раковины

Аналогичны по химическому составу огнеупорам марки Бакор плавленолистые огнеупоры следующих марок и производителей: ER-1681, ER-1685, ER-1711 (фирма SEPR, Франция); Monofrax (фирма «Carborundum», США); Refel (фирма «Refel», Италия); Zirkosit (фирма «Motim», Венгрия). В табл. 7 приведены характеристики бадделеитокорундовых огнеупоров различных марок.

Температура применения электроплавленных бадделеитокорундовых огнеупоров составляет 1600 – 1750°C . Показатели ТКЛР составляют $(6$ – $7,5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. При использовании бакора в стекловаренных печах необходимо учитывать объемные изменения в интервале температур 1000 – 1300°C , связанные с модификационными превращениями моноклинного ZrO_2 в тетрагональный.

Бадделеитокорундовые огнеупоры характеризуются отсутствием проницаемой канальной пористости, что исключает возможность про-

питки их расплавом. Это во многом предопределяет их высокую коррозионную стойкость в контакте со стекольными расплавами.

Таблица 7

Характеристика бадделеитокорундовых плавнелитых огнеупоров

Тип и марка	Химический состав, %	Фазовый состав, об. %	Кажущаяся плотность, г/см ³	Пористость, %
Тип А: БК-33 ER-1681 Monofrax S-3 Refel Zirkosit-S	ZrO ₂ 32,5–33,8 Al ₂ O ₃ 49,7–51,5 SiO ₂ 13,3–15,3 R ₂ O 1,0–1,4 Примеси 0,25–0,4	Бадделеит 32–33 Корунд 47–49 Стеклофаза 18–21	3,70–3,85	1,0–1,5
Тип В: БК-37 ER-1685 Monofrax S-4 Refel 1334 Zirkosit-M	ZrO ₂ 36,0–37,2 Al ₂ O ₃ 47,8–48,7 SiO ₂ 13,0–14,0 R ₂ O 1,05–1,4 Примеси 0,25–0,4	Бадделеит 36–37 Корунд 43–46 Стеклофаза 17–21	3,78–3,98	1,0–1,5
Тип С: БК-41 ER-1711 Monofrax S-5 Refel 1240 Zirkosit-Y	ZrO ₂ 39,5–41,3 Al ₂ O ₃ 44,4–46,7 SiO ₂ 12,0–12,9 R ₂ O 0,9–1,2 Примеси 0,25–0,4	Бадделеит 40–41 Корунд 42–44 Стеклофаза 16–18	3,94–4,10	1,0–1,5
Циркониевые: ER-1195 Monofrax Z	ZrO ₂ 94,0–94,2 Al ₂ O ₃ 0,6–1,2 SiO ₂ 3,6–4,0 R ₂ O 0,3–0,5	Бадделеит 94–96 Стеклофаза 4–6	5,29–5,42	0,7–1,0

Несмотря на однотипность химических составов бадделеитокорундовых изделий, поставляемых различными производителями, они могут существенно различаться по эксплуатационным показателям (табл. 8).

При сравнительных испытаниях на коррозионную стойкость статическим методом огнеупоров типа А лучшим оказался огнеупор БК-33. Это связано с более высоким содержанием наиболее химически стойкого компонента – ZrO₂. При этом наблюдается преимущественное

растворение корунда. Однако экспериментальный показатель коррозионной стойкости огнеупора не позволяет в полной мере оценить его поведение в промышленной стекловаренной печи. Стеклоустойчивость бакоровых огнеупоров, используемых для кладки бассейна стекловаренной печи, существенно зависит от текстуры, т. е. однородности или неоднородности качественных показателей огнеупора по всей толщине бруса.

Таблица 8

**Сравнительные показатели эксплуатационных свойств
бадделеитокорундовых огнеупоров**

Показатели	Огнеупоры типа А			Огнеупоры типа С		
	БК-33	ER-1681	Zirkosit-S	БК-41	ER-1711	Zirkosit-Y
Химический состав, %:						
ZrO ₂	34,69	32,39	33,13	40,46	40,81	41,49
Al ₂ O ₃	49,48	51,05	52,07	44,83	45,79	45,21
SiO ₂	14,13	15,26	13,52	13,06	12,21	12,14
Na ₂ O	1,41	1,12	1,09	1,32	1,05	1,01
Fe ₂ O ₃ + TiO ₂	0,20	0,12	0,14	0,25	0,14	0,15
Фазовый состав, об. %:						
кристаллы взаимного прораствания бадделеита и корунда	58	69	67	32	37	36
свободный бадделеит	12	6	7	28	34	36
свободный корунд	7	5	4	18	10	10
стекловидная фаза	23	20	22	22	19	18
Открытая пористость, %	3,03	1,43	0,54	1,02	0,06	0,06
Сравнительная коррозионная стойкость, %	100	91	86	100	106	108
Температура выплавления стеклофазы, °С	1340–1350	1500	1490–1500	1335	>1500	>1500

Однородная текстура по всему объему огнеупоров Zirkosit и ER обеспечивает их высокую эксплуатационную стойкость. При этом окислительные условия плавки при производстве этих огнеупоров, рациональный химический состав стеклофазы за счет оптимального количества SiO₂ и Na₂O и, соответственно, ее повышенные химическая стойкость и температура размягчения практически исключают образование в стекле пороков («мошки», пузырей, свиля).

При испытаниях в действующей стекловаренной печи огнеупоры марки Бакор существенно уступают огнеупорам Zirkosit и ER. Большинство выпускаемых бакоровых брусьев – изделия обычного наполнения, с глубокой усадочной раковинной и резкой дифференциацией текстуры по объему. Для них характерна очень небольшая мелкокристаллическая зона достаточно высокой плотности, обогащенная ZrO_2 и занимающая от 1/3 до 1/2 объема бруса. Остальная часть бруса пористая, крупнокристаллическая, с пониженным содержанием ZrO_2 и по этим причинам нестойкая к коррозионному воздействию расплава стекла. В процессе службы после разъедания плотной мелкокристаллической зоны скорость коррозии бруса возрастает, что значительно снижает эксплуатационную стойкость огнеупорной кладки в целом. К тому же получение бакоровых огнеупоров плавкой в восстановительных условиях резко ухудшает физико-химические свойства стеклофазы.

Плавнелитые хромалюмоцирконовые огнеупоры имеют следующий химический состав, %: 27,0–45,0 Cr_2O_3 ; 26,0–32,0 ZrO_2 ; 5,0–30,0 Al_2O_3 ; 12,5–15,5 SiO_2 ; 1,0–1,5 R_2O ; 1,0–2,6 примеси.

Фазовый состав (об. %) плавнелитого хромсодержащего огнеупора включает твердый раствор $(Cr, Al)_2O_3$ (51–57), бадделеит (23–27) и стеклофазу (20–23).

Хромалюмоцирконовые огнеупоры марок ХАЦ-30 и ХАЦ-45 содержат соответственно 30 и 45% Cr_2O_3 . Аналогичный по составу огнеупор ER-2161 фирмы SEPR (Франция) содержит 28% Cr_2O_3 и 28% ZrO_2 . В сравнении с электроплавленными огнеупорами, не содержащими Cr_2O_3 , хромалюмоцирконовые огнеупоры отличаются значительно более высокой коррозионной стойкостью, в том числе в расплавах агрессивных стекол. По данным фирмы SEPR, сравнительная коррозионная стойкость хромалюмоцирконового огнеупора ER-2161 в 2,3–3 раза (в зависимости от состава стекла) превышает коррозионную стойкость бадделеитокорундового огнеупора ER-1711, содержащего 41% ZrO_2 . Использование хромсодержащих огнеупоров для кладки участков печи, наиболее подверженных коррозии, а также бадделеитокорундовых огнеупоров с повышенным содержанием ZrO_2 позволяет продлить кампанию печи до 8 и более лет.

При варке малощелочных и бесщелочных стекол, главным образом в производстве стекловолокна, достаточно широко используют плавнелитые хромкорундовые (Monofrax К-3) и высокохромистые (Monofrax Е и Monofrax В) огнеупоры, превосходящие по коррозионной стойкости традиционные бадделеитокорундовые в 5–7 раз.

Керамические цирконистые огнеупоры получают спеканием при температурах порядка 1600°C тонких реакционно-активных порошков. Изделия формируются методом изостатического прессования. Огнеупоры практически не содержат стеклофазу, что обуславливает их высокую прочность и стеклостойчивость.

Фирмами VGT-DYKO, «Didier-Werke AG» (Германия), SEPR (Франция), «Corning Refractories» (США) выпускаются следующие виды цирконистых огнеупоров:

цирконовые с 65–68% ZrO_2 (остальное SiO_2) плотностью 3,65–4,25 г/см³ и открытой пористостью 0,5–5%;

циркономуллитовые и цирконокорундовые с 10–35% ZrO_2 и 45–70% Al_2O_3 плотностью 3,0–3,5 г/см³ и открытой пористостью 1,0–10%;

хромкорундоциркониевые и хромкорундовые с 10–80% Cr_2O_3 , 15–85% Al_2O_3 и 7–20% ZrO_2 .

1.8. Магнезиальные огнеупоры

Из группы магнезиальных огнеупоров в стекловаренных печах используются периклазовые, периклазохромитовые, хромитопериклазовые и форстеритовые изделия.

Для производства магнезиальных огнеупоров используется обожженный природный магнезит $MgCO_3$, в частности в России кристаллический магнезит Саткинского месторождения (Челябинская обл.). В странах, не имеющих крупных месторождений магнезита (Англия, США, Япония), оксид магния получают из морской воды.

Магнезиальные изделия – огнеупоры основного характера, поэтому обладают высокой устойчивостью к щелочным компонентам, улетучивающимся при варке стекла. Это определяет их применение для изготовления насадок регенераторов.

Периклазовые огнеупоры содержат не менее 85% MgO . Их огнеупорной основой служит периклаз. Основные примеси – CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 .

При производстве периклазовых огнеупоров по керамической технологии формирование изделий из измельченного предварительно обожженного магнезита ведут методом полусухого прессования с обжигом при температуре 1600–1750°C.

Периклазовые огнеупоры характеризуются большой разницей между огнеупорностью (2300°C) и температурой деформации под нагрузкой (1550°C), а также небольшим интервалом деформации (рис. 1). Кристаллы периклаза не образуют кристаллического сростка, они

сцементированы неогнеупорными монтичеллитовой и стекловидной связками. Плавление связки происходит при температуре 1450–1550°C, при этом с повышением температуры вязкость расплава существенно снижается.

Огнеупоры имеют высокий коэффициент термического расширения ($(13–15) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и относительно невысокую теплопроводность, поэтому при резких перепадах температур на изделиях появляются трещины. Периклазовые изделия чувствительны к парам воды: при взаимодействии с ними MgO гидратируется с образованием Mg(OH)₂.

По ГОСТ 4689 выпускаются периклазовые изделия марок П-91, П-90, П-89, содержащие соответственно 91, 90 и 89% MgO; CaO и SiO₂ не более 4%. Периклазовые изделия характеризуются следующими средними показателями:

огнеупорность, °С	2300
температура применения, °С, не менее	1500
дополнительная усадка, %	+0,2; –0,3
предел прочности при сжатии, МПа, не менее	40
кажушаяся пористость, %	22–26
термостойкость, водяных теплосмен	1–2
термостойкость, воздушных теплосмен	4–9

Для производства изделий ответственного назначения применяют плавленный периклаз, который получают путем плавки в дуговых электропечах спеченного периклазового порошка. Химический состав плавленного периклаза: 93–96% MgO; не более 0,5% оксидов железа; не более 1% SiO₂. Свойства изделий из плавленного периклаза: температура деформации под нагрузкой – 1680–1750°C; кажущаяся плотность 3,5 г/см³; предел прочности при сжатии – 150 МПа; термостойкость – 20 теплосмен; высокая коррозионная стойкость. ОАО «Комбинат “Магнезит”» (Россия) выпускает огнеупоры марок ППЛ (ППЛУ-95, ППЛС-97) – изделия периклазовые из плавленного периклаза (уплотненные или среднеплотные).

Магнезиально-шпинелидные огнеупоры в зависимости от содержания оксида магния делятся на две группы: хромитопериклазовые с относительно низким содержанием MgO (40–50%) и высоким Cr₂O₃ (15–35%); периклазохромитовые, содержащие не менее 60% MgO при низком содержании Cr₂O₃ (5–18%). Такое разделение достаточно условно и иногда все изделия этого типа называются хромитопериклазовыми.

Хромсодержащие огнеупоры получают при использовании магнетита и хромита – горной породы, содержащей около 80% минерала состава (Mg,Fe)O · (Cr,Al)₂O₃. Технология производства изделий аналогична технологии периклазовых огнеупоров.

Хромитопериклазовые изделия характеризуются высокой огнеупорностью (не менее 1900°С) и термостойкостью, составляющей 2–9 теплосмен. Однако температура начала размягчения под нагрузкой составляет 1450–1550°С, что ограничивает область их применения.

Хромсодержащие огнеупоры достаточно разнообразны по составу и показателям, что дает возможность широкого выбора материалов. В стекловаренных печах рекомендуется применять изделия, содержащие не более 3% Fe₂O₃, с хорошими показателями термостойкости. Эффективным методом повышения качества периклазохромитовых огнеупоров является использование в производстве плавящихся периклазохромитовых и периклазовых порошков. Изготовление изделий из таких порошков производится по керамической технологии.

В табл. 9 представлены характеристики магниезиальных огнеупоров, выпускаемых ОАО «Комбинат “Магнезит”». При этом огнеупоры марок П (периклазовый), ПХС (периклазохромитовый) и ХП (хромитопериклазовый) изготавливаются по керамической технологии. Огнеупоры марок ПХПУ, ПХПП, ПХПС – периклазохромитовые на основе плавящего периклазохромита соответственно уплотненные, плотные и среднеплотные.

Таблица 9

**Формованные огнеупоры
для регенераторов стекловаренных печей**

Характеристики	П	ПХС	ХП	ПХПП	ПХПУ
Массовая доля, %:					
MgO	91	65	46	95	70
Cr ₂ O ₃	–	7–15	22	–	8–18
CaO	3	–	–	2	2,5
SiO ₂	3	–	6	1,5	2,5
Fe ₂ O ₃	2,5	–	–	–	–
Открытая пористость, %	22	20	20	17	18
Предел прочности при сжатии, МПа	60	32,5	30	50	20
Температура начала размягчения, °С	1550	1540	1550	1600	1620
Термостойкость, теплосмен	–	5	2	–	3
Теплопроводность, Вт/(м·К), при температуре, °С:					
400	7,6	3,9	3,6	7	6,8
800	4,5	3,1	3	4,4	5,1
	3,1	2,7	2,5	3,5	3,8

Форстеритовые огнеупоры – материалы, в которых основным компонентом является форстерит Mg_2SiO_4 (до 85%). Прочие минералы (периклаз, магнезиоферрит) содержатся в небольшом количестве. Форстеритовые огнеупоры относятся к нейтральным огнеупорным материалам.

Сырьем для производства форстеритовых огнеупоров служат магнезиально-силикатные породы – оливины, серпентиниты, дуниты. Химический состав огнеупорных материалов, %: MgO – 50–65; SiO_2 – 20–45; Fe_2O_3 – 4–10; CaO – 1–2; Al_2O_3 – 1–8.

Минерал форстерит имеет большую анизотропию температурного коэффициента линейного расширения по осям, что обуславливает низкую термостойкость форстеритовых огнеупоров. Эти огнеупоры обладают пределом прочности при сжатии 25–30 МПа, пористостью 22–28%, температурой начала деформации под нагрузкой 1610°C, термостойкостью – 7 воздушных теплосмен.

1.9. Огнеупоры специального назначения

Хромоксидные огнеупоры. Высокая температура плавления эсклаита Cr_2O_3 , его очень высокая коррозионная устойчивость позволяют считать огнеупоры на основе оксида хрома перспективным материалом для стекольной промышленности.

Хромоксидные огнеупоры содержат 92–96% Cr_2O_3 и 4% TiO_2 . Формование производят методом шликерного литья или изостатического прессования сверхтонких порошков. Они характеризуются высокой огнеупорностью (более 2000°C) и температурой службы (более 1750°C). При нагревании до 1650°C хромоксидные огнеупоры дают дополнительную усадку 0,1–0,3%. Кажущаяся плотность огнеупоров составляет 4,0–4,6 г/см³, коэффициент теплопроводности – 2,28 Вт/м·К; ТКЛР – $8,1 \cdot 10^{-6} K^{-1}$.

Стеклоустойчивость хромоксидных огнеупоров в 5–10 раз превышает аналогичную характеристику всех огнеупорных материалов, особенно при варке стекол алюмоборосиликатного состава. Поэтому данные огнеупоры применяют при кладке бассейна печей в производстве стекловолокна. Не рекомендуется использовать хромоксидные огнеупоры в газовом пространстве стекловаренной печи, так как это приводит к большой возгонке оксида хрома, а также растрескиванию блоков. Недостатком таких огнеупоров являются низкая термостойкость (1–3 теплосмены). Огнеупоры на основе оксида хрома электро-

проводны, причем при нагревании до температуры 1200°C удельное электрическое сопротивление снижается почти в 1000 раз.

Особенностью применения данных огнеупоров для кладки бассейна стекловаренной печи является окраска стекломассы в светло-зеленый цвет.

При кладке бассейнов стекловаренных печей, предназначенных для варки стекла для стекловолокна, используются хромоксидные огнеупоры марок ХОСУ и ХОСС. Они имеют следующие характеристики: содержание Cr_2O_3 – не менее 92,0%; пористость открытая – 18–24%; плотность кажущаяся – не менее 3,9–4,1 г/см³; предел прочности при сжатии – 120 МПа.

Огнеупоры на основе оксида олова содержат до 99% SnO_2 . Они обладают более высокой, чем бакоры, стеклоустойчивостью (в 2–5 раз), высокой электропроводностью, поэтому известны в первую очередь как материал электродов при электроварке. В отличие от молибденовых и графитовых электродов не восстанавливают в расплавах стекол оксиды свинца, мышьяка и другие до металлического состояния. Используются также в качестве материала огнеупорных тиглей и печных брусьев при варке специальных стекол (легкоплавких), например свинцовых, бериллиевых. Восстановление SnO_2 до SnO и испарение при температурах выше 1300°C ограничивает использование этого огнеупора.

Формование производят методами шликерного литья, изостатического прессования. Фирмами «Feuerfestwerke Wetro» (Германия), «Glassworks Equipment» (Англия) и SEPR (Франция) выпускаются оксидно-оловянные огнеупоры, которые используются в основном в качестве пластинчатых и цилиндрических электродов.

Свойства огнеупоров на основе оксида олова:

кажущаяся плотность, г/см ³	5,9–6,1
пористость открытая, %	8–13
предел прочности при сжатии, МПа	100–150
теплопроводность, Вт/м·К, при 1400°C	5,2
термостойкость, водяных теплосмен (950–20°C)	5–20

Композиционные материалы. Разрабатываются композиционные огнеупорные материалы, которые представляют собой комбинации матричных материалов (глинозем, муллит) с нитевидными кристаллическими материалами (муллит, карбид кремния, циркон, каолиновое волокно). Большое значение при этом имеет оптимальный подбор матрицы и наполнителя, которые должны иметь близкие показатели теплового расширения. По сравнению с традиционными огнеупорами композиционные материалы характеризуются намного более

высокой механической прочностью, улучшенными показателями термостойкости, теплопроводности и устойчивости к механическим и химическим воздействиям. Практически все промышленно развитые страны применяют в настоящее время волокнистые огнеупоры, а также нитевидные кристаллы и композиты. Использование волокнистых и композиционных огнеупоров позволяет существенно снизить массу кладки, уменьшить количество теплоты, аккумулированной печными ограждениями, обеспечить повышение производительности печей на 20–40% при сокращении расхода топлива на 30–50%.

Разработаны композиционные материалы на основе глинозема, шамота, огнеупорных бетонов. Следует ожидать дальнейших разработок в области композиционных материалов. Однако при этом необходимо учитывать не только возможности улучшения эксплуатационных характеристик, но и экономические показатели – стоимость исходных компонентов и технологические затраты.

1.10. Теплоизоляционные материалы

При широком использовании в кладке печей плавленолитых огнеупоров с высокой теплопроводностью увеличиваются потери тепла в окружающую среду. Использование надежной тепловой изоляции обеспечивает экономию топлива, способствует повышению коррозионной устойчивости огнеупоров.

К материалам для тепловой изоляции печи предъявляются следующие требования:

- низкое значение коэффициента теплопроводности;
- способность противостоять высоким температурам, до которых прогревается внутренний огнеупорный слой;
- достаточная строительная прочность, чтобы избежать разрушения под действием веса теплоизоляционного слоя;
- небольшая удельная теплоемкость, чтобы потери теплоты на аккумуляцию кладкой были минимальными;
- по возможности невысокая стоимость этих материалов.

Теплоизоляционные материалы характеризуются теми же физическими свойствами, что и огнеупорные. Главной рабочей характеристикой теплоизоляционных материалов служит предельная температура их применения. Если действительная температура службы превышает предельно допустимую величину, то теплоизоляция может оказаться химически или механически неустойчивой и выйдет из строя.

По температуре применения теплоизоляционные материалы делят на три группы: низкотемпературные (до 900°C), среднетемпературные (900–1200°C) и высокотемпературные (свыше 1200°C). Поэтому не все материалы, входящие в группу теплоизоляционных, являются огнеупорными.

В качестве естественных теплоизоляционных материалов используются диатомит, трепел, вермикулит и асбест. Диатомит и трепел используют для засыпок в порошкообразном виде. Кроме того, из них изготавливают кирпич на глинистой связке. Диатомитовые кирпичи обладают очень малой прочностью и применяются для выполнения слоя наружной тепловой изоляции стен и сводов печей. Их пористость составляет от 55 до 75%, а предельная температура применения достигает 1000°C.

Вермикулит является разновидностью слюды, обладающей способностью при нагревании до 800–900°C вспучиваться и увеличивать свой объем в 15–20 раз. Необожженный вермикулит используют для засыпок и изготовления плит. Средний коэффициент теплопроводности этих материалов равен 0,1 Вт/м·К. Вермикулитовые плиты имеют низкую плотность (до 0,25 г/см³) и, соответственно, малый вес, однако предельная температура их применения не превышает 600°C. В обожженном виде вермикулит используют для засыпок и изготовления различных изделий. В этом случае он применяется при рабочей температуре до 1100°C.

Асбест, или горный лен, представляет собой волокнистый материал, соответствующий формуле $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. При нагреве до температуры выше 500°C он теряет связанную влагу и в результате разрушается, рассыпаясь в порошок. Поэтому асбест можно использовать до температуры 450°C. Из него изготавливают шнуры, ткани, картон. Асбестовые изделия при пористости 65–75% имеют коэффициент теплопроводности порядка 0,17 Вт/м·К.

Легковесные огнеупорные изделия на основе шамота, динаса, высокоглиноземистых материалов и карборунда широко используются в практике стеклоделия. Легковесные изделия изготавливают тремя способами: выгорающих добавок, пенообразования и химическим. Выбор метода зависит от величины требуемой пористости и структуры огнеупора.

При способе выгорающих добавок в керамическую массу добавляются твердые горючие материалы – древесные опилки, каменный уголь, кокс, лигнин и др. В процессе обжига добавки сгорают, и в изделии образуется большое количество крупных пор произвольной формы.

Пеновым способом можно получать изделия с пористостью до 80–85%. Сущность пенового способа заключается в смешении суспен-

зии тонкомолотого огнеупорного материала с пеной, которая должна быть стойкой и прочной. Пенообразователями являются поверхностно-активные вещества, например канифольное мыло; в качестве крепителя пены используют клей. Пеномассу с влажностью 40–45% заливают в формы. После сушки и обжига получают изделия с большим количеством мелких равномерно распределенных пор. Пеноизделия в отличие от изделий, получаемых методом выгорающих добавок, характеризуются более высокой пористостью и соответственно лучшими теплоизоляционными свойствами. Однако механическая прочность таких материалов ниже.

Химическим способом поры получают при выделении газообразных продуктов в результате взаимодействия доломита и гипса с серной кислотой. При этом образуется большое количество равномерно расположенных пор.

Механическая прочность легковесного огнеупора значительно меньше, чем плотного. Минимально допустимым является предел прочности 0,5 МПа. Температура применения изменяется от 1150 до 1550°C. Теплопроводность при 600°C изменяется от 0,25 до 0,7 Вт/м·К, закономерно снижаясь с уменьшением кажущейся плотности материалов.

Выпускаемые промышленностью по ГОСТ 5040 легковесные материалы по температуре применения, химико-минералогическому составу и плотности классифицируются на типы, представленные в табл. 10. Свойства легковесных огнеупорных материалов приведены в табл. П1.2.

Таблица 10

**Классификация легковесных
теплоизоляционных огнеупорных материалов**

Тип изделия	Марка	Характеристика	Температура применения, °С
Динасовые	ДЛ-1,2 ДЛ-1–1,2	Динасовые легковесные изделия кажущейся плотностью не более 1,2 г/см ³	1550
Шамотные	ШЛА-1,3	Шамотные легковесные изделия кажущейся плотностью не более 1,3 г/см ³	1400
	ШЛ-1,0	Шамотные легковесные изделия кажущейся плотностью не более 1,0 г/см ³	1300
	ШЛ-0,6	Шамотные легковесные изделия кажущейся плотностью не более 0,6 г/см ³	1150
	ШЛ-0,4	Шамотные легковесные изделия ка-	1150

		жущейся плотностью не более 0,4 г/см ³	
Муллитокремнеземистые	МКЛР-0,8	Муллитокремнеземистые легковесные изделия кажущейся плотностью не более 0,8 г/см ³	1250

Окончание табл. 10

Тип изделия	Марка	Характеристика	Температура применения, °С
Муллитовые	МЛЛ-1,3	Муллитовые легковесные изделия кажущейся плотностью не более 1,3 г/см ³	1550
Корундовые	КЛ-1,3	Корундовые легковесные изделия кажущейся плотностью не более 1,3 г/см ³	1550
	КЛ-1,1	Корундовые легковесные изделия кажущейся плотностью не более 1,1 г/см ³	1550

Волокнистые огнеупорные материалы находят все большее применение для тепловой изоляции стекловаренных печей. Их достоинством является легкость, низкий коэффициент теплопроводности, высокая термостойкость, хорошая химическая стойкость.

Наибольшее распространение получили алюмосиликатные стекловолоконные материалы каолинового состава (50% Al₂O₃, 50% SiO₂). Их применяют в виде каолиновой ваты и изделий на ее основе.

Каолиновая вата относится к огнеупорным материалам муллитокремнеземистой группы. Она производится из натуральных огнеупорных глин и каолинов или синтетических смесей каолинового и высокоглиноземистого составов. Из каолиновой ваты в настоящее время получают более 50 видов различных изделий: рулонный материал, плотный войлок, плиты, маты, бумагу, картон и т. д.

Каолиновые волокна представляют собой высокотемпературное стекло. При температурах свыше 1150°С стеклофаза волокон кристаллизуется, при этом теряется прочность, упругость волокон, они становятся хрупкими и менее термостойкими.

Муллитокремнеземистые изделия: войлок, рулонный материал, плиты – выпускаются по ГОСТ 23619. В зависимости от группы, температуры применения и плотности огнеупорные теплоизоляционные стекловолоконные материалы и изделия делятся на марки, представленные в табл. 11. Температура применения муллитокремнеземистых изделий изменяется от 1150–1300°С в зависимости от вида изделия

и марки. Теплопроводность изделий при температуре 600°С находится в пределах 0,23–0,16 Вт/м·К.

К искусственным теплоизоляционным материалам относится шлаковая вата, изготовленная из различных минеральных расплавов, чаще всего из шлаков рудоплавильных металлургических печей. Струю шлака раздувают паром, в результате чего образуются тончайшие нити, из которых и получают шлаковую вату. Шлаковая вата обладает хорошими теплоизоляционными свойствами и огнеупорностью. Ее применяют до температуры 600°С.

Температура применения муллитокремнеземистых материалов не превышает 1300°С. Создание волокнистых теплоизоляционных материалов с температурой службы 1600°С и выше возможно при использовании поликристаллических тугоплавких оксидов. Глиноземистые поликристаллические волокна состоят из кристаллов Al_2O_3 , распределенных в аморфной матрице. Известны также поликристаллические волокна из ZrO_2 , которые получают вытягиванием через фильеры, газодутьевым, центробежнодутьевым и другими способами. Особенностью получения поликристаллических волокон является последующий быстрый обжиг.

Таблица 11

Огнеупорные стекловолокнистые материалы и изделия

Марка	Температура применения, °С	Кажущаяся плотность, кг/м ³	Теплопроводность при 600°С, Вт/м·К	Характеристика
МКРВ	1150	–	–	Муллитокремнеземистая вата
МКРР-130	1150	130	0,15	Муллитокремнеземистый рулонный материал
МКРЗХ-150	1300	130	0,15	Муллитокремнеземистый хромсодержащий рулонный материал
МКРВ-200	1150	200	0,13	Муллитокремнеземистый войлок
МКРВХ-250	1300	250	0,13	Муллитокремнеземистый хромсодержащий войлок
МКРП-340	1150	340	0,23	Муллитокремнеземистые плиты на глинистой связке
МКРП-450	1150	450	0,27	Муллитокремнеземистые плиты на неорганической связке

МКРГП-500	1250	500	0,27	Плиты огнеупорные из муллитокремнеземистой ваты на глинистой связке
МКРГПО-650	1350	650	0,28	Плиты муллитокремнеземистые из огнеупорного войлока

Теплоизоляционные изделия, изготовленные из волокон ZrO_2 , имеют низкую теплопроводность – она составляет 0,14, 0,20 и 0,27 Вт/м·К при 500, 1000 и 1500°С соответственно. По данным американских специалистов, футеровка промышленных печей волокнистыми огнеупорами в 5–10 раз уменьшает капитальные вложения на сооружение печей. При этом масса кладки снижается в 9–12 раз, сокращаются трудозатраты при монтаже футеровки в 4–5 раз.

1.11. Неформованные огнеупорные материалы

К неформованным огнеупорным материалам относят огнеупорные порошки, цементы, массы, мертели. Они используются после затворения с водой или другой жидкостью. Огнеупорные массы спекаются и упрочняются в процессе эксплуатации печи.

Огнеупорные мертели представляют собой измельченные смеси огнеупорных отошающих и связующих материалов, которые в смеси с водой дают растворы. Эти растворы используются для заделки швов между формованными огнеупорными изделиями и связывания огнеупорных изделий в кладке. По составу различают динасовые, алюмосиликатные (полукислые, шамотные, высокоглиноземистые), корундовые, хромитопериклазовые и другие мертели. Химический состав мертеля должен соответствовать химическому составу огнеупоров в кладке печи.

Огнеупорные мертели бывают пластифицированные и неластифицированные. Пластифицирующие вещества, например ортофосфорную кислоту, вводят в мертели при их изготовлении или при затворении в растворы. Пластифицированные мертели требуют введения меньшего количества воды, обладают постоянством объема при нагревании, большей плотностью и стеклоустойчивостью.

Огнеупорные алюмосиликатные мертели предназначены для связывания алюмосиликатных огнеупоров в кладке. В зависимости от химического состава и огнеупорности по ГОСТ 6137 выпускаются мертели следующих марок: МШ-31, МШ-36, МШ-38 – шамотные мертели с содержанием Al_2O_3 соответственно не менее 31, 36 и 38%; мертель ММЛ-62 – муллитовый с содержанием Al_2O_3 не менее 62%; ММК-72 – муллитокорундовый мертель с содержанием Al_2O_3 не ме-

нее 72%. ГОСТ регламентирует содержание Al_2O_3 в зависимости от марки мертеля в пределах от 36 до 72%, зерновой состав, массовую долю влаги (5%), долю плавней, в том числе Fe_2O_3 .

Огнеупорные динасовые мертели предназначены для связывания динасовых изделий в огнеупорной кладке. По ГОСТ 5338 выпускаются пластифицированные мертели марок МД-90, МД-94, МД-96. ГОСТ регламентирует содержание SiO_2 в зависимости от марки мертеля в пределах от 90 до 96%, зерновой состав, массовую долю влаги (5%), содержание Al_2O_3 (от 2 до 6%). Максимальная температура применения динасовых мертелей составляет 1500–1650°C и возрастает с ростом содержания SiO_2 .

Корундовый мертель применяют при кладке плотных и легковесных корундовых изделий. Максимальная температура применения корундового мертеля выше 1500°C. Химический состав корундового мертеля МК-95: Al_2O_3 – не менее 95%, Fe_2O_3 – не более 0,15%, P_2O_5 – 2,5–3%.

Для подготовки изоляционного и защитного слоя пода стекловаренной печи выпускаются неформованные огнеупоры: ЦирАСил – бадделеитокорундовый огнеупорный мертель; КБО-1 – крошка бакоровая огнеупорная.

Мертель марки ЦирАСил применяется в качестве раствора толщиной 5–8 мм для выравнивающей выстилки дна бассейна бакоровыми плитками, а также для уплотнения швов и создания монолитного дна. Регламентируется содержание ZrO_2 – не менее 27%, SiO_2 – 20%, сумма плавней – не более 4%, влажность – не более 1,5%. Огнеупорность бадделеитокорундового порошка составляет 1710°C.

Бакоровая крошка марки КБО-1 используется в качестве изоляционного слоя толщиной 35–80 мм между электроплавленной плиткой и донным шамотным брусом ШСУ-33.

Огнеупорные бетоны – конструкционные и ремонтные материалы для монолитной кладки стекловаренных печей. Основой огнеупорных бетонов являются измельченные огнеупорные материалы (кварцевый песок, шамот, корунд, муллит, циркон и др.), содержащиеся в количестве до 80–95%. В состав бетонов входят гидравлические связующие, чаще всего высокоглиноземистый цемент, а также фосфатные связующие, растворимое стекло.

Технология производства и кладка изделий из огнеупорных бетонов такая же, как и у строительных бетонов. Упрочнение бетонов происходит путем гидратационного или химического твердения при нагревании и путем спекания за счет реакций, протекающих в связующем и между связующим и наполнителем. Показатели эксплуатационных свойств бетонов изменяются в процессе службы в стекловаренной печи.

Применение огнеупорных бетонов позволяет использовать новые рациональные методы сооружения промышленных печей – предварительное изготовление отдельных конструктивных элементов с последующим монтажом. Они используются также для тепловой изоляции свода.

Свойства неформованных огнеупорных материалов приведены в табл. П1.4–П1.5.

2. ПРИМЕНЕНИЕ ОГНЕУПОРОВ

2.1. Служба огнеупоров стекловаренной печи

В процессе эксплуатации стекловаренной печи неизбежно происходит разрушение огнеупоров, которое является следствием воздействия различных агрессивных реагентов и факторов.

2.1.1. Служба огнеупоров бассейна печи

Процесс разъедания огнеупора стекломассой (коррозия) состоит в том, что компоненты стеклорасплава химически взаимодействуют с компонентами огнеупора, образуя более легкоплавкие соединения. Одновременно идет процесс растворения компонентов огнеупора. Разрушение огнеупоров в расплаве стекол – сложный процесс, зависящий от многих факторов. Рассмотрим основные, влияющие на срок службы огнеупоров бассейна стекловаренной печи.

Химическая активность стекломассы по отношению к огнеупорам определяется в первую очередь реакционной способностью компонентов стекольного расплава и огнеупора. Например, стекломасса с повышенным содержанием щелочных оксидов особенно сильно разъедает огнеупоры, содержащие кислые компоненты (кремнезем). К такой стекломассе наиболее устойчивы высокоглиноземистые огнеупоры и огнеупоры, содержащие ZrO_2 . При варке борсодержащего стекла соединения бора являются плавнями для высокоглиноземистых соединений. В данном случае устойчивы цирконий- и хромсодержащие огнеупоры.

Отвод продуктов реакций из зоны взаимодействия на поверхности раздела расплав – огнеупор определяет скорость коррозии. В отсутствии конвективных потоков контактный слой насыщается твердыми или высоковязкими продуктами реакций. Это ведет к уменьшению скорости разрушения.

Чем выше химическая (коррозионная) стойкость компонентов огнеупора и чем больше вязкость контактного слоя расплава на границе огнеупор – стекломасса, тем медленнее коррозия. Большое значение в этом процессе имеет конвекция стекломассы, активность которой определяется градиентом температур по длине, ширине и глубине варочного бассейна. Соответственно, наибольшие разрушения происходят в случае активных конвективных потоков, например коррозия дна при бурлении стекломассы, коррозия огнеупоров протоков, в которых стекломасса движется с высокой скоростью.

Интенсивность всех реакций взаимодействия компонентов стекломассы и огнеупоров определяется *температурой стекломассы*. В пламенных и электрических стекловаренных печах распределение температур по глубине стекломассы различается, а профиль коррозии практически зеркально повторяет профиль температур стекломассы (рис. 3). Повышение температуры варки стекла возможно при использовании огнеупоров высокой стеклоустойчивости.

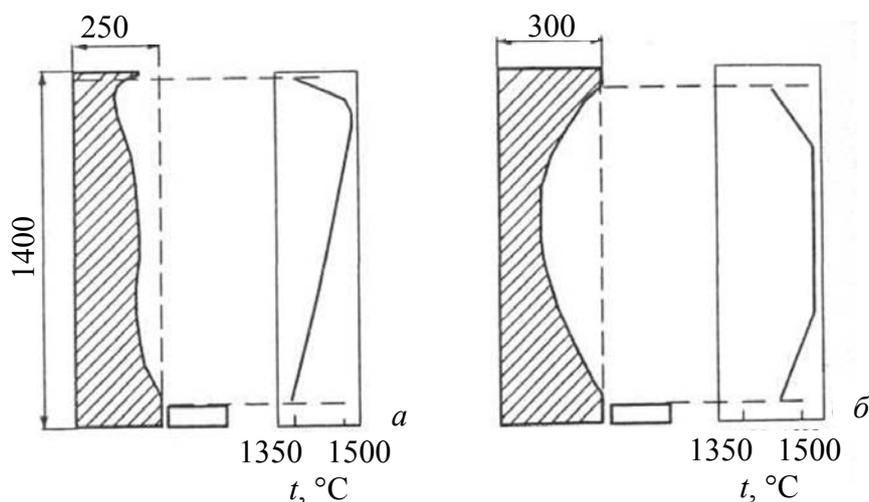


Рис. 3. Профили коррозии стеновых брусьев и распределение температур по глубине варочного бассейна:
а – пламенная печь; *б* – электрическая печь

Важное значение имеет *структура* огнеупора. Большинство огнеупорных материалов состоит из одной или нескольких кристаллических фаз, связанных стеклофазой. При коррозии огнеупора растворяется в первую очередь стеклофаза. Поэтому наиболее устойчивыми являются огнеупоры, практически не содержащие стеклофазу.

Большое значение имеет также *пористость* материала: чем меньше пористость, тем выше стойкость к расплавам. Соответственно, огнеупоры, получаемые по керамической технологии, с пористостью до 30% не могут конкурировать с электроплавленными огнеупорами (пористость 0,5–3%). Скорость коррозии зависит также от размера и формы пор. Стойкость пористого огнеупора, особенно с сообщающимися порами, на порядок ниже, чем плотного.

Скорость коррозионного процесса зависит также от *вязкости расплава* и *смачиваемости* огнеупора расплавом. Для стеклоустойчивости важно, чтобы смачиваемость была минимальной, поэтому поверхностное натяжение расплава должно быть высоким. Это закономерно и в отношении

вязкости – высокая вязкость стеклорасплава или растворенных продуктов коррозии снижают ее скорость. Вязкость снижается с ростом содержания в стекле щелочных компонентов, оксида бора, сульфатов.

Исследованиями механизма коррозии плавнелитых огнеупоров установлено существенное снижение их стойкости по мере уменьшения в составе стекла щелочных компонентов (переход от многощелочных к малощелочным и бесщелочным стеклам). Агрессивны бесщелочные расплавы, содержащие повышенное количество BaO , CaO . Это связано с тем, что коррозионная стойкость огнеупоров определяется степенью воздействия продуктов коррозии на вязкость расплава на границе раздела стекло – огнеупор. Величина градиента вязкости между исходным расплавом и формирующимся граничным слоем является одним из основных факторов, определяющих скорость коррозии огнеупора силикатным расплавом.

Характерный износ огнеупоров бассейна связан с *вертикальной ячеистой коррозией* (вертикальным пузырьковым сверлением). Стеклорасплав насыщен растворенными в нем газами или веществами, способными выделять дополнительное количество газов (оксиды переменной валентности, расплавы сульфатов, карбонатов). При растворении огнеупоров в расплаве нарушается физико-химическое равновесие, что является причиной выделения газообразной фазы с образованием пузырей у поверхности раздела. Вращение пузырей при их движении вверх-вниз усиливает конвекцию расплава и, соответственно, скорость коррозии.

Одной из наиболее характерных особенностей процесса взаимодействия огнеупора с расплавом в газопламенных печах является эффект максимальной коррозии материала на уровне зеркала (поверхности) стекломассы, на границе раздела трех фаз – твердой, жидкой и газообразной. Значительную роль при этом играет более высокая температура стекломассы.

Принципиальная схема коррозии в стене варочного бассейна на границе раздела трех фаз на примере взаимодействия глиноземсодержащего огнеупора с расплавом натрийкальцийсиликатного стекла приведена на рис. 4.

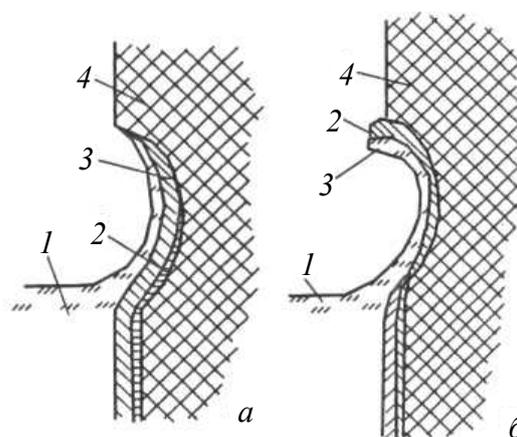


Рис. 4. Коррозия стенового бруса на уровне зеркала стекломассы: а – начальный период; б – отрыв капли стекла; 1 – стекломасса; 2 – реакционный контактный слой; 3 – стекло, обогащенное продуктами коррозии; 4 – огнеупор

Миграция щелочных компонентов в огнеупор из расплава способствует образованию слоя стекломассы, обедненного щелочными компонентами, и реакционного слоя продуктов взаимодействия.

Вследствие снижения концентрации щелочных компонентов и увеличения концентрации Al_2O_3 поверхностное натяжение расплава в образующихся слоях увеличивается, что способствует их подъему выше уровня стекломассы.

Когда масса накопившегося расплава становится достаточно большой, он срывается в виде капли стекла, обогащенного продуктами коррозии. При этом обнажаются новые поверхности огнеупора для взаимодействия со свежей стекломассой. Непрерывная миграция щелочных компонентов из расплава в обнаженные поверхностные слои огнеупора на уровне стекломассы способствует активному протеканию коррозии. В результате появляется характерный профиль коррозии огнеупора в стене варочного бассейна на границе раздела трех фаз.

Коррозия огнеупора на уровне зеркала стекломассы определяет в большинстве случаев длительность кампании стекловаренной печи. Участок стены на уровне зеркала стекломассы выполняют из наиболее стеклоустойчивых огнеупоров.

Пороки стекломассы, связанные с коррозией огнеупоров – камни (нерасплавившиеся кусочки огнеупоров), свиля, газовые включения. Процесс коррозии неизбежен, поэтому при выборе огнеупоров значение имеет не только коррозионная устойчивость, но и возможность возникновения тех или иных пороков. Например, растворение в стекломассе MgO и Al_2O_3 увеличивает количество свилей, так как растворимость стекловидных включений определяется их поверхностным натяжением, которое повышается с ростом содержания данных компонентов. Кремнеземистые свиля имеют меньшее поверхностное натяжение, поэтому растворяются в стекломассе.

2.1.2. Служба огнеупоров верхнего строения печи

Условия службы огнеупоров верхнего строения печи связаны с агрессивным воздействием летучих и пылевидных компонентов шихты, продуктов сжигания топлива, а также с высокими термическими нагрузками. В ваннных печах с поперечным направлением пламени пыление шихты происходит в зоне варки до 2–3 пар горелок, в печи с подковообразным направлением – вплоть до зоны осветления. Разрушение верхнего строения печи усиливается в случае содержания в шихте и стекломассе легколетучих компонентов – соединений фтора, бора, оксидов щелочных металлов, оксида свинца.

Коррозия огнеупоров происходит при взаимодействии компонентов шихты и стекломассы с компонентами огнеупоров. Кроме того, компоненты шихты и продукты сгорания топлива вызывают эрозию – механическое разрушение огнеупоров. Снижение разрушающего действия компонентов шихты обеспечивается ее увлажнением, еще в большей степени – гранулированием шихты.

Активное воздействие факела, значительные термические нагрузки при переключении направления пламени в регенеративных печах в сочетании с корродирующим действием компонентов стекла приводят к тому, что в пламенном пространстве наиболее сильно разрушаются влеты горелок. Поэтому для кладки влетов горелок, простенок между ними в зоне варки, а также загрузочного кармана рекомендуется использовать бадделеитокорундовые огнеупоры.

Рациональная раскладка огнеупоров регенераторов определяется различным характером воздействия агрессивных факторов по высоте. В регенераторах наиболее сильно разрушается насадка. На верхнюю ее часть (около 1/3 по высоте) действуют следующие факторы:

- высокая температура (свыше 1100°C) и ее циклические изменения;
- изменение газовой атмосферы;
- пыль шихты, газообразные продукты (B_2O_3 , Na_2O и др.).

В результате происходит разбухание огнеупора из-за образования силикатов, боратов, образование трещин из-за термического воздействия и усталости материала.

В нижней части насадки регенератора происходит коррозия щелочными компонентами, фтором; термические нагрузки менее существенны, однако циклические изменения температуры и атмосферы вызывают усталость материала.

2.1.3. Взаимодействие огнеупоров

Разрушение кладки теплотехнической установки может быть обусловлено взаимодействием огнеупоров различного химического состава между собой. Например, вследствие химического взаимодействия алюмосиликатных и периклазовых огнеупоров нельзя их укладывать рядом. В этом случае необходимо между ними размещать прокладку нейтрального огнеупора, например хромитопериклазового.

В табл. 12 приведены результаты исследований температур реакционного взаимодействия между различными огнеупорами. Прочерк в таблице говорит об отсутствии такого взаимодействия.

Температуры реакционного взаимодействия огнеупоров

Огнеупоры	Динасовые	Шамотные	Высокоглино-земистые	Хромитовые	Форстеритовые	Хромитопериклазовые	Периклазохромитовые	Периклазовые
Динасовые	–	1500	1600	1650	1700	1600	1600	1500
Шамотные	1500	–	–	1600	1500	1600	1600	1400
Высокоглино-земистые	1600	–	–	1600	1650	1600	1600	1500
Хромитовые	1650	1600	1600	–	1600	1700	1700	1700
Форстеритовые	1700	1500	1650	1600	–	1700	1700	1700
Хромитопериклазовые	1600	1600	1600	1700	–	–	–	–
Периклазохромитовые	1600	1600	1600	1700	1700	–	–	–
Периклазовые	1500	1400	1500	1700	1700	–	–	–

2.2. Рациональное размещение огнеупорных материалов в стекловаренных печах

Срок службы стекловаренных печей определяется длительностью работы отдельных конструктивных элементов бассейна и верхнего строения пламенного пространства печи. При общем удовлетворительном состоянии огнеупорной кладки чаще всего разрушаются, порой аварийно, верхний ряд стен бассейна варочной части печи, проток, влеты, своды и выстилки горелок, сыпчаная стена и арки загрузочного кармана, насадка, свод и разделительные стены регенераторов (рис. 1). Как правило, это приводит к преждевременной остановке печи на холодный ремонт через 3–4 года ее эксплуатации и связано либо с выполнением таких элементов без учета существующих рекомендаций, либо с неудовлетворительной их конструкцией и условиями эксплуатации.

Существующие сегодня в отечественной и зарубежной практике принципиально новые подходы к выбору огнеупорных материалов для кладки различных конструктивных элементов печей, рациональное их размещение с учетом специфики и свойств огнеупоров позволяют увеличить продолжительность кампании печи до 8–12 лет.

На рис. II–III представлены конструкции ванн регенеративных стекловаренных печей с указанием наиболее важных конструктивных элементов.

2.2.1. Рабочая камера печи

Варочный бассейн. Для кладки стен бассейна печи при варке многощелочных промышленных стекол (листовое, тарное, сортовое и др.) применяют преимущественно бадделеитокорундовые огнеупоры. В конструкциях печей для кладки стен бассейна также используют корундовые, хромалюмоциркониевые и высокоциркониевые огнеупоры.

При варке малощелочных и бесщелочных стекол достаточно широко применяют плавленолитые хромкорундовые и высокохромистые огнеупоры, превосходящие по коррозионной стойкости традиционные бадделеитокорундовые огнеупоры в 5–7 раз. При варке специальных, особо агрессивных стекол (стекловолокно, минеральная вата, стеклянная облицовочная плитка и др.) помимо плавленолитых огнеупоров в футеровке стен бассейна печи используют обожженные хромоксидные огнеупорные изделия. Они отличаются высокой коррозионной стойкостью во всех без исключения расплавах промышленных стекол. В таких печах в качестве второго слоя в стене применяют плотный циркониевый огнеупор.

В настоящее время существуют различные способы кладки стен бассейна печи. В высокопроизводительных ванн печах бассейн варочной части печи на всю высоту выполняют из полисадных брусьев, что позволяет исключить горизонтальные швы в кладке, подверженные активному воздействию вертикальной ячеистой коррозии, скорость которой может быть выше, чем на уровне зеркала стекломассы. При этом используемые брусья должны быть с ориентированной (в нижней, придонной части) усадочной раковиной или без нее (цельнонаполненные). Иногда кладку стен варочного бассейна выполняют из полисадных брусьев с наклонной внутренней поверхностью, что несколько замедляет коррозию на уровне и ниже уровня стекломассы и повышает надежность конструкции бассейна печи.

В печах с глубоким бассейном (свыше 1200 мм) и резко выраженным падением температур по глубине стекломассы кладку стен выполняют в два или три ряда брусьев.

Стены бассейна в большинстве случаев выкладывают без мертелей, насухо, с шириной шва не более 1 мм. Как правило, для уменьшения ширины швов в кладке их поверхности подвергают механической обработке.

Остановимся подробнее на особенностях кладки стен бассейна печи с использованием бадделеитокорундовых огнеупоров.

Как указывалось выше, одним из главных факторов, определяющих длительность кампании печи, является разрушение брусьев стен бассейна особенно на уровне зеркала стекломассы в зонах варки и максимальных температур.

Исходя из характера разъедания стен варочного бассейна при использовании бадделеитокорундовых огнеупоров, следует считать рациональной следующую раскладку огнеупоров. В печах с температурой варки более 1550°C в верхнем ряду зоны варки, включая зону максимальных температур, при многорядной кладке стен бассейна печи следует использовать брусья из бадделеитокорундового огнеупора с содержанием ZrO_2 не менее 41%, в верхнем ряду зоны осветления – брусья с содержанием ZrO_2 37%, в нижнем ряду по всему бассейну – брусья с содержанием ZrO_2 33%. В печах с температурой варки до 1550°C в верхнем ряду зоны варки, включая зону максимальных температур, целесообразно применять брусья из бадделеитокорундового огнеупора с содержанием ZrO_2 37%, в нижнем ряду – бадделеитокорундовые брусья, содержащие 33% ZrO_2 ; в верхнем ряду зоны осветления – брусья из бадделеитокорундового огнеупора с содержанием ZrO_2 33%, в нижнем ряду – корундовые (например, корвишитовые) брусья.

При кладке стен бассейна печи следует учитывать структуру стеновых брусьев из бадделеитокорундового огнеупора. Зона литниковых раковин, характеризующаяся крупнокристаллической структурой и пустотами, не должна попадать в зону интенсивного разрушения. В связи с этим неперемещаемым условием является кладка верхнего ряда варочного бассейна из цельнонаполненных брусьев или брусьев с ориентированной раковиной повышенной плотности: не ниже 3,7 г/см³ для бадделеитокорундового огнеупора с содержанием ZrO_2 41% и 3,6 г/см³ для бадделеитокорундового огнеупора с содержанием ZrO_2 37%. Кроме того, для верхнего ряда стен бассейна должны применяться брусья максимально возможной высоты – 900–1200 мм. Это позволяет опустить наиболее разрушаемые участки кладки – горизонтальный шов стен бассейна и зону летников – в придонные малоподвижные слои стекломассы.

Для кладки нижнего ряда можно использовать рядовые стеновые брусья с обычной заливкой. Следует только принимать во внимание, что установка брусьев из бадделеитокорундового огнеупора литниковой поверхностью внутрь печи недопустима, поскольку в этом случае происходит очень интенсивная коррозия их средней части.

Наиболее разрушаемые элементы стен бассейна печи – угловые брусья загрузочного кармана, угловые брусья перед протоком – должны выполняться на всю высоту из бадделеитокорундовых цельнонаполненных брусьев или брусьев с редуцированной раковиной, характеризующихся содержанием ZrO_2 37–41%.

В выработочных (студочных) частях печей стены бассейна разъедаются незначительно, практически независимо от типа применяемого огнеупора. Наиболее рационально кладку стен бассейна в студочной и выработочной частях печи выполнять из корундового (корвишит) или высокоглиноземистого огнеупора. Применение бакоровых брусьев для этих участков нецелесообразно как с экономической точки зрения, так и из-за присутствия в них стекловидной фазы, в ряде случаев приводящей к образованию в стекле пузырей и свилей.

Опыт работы ряда стекольных заводов, например «Гомельстекло», показывает, что теплоизоляция стен варочного бассейна ниже уровня стекломассы не отражается на скорости разъедания брусьев. В связи с этим признано рациональным теплоизолировать стены варочного бассейна, за исключением верхнего участка высотой 200 мм. Различные схемы тепловой изоляции стен бассейна печи приведены на рис. ПЗ.1.

Рациональная раскладка огнеупоров в стенах варочного бассейна печи показана на рис. IV–VI.

Дно бассейна печи. Современные стекловаренные печи вследствие применения различных средств интенсификации стекловарения характеризуются повышенным уровнем температур и возросшей активностью потоков стекломассы в придонных слоях. Это обстоятельство требует тщательной раскладки огнеупоров дна, обеспечивающей длительный срок службы, максимальную надежность и снижение тепловых потерь в окружающую среду. С этой целью дно выполняют из коррозионно-стойких огнеупоров и примыкающих к ним снаружи теплоизоляционных материалов.

Кладка неизолированного дна, как правило, выполняется в несколько слоев из различных огнеупорных материалов. При кладке изолированного дна используют до девяти слоев материалов (многослойная конструкция), причем каждый слой располагается в соответствии со своими функциональными и техническими особенностями (рис. ПЗ.2).

Независимо от типа раскладки дно бассейна сверху покрывают слоем плиток из огнеупорного высококоррозионно-стойкого материала, преимущественно бадделеитокорундового огнеупора в виде плит толщиной от 75 до 120 мм. Их укладывают на шамотные брусья без раствора либо на мертелях. При использовании тепловой изоляции

шамотного дна плитку нужно укладывать в два ряда на циркониевых мертелях с взаимной перебивкой продольных и поперечных швов. Для повышения надежности конструкции верхний ряд плитки располагают в шахматном порядке короткой стороной плитки вдоль печи.

Укладка плиток с использованием мертелей позволяет уменьшить проникновение в швы стекломассы и предотвратить контактное взаимодействие шамотных и литых огнеупоров. Для предотвращения контактного взаимодействия шамотного огнеупора с выстилкой дна используют разделительный слой из высокоглиноземистых огнеупоров. Растворение в расплаве оксида алюминия повышает вязкость и тем самым препятствует проникновению расплава в огнеупорную кладку дна печи. В качестве разделительного слоя можно использовать также цирконовую засыпку и спеченные хромкорундовые огнеупоры. В последнем случае зафиксировать повышенный износ дна можно по появлению характерной закраски стекла, что особенно важно при теплоизолированном дне.

При использовании на печи барботажа (бурление стекломассы) весь участок дна, где расположены сопла, выполняют из массивных брусьев плавленолитого бадделеитокорундового огнеупора. Кроме того, брусья с отверстиями для размещения сопел должны быть цельнонаполненными. Такая же кладка дна необходима и при дополнительном электроподогреве стекломассы. В электрических стекловаренных печах все дно выкладывают из массивных, содержащих цирконий брусьев толщиной 250–300 мм. Выбор материала для электродного бруса зависит от типа стекла, причем электросопротивление первого должно быть немного больше электросопротивления второго. Наиболее пригодными материалами для электродных брусьев являются бадделеитокорундовые и спеченные циркониевые огнеупоры, а также плавленый кварц.

В печах для варки специальных типов стекол, например стекловолокна, для кладки дна успешно применяют хромоксидный огнеупор (окраска стекломассы в этом случае не имеет значения).

Верхнее строение стекловаренной печи состоит из стен пламенного пространства, свода печи, влетов горелок, арок, сводов и стен горелок.

Главный свод варочной части в подавляющем большинстве промышленных стекловаренных печей, предназначенных для производства массовых стеклянных изделий (листовое, тарное, сортовое и другие виды стекол), выполняется из динасовых изделий. Динасовые огнеупоры особенно эффективны для футеровки стекловаренных печей, отапливаемых газом. Низкая пористость, высокие механическая прочность и температура начала деформации под нагруз-

кой динасовых огнеупоров позволяют эксплуатировать своды стекловаренных печей с широкими пролетами (до 14 м) при высоких тепловых и механических нагрузках в течение длительной кампании (до 10 лет) без каких-либо значительных следов коррозии или термомеханического разрушения.

Коррозия динасовых сводов увеличивается при недостаточной герметизации огнеупорной кладки вследствие плохой геометрии динасовых изделий, а также при использовании некачественных растворов (мертелей). В таких случаях из-за относительно высокого давления газовой среды в подсводовом пространстве в швы проникают и конденсируются летучие агрессивные компоненты стекольной шихты, содержащие главным образом щелочные, щелочноземельные, свинцовые, сернистые и фтористые соединения. В результате этого в швах образуются агрессивные силикатные расплавы, воздействующие на шовные поверхности динасовых изделий, поэтому огнеупорность рабочей поверхности (и, следовательно, температура начала деформации под нагрузкой) может снизиться на 100°C, что приведет к частичному оплавлению этих участков и возможному появлению сплошных прогаров. Особенно эти процессы могут активизироваться при отоплении стекловаренных печей мазутом, содержащим достаточно высокое количество (до 3,5%) сернистых соединений. В данных условиях нередки случаи образования на поверхности стекломассы слоя легколетучих и крайне агрессивных сульфатов щелочных и щелочноземельных металлов, конденсация которых в швах резко ускоряет процесс коррозии.

Для повышения надежности динасовых сводов их следует выполнять из высококачественных огнеупоров, характеризующихся содержанием оксида SiO_2 не менее 95–96%, количеством примесей оксидов алюминия и железа не более 0,4%, пористостью менее 22% и плотностью 2,34–2,36 г/см³. Кладку свода следует тщательно герметизировать. В последние годы наружные поверхности сводов теплоизолируют с одновременной герметизацией кладки.

В ваннах стекловаренных печей, предназначенных для варки боросиликатных и других малощелочных коррозионноактивных стекол, свод печи выполняют из качественного муллитового огнеупора. Для высокотемпературной варки некоторых промышленных стекол разработаны конструкции сводов, позволяющие использовать для кладки литые бадделеитокорундовые и хромкорундовые огнеупоры. В печах, где свод выполнен из указанных материалов, можно изготавливать достаточно агрессивные тугоплавкие стекла с максимальной температурой варки 1700°C.

Данные химического анализа образцов динасового огнеупора из влетов горелок и стен пламенного пространства ряда промышленных стекловаренных печей показали присутствие в поверхностных слоях огнеупора 2,5–4% оксидов щелочных металлов. Между тем, содержание в динасе 3–4% Na_2O снижает температуру его размягчения до 1550°C , а 6–7% Na_2O – до 1450°C . Дополнительное непосредственное воздействие факела на поверхность влета горелки приводит к его местному перегреву до температур, превышающих максимальную температуру варки стекла. Все это создает условия для оплавления поверхностных слоев динасовой кладки и ускоренного разрушения влетов горелок и подвесных стен в зонах варки и максимальных температур, в которых наблюдается воздействие на кладку летучих щелочных компонентов шихты.

По этой причине в настоящее время для кладки элементов верхнего строения в зонах варки и максимальных температур высокопроизводительных высокотемпературных печей в основном используют плавнелитые бадделеитокорундовые и в меньшей степени – корундовые огнеупоры. Динасовые изделия успешно применяют в печах с поперечным направлением пламени для кладки последних пар горелок и стен пламенного пространства на соседних участках.

При совместном использовании в кладке бадделеитокорундового и динасового огнеупоров в процессе эксплуатации стекловаренных печей нередки случаи активного контактного взаимодействия этих материалов, что иногда способствует усиленному износу участков верхнего строения. Установлено, что максимально допустимая температура непосредственного контакта между динасом и бакором в этих элементах кладки не должна превышать 1400°C ; при более высокой температуре совместную кладку этих огнеупоров необходимо выполнять с использованием нейтрального мертеля, содержащего цирконовый концентрат (92–93%), огнеупорную глину (7–8%), 45%-ную ортофосфорную кислоту (до требуемой консистенции).

Исследования бадделеитокорундовых огнеупоров после службы свидетельствуют об образовании на их поверхности слоя, обогащенного оксидами щелочных и щелочноземельных металлов, с низкой механической прочностью, что приводит к отслаиванию и обрушению его в стекломассу. Процесс разрушения ускоряется из-за резких перепадов температур на поверхности кладки (до 100°C каждые 0,5 ч), связанных с переводом направления пламени, и недостаточной термостойкости бадделеитокорундовых огнеупоров. По этим же причинам в кладке нередко образуются крупные сквозные трещины, приводящие к частичному скалыванию брусьев, а в отдельных случаях – к аварийному обрушению горелки или участка стены

пламенного пространства. Если механического отслаивания поверхностного слоя не происходит, то сформировавшаяся контактная реакционная зона практически полностью исключает дальнейшее разрушение кладки из бадделеитокорундовых огнеупоров в ходе кампании. В этой связи для верхнего строения стекловаренных печей в некоторых странах, в частности в США, применяют два типа плавнелитых корундовых огнеупоров – Monofrax A и Monofrax H, практически не содержащих стекловидной фазы. Monofrax A представляет собой плотный материал на основе α -глинозема и характеризуется высокими механической прочностью и коррозионной стойкостью к летучим компонентам шихты и стекла при температурах его варки. Этот материал используют для кладки стен пламенного пространства и горелок в зонах варки и максимальных температур, в том числе горелочных и проточных стен, зубьев и горелочных блоков.

Monofrax H полностью состоит из плотноупакованных кристаллов β -глинозема ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$). Высокая термостойкость и низкая по сравнению с другими плавнелитыми огнеупорами теплопроводность, высокая устойчивость к щелочным парам делают этот материал весьма пригодным для кладки элементов верхнего строения стекловаренных печей. Необходимо, однако, учитывать, что, будучи стойким в щелочной среде, β -глинозем может превратиться в α -глинозем в нещелочной окислительной среде и особенно нещелочной восстановительной. С учетом этих ограничений Monofrax H рекомендуется применять для кладки горелок (включая влеты, простенки, своды, зубья) за зоной максимальных температур, торцовых проточных стен, горелочных блоков, где по эксплуатационной стойкости этот материал значительно превосходит другие плавнелитые огнеупоры.

Для кладки стен пламенного пространства стекловаренных печей используют также плавнелитой хромкорундовый огнеупор, содержащий Cr_2O_3 от 15 до 30%. По стойкости в агрессивной газовой среде, обогащенной щелочными компонентами, он превосходит бадделеитокорундовый огнеупор примерно в 2,5 раза, а корундовый огнеупор типа Monofrax A – в 3 раза. Хромкорундовый огнеупор рекомендуется для кладки практически всех элементов верхнего строения современных стекловаренных печей.

При разработке рациональной раскладки огнеупоров в верхнем строении печей необходимо учитывать не только максимальную температуру варки, но и вид топлива.

Опыт работы ряда отечественных заводов и анализ службы огнеупоров в ваннах печах листового и тарного стекла позволяет считать рациональной следующую раскладку огнеупоров в верхнем строении:

при отоплении природным газом для влетов горелок в зоне варки, включая зону максимальных температур, и подвесных стен до 2–3 пар горелок использовать бадделеитокорундовый огнеупор, содержащий ZrO_2 37%, в печах с температурой варки свыше $1550^\circ C$ и бадделеитокорундовый огнеупор с содержанием ZrO_2 33% – при температуре до $1550^\circ C$; для влетов последних пар горелок и всех остальных участков подвесных стен – высококачественный динас (для обоих типов печей);

при отоплении мазутом для влетов горелок в зоне варки, включая зону максимальных температур, и подвесных стен использовать между ними бадделеитокорундовый огнеупор с содержанием 37% ZrO_2 – при температуре варки свыше $1550^\circ C$ и 33% ZrO_2 при температуре до $1550^\circ C$; для влетов последних пар горелок и подвесных стен на этом участке – бадделеитокорундовый огнеупор, содержащий 33% ZrO_2 , при температуре варки свыше $1550^\circ C$ и высококачественный динас при температуре до $1550^\circ C$.

Загрузочный узел. В стекловаренных печах, независимо от типа применяемого огнеупора, очень сильному разрушению подвергаются арки загрузочного кармана. В некоторых случаях их аварийное состояние является причиной преждевременной остановки печей на холодный ремонт. Вследствие активного воздействия летучих компонентов шихты и градиента температур арки загрузочного кармана необходимо выполнять из огнеупоров, характеризующихся высокими показателями термостойкости, коррозионной стойкости и механической прочности при высоких температурах.

Для повышения надежности и удлинения срока службы данного узла арку торцевой стены, включая пяты и участки подвесной стены на уровне пят, рекомендуется выполнять из фасонных брусьев бадделеитокорундового огнеупора с содержанием оксида циркония 33%. Обязательным является полная тепловая изоляция наружной поверхности арки выносными арками, что позволяет уменьшить перепад температур по толщине между горячей и холодной поверхностями. Типичным случаем разрушения неизолированных в тепловом отношении арок загрузочного кармана является скалывание нижней части отдельных брусьев.

Выносная защитная арка может выполняться из динасового огнеупора. Из него же изготавливаются одна или две выносные арки перекрытия кармана, при этом наружная делается плоской, с минимальной стрелой подъема.

Арки загрузочного кармана являются самостоятельными элементами кладки. Срок их службы практически полностью определяется качеством кладки и выводки. Именно в процессе выводки на арках часто появляются многочисленные посечки и трещины, что приводит в дальнейшем к ска-

ливанию отдельных брусьев и нередко к аварийному обрушению арок. В особенности это относится к арке из бадделеитокорундового огнеупора: в ходе выводки она должна постоянно находиться в зажатом состоянии, для чего упорные болты следует регулярно проверять на зажим.

Для кладки арок загрузочного кармана также используют плотный керамический огнеупор на основе синтетического муллита, обладающий высокой термостойкостью и устойчивостью к летучим компонентам шихты и стекла. Особенно хорошо этот огнеупор работает в малогабаритных ваннах печей периодического действия.

Боковые и торцовые стены бассейна в сыпчонном кармане, традиционно выполняемые из бадделеитокорундового огнеупора, при сравнительно небольшом разъедании сильно растрескиваются, причем в отдельных случаях трещины распространяются на всю толщину бруса. Для предохранения загрузочного кармана от растрескивания и для утепления кармана целесообразно осуществлять теплоизоляцию торцовой стены на всю ее высоту. Горизонтальные и вертикальные швы между брусьями не изолируются. Кладку стены бассейна в загрузочном кармане необходимо выполнять с тщательной подгонкой брусьев, оставляя между ними минимальные швы. Особое внимание следует уделять угловым брусьям загрузочного кармана, подверженным наибольшему износу агрессивными продуктами плавления шихты.

Проток. Проток наряду со стенами варочного бассейна является наиболее изнашивающимся элементом кладки, лимитирующим продолжительность кампании печи. Скорость износа перекрывных брусьев протока в основном определяется стойкостью огнеупорного материала к вертикальной ячеистой коррозии и температурой внутренней контактной поверхности кладки, которая зависит от типа стекла, глубины варочного бассейна и расположения протока относительно уровня дна. Следует отметить, что огромное влияние на степень износа протока оказывает практически полное отсутствие охлаждения переднего перекрывного бруса, встроенного в торцевую проточную стену, а также то обстоятельство, что по мере разъедания перекрытия температура стекломассы, воздействующая на брусья (в отличие от участка стен варочного бассейна) не только не снижается, но и имеет тенденцию к повышению. Это связано с относительным уменьшением, по мере разъедания, высоты заглабления нижней плоскости перекрывных брусьев и ее приближением к поверхностным, более нагретым слоям стекломассы.

Повысить эксплуатационную надежность протока можно благодаря использованию для кладки высокостойких огнеупорных материалов и созданию оптимальных условий их службы.

Наиболее стойкими плавнелитыми огнеупорами, пригодными для изготовления протока, являются бадделеитокорундовые огнеупоры, высокоциркониевые, хромалюмоциркониевые, хромкорундовые и высокохромистые. При этом для варки основных промышленных стекол натрийкальцийсиликатного состава (листовых, тарных, сортовых) в основном применяют первые и в отдельных случаях – вторые и третьи из перечисленных материалов, остальные – при варке особо агрессивных бесщелочных боросиликатных, опаловых фторсодержащих и др. В отдельных случаях этот узел выполняется из обожженного хром-оксидного огнеупора.

Хромалюмоциркониевые, хромкорундовые и высокохромистые огнеупоры по стойкости намного превосходят бадделеитокорундовые и корундовые материалы. При кладке протока из бадделеитокорундовых огнеупоров следует использовать только цельнонаполненные, механически обработанные брусья с содержанием ZrO_2 не менее 37–41%.

На скорость износа перекрывных брусьев протока влияет профиль их обращенной вниз поверхности, находящейся в контакте со стекломассой. Отклонение нижних поверхностей от горизонтали способствует удалению газовых пузырей, вызывающих вертикальную ячеистую коррозию. Средняя скорость коррозии образцов со скошенной под углом 10, 25 и 45° нижней поверхностью при температуре 1350°C соответственно составляет 0,32, 0,21 и 0,16 мм/сут. Иными словами, перекрывной брус протока из бадделеитокорундового огнеупора с содержанием ZrO_2 33% со скошенной под углом 25° нижней поверхностью корродирует с меньшей скоростью, чем тот же тип огнеупора с содержанием ZrO_2 41%, а брус из бадделеитокорундового огнеупора с содержанием ZrO_2 33% со скошенной под углом 45° нижней поверхностью приближается по стойкости к брусу из хромалюмоциркониевого огнеупора (ХАЦ-30) с горизонтальной нижней поверхностью.

Уменьшению скорости коррозии огнеупоров способствует и устройство так называемых заглубленных протоков, поскольку это снижает температуру стекломассы на входе в проток.

В этой связи в настоящее время используются различные конструкции протоков: заглубленные протоки, протоки со скошенными перекрывными брусьями. В последнем случае рациональной раскладкой может быть предусмотрено как наклонное перекрытие протока с подъемом в сторону зоны выработки, так и наклонный профиль дна. Конструкция заглубленного протока с указанием марок применяемых огнеупоров показана на рис. 5.

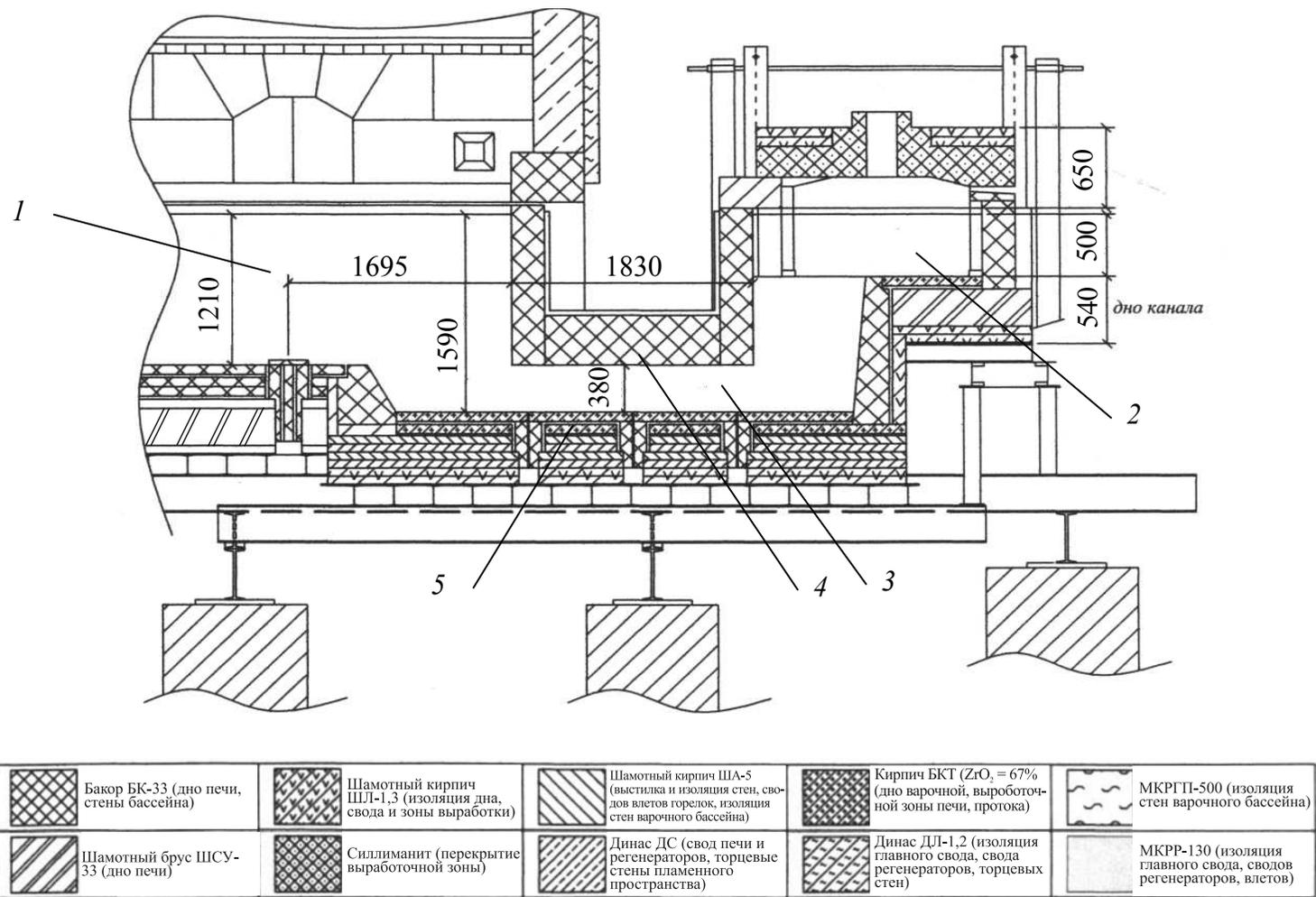


Рис. 5. Рациональная конструкция протока ванны стекловаренной печи:

1 – варочный бассейн; 2 – выработочный бассейн; 3 – проток; 4 – перекрытие протока; 5 – основание протока

Очень высокие требования предъявляются к качеству механической обработки соприкасающихся поверхностей брусьев и к стендовой сборке перекрытий протоков: швы между брусьями должны быть тщательно подогнаны, рабочие поверхности блоков отполированы.

Важным фактором, способствующим снижению скорости износа протока, является охлаждение: при воздушном обдувании срок службы протока может быть увеличен соответственно в 2–2,5 и 3–3,5 раза по сравнению с протоком, работающим при естественной конвекции без применения принудительного охлаждения.

Тепловая изоляция. Использование тепловой изоляции огнеупорной кладки печи во всех случаях позволяет:

сократить расход топлива на 15–20% или повысить температуру варки на 20–30°C;

уменьшить объем дымовых газов и тепловое напряжение пламенного пространства, тем самым продлить срок службы огнеупоров верхнего строения (свода, подвесных стен, горелок) и насадок регенераторов;

обеспечить требуемое распределение топлива и воздуха по горелкам без перегрузки некоторых из них;

обеспечить лучшую утилизацию тепла отходящих газов и снизить их температуру у дымовой трубы;

стабильно и точно выдерживать, а также регулировать заданный режим варки благодаря незначительному влиянию внешних факторов (своеобразное термостатирование печи);

улучшить условия работы обслуживающего персонала.

Перечисленные достоинства тепловой изоляции ваннных печей обеспечивают не только повышение качества стекломассы с точки зрения химической и термической однородности, но и производительность печи при том же расходе топлива.

Вместе с тем изоляция ваннных печей имеет свои особенности конструктивного и эксплуатационного характера. Недостаточное внимание или игнорирование этих особенностей может явиться причиной серьезных нарушений работы печи.

При тепловой изоляции стен бассейна печи необходимо оставлять открытыми (без изоляции) все горизонтальные и вертикальные швы. Особое внимание должно быть обращено на возможность контактного взаимодействия между огнеупорной кладкой печи и изоляцией. В местах контакта с изоляцией резко увеличивается температура наружной поверхности бруса стенки из бадделеитокорундового огнеупора (до 1400°C и более) и шамотного бруса дна (до 1100°C). Если в контакт-

ном слое при изоляции дна взаимодействие шамотного и легковесного огнеупоров практически исключено, то в контактном слое при изоляции бруса возможно протекание реакций главным образом между стекловидной фазой бадделеитокорундового огнеупора и высокоглиноземистым огнеупором. Столь высокие температуры в контактном слое требуют применения для кладки бассейна цельнонаполненных брусьев с тщательной обработкой их поверхности, иначе может произойти прорыв стекломассы через литниковую часть с последующим разрушением изоляции. Это объясняет, почему для кладки первого слоя изоляции нельзя использовать шамотный легковесный кирпич: температура его применения обычно не превышает 1200°C.

Более надежна изоляция на высокотемпературном растворе. Предпочтительней при этом применять растворы на основе силиката циркония, обладающего рядом преимуществ: цирконовые материалы отличаются высокой термостойкостью и достаточно стеклоустойчивы, кроме того, они нейтральны как к шамотным, так и бакоровым огнеупорам (рис. ПЗ.1).

Возможна также полная изоляция стен бассейна с использованием крупноразмерных материалов, например шамотного бруса. При изоляции дна необходимо учитывать низкую механическую прочность легковесных огнеупоров. Поэтому между металлическими прогонами дна печи и шамотными брусьями необходимо укладывать плотные шамотные кирпичи.

Участок кладки подвесных бакоровых стен печи по сравнению с бассейном имеет свои особенности. Отсутствие стекломассы позволяет осуществить полную изоляцию стен, не оставляя открытыми швы. Брусья могут быть обычного исполнения (нецельнонаполненные). Особое внимание должно быть обращено на их толщину. Для кладки подвесных бакоровых стен следует использовать брусья толщиной не более 200–250 мм, что облегчает конструкцию печи и снижает расход плавленых огнеупоров. Однако следует учитывать, как и при изоляции бассейна, возможность контактных реакций между бадделеитокорундовым огнеупором и изоляцией (рис. ПЗ.3).

Одним из основных условий тепловой изоляции динасового свода печи является тщательная герметизация всей кладки. При изолированном, но не герметизированном своде возможно разрушение первого слоя изоляции дымовыми газами, насыщенными щелочными парами, что приводит к быстрому разрушению изоляции и прогоранию самого свода. Этот процесс чрезвычайно ускоряется при расширении швов между динасовыми кирпичами, в связи с чем кладка сво-

да при его тепловой изоляции должна выполняться не только из кирпичей одного и того же класса огнеупора, но и по возможности из одной партии.

Оптимальным вариантом изоляции динасового свода является следующий:

первый слой – чистый кварцевый песок слоем 20–30 мм, насыпаемый на слой высокотемпературного динасового мертеля (герметизирующей обмазки) толщиной 3–10 мм;

второй слой – высококачественный ультралегковесный динасовый кирпич толщиной 115–130 мм, выкладываемый на ребро непосредственно на песок без раствора;

третий слой – шамотный ультралегковесный кирпич, выкладываемый «на плашку» на растворе, толщиной 65 мм, или каолиновое, или муллитокремнеземистое рулонное волокно толщиной около 60 мм, раскатанное по второму слою уплотнительной обмазки толщиной 2–5 мм. В последнем случае для защиты теплоизоляционного материала от пыли на него укладывают алюминиевый лист или стеклоткань (рис. ПЗ.5).

Как правило, кладку изоляции свода ванной печи проводят после выводки и наварки стекломассы, когда наружная температура свода достигает 250–300°C.

Принято считать, что при изоляции свода разогретой печи практически отсутствует дополнительный рост огнеупорной кладки свода, а следовательно, герметизирующая обмазка, ТКЛР которой близок к ТКЛР кладки, не будет иметь трещин после укладки изоляции. Таким образом, нанесение герметизирующего раствора на поверхность разогретого свода обеспечивает надежную защиту тепловой изоляции от воздействия агрессивных компонентов газовой среды.

Герметизирующая обмазка имеет следующий состав, мас. %: 58 – молотого динаса, 7 – огнеупорной глины, 10 – концентрированной ортофосфорной кислоты, 25 – воды.

Такая изоляция динасового свода ваннных печей устойчиво работает в течение всей кампании, экономия топлива, достигнутая за счет изоляции только главного свода ванной печи, составляет 4–15%.

Существуют и другие способы изоляции динасового свода ваннных печей, однако все они не нашли широкого применения главным образом из-за низкой надежности, связанной, прежде всего, с контактным взаимодействием огнеупорного и теплоизоляционного слоев (применение трепела, диатомитового кирпича и т. д.).

Свод из плавленолитых огнеупоров, характеризующихся повышенной теплопроводностью, требует применения особо эффективной

тепловой изоляции, способствующей не только снижению тепловых потерь, но и улучшению условий его эксплуатации. Поскольку контактные температуры между наружной поверхностью свода из плавленолигнитных огнеупоров и первым слоем изоляции значительно выше, чем при динасовом своде, в качестве материала для первого слоя используют легковесные огнеупоры, характеризующиеся высокими термомеханическими свойствами (например, корундовые или муллитокорундовые), в качестве второго – шамотные легковесные материалы.

Различные схемы тепловой изоляции рабочей камеры стекловаренной печи показаны в прил. 3.

2.2.2. Питатели

Огнеупоры капельных питателей стеклоформирующих машин (секции лотков, перекрывные плиты и другие детали) во время эксплуатации не только испытывают химическое воздействие стекломассы, значительные по величине температурные перепады, но и подвергаются постоянному эрозионному износу потоками движущейся стекломассы. В связи с этим к огнеупорным материалам питателя предъявляются следующие требования: высокая стеклоустойчивость, равномерное разъедание, легкое растворение продуктов реакций в стекломассе, устойчивость к резким температурным перепадам и достаточная механическая прочность, обеспечивающая надежную эксплуатацию в течение всей кампании печи. Указанным требованиям в значительной степени соответствует высокоглиноземистая керамика муллитового и силлиманитового состава, плавленнолитые α -/ β -корундовые и бадделеитокорундовые изделия (рис. VII, VIII).

Для изготовления огнеупоров питателей широко используют высокоглиноземистые массы на основе природного (чаще индийского) силлиманита и синтетического муллита. Фирмы Англии, США и Германии «PSR», «Cawoods Refractories», «Morgan Refractories», «Didier-Werke A. G.», «Dr. C. OTTO», специализирующиеся на выпуске огнеупоров для питателей, используют массы на основе синтетических муллита и силлиманита. Фазовый состав огнеупоров французской фирмы «Seva» представлен муллитом, силлиманитом и α -тридимитом. В огнеупорах для питателей, выпускаемых фирмами «Dr. C. OTTO» и «PSR», содержится 62–75% Al_2O_3 , 13–20% ZrO_2 , преобладающей фазой служит муллит, присутствует корунд и циркон. Подобные огнеупоры в результате повышенного содержания в своем составе Al_2O_3 , высокой степени муллитизации черепка и высокой стеклоустойчивости обеспечивают длительность службы питателей более 3–5 лет.

Фирмы «Motim» (Венгрия) и «Подольскогнеупор» (Россия) для футеровки каналов питателей изготавливают плавнелитые α -/ β -корундовые и бадделеитокорундовые изделия. Причем лучшим материалом из электроплавленных огнеупоров являются корундовые огнеупоры типа «корвишит», поскольку электроплавленные цирконсодержащие огнеупоры могут приводить к появлению в готовых изделиях цирконовых свилей – очень тонких линий на поверхности стекла, известных как «кошачьи царапины».

Указанные керамические и плавнелитые огнеупоры используются также для изготовления стеклоформирующих деталей: плунжера, бушинга, затвора питателя, очка, мундштука и т. д. При этом указанные изделия из керамических огнеупоров все в больших масштабах изготавливаются методами шликерного литья и изостатического пресования. По некоторым данным, срок службы силлиманитовых стеклоформирующих деталей составляет около 4–6 месяцев. Те же детали из муллитоцирконового, цирконокорундового и циркономуллитового огнеупоров могут служить 10–15 месяцев.

Все большее применение для производства чаши, плунжера, бушинга, очка, каплеобразующих элементов стеклоформирующих машин находит плавненный кварц, поскольку этот материал в контакте со стекломассой не образует пузырей.

Применение хромосидных огнеупоров в каналах питателей целесообразно лишь при выработке некоторых специальных стекол, например стекловолокна.

2.2.3. Регенераторы

Регенераторы используются для утилизации тепла отходящих от печи дымовых газов. Они представляют собой теплообменники периодического действия. Их работа основана на периодической аккумуляции тепла отходящих газов с последующей отдачей его нагреваемому воздуху.

Принципиальная конструкция вертикального регенератора показана на рис. II, IX. Регенератор представляет собой камеру, заполненную решетчатой насадкой из огнеупорного кирпича или специальными насадочными элементами. В его нижней части находится поднасадочная камера, соединенная коротким каналом с переводным газоздушным каналом. В несекционированных регенераторах с общей камерой короткие каналы образуют единый канал, проходящий внутри камеры. Над поднасадочной камерой находятся поднасадочные арки, на которых размещается насадка. Верхняя часть насадочной камеры

соединена непосредственно с горелкой. Сверху регенеративная камера перекрыта сводом, чаще всего купольным.

В процессе службы огнеупорные материалы, используемые в регенераторах, длительное время подвержены воздействию циклического изменения температур, а также различному химическому воздействию.

Важнейшими видами агрессивного воздействия на верхнюю горячую часть насадки являются высокая температура отходящих дымовых газов, возрастающая при перелетах пламени в случае неудовлетворительной настройки режима сжигания, в особенности в печах с поперечным направлением пламени и узким варочным бассейном; высокое содержание химически активных компонентов, попадающих в отходящие газы из шихты или топлива; чередование окислительной и восстановительной атмосфер.

Нижняя, менее нагретая часть регенератора подвержена следующим агрессивным воздействиям: химической коррозии расплавами щелочных соединений, периодически конденсирующихся на поверхности огнеупорной кладки; коррозии жидкотекучими сульфатными расплавами; высокой механической нагрузке под тяжестью вышерасположенной огнеупорной кладки.

В зависимости от типа стекла, варочной производительности, температур варки и других технологических параметров существует много различных вариантов выбора огнеупорных материалов для насадок регенераторов.

Кладку свода регенератора и расположенных над насадкой участков стен следует выполнять из основных, преимущественно периклазошпинелидных и хромпериклазовых огнеупоров. В печах средней производительности с небольшой продолжительностью кампании следует применять динас. Необходимо лишь предотвратить возможность контактного взаимодействия между динасовыми стенами и основной насадкой (если таковая используется). Однако использование динаса возможно лишь в том случае, если это не приводит к образованию жидкотекучих расплавов, стекание которых может повредить насадку. В стекловаренных печах боросиликатного стекла в своде регенеративной камеры можно применять муллитовые и силлиманитовые огнеупоры.

Для уменьшения потерь тепла в окружающую среду стены камер регенераторов выкладывают из нескольких слоев, внутренний – в один огнеупорный кирпич, средний – в один изоляционный, наружный – в один или полтора керамического кирпича. Для повышения газоплот-

ности стены регенераторов снаружи покрывают специальными обмазками. Внутренний слой, а также разделительный слой регенеративных камер выполняют в основном по аналогии с насадкой, поскольку они служат практически в одних и тех же условиях. Выбор материала для тепловой изоляции стен камеры регенератора зависит от ожидаемых температур наружной поверхности кладки на контакте с изоляцией и от типа изолируемых огнеупорных материалов. Динасовую кладку следует изолировать легковесным динасом и матами из огнеупорных волокон, кладку из основных и алюмосиликатных огнеупоров – легковесным муллитовым и шамотным кирпичом.

Для кладки высокотемпературной верхней части насадки наиболее рационально применять высокообжиговые плотные периклазовые изделия с низким содержанием оксидов железа и силикатных фаз (форстерита и монтичеллита). Все остальные типы огнеупоров в этой зоне насадки характеризуются гораздо меньшим сроком службы. Применение в регенераторах печей опалового и боросиликатных стекол основных огнеупоров не столь эффективно, здесь большей стойкостью характеризуются высокоглиноземистые изделия, в особенности муллитового состава, плотные цирконокорундовые огнеупоры.

В менее нагруженных печах с небольшой продолжительностью кампании из экономических соображений верхние ряды насадок регенераторов до настоящего времени часто выкладывают из динаса.

Для уменьшения износа верхней части насадки, эксплуатируемой при температурах выше 1000°C , ее кладку выполняют из пористых термостойких бадделеитокорундовых огнеупоров, что в особенности целесообразно при длительных сроках службы стекловаренных печей.

Для зоны насадки, эксплуатируемой при температурах $1100\text{--}1200^{\circ}\text{C}$, наиболее целесообразно использовать периклазошпинелидные огнеупоры преимущественно в виде высокообожженных плотных изделий, а также безобжиговые на фосфатных связующих. Менее пригодны для данной зоны хромитопериклазовые, иногда применяют форстеритовые изделия. Важно учесть, что для длительной службы в этой зоне насадки огнеупоры должны характеризоваться высоким показателем термостойкости и в особенности устойчивости к агрессивному воздействию SO_2 и SO_3 .

Для зон насадки, эксплуатируемых при температурах ниже 800°C , применяют материалы с повышенным содержанием Al_2O_3 (не менее 45%), в частности высокоглиноземистые, муллитовые и корундовые.

Возможно использование высококачественного шамотного кирпича. Для уменьшения контактного взаимодействия между алюмосиликатными и основными огнеупорами выполняют промежуточный ряд насадки из хромитового огнеупора, либо между ними прокладывают тонкий слой нейтрального мертеля на основе хромитовой руды.

Ниже приведена рациональная раскладка огнеупоров в регенераторах ваннных печей листового и тарного стекла:

в зоне варки, включая зону максимальных температур, необходимо применять следующие огнеупоры: в верхних 4–5 рядах насадки – магнезитовый или форстеритовый кирпич, в средней части – магнезитохромитовый или форстеритовый кирпич, в нижних 4–5 рядах – высокоглиноземистый кирпич; для свода регенеративной камеры и разделительных стен на $2/3$ высоты – магнезитовый или форстеритовый кирпич, в нижнем участке ($1/3$ высоты) – высокоглиноземистый кирпич. Между основными и высокоглиноземистыми огнеупорами необходимо предусмотреть 1–2 ряда нейтрального хромомагнезитового кирпича;

в зоне освещения (последние пары горелок) для свода регенеративной камеры, разделительных стен и верхней части насадки ($1/3$ высоты) – магнезитохромитовый или форстеритовый кирпич, для нижней части насадки и разделительных стен (на $2/3$ высоты) – высокоглиноземистый кирпич. В отдельных случаях свод и разделительные стены регенеративной камеры могут быть выполнены из динаса. Рациональная раскладка огнеупоров насадки регенератора показана на рис. IX.

В последние годы в качестве элементов насадки регенераторов успешно применяют фасонные огнеупорные изделия (крестообразные, чашечного типа и др.). Насадки из данных элементов, выполняемых из указанных выше огнеупоров, имеют большую удельную поверхность и площадь проходного сечения для газового потока (60% против 45–55% у обычных насадок), высокую устойчивость к термическому удару и химическому воздействию.

2.2.4. Керамические рекуператоры

Рекуператоры представляют собой теплообменники непрерывного действия и используются для утилизации тепла отходящих газов. Керамические рекуператоры, применяемые в стекловаренных печах, работают в противотоке и подогревают воздух до 1000°C . Тепло отходящих газов передается движущемуся в противоположном направлении воздуху через керамическую стенку. Благодаря непрерывному харак-

теру работы в рекуператоре устанавливается состояние равновесия, нарушаемое лишь при изменении соотношения газ – воздух.

Керамический рекуператор состоит из отдельных элементов прямоугольного, круглого либо шестиугольного поперечного сечения, соединенных между собой муфтами или специальными вкладышами в единую систему. Такие системы труб внутри рекуперативной камеры объединены в одно- либо многопроходные рекуператоры.

На рис. X приведен керамический рекуператор, в котором дымовые газы двигаются сверху вниз внутри трубчатых элементов, а подогреваемый воздух омывает эти элементы. Трубчатые элементы соединяются между собой специальными вкладышами и кольцами для образования каналов, по которым должен перемещаться воздух (рис. XI). При кладке керамических рекуператоров особое внимание уделяется уплотнению стыков элементов с целью уменьшения подсоса воздуха к дымовым газам. Плотное примыкание рекуперативных элементов достигается шлифованием торцовых граней элементов и вкладышей после обжига и использованием специальных замазок (мертелей).

На эффективность и срок службы рекуператора в значительной степени влияет оптимальная конфигурация элементов, степень обработки их поверхности и характер текстуры материала. Квасистабильное снижение температуры по длине труб и от горячей к холодной поверхности позволяет использовать для изготовления элементов огнеупоры с низкой термостойкостью. Наиболее пригодными являются тонкостенные элементы из огнеупоров с высокой теплопроводностью. Самыми распространенными огнеупорами для элементов горячей зоны являются силлиманитовые и муллитовые материалы, для холодной зоны – высококачественный шамот. Шамотные рекуперативные элементы применяются при температуре стенки менее 1000°C, высокоглиноземистые и карборундовые – при температуре выше 1000°C. Карборундовые материалы обладают высокой теплопроводностью и хорошей термической стойкостью, однако сильно разъедаются шихтовой пылью, уносимой из печи отходящими дымовыми газами.

Повышение эффективности и срока службы рекуператоров может быть достигнуто при применении насадочных элементов из периклазового и особенно форстеритового огнеупора на алюмосиликатной связке.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОГНЕУПОРНЫХ И ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ КЛАДКИ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Таблица П1.1

Свойства огнеупорных изделий

Тип	Группа, марка, ГОСТ	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огп}$, °С	Температура деформации под нагрузкой $t_{нр}$, °С	Тепло- проводность λ , Вт/(м·К)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$, МПа (при температуре)			Коэффициент теп- лового излучения ϵ (при температуре)	Температурный коэффициент линей- ного расширения α , 10 ⁶ 1/К	Модуль упругости Юнга E , 10 ⁵ МПа
							сжатия	растяжения	изгиба			
Кремнезе- мистые	Кварцевый брус (ГОСТ 9800)	2090–2200	1650	1280–1500	$1,07 + 1,61 \times 10^{-5}t + 1,07 \times 10^{-6}t^2$ (0–1200°С)	$0,935 + 1,28 \times 10^{-6}T + 24\,200 / T^2$ (≤1700°С)	280–350	45–60	23–25	$0,9 - 45 \cdot 10^{-5}t$ (300–1300°С)	0,4–0,6	0,7–1,1
	Динасовые (ГОСТ 3910, ГОСТ 4157)	1840–1970	1690–1720	1640–1660	$1,23 + 70 \times 10^{-5}t$ (200–1600°С)	$1,04 + 70 \times 10^{-6}T + 30\,000 / T^2$ (≤1700°С)	15–40	9,1–6,3 (20– 1500°С)	0,7 (1400°С)	$0,82 - 15 \times 10^{-5}t$ (400–1500°С)	16–20	0,5–1,6
Алюмоси- ликатные	Полукислые ПА, ПБ, ПВ (ГОСТ 390)	1800–1950	1610–1730	1320–1450	$0,78 + 36,6 \times 10^{-5}t$ (200–1450°С)	$1,03 + 85 \cdot 10^{-6} \times T + 30\,500 / T^2$ (≤1700°С)	12–45	4,5	7	$0,95 - 34 \cdot 10^{-5}t$ (0–1700°С)	7–9	0,6–1,3
	Шамотные ША, ШБ, ШВ (ГОСТ 390)	1830–1980	1580–1750	1300–1400	$0,84 + 58 \times 10^{-5}t$	$1,03 + 88 \times 10^{-6}T + 30\,100 / T^2$ (20–1700°С)	15–50	2–8	5–14	$0,95 - 24 \cdot 10^{-5}t$ (≤2000°С)	2,5–8,0	0,7–1,4

Тип	Группа, марка, ГОСТ	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огп}$, °С	Температура деформации под нагрузкой $t_{д,р}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$, МПа (при температуре)			Коэффициент теплового излучения ε (при температуре)	Температурный коэффициент линейного расширения α , 10 ⁶ 1/К	Модуль упругости Юнга E , 10 ⁵ МПа
							сжатия	растяжения	изгиба			
То же	Муллито-кремнеземистые (ГОСТ 24704)	2150–2320	1750–1830	1420–1590	$1,78 + 25,6 \times 10^{-5} t$	$1,04 + 87 \times 10^{-6} T + 29\,000 / T^2$ (20–1700°C)	32–150	20–33	60–80	$0,71 - 21 \cdot 10^{-5} t$	5–7	1,0–1,1
	Муллитовые (ГОСТ 10381)	2340–2520	1800–1850	1510–1600	$1,12 + 44,4 \times 10^{-5} t$ (200–1650°C)	$1,08 + 70 \times 10^{-6} T + 32\,000 / T^2$ (20–1700°C)	60–300	20–45	50–70	$0,7 - 16 \cdot 10^{-5} t$ (400–1400°C)	4,6–5,8	1,2–1,4
	Муллито-корундовые (ГОСТ 24704)	2550–2750	1800–2000	1620–1650	$2,79 - 70,8 \times 10^{-5} t + 25,4 \cdot 10^{-8} t^2$ (200–1700°C)	$1,1 + 70 \times 10^{-6} T + 33\,000 / T^2$ (20–1700°C)	30–80	12–18	12–18	$0,7 - 16 \cdot 10^{-5} t$ (400–1400°C)	4,8–7,5	1,4–3,1
Глиноземистые	Корундовые (ГОСТ 24704)	2890–3120	1950–2000	1750–1800	$4,78 - 365 \times 10^{-5} t + 138 \cdot 10^{-8} t^2$ (200–1700°C)	$1,12 + 365 \times 10^{-5} T + 34\,300 / T^2$ (20–1700°C)	60–120	18–25	15–40	$0,7 - 23 \cdot 10^{-5} t$ (200–1600°C)	6–8	1,0–1,2
Высокомагнезиальные	Периклазовые (ГОСТ 4689)	2600–2800	2200–2400	1500–1700	$4,7 - 170 \times 10^{-5} t$ (200–1500°C)	$1,05 + 29 \times 10^{-5} t$	45–65	5–12	14–18	$0,72 - 20 \cdot 10^{-5} t$	11–14	0,6–0,8

Продолжение табл. П1.1

Тип	Группа, марка, ГОСТ	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огп}$, °С	Температура деформации под нагрузкой $t_{нр}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$, МПа (при температуре)			Коэффициент теплового излучения ε (при температуре)	Температурный коэффициент линейного расширения α , 10^{-5} 1/К	Модуль упругости Юнга E , 10^{-5} МПа
							сжатия	растяжения	изгиба			
Магнезиально-силикатные	Форстеритовые (ГОСТ 14832)	2620–2820	1830–1920	1560–1680	$4,09 - 358 \times 10^{-5} t + 142 \times 10^{-8} t^2$ (100–1500°С)	$0,89 + 41,9 \times 10^{-5} t$	25–120	–	–	–	10,7	–
Магнезиально-шпинелидные	Периклазохромитовые (ГОСТ 10888)	2950–3040	> 2000	1500–1690	$2,58 - 70 \times 10^{-5} t$	$0,67 + 4,8 \times 10^{-4} T + 28\,300 / T^2$	40–65	4–8	10–20	$0,93 - 11 \times 10^{-5} t$ (100–1500°С)	9–12	0,2–0,3
	Хромитопериклазовые (ГОСТ 5381)	2900–3150	1920–2000	1450–1530	$2,04 - 38,4 \times 10^{-5} t$	$1,08 + 7 \cdot 10^{-5} t$	30–70	3–8	6–20	0,85 – 0,9 (≤1700°С)	8,5–10,0	0,4
	Хромитовые	3000–3200	1850–2050	1400–1600	$1,28 + 41 \times 10^{-5} t$	$0,84 + 29 \cdot 10^{-5} t$	24–49	–	–	$0,9 - 55 \times 10^{-5} t$	8,0–10,7	–
	Периклазошпинелидные	3030–3330	> 2000	1560–1630	$3,14 - 64,4 \times 10^{-5} t$ (200–1800°С)	$1,17 + 54 \cdot 10^{-6} \times T + 28\,000 / T^2$ (20–1700°С)	60–150	–	–	$0,85 - 48 \times 10^{-5} t$	11–13	0,2

Тип	Группа, марка, ГОСТ	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огн}$, °С	Температура деформации под нагрузкой $t_{н.р.}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$, МПа (при температуре)			Коэффициент теплового излучения ϵ (при температуре)	Температурный коэффициент линейного расширения α , 10 ⁶ 1/К	Модуль упругости Юнга E , 10 ⁵ МПа
							сжатия	растяжения	изгиба			
Периклазоизвестковые	Доломитовые	2640–2670	1770–1900	1540–1560	$1,83 + 210 \times 10^{-5} t - 221 \cdot 10^{-8} t^2$ (200–1800°С)	$1,07 + 47 \times 10^{-6} T + 21\,900 / T^2$ (20–1700°С)	25–160	–	10–60	$0,46 - 10 \times 10^{-5} t$	15	–
Хромистые	Хромоксидные	4400–4500	>2000	1750–1850	$4,07 - 71,5 \times 10^{-5} t$ ($\geq 500^\circ\text{C}$)	$0,78 + 0,7 \times 10^{-5} t$	139–308	–	85–135 (20°С) 15–20 (1200°С)	$0,86 - 13,3 \times 10^{-5} t$	7,5–8,5	0,2–0,4
Цирконистые	Оксициркониевые (ГОСТ 21907)	5100–5630	2500	1650–1700	$1,3 + 64 \times 10^{-5} t$	$0,54 + 13 \times 10^{-5} t$	50–200	3–18	10–70	$0,67 - 16,7 \times 10^{-5} t$	5,9–8,7	1,5
	Бакор-33 (ГОСТ 23053)	3400–3500	1810	1740	$1,63 + 2,91 \times 10^{-5} t$ (0–1800°С)	$0,65 + 23,3 \times 10^{-5} t$ (200–1700°С)	300–400	25–40	30–50	–	5–7	–
Углеродистые	Графитовые (ГОСТ 17022)	1600–1650	>2000	>1900	$162,8 - 4070 \times 10^{-5} t$ (0–1800°С)	$0,89 + 41,9 \times 10^{-5} t$	20–30	–	–	$0,57 + 9,5 \times 10^{-5} T$ (1700°С)	2,6–6,7	0,6–0,9

Окончание табл. П1.1

Тип	Группа, марка, ГОСТ	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огнь}$, °С	Температура деформации под нагрузкой $t_{н.р.}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$, МПа (при температуре)			Коэффициент теплового излучения ε (при температуре)	Температурный коэффициент линейного расширения α , 10^6 1/К	Модуль упругости Юнга E , 10^5 МПа
							сжатия	растяжения	изгиба			
То же	Угольные	1350–1600	2500	>1900	$23,2 + 3500 \times 10^{-5} t$ (0–1000°С)	$1,42 + 19 \times 10^{-5} t$ ($\geq 400^\circ\text{C}$)	25–55	–	–	$0,963 - 3 \times 10^{-5} t$	3,7–5,8	1,0–1,5
	Графито-шамотные	1650–2000	1690–1730	1380–1490	$3,5 + 1,27 \times 10^{-3} t$	$1,16 + 33 \times 10^{-5} t$	35–50	–	–	$0,96 - 18 \times 10^{-5} T$	2,8–3,8	–
Карбидокремниевые	Карбидокремниевые (ГОСТ 10153)	2350–2540	>2000	1700–1800	$43 - 45 \times 10^{-3} t + 17 \cdot 10^{-6} t^2$ (200–1600°С)	$0,963 + 14,6 \times 10^{-5} t$	50–120	376–348 (20–800°С)	190 (1320°С)	$0,22 + 10,9 \times 10^{-5} T$ (900–2700°С)	4,5–5,2	1,5–2,2

Примечание. Здесь и далее в таблицах температура t , °С; T , К.

Свойства жестких легковесных огнеупорных изделий (ГОСТ 5040)

Тип	Марка	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупор- ность $t_{огн}$, °С	Теплопро- водность λ , Вт/(м·К)	Средняя удельная теплоем- кость c , кДж/(кг·К) (при тем- пературе)	Предельная рабочая тем- пература $t_{раб}^{max}$, °С	Допустимое напряжение сжатия $\sigma_{доп}^{сж}$, МПа (при температуре)	Температурный коэффициент линейного рас- ширения α , 10 ⁶ 1/К
Динасовые	ДЛ-1,2	1120–1200	1690–1700	$0,58 + 43,6 \cdot 10^{-5} t$	1,19 ($\leq 1400^\circ\text{C}$)	1550	1,5 ($\leq 1500^\circ\text{C}$)	4,0–8,3 (100–1500 $^\circ\text{C}$)
Шамотные и полукислые	ШЛА-1,3	1250–1300	1760	$0,47 + 16,3 \cdot 10^{-5} t$	1,16 ($\leq 1400^\circ\text{C}$)	1400	6,0–9,0 (20–1100 $^\circ\text{C}$)	5,5 ($\leq 1000^\circ\text{C}$)
	ШКЛ-1,3	1240–1320	1740	$0,582 + 16,3 \cdot 10^{-5} t$	1,22 ($\leq 1400^\circ\text{C}$)	1400	3,5–4,0 (20–1100 $^\circ\text{C}$)	4,6–7,3 (20–1000 $^\circ\text{C}$)
	ШЛ-1,3	1260–1300	1660–1730	$0,47 + 16,3 \cdot 10^{-5} t$	1,16–1,21 (20–1300 $^\circ\text{C}$)	1300	5,4–8,0 (20–1100 $^\circ\text{C}$)	6,3–7,1 (20–1000 $^\circ\text{C}$)
	ШКЛ-1,0	1000	1680–1710	$0,33 + 35 \cdot 10^{-5} t$	1,17 (20–1300 $^\circ\text{C}$)	1400	2,7–3,2 (20–1200 $^\circ\text{C}$)	5,7 (20–1000 $^\circ\text{C}$)
	ШЛ-1,0	960–1000	1680–1710	$0,314 + 35 \cdot 10^{-5} t$	1,17 (20–1300 $^\circ\text{C}$)	1300	2,4–0,8 (20–1100 $^\circ\text{C}$)	5,5 (100–1300 $^\circ\text{C}$)
	ШЛ-0,9	800–900	1680–1740	$0,291 + 23,3 \cdot 10^{-5} t$	1,17 (20–1300 $^\circ\text{C}$)	1270	4,0–9,7 (20–1200 $^\circ\text{C}$)	5,8 (100–1300 $^\circ\text{C}$)
	ШТЛ-0,6	540–600	1650	$0,1 + 14,5 \cdot 10^{-5} t$	1,17 ($\leq 1200^\circ\text{C}$)	1150	2,7–3,2 (20–1200 $^\circ\text{C}$)	4,8–5,5 (100–1300 $^\circ\text{C}$)
	ШЛ-0,4	300–400	1680–1730	$0,058 + 17,4 \cdot 10^{-5} t$	1,17 ($\leq 1200^\circ\text{C}$)	1150	1,0–2,3 (20–1000 $^\circ\text{C}$)	6,0 (100–1200 $^\circ\text{C}$)
Каолиновые	КЛ-1,3	1300	1720–1760	$0,582 + 16,3 \cdot 10^{-5} t$	1,18 ($\leq 1400^\circ\text{C}$)	1400	7,0–10,0 (20–1200 $^\circ\text{C}$)	5,7 (100–1300 $^\circ\text{C}$)

Окончание табл. П1.2

Тип	Марка	Плотность ρ , кг/м ³	Огне- упорность $t_{огн}$, °С	Теплопро- водность λ , Вт/(м·К)	Средняя удельная теплоем- кость c , кДж/(кг·К) (при темпе- ратуре)	Предельная рабочая температура $t_{раб}^{max}$, °С	Допустимое напряжение сжатия $\sigma_{доп}^{сж}$, МПа (при температуре)	Температурный коэффициент линейного рас- ширения α , 10 ⁶ 1/К
Муллито- кремне- земистые	МКРЛ-1,0	950–1000	1850–1830	0,6 (350°С); 0,65 (600°С)	$1,064 + 87 \times 10^{-6} t$ ($\leq 1500^\circ\text{C}$)	1450	–	–
	МКРЛ-0,8	750–800	1780–1820	0,35 (350°С); 0,4 (600°С)	$1,064 + 87 \times 10^{-6} t$ ($\leq 1500^\circ\text{C}$)	1250	–	–
	МКРЛ-0,5	450–500	1750–1830	0,25 (350°С); 0,3 (600°С)	$1,064 + 87 \times 10^{-6} t$ ($\leq 1500^\circ\text{C}$)	1300	–	–
Муллитовые	МЛЛ-1,3	1240–1260	1760–1800	0,5 (350°С); 0,6 (600°С)	$0,84 + 25,1 \times 10^{-5} t$ ($\leq 1500^\circ\text{C}$)	1550	2,8–3,8 (20–1200°С)	–
Корундовые	Кор Л-1,8	1720–1800	>1900	0,9 ($\leq 600^\circ\text{C}$)	$1,14 + 65 \times 10^{-6} t$ ($\leq 1550^\circ\text{C}$)	1700–1750	7,8–2,9 (20–600°С)	7–10 (100–1600°С)
	Кор Л-1,3	1250–1390	>1900	0,8 ($\leq 600^\circ\text{C}$)	$1,14 + 65 \times 10^{-6} t$ ($\leq 1550^\circ\text{C}$)	1650–1700	4,7–1,4 (20–500°С)	6–9 (100–1500°С)
	Кор Л-1,1	1050–1100	>1900	0,55 ($\leq 600^\circ\text{C}$)	$1,14 + 65 \times 10^{-6} t$ ($\leq 1550^\circ\text{C}$)	1600–1650	2,5	5–7 (100–1400°С)

Таблица П1.3

Свойства огнеупорных волокнистых легковесов и зернистых засыпок

Наименование	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{\text{огн}}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) (при температуре)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Пред. рабоч. темп-ра $t_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °С
Волокнистые легковесы (ГОСТ 23619)					
Каолиновая вата 2–8 мкм	200	1760	0,116 (100–600°С)	1,22 (≤1400°С)	1100
Маты каолиновые:					
МТК	150	–	$0,06 + 16 \cdot 10^{-5}t + 7 \cdot 10^{-8}t^2$	1,22 (≤1400°С)	1100
МТКУ	300	–	$0,04 + 25 \cdot 10^{-5}t$ (≤1000°С)	1,22 (≤1400°С)	1100
Плиты из каолиновой ваты	200	–	$0,14 + 102 \cdot 10^{-12}T$ (≤1200°С)	1,22 (≤1400°С)	1100
	300	–	$0,13 + 86,7 \cdot 10^{-12}T$ (≤1200°С)	1,22 (≤1400°С)	1100
Картон и бумага из каолиновой ваты толщиной 0,6–4 мкм	300–400	1840	$0,045 + 3,43 \times 10^{-5}T + 93 \cdot 10^{-12}T^2$	1,22 (≤1400°С)	1150
Муллитокремнеземистые волокна, вата (4 мкм):					
МКРР-130 (≤4 мкм)	130	1750	–	1,05–1,10 (100–1000°С)	1150
МКРР-150	150	1750	–	1,05–1,10 (100–1000°С)	1300
Плиты муллитокремнеземистые:					
МКРВ-350	350	–	$0,41 \cdot 10^{-6}t^2$ (600–1100°С)	1,05–1,10 (100–1000°С)	1150
МКРВ-500	500	–			
Муллитокремнеземистый рулонный материал МКРР-130	130	–	$0,043 + 182 \cdot 10^{-5}t - 6,22 \cdot 10^{-8}t^2 + 218 \cdot 10^{-12}t^3$ (≤1150°С)	1,05–1,10 (100–1000°С)	1150
Кварцевое волокно 6–8 мкм	–	1720	–	$0,88 + 17,9 \times 10^{-5}t$ (≤1200°С)	1100–1200

Окончание табл. П1.3

Наименование	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{\text{огн}}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) (при температуре)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Пред. рабоч. температура $t_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °С
Ткань из кварцевого волокна толщиной 0,4 мм	0,34 кг/м ²	1720	$0,065 + 22,5 \cdot 10^{-5}t$ ($\leq 1100^\circ\text{C}$)	$0,88 + 17,9 \cdot 10^{-5}t$ ($\leq 1200^\circ\text{C}$)	1100–1200
Холсты кварцевого волокна толщиной 0,03–0,08 мм	0,015 кг/м ²	1720	$0,049 + 5,1 \cdot 10^{-5}t$ ($\leq 1100^\circ\text{C}$)	$0,88 + 17,9 \cdot 10^{-5}t$ ($\leq 1200^\circ\text{C}$)	1100–1200
Графитированный углеродистый войлок из волокон 10–20 мкм	40–120	3000	$110 \cdot 10^{-5}t - 0,7$ (1000–2000°С)	$0,8 + 140 \cdot 10^{-5}t$	2200
Зернистые засыпки					
Шамотный легковес 8–20 мм	Насыпная масса 330 кг/м ³	1600–1700	$0,227 + 602 \cdot 10^{-12}T^2$	1,16–1,21 ($\leq 1400^\circ\text{C}$)	1300–1400
Корунд, частицы, мм:					
3,2	1800	2000	$0,13 + 69,6 \cdot 10^{-5}t$ (200–1000°С)	$1,12 + 65 \cdot 10^{-6}T + 34\,300 / T^2$ (20–1700°С)	1550
2,2	1800	2000	$0,14 + 58,5 \cdot 10^{-5}t$ (200–1000°С)	$1,12 + 65 \cdot 10^{-6}T + 34\,300 / T^2$ (20–1700°С)	1550
1,7	1800	2000	$0,21 + 49,1 \cdot 10^{-5}t$ (200–1000°С)	$1,12 + 65 \cdot 10^{-6}T + 34\,300 / T^2$ (20–1700°С)	1550
1,0	1800	2000	$0,23 + 36,8 \cdot 10^{-5}t$ (200–1000°С)	$1,12 + 65 \cdot 10^{-6}T + 34\,300 / T^2$ (20–1700°С)	1550
Бадделеит, частицы, мм:					
0,5	2500	2500	$0,24 + 1,1 \cdot 10^{-4}T + 40 \cdot 10^{-12}T^2$ (0–1400°С)	$0,54 + 13 \cdot 10^{-5}t$	2000–2300
0,5–2,0	2500	2500	$0,24 + 10^{-4}T + 150 \cdot 10^{-12}T^2$ (0–1400°С)	$0,54 + 13 \cdot 10^{-5}t$	2000–2300
2,0–8,0	2500	2500	$0,24 + 10^{-4}T + 260 \cdot 10^{-12}T^2$ (0–1400°С)	$0,54 + 13 \cdot 10^{-5}t$	2000–2300

Свойства огнеупорных бетонов

Тип	Группа, марка	Состав, %	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огн}$, °С	Температура начала деформации под нагрузкой $t_{н,р}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) (при температуре)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$, МПа (при температуре, °С)			Модуль упругости Юнга E , 10^5 МПа (при температуре)	Температурный коэффициент линейного расширения α , 10^{-6} 1/К (при температуре)	Коэффициент теплового излучения ϵ (при температуре)	
								на сжатие	на изгиб	на растяжение				
Кремнеземистые	Динасовый ДК-35П-121	Динас – 71, цемент кварцитовый – 18, КФН – 1, ЖС – 10	1730–1760	1650–1670	1560–1570	$1,21 - 2,4 \times 10^{-3} t + 3,7 \times 10^{-6} t^2 - 1,6 \cdot 10^{-9} t^3$ (200–1300°С)	$0,67 + 54,4 \times 10^{-5} t$ (200–1300°С)	12–22 (110–1350)	1,9–0,3 (110–1350)	1,1–0,1 (110–800)	1650	3–5 (20–1400°С)	6,9 (400–1150°С)	0,86 – $5,7 \cdot 10^{-5} T$ (≤ 1400 К)
	Шамотный ШБВ-711	Шамот – 71, цемент глиноземистый – 18, вода – 11	1860–1900	1600–1650	1270–1290	$0,75 + 4 \times 10^{-5} t$ (300–1300°С)	$0,89 + 15,4 \times 10^{-5} t$ (500–1300°С)	11,4–1,5 (110–1350)	6,2–0,4 (110–1350)	1,1–0,1 (110–1200)	1350	13,8–11,1 (100–1300°С)	10,6 (200–1400°С)	0,77 – $15 \cdot 10^{-5} T$ (≤ 1400 К)
	Муллитовый МЛБП-441	Киенитовый концентрат – 64, цементы – 26	2190–2330	1850–1900	1340–1450	$1,2 - 8,46 \times 10^{-5} t$ (500–1300°С)	$0,9 + 15,4 \times 10^{-5} t$ (500–1300°С)	21,0–2,7 (110–1350)	8,9–0,6 (110–1350)	2,8–0,6 (400–1200)	1600	23,0–37,6 (100–1300°С)	5,5 (20–1300°С)	0,76 – $17,5 \times 10^{-5} T$ (≤ 1400 К)
Глиноземистые	Корундовый КБП-431	Корунд – 70, цементы – 25, ГФС – 5	2720–2980	2000	1590–1670	$1,7 - 10 \times 10^{-5} t$ (≤ 1400 °С)	$0,95 + 16,9 \times 10^{-5} t$ (500–1300°С)	24,7–1,5 (110–1350)	5,9–0,2 (110–1350)	0,7–0,3 (110–1350)	1800	19–42 (100–1400°С)	8,2 (20–1400°С)	–

Окончание табл. П1.4

Тип	Группа, марка	Состав, %	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огн}$, °С	Температура начала деформации под нагрузкой $t_{нр}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) (при температуре)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимые напряжения $\sigma_{доп}$, МПа (при температуре, °С)				Модуль упругости Юнга E , 10^{-5} МПа (при температуре)	Температурный коэффициент линейного расширения α , 10^{-6} 1/К (при температуре)	Коэффициент теплового излучения ϵ (при температуре)
								на сжатие	на изгиб	на растяжение				
То же	Периклазовый ПБЛ-851	Плавленый периклаз – 70, цемент периклазовый – 17, ПФН – 13	2900–3100	2000	1580	$4,8 - 156 \times 10^{-5} t$	$1,1 + 30 \times 10^{-5} t$ ($\leq 1500^\circ\text{C}$)	55–70 (1300)	–	–	1750	–	16,5 (20–1400°C)	$0,65 - 4,29 \times 10^{-5} T$ (800–1400 К)
Магнезиально-шпинелидные	Хромитопериклазовый ХПП-851	Хромитопериклаз – 30, хромит – 35, цемент периклазовый – 20, ПФН – 15	2600–2800	1900	1490–1520			16,8–14,0 (110–120)	1,9–0,7 (110–1200)	–	1800	7,6–12,3 (300–1500°C)	14,2 (20–1400°C)	0,805–0,80 (800–1600 К)
	Хромитовый ХБП-851	Хромит – 80, электрокорунд – 10, ПФН – 10	2800–2900	1750	1350–1400			25–8 (30–1400)	–	–	1500	–	6,5 (900°C)	$0,85 - 6,9 \times 10^{-5} T$ (≤ 1600 К)
	Форстеритовый ФБП-851	Дунит – 70, цемент периклазовый – 20, ПФН – 10	2600–2760	1770	1520			13,7–12,7 (110–1200)	3,2–0,4 (110–1200)	0,9–0,6 (110–800)	1650	16,0–17,6	15,5 (20–1400°C)	–

Примечание. КФН – кремнефтористый натрий Na_2SiF_6 ; ЖС – жидкое стекло (ГОСТ 13078); ГФС – глинисто-фосфатная связка (смесь огнеупорной глины 18%, ОФК 20%, воды 62%); ПФН – полифосфат натрия $(\text{NaPO}_3)_n$ (ГОСТ 20291); ОФК – ортофосфорная кислота термическая H_3PO_4 (ГОСТ 10678); электрокорунд (ГОСТ 3647). Температура t , °С; T , К.

Свойства огнеупорных покрытий и набивных масс

Тип	Группа	Состав, %	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огн}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) (при температуре)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Предельная рабочая температура t , °С	Допустимое напряжение сжатия $\sigma_{доп}^{сж}$, МПа (при температуре)	Температурный коэффициент линейного расширения α , 10 ⁶ 1/К (при температуре)	Коэффициент теплового излучения ε (при температуре)
Кремнеземистые	Кварцевые	Кварцевый песок – 93, ЖС – 7, вода	1800	1670	$0,65 + 46 \times 10^{-5}t$ ($\leq 1500^\circ\text{C}$)	$0,67 + 54,4 \times 10^{-5}t$ (200–1300°C)	1600	28–35 (20°C)	6	$0,86 - 5,7 \cdot 10^{-5}T$ ($\leq 1400^\circ\text{C}$)
Алюмосиликатные	Полукислые	Кварцит – 50, огнеупорная глина – 40, коксик – 10, вода	1700–1800	1580–1680	0,7–1,16 (500°C)	$0,88 + 16,9 \times 10^{-5}t$ (500–1300°C)	1400	8 (1400°C)	6	$0,95 - 34 \cdot 10^{-5}T$ ($\leq 1400^\circ\text{C}$)
	Шамотные	Шамот – 75, огнеупорная глина – 22, ЖС – 3, вода	1600–1700	1580–1680	0,7–0,81 (500°C)	$0,88 + 23 \times 10^{-5}t$	1350	1,5–6,0 (100–1300°C)	5–6	$0,98 - 34 \cdot 10^{-5}T$ ($\leq 1400^\circ\text{C}$)
Магнезиальные	Периклазовые	Магнезит – 86, огнеупорная глина – 7,4, ЖС – 6, КФН – 0,6, вода	2300–2500	>2000	$3,78 - 186 \cdot 10^{-5}t$ ($\leq 1600^\circ\text{C}$)	$1,05 + 29 \times 10^{-5}t$	1700–1800	50–65 (20°C)	10	$0,28 + 20 \cdot 10^{-5}T$ (600–1600°C)
Магнезиально-шпинелидные	Хромитопериклазовые	Бой хроммагнезита – 75, огнеупорная глина – 18, ЖС – 7, вода	2500–3000	>1800	$2,33 - 98 \times 10^{-5}t$ (200–1600°C)	1,08–1,15 ($\leq 1000^\circ\text{C}$)	1650	15–20	6,5 (20–90°C)	–

Окончание табл. П1.5

Тип	Группа	Состав, %	Плотность ρ , кг/м ³	Огнеупорность $t_{огн}$, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) (при температуре)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Пределная рабочая температура t , °С	Допустимое напряжение сжатия $\sigma_{доп}^{сж}$, МПа (при температуре)	Температурный коэффициент линейного расширения α , 10 ⁶ 1/К (при температуре)	Коэффициент теплового излучения ϵ (при температуре)
То же	То же	Хроммагнетит – 85,4, огнеупорная глина – 8, ЖС – 6, КФН – 0,6, вода	2450	>1900	$1,18 + 67,5 \times 10^{-5}t$	1,08–1,15 ($\leq 1000^\circ\text{C}$)	1600	10–14	–	–
			2700	>1900	$1,34 + 52,3 \times 10^{-5}t$	1,08–1,15 ($\leq 1000^\circ\text{C}$)	1650	13–18	–	–
	Периклазошпинелидная обмазка	Периклазошпинель – 75, огнеупорная глина – 18, ЖС – 7, вода	2400–2700	>1800	$1,5 + 58 \times 10^{-5}t$ (200–1600°C)	1,05–1,32 (300–1600°C)	1700	–	–	0,62–0,615 (500–1450°C)
Углеродистые	Хромитовая набивка ПХМ-6	Хромит – 92,5, огнеупорная глина – 3, ЖС – 4, КФН – 0,5, вода	2800–3300	1900	1,28–2,2 (700°C)	$0,84 + 29 \times 10^{-5}t$	1350–1400	12–36 (100–1400°C)	7–8	$0,87 - 6,25 \cdot 10^{-5}T$ ($\leq 1600\text{ K}$)
			Углеродистая набивка	Термоантрацит – 52, кокс – 34, песок – 7, антраценовое масло – 7	1700–1800	>1800	3,5–4,6 (500°C)	$1,42 + 19 \times 10^{-5}t$ ($\geq 400^\circ\text{C}$)	1650	5–8 (1400°C)
Карбидокремниевые	Карбидокремниевая набивка	Карбидокремний – 85, огнеупорная глина – 7, ЖС – 7, КФН – 1, вода	2100	>2000	$2,33 + 210 \times 10^{-5}t$	$0,96 + 14,7 \times 10^{-5}t$	1400–1500	10 (1200°C)	3,5	$0,22 + 0,9 \times 10^{-5}T$ (1200–3000 K)
	То же	То же	2500	>2000	$5,4 + 35 \times 10^{-5}t$	$0,96 + 14,7 \times 10^{-5}t$	1400–1500	20 (1200°C)	4,5 (1200°C)	–

Таблица П1.6

Свойства теплоизоляционных материалов и изделий

Наименование, марка	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) (при температуре)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимая рабочая температура $t_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °С	
Неорганические материалы					
Асбест хризотилковый распушенный (ГОСТ 12871)	150	$0,039 + 18,6 \cdot 10^{-5}t$	0,82–0,85	600	
	400–450	$0,106 + 18,6 \cdot 10^{-5}t$	0,82–0,85	600	
	800	$0,209 + 18,6 \cdot 10^{-5}t$	0,82–0,85	600	
Бумага асбестовая БТ толщиной 0,5–1,0 мм	900	$0,156 + 14 \cdot 10^{-5}t$	0,84	500	
Картон асбестовый толщиной 2–10 мм (ГОСТ 2850)	1000–1300	$0,157 + 14 \cdot 10^{-5}t$	0,84	500	
Ткань асбестовая АТ с хлопком (ГОСТ 6102)	500–600	$0,124 + 22 \cdot 10^{-5}t$	0,83	200	
Ткань асбестовая АСТ со стеклонитью	600	$0,124 + 18 \cdot 10^{-5}t$	0,86	450	
Шнур асбестовый (ГОСТ 1779) диамет- ром 10–55 мм:					
	ШАОН	$550–750$	$0,14 + 23 \cdot 10^{-5}t$	0,85	400
ШАП	250	$0,092 + 19 \cdot 10^{-5}t$	0,85	220	
Асбестовермикулито- вые плиты	250	$0,081 + 23,3 \cdot 10^{-5}t$	0,84	600	
	300	$0,095 + 23,3 \cdot 10^{-5}t$	0,84	600	
	350	$0,095 + 23,3 \cdot 10^{-5}t$	0,84	600	
Вата стеклянная в на- бивке (ГОСТ 4640)	130–170	$0,04 + 35 \cdot 10^{-5}t$	$1,48 + 62,8 \times 10^{-5}t$	450	
Маты из штапельного стекловолокна в ру- лоне (ГОСТ 10499) технических марок:					
	МРТ-35	55	$0,04 + 41 \cdot 10^{-5}t$	0,84 (20°С)	500
	МРТ-50	80	$0,042 + 35 \cdot 10^{-5}t$	0,84 (20°С)	500
Вата минеральная в набивке (ГОСТ 4640) марок:					
	75	120	$0,043 + 29 \cdot 10^{-5}t$	0,92	600
	100	150	$0,046 + 23 \cdot 10^{-5}t$	0,92	600
125	190	$0,053 + 19 \cdot 10^{-5}t$	0,92	600	

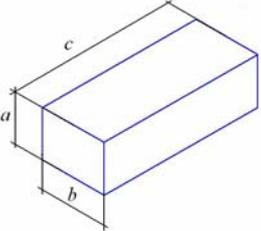
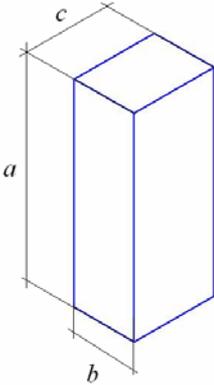
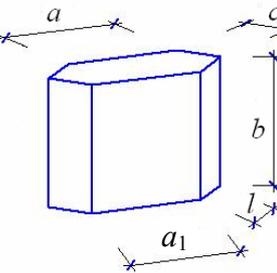
Окончание табл. П1.6

Наименование, марка	Плотность ρ , кг/м ³	Теплопроводность λ , Вт/(м·К) (при температуре)	Средняя удельная теплоемкость c , кДж/(кг·К) (при температуре)	Допустимая рабочая температура $t_{\text{раб}}^{\text{max}}$, °С
Маты прошивные из минеральной ваты ВФ-75 (ГОСТ 21880)	150–200	$0,049 + 20 \cdot 10^{-5}t$	0,92 (20°С)	600
Плиты минераловатные на битумной связке (ГОСТ 10140) марок:				
200	200	0,82 (20°С)	0,92	700
250 жесткие	250	0,87 (20°С)	0,92	700
300 жесткие	300	0,93 (20°С)	0,92	700
Плиты минераловатные на синтетическом свя- зующем (ГОСТ 9573 марок):				
75 мягкие	115	$0,043 + 22,1 \cdot 10^{-5}t$	0,92	400
100 полужесткие	120	$0,0442 + 21 \cdot 10^{-5}t$	0,92	400
125 полужесткие	150	$0,0465 + 19,8 \cdot 10^{-5}t$	0,92	400
Диатомитовые кирпи- чи, сегменты, полуци- линдры (ГОСТ 2694) марок:				
Д-500	421–525	$0,107 + 23 \cdot 10^{-5}t$	0,84 (20°С)	900
Д-600	526–630	$0,128 + 23 \cdot 10^{-5}t$	0,84 (20°С)	900
Пенодиатомитовые из- делия (ГОСТ 2694) ма- рок:				
ПД-350	365	$0,058 + 18,6 \cdot 10^{-5}t$	0,84 (20°С)	900
ПД-400	365–420	$0,078 + 22 \cdot 10^{-5}t$	0,84 (20°С)	900
Диатомитовая обож- женная крошка в за- сыпке	500 600	$0,0117 + 17,4 \cdot 10^{-5}t$ $0,012 + 23,3 \cdot 10^{-5}t$	0,84 (20°С) 0,84 (20°С)	900 900
Перлит вспученный (ГОСТ 10832)	150	$0,054 + 18,6 \cdot 10^{-5}t$	–	900
Перлитокерамические изделия (ГОСТ 21521) марок:				
250	250	$0,071 + 18 \cdot 10^{-5}t$	–	900
300	300	$0,0761 + 18 \cdot 10^{-5}t$	–	900

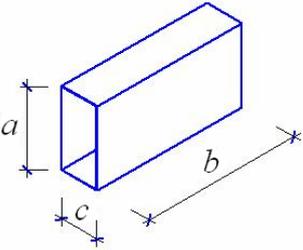
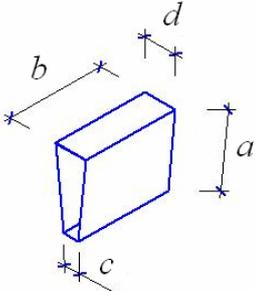
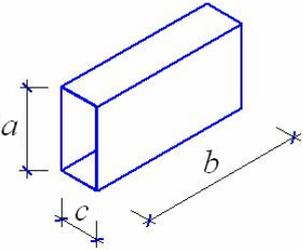
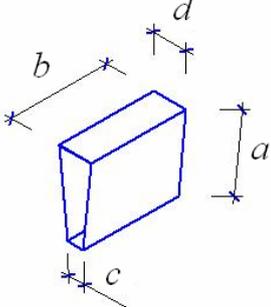
2. ФОРМА И РАЗМЕРЫ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Таблица П2.1

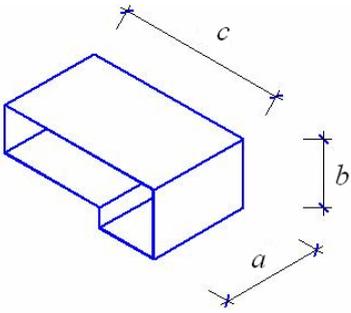
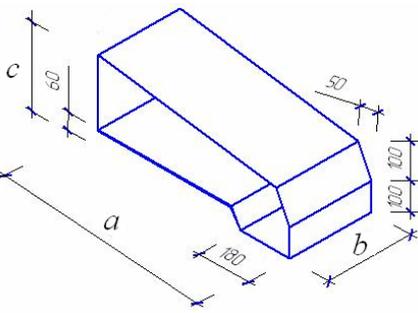
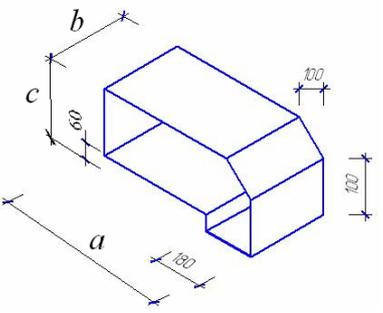
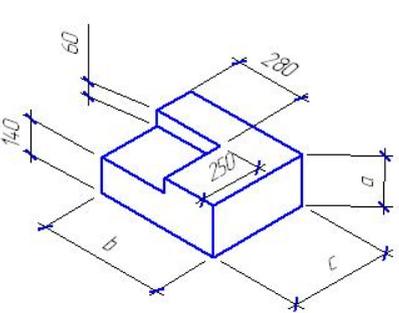
Техническая характеристика огнеупоров

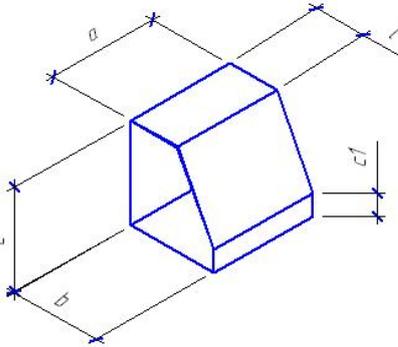
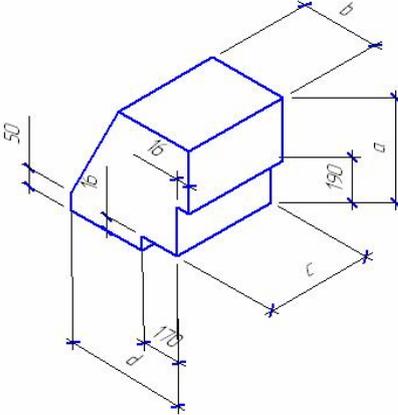
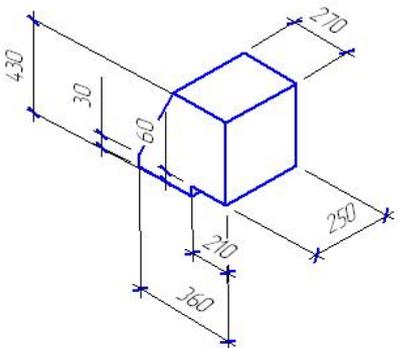
Изделие, применение	Форма (эскиз)	Размеры, мм	Марка изделия																																																						
1. Брус донный		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>a</i></td> <td style="text-align: center;"><i>b</i></td> <td style="text-align: center;"><i>c</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">300</td> <td style="text-align: center;">400</td> <td style="text-align: center;">1000</td> </tr> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	300	400	1000	ШСУ-33, ШСУ-40, ШСП-40, ШСКП-40, МЛСУ, МЛСП																																																
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>																																																							
300	400	1000																																																							
2. Брус стеновой		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>a</i></td> <td style="text-align: center;"><i>b</i></td> <td style="text-align: center;"><i>c</i></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">300</td> <td style="text-align: center;">300</td> <td style="text-align: center;">300</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">350</td> <td style="text-align: center;">300 (400)</td> <td style="text-align: center;">250</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">400</td> <td style="text-align: center;">300 (400)</td> <td style="text-align: center;">250 (300)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">450</td> <td style="text-align: center;">200</td> <td style="text-align: center;">250</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">500</td> <td style="text-align: center;">200–400</td> <td style="text-align: center;">250 (300)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">600</td> <td style="text-align: center;">300 (400)</td> <td style="text-align: center;">250</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">700</td> <td style="text-align: center;">300–500</td> <td style="text-align: center;">300</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">800</td> <td style="text-align: center;">300–600</td> <td style="text-align: center;">250 (300)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">900</td> <td style="text-align: center;">400 (500)</td> <td style="text-align: center;">250</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">900</td> <td style="text-align: center;">250 (300)</td> <td style="text-align: center;">300</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1000</td> <td style="text-align: center;">300</td> <td style="text-align: center;">200 (250, 300)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1000</td> <td style="text-align: center;">400</td> <td style="text-align: center;">250 (300)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1100</td> <td style="text-align: center;">300</td> <td style="text-align: center;">300 (400)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1200</td> <td style="text-align: center;">400</td> <td style="text-align: center;">250 (300)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1200</td> <td style="text-align: center;">300</td> <td style="text-align: center;">250 (300)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1200</td> <td style="text-align: center;">500</td> <td style="text-align: center;">300</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">1400</td> <td style="text-align: center;">300 (400)</td> <td style="text-align: center;">200 (300)</td> </tr> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	300	300	300	350	300 (400)	250	400	300 (400)	250 (300)	450	200	250	500	200–400	250 (300)	600	300 (400)	250	700	300–500	300	800	300–600	250 (300)	900	400 (500)	250	900	250 (300)	300	1000	300	200 (250, 300)	1000	400	250 (300)	1100	300	300 (400)	1200	400	250 (300)	1200	300	250 (300)	1200	500	300	1400	300 (400)	200 (300)	БК-33, БК-37, БК-41, КОР-95, КЭЛ-93, КЭЛ-95,
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>																																																							
300	300	300																																																							
350	300 (400)	250																																																							
400	300 (400)	250 (300)																																																							
450	200	250																																																							
500	200–400	250 (300)																																																							
600	300 (400)	250																																																							
700	300–500	300																																																							
800	300–600	250 (300)																																																							
900	400 (500)	250																																																							
900	250 (300)	300																																																							
1000	300	200 (250, 300)																																																							
1000	400	250 (300)																																																							
1100	300	300 (400)																																																							
1200	400	250 (300)																																																							
1200	300	250 (300)																																																							
1200	500	300																																																							
1400	300 (400)	200 (300)																																																							
3. Блок угловой		<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;"><i>a</i></td> <td style="text-align: center;">600</td> <td style="text-align: center;">600</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>a</i>₁</td> <td style="text-align: center;">426</td> <td style="text-align: center;">426</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>b</i></td> <td style="text-align: center;">500</td> <td style="text-align: center;">600</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>c</i></td> <td style="text-align: center;">300</td> <td style="text-align: center;">300</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><i>l</i></td> <td style="text-align: center;">180</td> <td style="text-align: center;">180</td> </tr> </table>	<i>a</i>	600	600	<i>a</i> ₁	426	426	<i>b</i>	500	600	<i>c</i>	300	300	<i>l</i>	180	180	БК-33, БК-37, БК-41, КОР-95, КЭЛ-93, КЭЛ-95,																																							
<i>a</i>	600	600																																																							
<i>a</i> ₁	426	426																																																							
<i>b</i>	500	600																																																							
<i>c</i>	300	300																																																							
<i>l</i>	180	180																																																							

Продолжение табл. П2.1

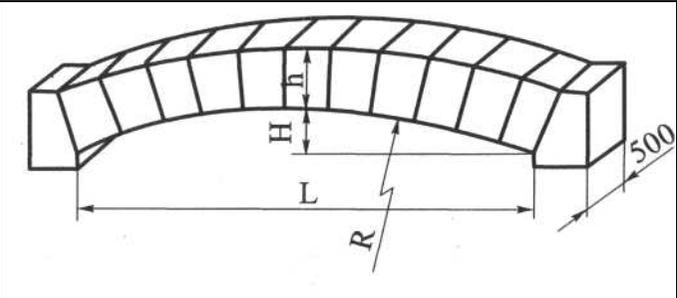
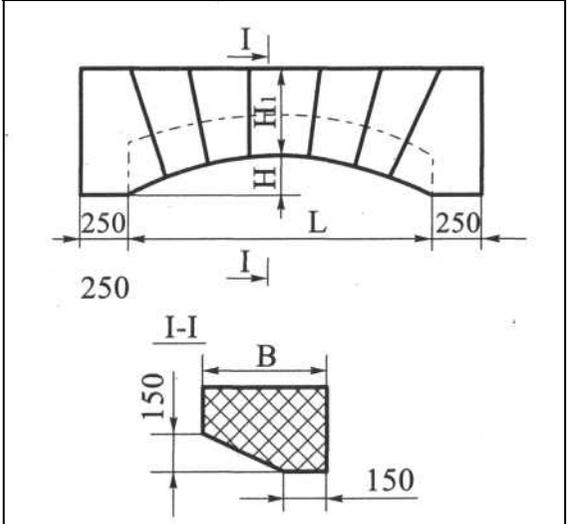
Изделие, применение	Форма (эскиз)	Размеры, мм	Марка изделия																																													
4. Кирпич прямой		<table border="0"> <tr> <td><i>a</i></td> <td><i>b</i></td> <td><i>c</i></td> </tr> <tr> <td colspan="3">кирпич прямой</td> </tr> <tr> <td>230</td> <td>65 (85)</td> <td>65</td> </tr> <tr> <td>230</td> <td>114</td> <td>40 (65)</td> </tr> <tr> <td>230</td> <td>114</td> <td>75 (100)</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>124</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>150</td> <td>65 (75)</td> </tr> <tr> <td>345</td> <td>150</td> <td>75</td> </tr> <tr> <td colspan="3">кирпич полуторный</td> </tr> <tr> <td>230</td> <td>172</td> <td>65 (75)</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>187</td> <td>65 (75)</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>225</td> <td>65</td> </tr> <tr> <td colspan="3">кирпич прямой трехчетвертной</td> </tr> <tr> <td>187</td> <td>124</td> <td>65 75)</td> </tr> <tr> <td>172</td> <td>114</td> <td>65 (75)</td> </tr> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	кирпич прямой			230	65 (85)	65	230	114	40 (65)	230	114	75 (100)	250	124	75	300	150	65 (75)	345	150	75	кирпич полуторный			230	172	65 (75)	250	187	65 (75)	300	225	65	кирпич прямой трехчетвертной			187	124	65 75)	172	114	65 (75)	ША, ШБ, ШВ, ШУС, ПБ, ПВ, ШЛ, МЛЛ, КЛ, ДЛ, ШКЛ, МРКЛ
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>																																														
кирпич прямой																																																
230	65 (85)	65																																														
230	114	40 (65)																																														
230	114	75 (100)																																														
250	124	75																																														
300	150	65 (75)																																														
345	150	75																																														
кирпич полуторный																																																
230	172	65 (75)																																														
250	187	65 (75)																																														
300	225	65																																														
кирпич прямой трехчетвертной																																																
187	124	65 75)																																														
172	114	65 (75)																																														
5. Кирпич клиновой		<table border="0"> <tr> <td><i>a</i></td> <td><i>b</i></td> <td><i>c</i></td> <td><i>d</i></td> </tr> <tr> <td>114</td> <td>230</td> <td>75</td> <td>65 (55)</td> </tr> <tr> <td>124</td> <td>250</td> <td>65</td> <td>45 (55)</td> </tr> <tr> <td>124</td> <td>250</td> <td>75</td> <td>65</td> </tr> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	114	230	75	65 (55)	124	250	65	45 (55)	124	250	75	65	ША, ШБ, ШВ, ШУС, ПБ, ПВ, ШЛ, МЛЛ, КЛ, ДЛ, ШКЛ, МРКЛ																													
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>																																													
114	230	75	65 (55)																																													
124	250	65	45 (55)																																													
124	250	75	65																																													
6. Брус прямой для кладки стен и сводов		<table border="0"> <tr> <td><i>a</i></td> <td><i>b</i></td> <td><i>c</i></td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>500</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>600</td> <td>100 (150)</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>250</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>380</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>500</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>250 (380)</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>250 (380)</td> <td>100</td> </tr> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	250	500	120	250	600	100 (150)	300	250	100	300	380	100	300	500	100	400	250 (380)	100	500	250 (380)	100	ДС, ДСО, ДСУ																					
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>																																														
250	500	120																																														
250	600	100 (150)																																														
300	250	100																																														
300	380	100																																														
300	500	100																																														
400	250 (380)	100																																														
500	250 (380)	100																																														
7. Брус клиновой двусторонний для кладки сводов		<table border="0"> <tr> <td><i>a</i></td> <td><i>b</i></td> <td><i>c</i></td> <td><i>d</i></td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>250</td> <td>100</td> <td>108</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>380</td> <td>100</td> <td>108 (115)</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>500</td> <td>100</td> <td>108 (115)</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>250</td> <td>100</td> <td>111(120)</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>380</td> <td>100</td> <td>111 (120)</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>250</td> <td>100</td> <td>113 (125)</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>380</td> <td>100</td> <td>113 (125)</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>600</td> <td>100</td> <td>120</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>250</td> <td>50 (75)</td> <td>100</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>380</td> <td>75</td> <td>100</td> </tr> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	300	250	100	108	300	380	100	108 (115)	300	500	100	108 (115)	400	250	100	111(120)	400	380	100	111 (120)	500	250	100	113 (125)	500	380	100	113 (125)	250	600	100	120	300	250	50 (75)	100	300	380	75	100	ДС, ДСО, ДСУ	
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>																																													
300	250	100	108																																													
300	380	100	108 (115)																																													
300	500	100	108 (115)																																													
400	250	100	111(120)																																													
400	380	100	111 (120)																																													
500	250	100	113 (125)																																													
500	380	100	113 (125)																																													
250	600	100	120																																													
300	250	50 (75)	100																																													
300	380	75	100																																													

Продолжение табл. П2.1

Изделие, применение	Форма (эскиз)	Размеры, мм	Марка изделия																		
8. Зуб простенка прямой		<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>a</i></th> <th><i>b</i></th> <th><i>c</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>200</td> <td>200</td> <td>500</td> </tr> <tr> <td>300</td> <td>200</td> <td>500</td> </tr> </tbody> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	200	200	500	300	200	500	ДС, ДСО, ДСУ									
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>																			
200	200	500																			
300	200	500																			
9. Зуб угловой		<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>a</i></th> <th><i>b</i></th> <th><i>c</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>700</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>400</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>250</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>400</td> <td>300</td> </tr> </tbody> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	700	300	300	700	400	300	700	250	300	700	300	300	700	400	300	БК-33
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>																			
700	300	300																			
700	400	300																			
700	250	300																			
700	300	300																			
700	400	300																			
10. Зуб		<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>a</i></th> <th><i>b</i></th> <th><i>c</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>600</td> <td>250</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>300</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>400</td> <td>300</td> </tr> </tbody> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	600	250	300	600	300	300	600	400	300	БК-33						
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>																			
600	250	300																			
600	300	300																			
600	400	300																			
11. Зуб угловой (левый, правый)		<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>a</i></th> <th><i>b</i></th> <th><i>c</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>200</td> <td>500</td> <td>400</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>550</td> <td>350</td> </tr> <tr> <td>250</td> <td>550</td> <td>350</td> </tr> </tbody> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	200	500	400	250	550	350	250	550	350	ДС, ДСО, ДСУ, БК-33						
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>																			
200	500	400																			
250	550	350																			
250	550	350																			

Изделие, применение	Форма (эскиз)	Размеры, мм	Марка изделия																				
12. Пята		<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>a</i></th> <th><i>b</i></th> <th><i>c</i></th> <th><i>c</i>₁</th> <th><i>l</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>100</td> <td>250</td> <td>275</td> <td>60</td> <td>140</td> </tr> <tr> <td>600</td> <td>250</td> <td>375</td> <td>135</td> <td>132</td> </tr> </tbody> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>c</i> ₁	<i>l</i>	100	250	275	60	140	600	250	375	135	132	ДС, ДСО, ДСУ, БК-33					
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>c</i> ₁	<i>l</i>																			
100	250	275	60	140																			
600	250	375	135	132																			
13. Пята для кладки сводов		<table border="1"> <thead> <tr> <th><i>a</i></th> <th><i>b</i></th> <th><i>c</i></th> <th><i>d</i></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>325</td> <td>150</td> <td>100</td> <td>300</td> </tr> <tr> <td>350</td> <td>190</td> <td>100</td> <td>340</td> </tr> <tr> <td>400</td> <td>165</td> <td>100</td> <td>340</td> </tr> <tr> <td>500</td> <td>115</td> <td>100</td> <td>340</td> </tr> </tbody> </table>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	325	150	100	300	350	190	100	340	400	165	100	340	500	115	100	340	ДС, ДСО, ДСУ
<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>																				
325	150	100	300																				
350	190	100	340																				
400	165	100	340																				
500	115	100	340																				
14. Пята плоской арки			ДС, ДСО, ДСУ																				

Техническая характеристика огнеупоров

Изделие, применение	Форма (эскиз)	Размеры, мм	Марка изделия																																								
1. Арки загрузочного канала		<table border="1"> <thead> <tr> <th>L</th> <th>H</th> <th>h</th> <th>R</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2200</td><td>210</td><td>500</td><td>3000</td></tr> <tr><td>3200</td><td>300</td><td>500</td><td>4370</td></tr> <tr><td>4200</td><td>400</td><td>500</td><td>5370</td></tr> <tr><td>5200</td><td>490</td><td>500</td><td>7100</td></tr> <tr><td>6200</td><td>590</td><td>500</td><td>8460</td></tr> <tr><td>6700</td><td>635</td><td>500</td><td>9150</td></tr> <tr><td>7300</td><td>690</td><td>500</td><td>9960</td></tr> <tr><td>7900</td><td>750</td><td>500</td><td>10 780</td></tr> <tr><td>9100</td><td>865</td><td>500</td><td>12 420</td></tr> </tbody> </table>	L	H	h	R	2200	210	500	3000	3200	300	500	4370	4200	400	500	5370	5200	490	500	7100	6200	590	500	8460	6700	635	500	9150	7300	690	500	9960	7900	750	500	10 780	9100	865	500	12 420	БК-33
L	H	h	R																																								
2200	210	500	3000																																								
3200	300	500	4370																																								
4200	400	500	5370																																								
5200	490	500	7100																																								
6200	590	500	8460																																								
6700	635	500	9150																																								
7300	690	500	9960																																								
7900	750	500	10 780																																								
9100	865	500	12 420																																								
2. Арки скошенных влетов		<table border="1"> <thead> <tr> <th>L</th> <th>B</th> <th>H</th> <th>H_1</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1000</td><td>600</td><td>100</td><td>450</td></tr> <tr><td>1200</td><td></td><td>150</td><td>400</td></tr> <tr><td>1400</td><td></td><td>150</td><td>400</td></tr> <tr><td>1600</td><td></td><td>150</td><td>400</td></tr> <tr><td>1800</td><td></td><td>150</td><td>400</td></tr> <tr><td>2000</td><td></td><td>150</td><td>400</td></tr> <tr><td>2200</td><td></td><td>200</td><td>400</td></tr> <tr><td>2400</td><td></td><td>200</td><td>400</td></tr> </tbody> </table>	L	B	H	H_1	1000	600	100	450	1200		150	400	1400		150	400	1600		150	400	1800		150	400	2000		150	400	2200		200	400	2400		200	400	БК-33				
L	B	H	H_1																																								
1000	600	100	450																																								
1200		150	400																																								
1400		150	400																																								
1600		150	400																																								
1800		150	400																																								
2000		150	400																																								
2200		200	400																																								
2400		200	400																																								

ЛИТЕРАТУРА

1. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок: справочное изд.: в 2 кн. / под ред. И. Д. Кашеева. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – Кн. 1: Производство огнеупоров. – 663 с.
2. Огнеупоры для промышленных агрегатов и топок: справочное изд.: в 2 кн. / под ред. И. Д. Кашеева, Е. Е. Грищенко. – М.: Интермет Инжиниринг, 2002. – Кн. 2: Служба огнеупоров. – 656 с.
3. Гушин, С. Н. Теплотехника стекловаренных печей: учеб. пособие / С. Н. Гушин. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ, 1998. – 176 с.
4. Кашеев, И. Д. Химическая технология огнеупоров: учеб. пособие / И. Д. Кашеев, К. К. Стрелов, П. С. Мамыкин. – М.: Интермет Инжиниринг, 2007. – 752 с.
5. Левицкий, И. А. Теплотехнические установки и агрегаты предприятий производства стекла. Расчет стекловаренной печи / И. А. Левицкий, Ю. Г. Павлюкевич. – Минск: БГТУ, 2006. – 232 с.
6. Химическая технология стекла и ситаллов / под ред. Н. М. Павлушкина. – М.: Стройиздат, 1983. – 431 с.
7. Ферворнер, О. Огнеупорные материалы для стекловаренных печей / О. Ферворнер, К. Берндт. – М.: Стройиздат, 1984. – 260 с.
8. Виды брака в производстве стекла / под ред. Г. Иебсена-Мерведеля, Р. Брюкнера. – М.: Стройиздат, 1986. – 647 с.
9. Шаеффер, Н. А. Технология стекла / Н. А. Шаеффер, К. Х. Хойзнер. – Кишинев: СТИ-Print, 1998. – 280 с.
10. Хорошавин, Л. Б. Магнезиальные огнеупоры: справочник / Л. Б. Хорошавин, В. А. Перепелицын, В. А. Кононов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2000. – 576 с.
11. Бондарев, К. Т. Выбор, кладка и служба огнеупоров в ваннах стекловаренных печах / К. Т. Бондарев, О. Н. Попов, В. Д. Снежко // Стекло и керамика. – 1974. – № 7. – С. 3–7.
12. Особенности огнеупорной кладки конструктивных элементов стекловаренных печей / К. Т. Бондарев [и др.] // Стекло и керамика. – 1977. – № 11. – С. 23–26.
13. Кучерявый, М. Н. Рациональная конструкция и условия эксплуатации протока стекловаренной печи / М. Н. Кучерявый, О. Н. Попов, В. А. Полевой // Стекло и керамика. – 1985. – № 5. – С. 17–19.
14. Селянко, В. Т. Высокоглиноземистые огнеупоры для питателей стеклоформирующих машин / В. Т. Селянко, Г. Н. Зеленова, М. А. Горелова // Стекло и керамика. – 1978. – № 2. – С. 12–14.

15. Применение шамотного легковесного кирпича для теплоизоляции сводов стекловаренных печей / М. Н. Павлушкин [и др.] // Стекло и керамика. – 1987. – № 4. – С. 4–5.
16. Бондарев, К. Т. Рациональные режимы охлаждения и изоляция стекловаренных печей / К. Т. Бондарев, О. Н. Попов // Стекло и керамика. – 1974. – № 1. – С. 4–5.
17. Спирин, Ю. Л. Эффективная теплоизоляция стекловаренных печей / Ю. Л. Спирин [и др.] // Стекло и керамика. – 1985. – № 11. – С. 4–5.
18. Смирнов, А. О повышении эффективности работы стекловаренных печей / А. Смирнов // Стекло мира. – 2002. – № 4. – С. 69–73.
19. Балан, Г. О повышении срока службы печей / Г. Балан // Стекло мира. – 2002. – № 4. – С. 73–77.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	4
1. Огнеупорные материалы	6
1.1. Классификация огнеупорных материалов.....	6
1.2. Технические требования к огнеупорам	8
1.3. Технология огнеупорных изделий	13
1.3.1. Керамические огнеупоры	13
1.3.2. Плавнелитые огнеупоры	14
1.4. Кремнеземистые огнеупоры	16
1.5. Алюмосиликатные огнеупоры.....	21
1.6. Глиноземистые огнеупоры.....	25
1.7. Цирконистые огнеупоры	27
1.8. Магнезиальные огнеупоры.....	33
1.9. Огнеупоры специального назначения.....	36
1.10. Теплоизоляционные материалы	38
1.11. Неформованные огнеупорные материалы.....	43
2. Применение огнеупоров	45
2.1. Служба огнеупоров стекловаренной печи	45
2.1.1. Служба огнеупоров бассейна печи.....	45
2.1.2. Служба огнеупоров верхнего строения печи	48
2.1.3. Взаимодействие огнеупоров	49
2.2. Рациональное размещение огнеупорных материалов в стекловаренных печах	50
2.2.1. Рабочая камера печи	51
2.2.2. Питатели	55
2.2.3. Регенераторы.....	66
2.2.4. Керамические рекуператоры.....	69
Приложения	71
1. Характеристики огнеупорных и теплоизоляционных изде- лий для кладки стекловаренных печей.....	71
2. Форма и размеры огнеупорных изделий	86
3. Раскладка огнеупоров в рабочей камере ванной стеклова- ренной печи	91
Литература	95

Учебное издание

Папко Людмила Федоровна
Павлюкевич Юрий Геннадьевич

ОГНЕУПОРЫ ДЛЯ СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Пособие

Редактор *Т. Е. Самсанович*
Компьютерная верстка *И. А. Ткаченко*

Подписано в печать 27.11.2008. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,3. Уч.-изд. л. 6,0.
Тираж 100 экз. Заказ .

Учреждение образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220006. Минск, Свердлова, 13а.
ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования
«Белорусский государственный технологический университет».
220006. Минск, Свердлова, 13.
ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.