



К. Т. Н. А. В. Сакулин¹, К. Т. Н. С. И. Гершкович¹, К. Т. Н. Ф. Р. Иксанов¹,
А. В. Витовский¹, К. Т. Н. В. А. Мусевич¹ (✉), Н. В. Вихрова¹,
М. Я. Калугина², Б. Н. Прокофьев², Ю. А. Мурзин²

¹ АО «Боровичский комбинат огнеупоров»,
г. Боровичи Новгородской обл., Россия

² АО «КАЛУГИН», Екатеринбург, Россия

УДК 666.76:[669.162.21:69.057.4

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ АО БКО ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ КОНСТРУКЦИИ КАЛУГИНА (ВНК)

Представлены результаты применения продукции, разработанной Боровичским комбинатом огнеупоров (АО БКО), для доменных воздухонагревателей конструкции Калугина (ВНК, АО «КАЛУГИН»). Обозначены основные тенденции совершенствования технологий, применяемых при реконструкции и строительстве воздухонагревателей, радикально улучшающих их технико-экономические показатели и повышающих эффективность работы тепловых агрегатов.

Ключевые слова: АО БКО, АО «КАЛУГИН», ПАО «Северсталь», АО ЕВРАЗ НТМК, воздухонагреватели, доменная печь, проект, реконструкция, огнеупорные материалы, производство, приемка, инспекция, комплексная поставка, футеровка, монтаж, стойкость, ресурс эксплуатации.

В настоящий момент Боровичский комбинат огнеупоров (АО БКО) является крупнейшим в России производителем огнеупорных материалов, которые применяются при строительстве и реконструкции различных доменных агрегатов и систем. В табл. 1 приведены характеристики

выпускаемых стеновых и насадочных изделий разных форматов и типоразмеров.

Следует отметить, что потребителями этих огнеупоров являются крупнейшие металлургические предприятия России и ближнего зарубежья: ПАО «Северсталь», АО ЕВРАЗ ЗСМК,

Таблица 1. Физико-химические свойства традиционных алюмосиликатных изделий для воздухонагревателей доменных печей

Показатели	ГОСТ 20901–2016			Факт*		
	ШВ-37	ШВ-42	ШВ-72	ШВ-37	ШВ-42	ШВ-72
Массовая доля, %:						
Al ₂ O ₃ , не менее	37	42	72	39,2	48,5	74,5
Fe ₂ O ₃ , не более	–	1,7	1,2	–	1,50	0,93
Огнеупорность, °С, не ниже	1730	1750	–	1730	1750	–
Остаточные изменения размеров, %, не более, при температуре, °С:						
1350	–0,2	–	–	0,0	–	–
1450	–	–0,4	–	–	0,2	–
1600	–	–	–0,8	–	–	0,3
Температура начала размягчения, °С, не ниже	1330	1500	1550	1367	1510	1579
Открытая пористость, %, не более	23–25	14–20	21–24	18,4–22,3	16,9–18,2	19,8–21,9
Предел прочности при сжатии, Н/мм ² , не менее	20	30–40	30–50	38	52–63	72–81

* Средние фактические данные по результатам многочисленных выборок.



В. А. Мусевич

E-mail: vmusevich@aobko.ru

АО ЕВРАЗ НТМК, ПАО НЛМК, ПАО ММК, ПАО ЧМК, АО «Арселор Миттал Темиртау» и многие другие. За последние 5 лет работы АО БКО реализовало более 20 проектов по комплексной поставке огнеупорных материалов для футеровки воздухонагревателей. Более того, после каждого реализованного проекта заказчики продукции

направляют в адрес АО БКО положительные отзывы и референции.

Один из основных факторов интенсификации доменного процесса — повышение температуры нагрева доменного дутья, которое может быть достигнуто за счет повышения температуры купола и продуктов горения, внедрения в воздухонагреватель эффективной насадки с увеличенной поверхностью нагрева, совершенствования разных систем воздухонагревателей. В этой связи заказчики предъявляют повышенные требования к теплофизическим свойствам и другим характеристикам огнеупоров, обеспечивающим увеличение стойкости рабочего слоя футеровки и продлевающим ресурс эксплуатации тепловых агрегатов на срок не менее 30 лет.

Компания АО «КАЛУГИН» является мировым лидером по разработке бесшахтных доменных воздухонагревателей Калугина (ВНК) и

разных систем утилизации тепла. В настоящее время более 30 % российского чугуна производится с применением доменного оборудования, созданного компанией; в мировом масштабе этот показатель составляет 10 %. Отличительной особенностью бесшахтных ВНК является наличие форкамеры (камеры горения с горелкой) на верхней части купола (рис. 1, а). Газ сжигается в горелочном устройстве форкамерного типа со струйно-вихревой подачей газа и воздуха, расположенном сверху купола по оси воздухонагревателя. Кольцевые коллекторы газа и воздуха размещаются внутри кладки форкамеры, а сама кладка форкамеры ВНК имеет независимую опору на кожух. Закрутка струй газа и воздуха в форкамере (рис. 1, б) обеспечивает весьма интенсивное и равномерное сжигание газа, которое заканчивается в средней части купола, до входа в насадку. Пример расчета форкамерной горелки

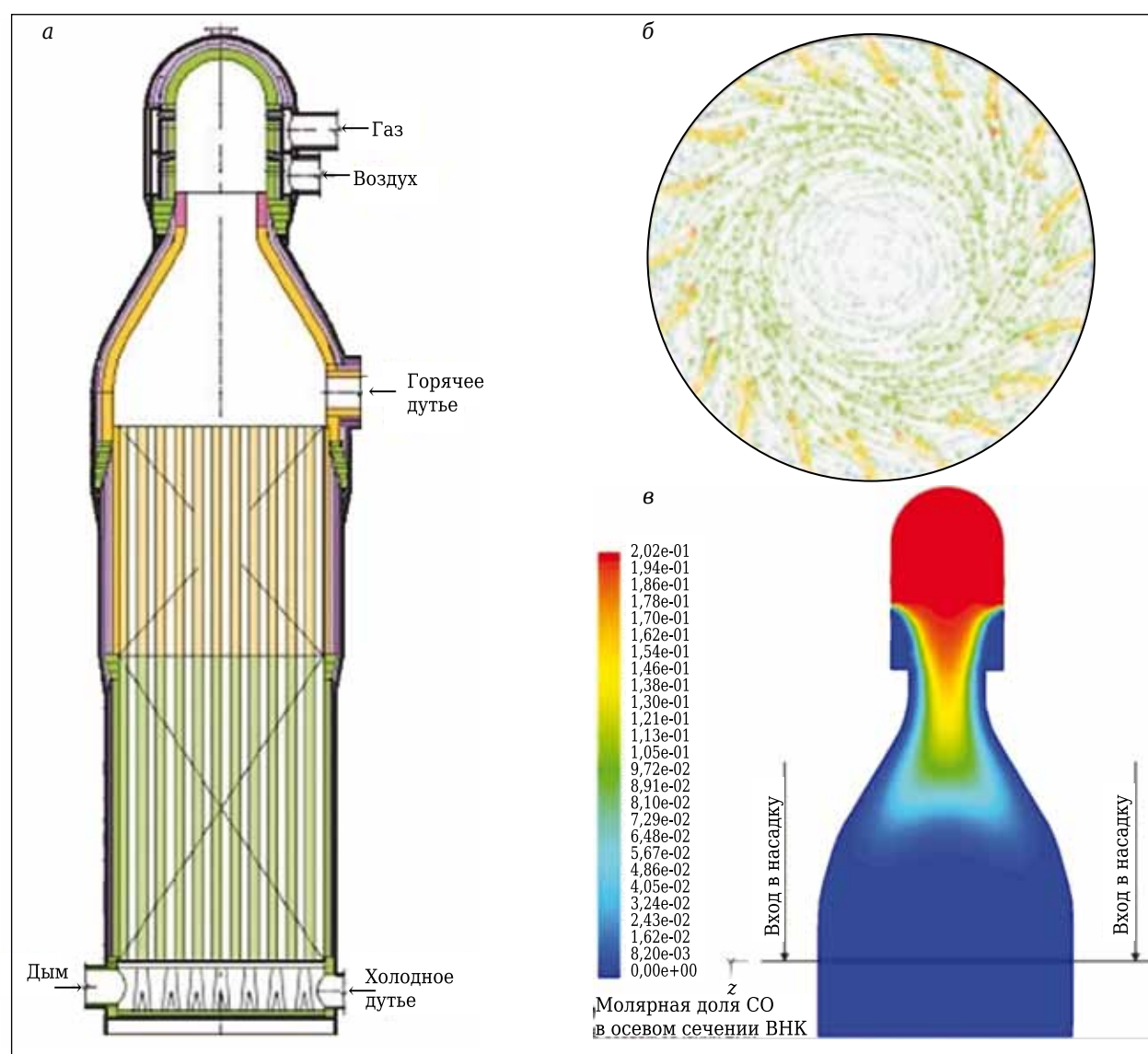


Рис. 1. Принципиальная схема воздухонагревателя конструкции Калугина (а); закрученный поток газов в форкамере (б); тепловой расчет положения зоны горения газа в ВНК (в)

показан на рис. 1, в. Видно, что горение газа начинается в форкамере и заканчивается в верхней части купола, так что при входе в насадку имеется практически полное сгорание газа с содержанием оксида углерода до 50 ppm. Таким образом, форкамерная горелка за счет струйной подачи газа и воздуха а также закрутки потоков обеспечивает весьма интенсивное их смешение и быстрое сгорание газа, превосходя по своим параметрам альтернативные керамические горелки.

Тесное сотрудничество АО БКО и АО «КАЛУГИН» началось в 2008 г., когда по запросу проектировщика было освоено производство необходимых для футеровки ВНК огнеупорных изделий заявленного дизайна с заданными физико-химическими характеристиками. В ходе масштабной работы при поддержке Центра совершенствования технологий и производства (ЦСТП) в АО БКО были разработаны и внедрены в серийное производство следующие огнеупорные изделия для футеровки ВНК [1]:

- муллитокорундовые марки DRL-150 для кладки воздухопроводов горячего дутья (табл. 2, рис. 2, а);

- муллитокремнеземистые марки HRK для кладки форкамер (табл. 3, рис. 2, б)

- насадочные марок ШВ-37 и ШВ-42, включая 37- и 65-канальные насадки.

При повышении температуры дутья воздухопроводы испытывают повышенную тепловую нагрузку. Учитывая, что их футеровка выполнена кольцевой кладкой клиновыми огнеупорами, при повышенной температуре на воздухопроводы дополнительно воздействуют сжимающие нагрузки за счет теплового расширения. Поэтому изделия, кроме высокой прочности при комнатной температуре, должны иметь очень низкую скорость ползучести при сжатии (крип). Этот параметр определяется малым количеством стеклофазы в изделиях, обладающей высокой вяз-

костью, и формированием плотной структуры за счет реакций, протекающих в материале изделия под воздействием высокой температуры. Разработанные в АО БКО муллитокорундовые огнеупоры марки DRL-150 для футеровки воздухопроводов горячего дутья ВНК помимо высоких прочностных характеристик имеют предельно низкие показатели крипа. Этот показатель при 1500 °С в интервале 15–25 ч составляет 0,003 %/ч, в интервале 25–50 ч 0,002 %/ч.

Изделия форкамеры воздушонагревателя служат в сложном термонапряженном состоянии в условиях переменного теплового режима (нагрев – охлаждение), что предъявляет повышенные требования к огнеупорам по термостойкости. В АО БКО была внедрена инновационная технология производства специальных высокоглиноземистых изделий для футеровки этого узла воздушонагревателей. В сочетании с высокой механической прочностью и низкой пористостью продукция обладает очень высокой устойчивостью к термоударам. Изделия при открытой пористости менее 22 % и пределе прочности при сжатии не менее 50 Н/мм² выдерживают более 100 водяных теплосмен. Например, изделие HRK для футеровки форкамеры бесшахтных ВНК имеет уникальные технические характеристики: при открытой пористости 17 % и пределе прочности при сжатии 98 Н/мм² оно выдерживает более 100 водяных теплосмен.

Параллельно в АО БКО осваивалась технология выпуска 37- и 65-канальных насадочных изделий марок ШВ-37 и ШВ-42 по чертежам АО «КАЛУГИН» (рис. 3). Впоследствии эти изделия также были признаны соответствующими требованиям нормативной документации и рекомендованы для использования при строительстве ВНК.

Таким образом, в короткие сроки в АО БКО было освоено производство специализированной продукции, максимально адаптированной к

Таблица 2. Физико-химические свойства муллитокорундовых изделий DRL-150 для воздухопроводов горячего дутья бесшахтных ВНК

Показатель	Норматив	Факт*
Массовая доля, %:		
Al ₂ O ₃ , не менее	80,0	85,0
Fe ₂ O ₃ , не более	1,20	0,51
Огнеупорность, °С, не ниже	1770	1770
Открытая пористость, %, не более	19	15,2
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не менее	2,8	2,91
Предел прочности при сжатии, Н/мм ² , не менее	60	87
Ползучесть при 1500 °С и выдержке 50 ч, %, не более	0,8	0,5–0,6
Температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 Н/мм ² , °С, не ниже	1600	1630
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены, не менее	5	18
*Средние фактические данные по результатам многочисленных выборок.		

Таблица 3. Физико-химические свойства муллитокремнеземистых изделий HRK для форкамер бесшахтных ВНК

Показатель	Норматив	Факт*
Массовая доля, %:		
Al ₂ O ₃ , не менее	52	57,5
Fe ₂ O ₃ , не более	2,0	1,38
Огнеупорность, °С, не ниже	1750	> 1750
Температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 Н/мм ² , °С, не ниже	1400	1500
Кажущаяся плотность, г/см ³ , не менее	2,35	2,40
Открытая пористость, %, не более	22	17,2
Предел прочности при сжатии, Н/мм ² , не менее	45	98
Термостойкость (1300 °С – вода), теплосмены, не менее	100	> 100
*Средние фактические данные по результатам многочисленных выборок.		

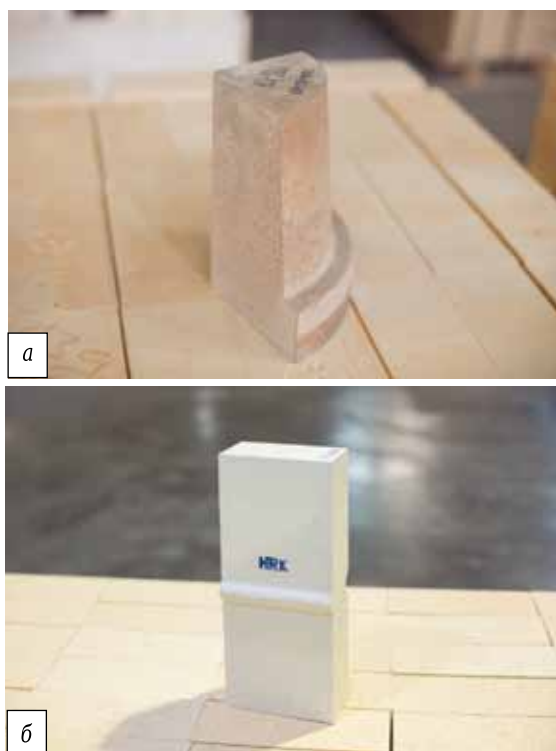


Рис. 2. Изделия DRL-150 (а) и HRK (б)

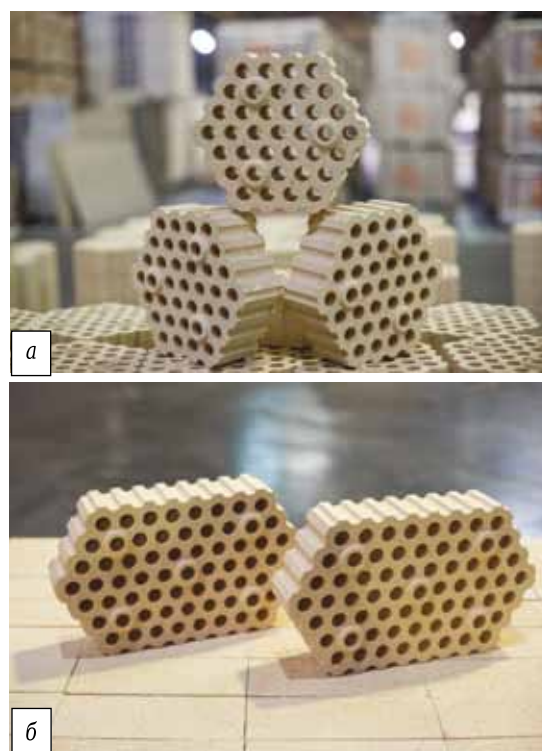


Рис. 3. Изделия марки ШВ-37: а — 37-канальная насадка; б — 65-канальная насадка

жестким условиям эксплуатации воздухонагревателей, разрабатываемых АО «КАЛУГИН». Высокотехнологичное оборудование (дробильно-помольное, смесительное, прессовое) на всех переделах производства, богатая научно-техническая база, высококвалифицированные кадры позволили комбинату огнеупоров разработать и оперативно освоить технологию производства этих огнеупорных материалов с заданными техническими параметрами, произвести необходимую прессовую оснастку для выпуска особосложных изделий и обеспечить требуемую точность их геометрических размеров [2]. На всех этапах эта сложная работа проводилась под постоянным вниманием и особым контролем специалистов АО «КАЛУГИН». Ими были выданы особые рекомендации и пожелания, направленные на оптимизацию и улучшение технологий выпуска огнеупорной продукции, что обеспечило повышение качества и стабильность физико-химических характеристик выпускаемых изделий. Итог этой совместной работы — полное подтверждение возможности производства в АО БКО и осуществления комплексных поставок огнеупорной продукции для ВНК по проектам и требованиям АО «КАЛУГИН», соответствие фактических характеристик выпускаемых огнеупорных изделий заявленным проектным требованиям.

Особенность взаимодействия АО БКО и АО «КАЛУГИН» — выполнение предварительной

стендовой сборки основных элементов ВНК из выпущенных по заказам и проектам изделий:

- коллекторов (воздушных и газовых);
- куполов и пробок куполов;
- арок воздушных коллекторов;
- воздухопроводов горячего дутья.

Сборка выполняется на специализированных стендах АО БКО.

Предварительно выполняется компьютерное 3D-моделирование сборки каждого элемента с учетом фактических размеров уже изготовленных изделий (рис. 4). С помощью моделирования разрабатываются рекомендации по сборке каждого из элементов ВНК.

За время партнерства с 2013 по 2020 г. АО «КАЛУГИН» и АО БКО реализовали более 15 крупных проектов по поставкам огнеупорных материалов (общим объемом более 21000 т) для комплексной футеровки ВНК на следующих металлургических предприятиях: ПАО «Северсталь», АО ЕВРАЗ НТМК, ПАО ММК, АО ЕВРАЗ ЗСМК, ПАО НЛМК, Trinecke Zelezarny (Moravia Steel, Чехия), АО СЧПЗ.

Ниже приведены два примера реализации новых масштабных совместных проектов по строительству и реконструкции воздухонагревателей.

1. Проект с ПАО «Северсталь». АО «КАЛУГИН», АО БКО и ПАО «Северсталь» имеют многолетние партнерские отношения в области производства, реализации и эксплуатации ши-

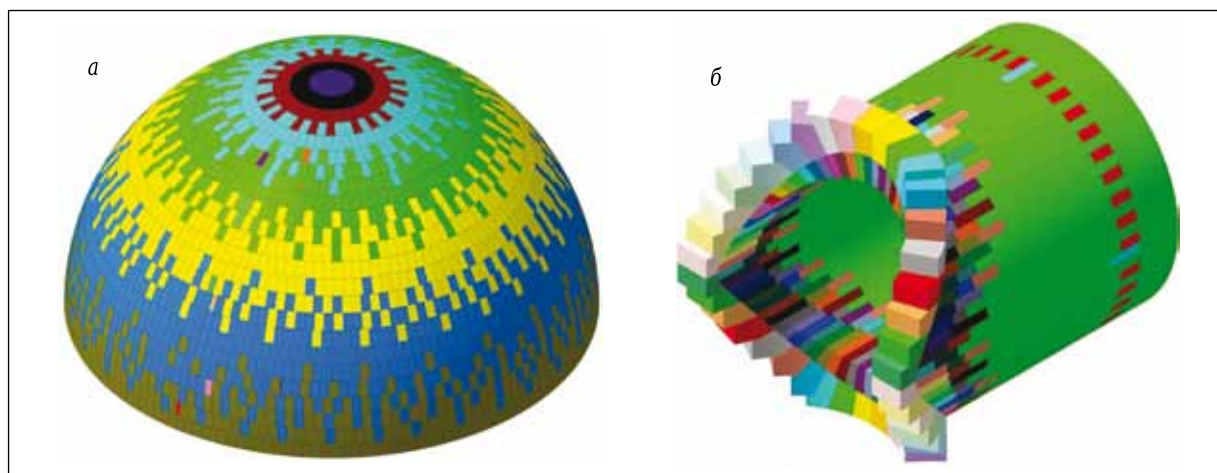


Рис. 4. Компьютерное 3D-моделирование стендовой сборки: купола форкамеры по фактическим размерам изделий марки HRK (а); арки и штуцера воздухопровода горячего дутья по фактическим размерам изделий марки DRL-150 (б)

рокого спектра высококачественных огнеупорных материалов для футеровки воздухонагревателей доменных печей (ДП). В середине 2018 г. АО БКО получило заказ от коксоаглодоменного производства «Северсталь» на выпуск огнеупорной продукции для строительства четырех воздухонагревателей новой ДП № 3 «Череповчанка» по проекту АО «КАЛУГИН». Основные показатели эффективности реализуемого проекта:

- высота ВНК около 40 м, масса металлоконструкций каждого воздухонагревателя 500 т;
- специальная конструкция воздухонагревателей позволяет получить температуру дутья в доменной печи до 1300–1400 °С;
- сокращение массы ВНК на 30–50 % в первую очередь за счет сокращения массы огнеупорных кладочных материалов;
- повышение срока службы ВНК без ремонтов до 30 лет;
- повышение температуры дутья и получение существенной экономии кокса;
- проектная производительность модернизированной домны более 3 млн т чугуна в год.

Этот крупный проект включает комплексную поставку следующей огнеупорной продукции (6585 т):

- шамотных 37- и 65-канальных насадочных изделий двух марок для камеры насадки ВНК (~ 4100 т). При этом каждая марка изделий включает 80 разных форматов насадочных изделий, в том числе резаных;
- шамотных стеновых изделий для футеровки ВНК двух марок и 13 типоразмеров (> 1500 т);
- высокоглиноземистых изделий двух марок со специальными теплофизическими характеристиками для футеровки отдельных узлов кладки воздухонагревателя общим объемом 870 т и 125 особосложных форматов (изделия для форкамеры, воздухопроводов, штуцеров, арок);
- высокоглиноземистого мертеля (115 т).

В процессе поэтапного выпуска этого заказа были проведены приемки продукции специалистами АО «КАЛУГИН» и ПАО «Северсталь»: проверка входного контроля огнеупоров, соответствие их физико-химическим нормативным значениям, проверка контрольной стендовой сборки элементов воздухонагревателей (4 купола, 4 арки газового и 4 арки воздушного коллекторов, 4 нижние арки штуцера горячего дутья, рис. 5). Выполнение предварительной контрольной сборки позволило:

- обеспечить проверку качества изготовления изделий;
- обеспечить тщательную подгонку элементов конструкции;
- облегчить и ускорить сборку в условиях ПАО «Северсталь» [3].

По окончании контрольных сборок на каждое огнеупорное изделие была нанесена дополнительная маркировка (адрес в кладке) с указанием номера воздухонагревателя, номера ряда по высоте, порядкового номера в ряду, начиная от линии отсчета (рис. 6). Представители заказчика и проектировщика были полностью удовлетворены качеством представленной к инспекциям продукции и сроками выполнения заказа в целом.

Вся выпущенная огнеупорная продукция для строительства четырех ВНК была поэтапно отгружена в Череповец. На июнь 2020 г. на площадке строительства агрегатов ведутся футеровочные работы. Специалисты отметили удобство футеровочных работ после качественно выполненной контрольной сборки элементов воздухонагревателя на комбинате огнеупоров. Задувка новой ДП № 3 и пуск в работу ВНК планируются во второй половине 2020 г. (рис. 7).

Слаженная совместная деятельность по реализации такого масштабного проекта позволила обеспечить запуск в эксплуатацию модерни-



Рис. 5. Стендовая сборка и приемка продукции в АО БКО в присутствии представителя АО «КАЛУГИН»: а — купол ВНК; б — воздушный коллектор; в — газовый коллектор; г — арка штуцера горячего дутья

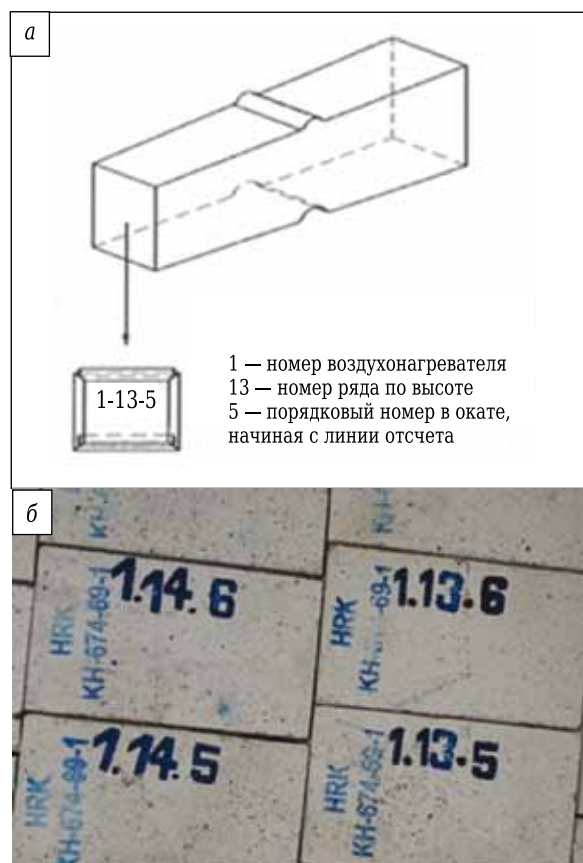


Рис. 6. Маркировка изделий на примере купола формеры: а — порядок идентификации; б — внешний вид изделий



Рис. 7. Внешний вид строящихся воздухонагревателей ДП № 3 ПАО «Северсталь»

рованных металлургических агрегатов четко в срок и повысить эффективность функционирования доменного цеха.

II. Проект с ЕВРАЗ НТМК. В начале 2019 г. АО ЕВРАЗ НТМК приступило к техническому перевооружению доменной печи № 6 и реконструкции трех воздухонагревателей к ней. Для реализации проекта на тендерной основе была выбрана компания АО «КАЛУГИН», которая разработала проект и выбрала поставщиков технологического оборудования и огнеупорных материалов для строительства воздухонагревателей. АО БКО получило заказ на поставку огнеупорной продукции и принимало непосредственное участие в этой масштабной реконструкции. Модернизация ДП № 6 позволит АО ЕВРАЗ НТМК выпускать чугун на двух новых

современных домнах (включая построенную в 2018 г. ДП № 7; в строительстве воздухонагревателей для этой печи также принимали активное участие специалисты АО БКО и АО «КАЛУГИН»). После запуска печи будет остановлена выработавшая свой срок ДП № 5. Объем новой печи после технического перевооружения составит 2200 м³, мощность 2,5 млн т чугуна в год. Домна будет оборудована двумя литейными дворами с полностью закрытыми главными и транспортными желобами, автоматизированными системами верхней и нижней загрузки сырья, бесшахтными ВНК.

АО БКО изготовило и поставило следующую огнеупорную продукцию суммарным объемом 4265 т (апрель 2019 г. – февраль 2020 г.) для строительства трех ВНК ДП № 6 АО ЕВРАЗ НТМК:

- шамотные насадочные изделия для камеры насадки ВНК (2078 т);

- шамотные стеновые изделия для футеровки ВНК двух марок и 11 типоразмеров (611 т);

- высокоглиноземистые изделия для кладки воздухопроводов горячего дутья (385 т) из 14 форматов изделий;

- высокоглиноземистые изделия двух марок со специальными теплофизическими характеристиками для футеровки отдельных узлов кладки воздухонагревателя общим объемом 984 т из 170 особосложных форматов (изделия для форкамеры, воздухопроводов, штуцеров, арок);

- муллитокремнеземистые изделия (168 т) для арматурной футеровки отдельных конструкций воздухонагревателей;

- специальный огнеупорный клей (39 т).

В процессе последовательного выпуска изделий были проведены приемки продукции специалистами АО ЕВРАЗ НТМК и АО «КАЛУГИН»: проверка входного контроля огнеупоров, соответствие их физико-химическим нормативным значениям, проверка контрольной стендовой сборки элементов воздухонагревателей. Всего в условиях АО БКО перед отправкой продукции были осуществлены следующие сборки для последующего облегчения и ускорения проведения футеровочных работ на строительной площадке: шесть комплектов арок штуцера газа и воздуха, три комплекта нижних арок штуцера горячего дутья, три комплекта купола (рис. 8).

Выпущенная огнеупорная продукция для строительства воздухонагревателей в полном объеме была поэтапно отгружена в Нижний Тагил в установленные графиком сроки, прошла комплексный входной контроль у заказчика без претензий и нареканий. Отмечены высокое качество и точность геометрических размеров всех изделий, удобство проведения футеровочных работ после контрольной сборки элементов воздухонагревателя на комбинате огнеупоров. В настоящее время на площадке строительства агрегатов закончены монтажные и футеровочные работы.



Рис. 8. Стендовые сборки в АО БКО и приемка продукции в присутствии представителей АО «КАЛУГИН» и АО ЕВРАЗ НТМК: а — штуцер горячего дутья; б — нижняя арка штуцера; в — совместная инспекция; г — комплект купола



Рис. 9. Внешний вид воздушонагревателей ДП № 6 АО ЕВРАЗ НТМК

Проектное окончание технического перевооружения — третий квартал 2020 г. Внедряются так называемые безлюдные технологии, предусматривающие автоматизированное управление новой ДП № 6 и воздушонагревателей, включая загрузку сырья и топлива. Интеллектуальная система за счет сбора и анализа статистической

информации позволит определить оптимальный технологический режим и управлять доменной плавкой без участия человека.

Совместная работа АО ЕВРАЗ НТМК (одного из крупнейших потребителей огнеупорных материалов АО БКО) и АО «КАЛУГИН» позволила при реализации проекта внедрить новые и самые перспективные виды огнеупорных изделий, обеспечить новым воздушонагревателям (рис. 9) увеличенный ресурс эксплуатации. Расширяя спектр своей деятельности [4], АО БКО постоянно осваивает производство новой продукции, которая по своим техническим и ресурсным характеристикам превосходит различные отечественные аналоги, не уступает лучшим зарубежным образцам. Таким образом, сотрудничество АО БКО и инженеринговой компании АО «КАЛУГИН» повышает инновационные возможности двух предприятий, позволяет осуществлять масштабные проекты по строительству и реконструкции воздушонагревателей, повышает эффективность работы доменного производства, способствует развитию и росту конкурентоспособности российской металлургии.

Библиографический список

1. **Сакулин, А. В.** Разработка современных высокоэффективных огнеупорных материалов / А. В. Сакулин, В. В. Скурихин Л. Ю., Громова, О. С. Федорова // Новые огнеупоры. — 2012. — № 6. — С. 14–19.
2. **Маргишвили, А. П.** Разработка и внедрение в производство новых огнеупорных материалов и пропантов / А. П. Маргишвили, С. И. Гершкович, А. Н. Иксанова [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 6. — С. 16–24.
3. **Можжерин, А. В.** Опыт применения огнеупоров АО «БКО» на ПАО «Северсталь» / А. В. Можжерин, А. В.

Сакулин, А. П. Маргишвили [и др.] // Новые огнеупоры. — 2017. — № 6. — С. 4–11.

4. **Коржавин, А. Ю.** Уверенно смотрим в будущее / А. Ю. Коржавин, А. В. Витовский, В. А. Мусевич // Новые огнеупоры. — 2017. — № 6. — С. 25–28. ■

Получено 01.07.20

© А. В. Сакулин, С. И. Гершкович,
Ф. Р. Иксанов, А. В. Витовский,

В. А. Мусевич, Н. В. Вихрова, М. Я. Калугина,
Б. Н. Прокофьев, Ю. А. Мурзин, 2020 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

