

К. Т. Н. В. В. Словиковский, А. В. Гуляева (✉)

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

УДК 666.76:669.1.043.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ, КОНСТРУКЦИЙ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, УВЕЛИЧИВАЮЩИХ СРОК СЛУЖБЫ АГРЕГАТОВ

Разработаны, испытаны и внедрены фурменные блоки, позволяющие уменьшить количество швов в фурменном поясе горизонтальных конвертеров в 9 раз, снизить коррозионный износ изделий, уменьшить вероятность проникновения в изделие шлако-штейнового расплава. Разработана конструкция специального огнеупорного изделия, позволяющая снизить термические напряжения, исключить выпадение изделий из окатов кладки арочных сводов, сократить время разогрева, резко снизить теплопотери через кладку сводов мартеновских и рудно-термических печей, футеровок вельц-печей. Внедрение изделий специальной конструкции позволило увеличить стойкость футеровок тепловых агрегатов без увеличения затрат на ремонт.

**Ключевые слова:** медно-никелевый конвертер, футеровка тепловых агрегатов, термическое напряжение, глissажные трубы.

Традиционные футеровки металлургических высокотемпературных агрегатов цветной металлургии изготовлены в основном из периклазохромитовых и хромитопериклазовых огнеупоров (ПХС, ХП, ХПТ). Исследования показали их малую стойкость в наиболее изнашиваемых частях кладки, таких как фурменный пояс горизонтальных конвертеров, шпуровые узлы, шлаковый пояс и своды рудно-термических печей (РТП), реакционная зона вельц-печей.

Цель работы — разработка огнеупорных изделий с оптимальными геометрическими размерами, которые позволят увеличить срок службы футеровок тепловых агрегатов.

В отечественной практике по производству огнеупорных материалов конструкция и форма изделий научно не обоснованы. Изделия имеют форму параллелепипеда или клина, а размеры аналогичны размерам кирпичей, применяемых в строительстве, где нет резких перепадов температур, которые имеют место в огнеупорных кладках тепловых агрегатов цветной металлургии (20–1500 °С). Ввиду этого происходит скол изделий из-за возникновения в них термических напряжений, поэтому одним из факторов, повышающих эксплуатационные свойства огнеупорных изделий, являются их пространственная геометрическая форма и конструкция.

Зарубежный опыт показывает, что вышеприведенные факторы позволяют увеличить эксплуатационную стойкость изделий и кладок из них до 35–40 %. Наименьшим сроком эксплуатации в цветной металлургии обладают футеровки медно-никелевых конвертеров. Так, стойкость кладки медных конвертеров составляет 40–90 сут, никелевых 6–17 сут. Стойкость футеровки конвертеров лимитируется сроком службы фурменной зоны. Ее низкая стойкость обусловлена следующими факторами: термическими ударами при сливе и подаче шлаково-штейнового расплава, а также разрушением кладки на границе воздух – огнеупор – шлако-штейновый расплав при продувке конвертера во время службы (перепад температур составляет 20–1200 °С); наличием барботажа на границе воздух – расплав и, как следствие, эрозийным износом; разрушением сколом ввиду различных свойств пропитанной и исходной частей огнеупорной кладки; образованием легкоплавких соединений, обладающих малой вязкостью, и проникновением их по швам фурменной зоны, приводящими к прожугу кожуха и аварийной остановке конвертера.

До настоящего времени решение проблемы повышения стойкости футеровки в медно-никелевых конвертерах искали в создании наиболее качественного огнеупорного материала. Стойкость кладки удавалось увеличить всего на 20–30 % (огнеупоры ПХС, ХПТ взамен М). Внешние факторы, воздействующие на футеровку, весьма разнообразны. Стойкость кладки определяется конструктивными особенностями теплового агрегата, температурным режимом эксплуатации кладки,



А. В. Гуляева

E-mail: a.gulyaewa2012@yandex.ru

формой и размерами огнеупорных изделий, условиями их сопряжения. Для эффективного решения проблемы повышения стойкости фурменной зоны авторами были разработаны конструкции фурменных блоков для фурменных поясов футеровок медных и никелевых конвертеров, имеющих конструктивные особенности (рис. 1) по сравнению с традиционно применяемыми желобковыми кирпичами (рис. 2).

Авторами совместно со специалистами комбината «Магнезит» была выпущена промышленная партия фурменных блоков в количестве 1000 т. По физико-механическим свойствам фурменные блоки превосходят традиционные желобковые кирпичи. При футеровании фурменного пояса опытными блоками количество швов в кладке сокращается в 9 раз, что уменьшает вероятность проникновения шлако-штейнового расплава вглубь кладки. Также возрастает эрозионная стойкость кладки [1].

Технические характеристики фурменного блока представлены ниже:

Открытая пористость, %.....	14–16
Предел прочности при сжатии, МПа.....	35
Кажущаяся плотность, г/см <sup>3</sup> .....	3,69
Температура начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа, °С.....	1600
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены.....	5–6
Масса, кг.....	43
Эрозионная стойкость шлака, тыс. т.....	17500

Схемы установки фурменных блоков и традиционных желобковых огнеупоров показаны на рис. 3, 4.

Результаты промышленных испытаний фурменных блоков в конвертерах медно-никелевого

производства представлены в таблице. Таким образом, применение фурменных блоков в фурменном поясе горизонтальных конвертеров очень эффективно и позволяет увеличить стойкость футеровки до 45 %. Использование фурменных блоков на медеплавильных комбинатах увеличило стойкость футеровок горизонтальных конвертеров на 20–50 %.

Одно из проблемных мест в кладке РТП для выплавки ферроникеля, никеля, олова является кладка шпуровых узлов. Кладка шпуровых узлов традиционно выполняется штучными изделиями ПХС. Шпуровые узлы изнашиваются в 2–4 раза быстрее, чем остальная футеровка, ввиду быстрого эрозионного износа, что приводит к аварийным прорывам расплава через разрушенные элементы кладки (рис. 5). Авторами было предложено использовать в кладке шпуровых узлов фурменные блоки ПХКУ-23, которые уменьшают

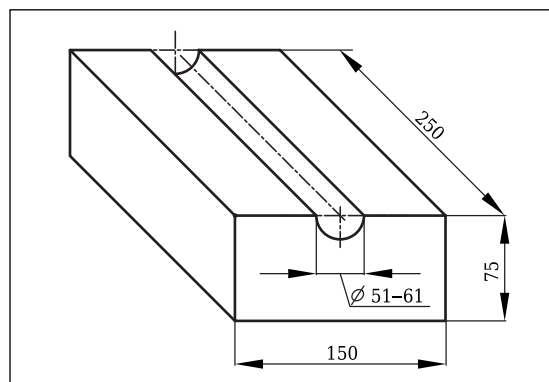


Рис. 2. Желобковый кирпич

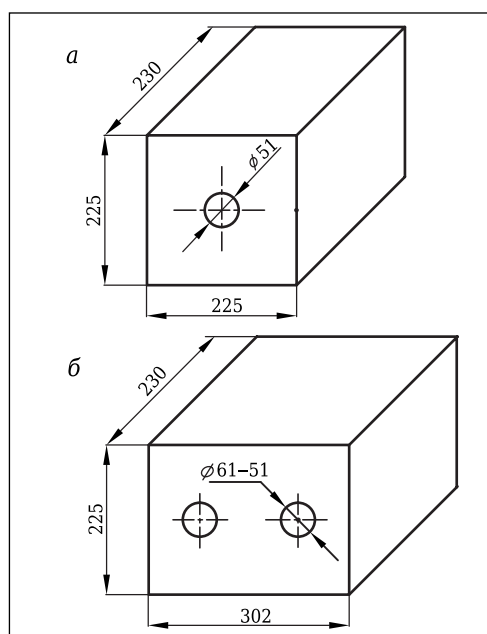


Рис. 1. Фурменные блоки: а — ПХКУ-23 (ПХКУ-24) для медных конвертеров; б — ПХКУ-25 (ПХКУ-26) для никелевых конвертеров

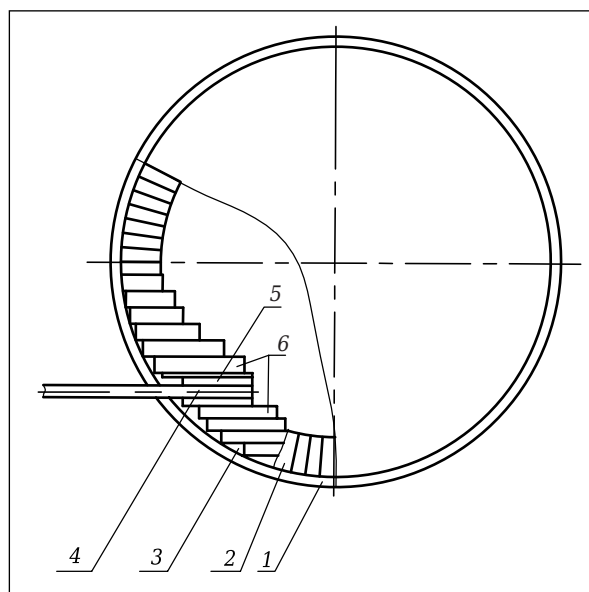


Рис. 3. Система традиционной футеровки горизонтального конвертера: 1 — металлический корпус; 2 — хромитопериклазовая засыпка; 3 — основная кладка; 4 — фурменная трубка; 5 — желобковый кирпич; 6 — надфурменный и подфурменный кирпич длиной 460 мм

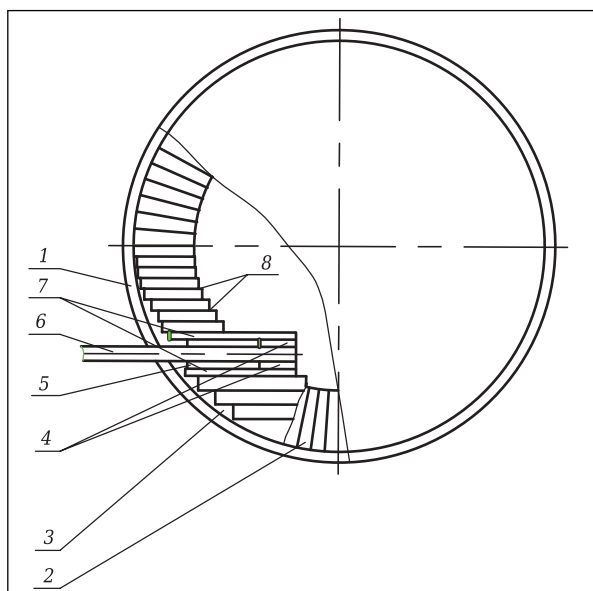
## Результаты промышленных испытаний фурменных блоков\* в конвертерах

Предприятие	Вместимость конвертера, т	Марка изделия	Продолжительность кампании, сут	Остаточная толщина футеровки, мм	Износ огнеупоров, мм	Скорость износа, мм/сут	Увеличение стойкости футеровки, %
Иртышский полиметаллический комбинат	12	ПХКУ-17	44,0	160	300	6,8	30,0
Красноуральский медеплавильный комбинат («Святогор»)	40	ПХКУ-17	57,2	212	248	4,6	
Кировградский медеплавильный комбинат	40	ПХКУ-25	56,0	80	380	6,8	45,0
Карабашский медеплавильный комбинат (Карабашмедь)	40	ПХКУ-25	81,2	93	364	4,48	
Медногорский медно-серный комбинат	40	ПХСО-19	50,0	100	360	7,2	38,0
Алавердский горно-металлургический комбинат	40	ПХКУ-25	69,0	130	330	4,8	
Печенганикель	40	ПХС-13	87,0	60	400	4,6	27,6
	80	ПХКУ-25	111,0	80	340	3,1	
	80	ПХКУ-19	40,0	90	370	9,25	13,0
	80	ПХКУ-26	45,0	105	355	7,9	
	40	ПХСП-5	45,0	80	380	8,4	17,0
	40	ПХКУ-25	53,0	100	360	6,8	
	80	ПХКУ-19	43,5	70	390	8,37	10,0
	80	ПХКУ-26	48,0	80	380	7,9	

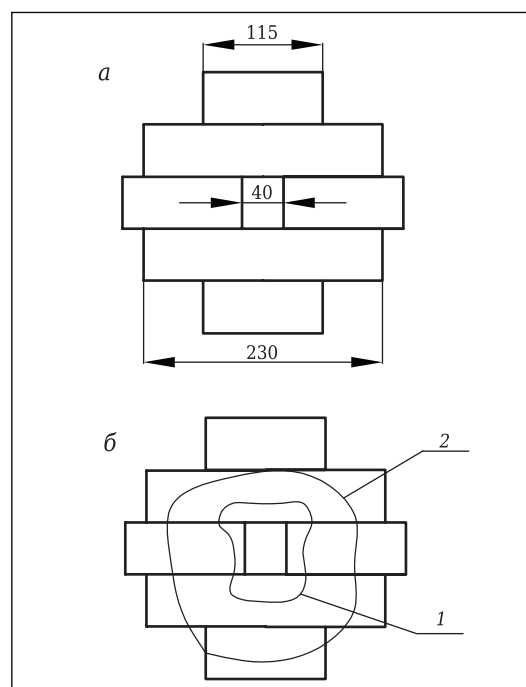
\* В числителе указаны традиционно применяемые желобковые фурменные изделия ПХКУ-17, ПХСО-19, ПХС-13, ПХСП-5 и ПХКУ-19 (см. рис. 2), в знаменателе — одноканальные фурменные блоки для медных конвертеров ПХКУ-23 и ПХКУ-24, двухканальные фурменные блоки для никелевых конвертеров ПХКУ-25 и ПХКУ-26 (см. рис. 1).

количество швов до 9 раз. Эрозионная стойкость возросла с 8 тыс. до 17 тыс. т шлака. Как показали испытания, исключение швов из шпуровых узлов позволило увеличить кампании агрегатов в 1,8–2,5 раза [2].

Такие показатели удалось достигнуть в РТП на Побужском никелевом заводе (г. Побужье, Украина), Новосибирском оловянном комбинате (г. Новосибирск), Рязанском заводе цветных металлов «Рязцветмет» (г. Рязань). Данная кон-



**Рис. 4.** Схема усовершенствованной футеровки горизонтального конвертера: 1 — металлургический корпус; 2 — основная кладка; 3 — теплопроводящая огнеупорная масса; 4 — химически устойчивая огнеупорная масса; 5 — фурменные блоки ПХКУ-23, ПХКУ-24 или ПХКУ-25, ПХКУ-26; 6 — фурменная трубка; 7 — надфурменный и подфурменный кирпич длиной 520 мм; 8 — клей



**Рис. 5.** Схема кладки (а) и разгара (б) шпуров из ПХС-огнеупора: 1 — разгар после выпуска 3 тыс. т шлака; 2 — разгар после выпуска 8 тыс. т шлака

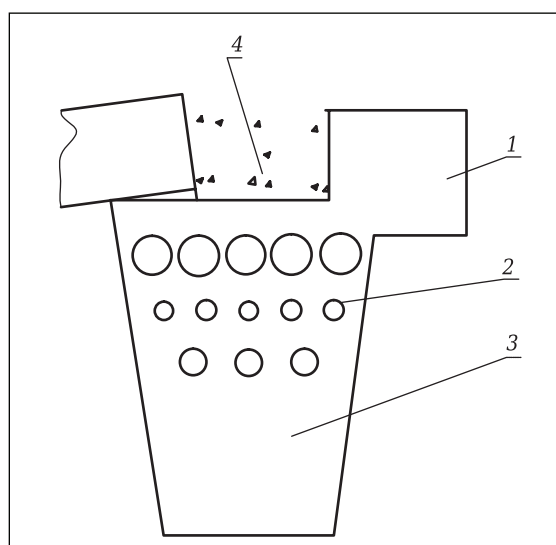
струкция шпуровых узлов может быть применена в кивцэтных агрегатах, печах ПЖВ.

Авторами также был рассмотрен вопрос повышения стойкости футеровок тепловых агрегатов путем применения огнеупорных изделий оптимальной конструкции, обладающих регулируемой теплопроводностью, не подверженных температурному сколу, исключаяющих выпадение скатов футеровки во время службы. Такие изделия целесообразно использовать в вельц-печах и сводах металлургических агрегатов. В настоящее время кладка футеровки вращающихся печей очень часто ведется с расклиниванием металлическими пластинами для уменьшения вероятности выпадения огнеупорных изделий при эксплуатации. Применение металлических пластин вызывает дополнительные термические напряжения в кладке, химический износ, особенно в рабочем окате из-за высокого темпера-

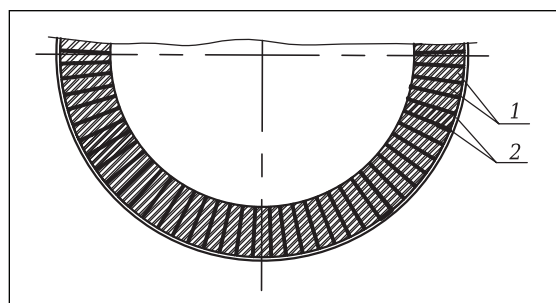
турного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) металла пластин, и образование легкоплавких соединений типа магнезиоферрита с футеровкой на границе огнеупор – шихта. При этом происходят изменения в объеме, в результате чего может произойти скалывание огнеупора на толщину до 80 мм при пуске или остановке вращающейся печи. Использование шамотного мертеля в зоне подготовки часто приводит к разрушению шва из-за малой механической прочности и большой усадки, что ведет к открытию швов и способствует выпадению кирпичей из окатов футеровки.

К недостаткам традиционных футеровок вельц-печей можно отнести повышенную температуру кожуха печей (до 350 °С) при их эксплуатации, что уменьшает механическую прочность кожуха, а также ведет к увеличению энергетических затрат при эксплуатации в несколько раз. Для ликвидации этих недостатков была разработана конструкция специального изделия (рис. 6), позволяющая за счет рассчитанной формы снизить термические напряжения в футеровке. Наличие специального зацепа резко уменьшает вероятность выпадения изделий из окатов во время эксплуатации печи, исключает использование металлических пластин при кладке. За счет того, что в одном изделии есть рабочий и теплоизоляционный слой, резко снижаются тепловые потери через кладку. Теплоизоляционный слой состоит из огнеупорного материала и искусственных пор, которые образуются при прессовании изделий. Потери тепла через футеровку уменьшает также паз для закладки дополнительной теплоизоляции: каолиновой ваты, асбестового волокна и др. При разработке конструкции изделия учитывали распределения термических напряжений по его сечению при температуре службы, затем рассчитывали оптимальные размеры, количество и размер искусственных пор с целью уменьшения теплопроводности изделия без потери необходимой механической прочности. Для получения пор использовали шарообразный пенопласт, который выгорает при службе изделия (см. рис. 6) [3].

Огнеупорные изделия специальной конструкции могут быть прессованными и обожженными по традиционной технологии хромитовых, периклазовых, периклазохромитовых изделий, а также производиться по технологии огнеупорных бетонов. Разработанные изделия могут применяться в наиболее изнашиваемых частях футеровок — сводах различных металлургических агрегатов: вельц-печи, мартеновские, РТП, электропечи, кивцэтные агрегаты, печи Ванюкова. Применение этих изделий целесообразно также в кладке стен сталеразливочных ковшей, в футеровке установок ковш-печь, так как позволяет исключить теплоизоляционный шамотный окат футеровки, уменьшить случаи выпадения огнеупорных изделий при эксплуатации ковшей (рис. 7–10).



**Рис. 6.** Специальное огнеупорное изделие: 1 — зацеп; 2 — искусственные поры; 3 — рабочая зона огнеупорного изделия; 4 — теплоизоляционная засыпка из волокнистого материала (каолиновая вата, асбестовое волокно и т. д.)



**Рис. 7.** Традиционная кладка вельц-печи большого диаметра: 1 — кладка из огнеупоров периклазохромитового состава (ПХС-13, ПХС-12); 2 — магнезиально-железистый кладочный раствор

Применение огнеупорных изделий разработанной конструкции позволяет отказаться от расклинивания кладки, уменьшить толщину футеровки вращающихся печей до 30 % от применяемой обычно и тем самым уменьшить массу кладки и расход дорогостоящих огнеупорных материалов; изделия уменьшают расход энергоснабжителей, термические напряжения в кладке и тем самым уменьшают скалывание огнеупоров при службе. Практически исключается выпадение элементов кладки при эксплуатации.

Для производства изделий авторами и специалистами огнеупорного производства Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК) была изготовлена специальная пресс-форма и выпущена опытно-промышленная партия изделий в количестве 100 т. Обожженные изделия целесообразно использовать в реакционной зоне вращающихся печей, сводах металлургических агрегатов; необожженные — в зоне подготовки вращающихся печей. Изделия прошли испытания и внедрение в сводах мартеновских печей Нижнетагильского металлургического комбината и Нижнесергинского металлургического завода, в футеровке вращающихся печей Карагандинского металлургического комбината и Ачинского глиноземного завода. Свод, выполненный из специальных изделий, прошел испытание и был внедрен на Нижнесергинском металлургическом заводе в мартеновских печах с увеличением стойкости в 1,8 раза [4]. Футеровка вельц-печей из специальных изделий прошла испытания на Усть-Каменогорском свинцово-цинковом комбинате с увеличением стойкости в 1,6–1,8 раза [5].

Авторами разработаны конструкции стен и сводов агрегатов цветной металлургии, работающих в наиболее тяжелых условиях. Предложена установка в кладку водоохлаждаемых медных кессонов в виде глиссажных труб. Испытания данных футеровок на Алмалыкском медеплавильном комбинате (г. Алмалык, Узбекистан) в агрегате кислородно-факельной плавки, Кировградском медеплавильном заводе (г. Кировград) показали увеличение стойкости футеровок в 1,8–2,0 раза. Для увеличения стойкости свода и стен в районе шлакового пояса были установлены водоохлаждаемые глиссажные трубы, выполненные из меди, размером 65 × 65 мм и диаметром внутреннего отверстия 30 мм (рис. 11, 12). Глиссажные трубы обеспечивали высокую стойкость элементов футеровки, а также дали возможность использовать тепло охлаждаемой воды. Сущность испарительного охлаждения состоит в использовании скрытой теплоты парообразования для отвода тепла от охлаждаемых элементов печей и в замене охлаждающей холодной воды кипящей, коэффициент теплопередачи которой значительно выше, чем холодной воды. Тепло, отбираемое охлаждающей водой, затрачивается на ее испарение. Применение испарительного охлаждения для защиты

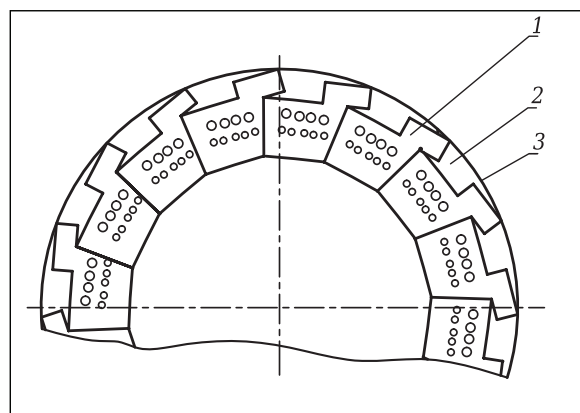


Рис. 8. Футеровка свода мартеновских печей: 1 — специальное изделие; 2 — теплоизоляционный слой; 3 — кожух печи

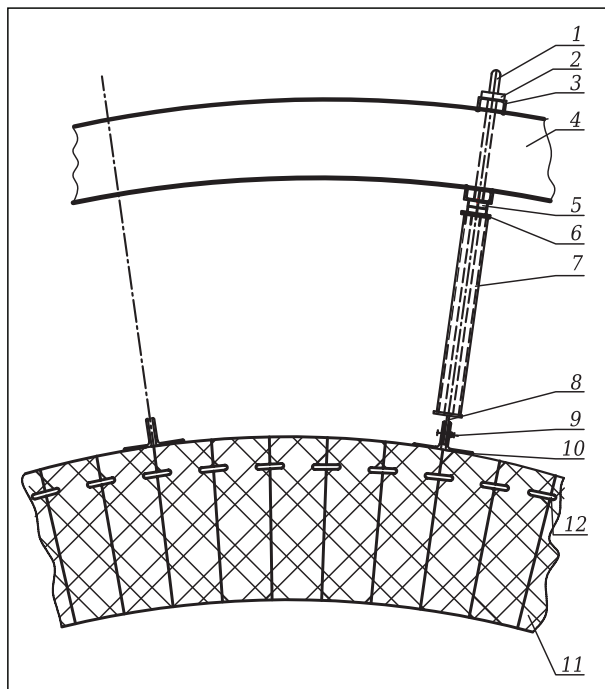


Рис. 9. Продольный разрез крепления свода подвесками: 1 — тяга; 2 — клин; 3 — швеллер; 4 — несущие дуги; 5 — прокладка; 6 — шайба; 7 — трубка; 8 — подвесная пластина; 9 — болт; 10 — уголки; 11 — кирпич; 12 — штырь

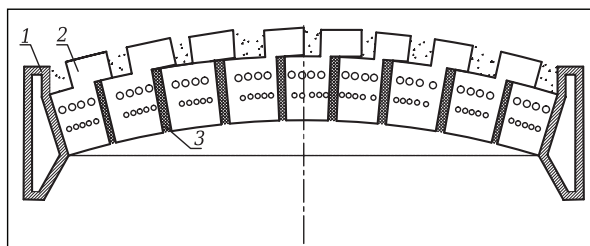
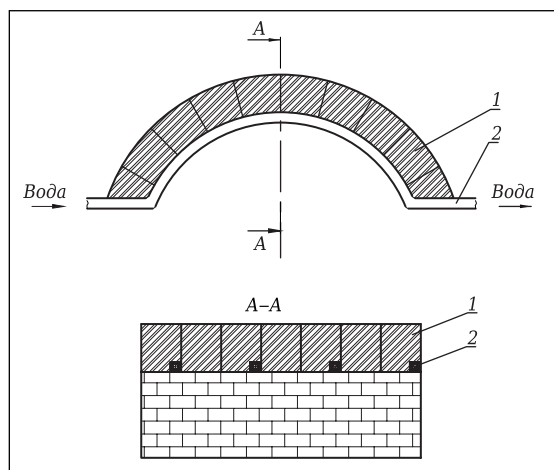
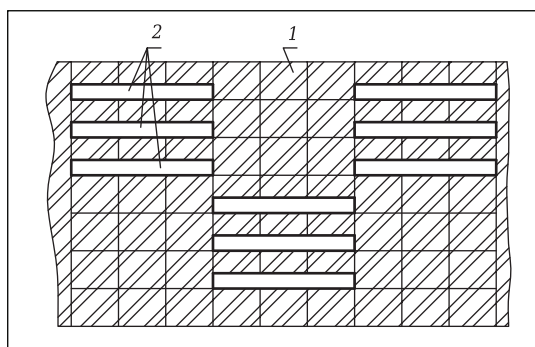


Рис. 10. Усовершенствованный свод: 1 — опора; 2 — специальное изделие; 3 — высокотемпературный огнеупорный клей





**Рис. 11.** Применение глissажных труб при кладке сводов РТП: 1 — огнеупорная футеровка ПХС; 2 — глissажные трубы



**Рис. 12.** Схема расположения секций глissажных труб в стенах РТП: 1 — огнеупоры; 2 — глissажные трубы

футеровки является перспективным, поскольку использование глissажных труб безопасно при их поломке, так как объем воды или пара в них небольшой. Глissажные трубы уменьшают потери тепла через свод. Их использование позволяет снизить общую температуру сводов, следовательно,

но, замедляется процесс взаимодействия футеровки с продуктами возгона, проникновение газов в поры огнеупора происходит на меньшую глубину; ввиду этого происходит меньшее разрушение и скалывание огнеупоров. Применение глissажных труб повышает стойкость футеровок в 2,0–2,5 раза.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен вопрос применения огнеупорных изделий стандартных размеров. Стандартные изделия в основном имеют форму параллелепипеда или клина, что приводит к снижению их предела прочности при изгибе, сдвиге. Также стандартные изделия имеют одинаковую пористость во всем объеме изделия, что ведет к их повышенной теплопроводности, вызывая большие энергопотери при эксплуатации тепловых агрегатов. Использование изделий стандартного размера приводит к увеличению количества швов в кладке. Большая поверхность кладки, контактирующая с расплавом, вызывает повышенный коррозионный износ футеровки.

Авторами были разработаны специальные огнеупорные изделия с регулируемой пористостью, обладающие специальным зацепом, исключающим выпадение изделий при службе. Разработанные фурменные блоки уменьшают количество швов в фурменном поясе в 9 раз и имеют высокие показатели физико-механических свойств. Фурменные блоки также рационально использовать в шпуровых узлах РТП вместо стандартных изделий.

Авторами было предложено использовать в сводах и стенах РТП, печах кислородно-факельной плавки, мартеновских печах глissажные трубы, понижающие температуру службы кладки.

Испытания и внедрение вышеприведенных конструкций и форм изделий позволили увеличить стойкость футеровок горизонтальных конвертеров, РТП, мартеновских печей, вельц-печей в 1,8–2,5 раза, снизить энергозатраты на проведение металлургических процессов на 20–30 %.

## Библиографический список

1. **Словиковский, В. В.** Футеровка горизонтальных медно-никелевых конвертеров повышенной стойкости / В. В. Словиковский, А. В. Гуляева // Новые огнеупоры. — 2013. — № 11. — С. 39–42.
2. **Slovikovskii, V. V.** More durable lining for horizontal copper-nickel converters / V. V. Slovikovskii, A. V. Gulyaeva // Refract. Industr. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 1. — P. 463–466.
3. **Словиковский, В. В.** Высокостойкие футеровки шпуровых узлов рудно-термических печей / В. В. Словиковский, А. В. Гуляева // Новые огнеупоры. — 2015. — № 2. — С. 3, 4.
4. **Slovikovskii, V. V.** Durable linings for the tap holes of ore-roasting furnaces / V. V. Slovikovskii, A. V. Gulyaeva // Refract. Industr. Ceram. — 2015. — Vol. 56, № 1. — P. 1–4.
5. **Словиковский, В. В.** Кладки футеровок высокотемпературных металлургических агрегатов из специаль-

ных огнеупорных изделий / В. В. Словиковский // Новые огнеупоры. — 2010. — № 8. — С. 7, 8.

4. **Словиковский, В. В.** Футеровка свода мартеновской печи / В. В. Словиковский, А. В. Гуляева // Новые огнеупоры. — 2013. — № 8. — С. 7–9.

**Slovikovskii, V. V.** Increased life for open-hearth furnace roof lining / V. V. Slovikovskii, A. V. Gulyaeva // Refract. Industr. Ceram. — 2013. — Vol. 54, № 4. — P. 272, 273.

5. **Словиковский, В. В.** Эффективные высокостойкие футеровки для вельц-печей / В. В. Словиковский, А. В. Гуляева // Новые огнеупоры. — 2014. — № 8. — С. 3–7.

**Slovikovskii, V. V.** Effective highly resistant waelz kiln linings / V. V. Slovikovskii, A. V. Gulyaeva // Refract. Industr. Ceram. — 2014. — Vol. 55, № 4. — P. 277–280. ■

Получено 28.03.17

© В. В. Словиковский, А. В. Гуляева, 2018 г.