

## **Опыт использования материалов АО «БКО» при строительстве высокотемпературных воздухонагревателей конструкции Калугина (ВНК)**

к.т.н. Сакулин А.В., к.т.н. Гершкович С.И., к.т.н. Иксанов Ф.Р., Витовский А.В., к.т.н. Мусевич В.А., Вихрова Н.В. (АО «БКО»). г. Боровичи Новгородской обл., Россия.

Калугина М.Я., Прокофьев Б.Н., Мурзин Ю.А., (АО «КАЛУГИН»), г. Екатеринбург, Россия.

### Реферат

*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 повышающие технико-экономические показатели и эффективность работы тепловых агрегатов.*

### Ключевые слова

*АО «БКО», АО «КАЛУГИН», ПАО «Северсталь», АО «ЕВРАЗ НТМК», воздухонагреватель, 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 таблице №1 представлены характеристики выпускаемых стеновых и насадочных изделий различных форматов и типоразмеров.

Важно отметить, что Потребителями этих огнеупоров являются крупнейшие металлургические предприятия России и ближнего зарубежья: ПАО «Северсталь», АО «ЕВРАЗ ЗСМК», АО «ЕВРАЗ НТМК», ПАО «НЛМК», ПАО «ММК», ПАО «ЧМК», АО «Арселор Миттал Темиртау» и многие другие. За последние 5 лет работы предприятие 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» исключительно положительные отзывы и референции.

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

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

\*средние фактические результаты по результатам многочисленных выборок

Одним из основных факторов интенсификации доменного процесса является повышение температуры нагрева доменного дутья, которое может быть достигнуто за счет увеличения температуры купола и температуры продуктов горения, внедрения в воздухонагреватель эффективной насадки с повышенной поверхностью нагрева, совершенствованием различных систем воздухонагревателей. Вследствие чего со стороны Заказчиков предъявляются повышенные технические требования к теплофизическим свойствам и характеристикам огнеупоров, обеспечивающих увеличение стойкости рабочей футеровки и продлевающих ресурс эксплуатации тепловых агрегатов на срок не менее 30 лет.

Компания АО «КАЛУГИН» является мировым лидером по разработке бесшахтных доменных воздухонагревателей и различных систем утилизации тепла. В настоящее время более 30% российского чугуна производится с помощью доменного оборудования, созданного компанией, в мировом масштабе этот показатель составляет 10%.

Отличительной особенностью бесшахтных ВНК является наличие форкамеры (камеры горения с горелкой) на верху купола (рис. 1а). 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. 1б) обеспечивает весьма интенсивное и равномерное сжигание газа, которое

заканчивается в средней части купола, до входа в насадку. Пример результатов расчёта форкамерной горелки показан на рис. 1в. Здесь 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 счёт струйной подачи газа и воздуха и закрутки потоков обеспечивает весьма интенсивное их смешение и быстрое сгорание газа, по своим параметрам превосходя альтернативные керамические горелки.

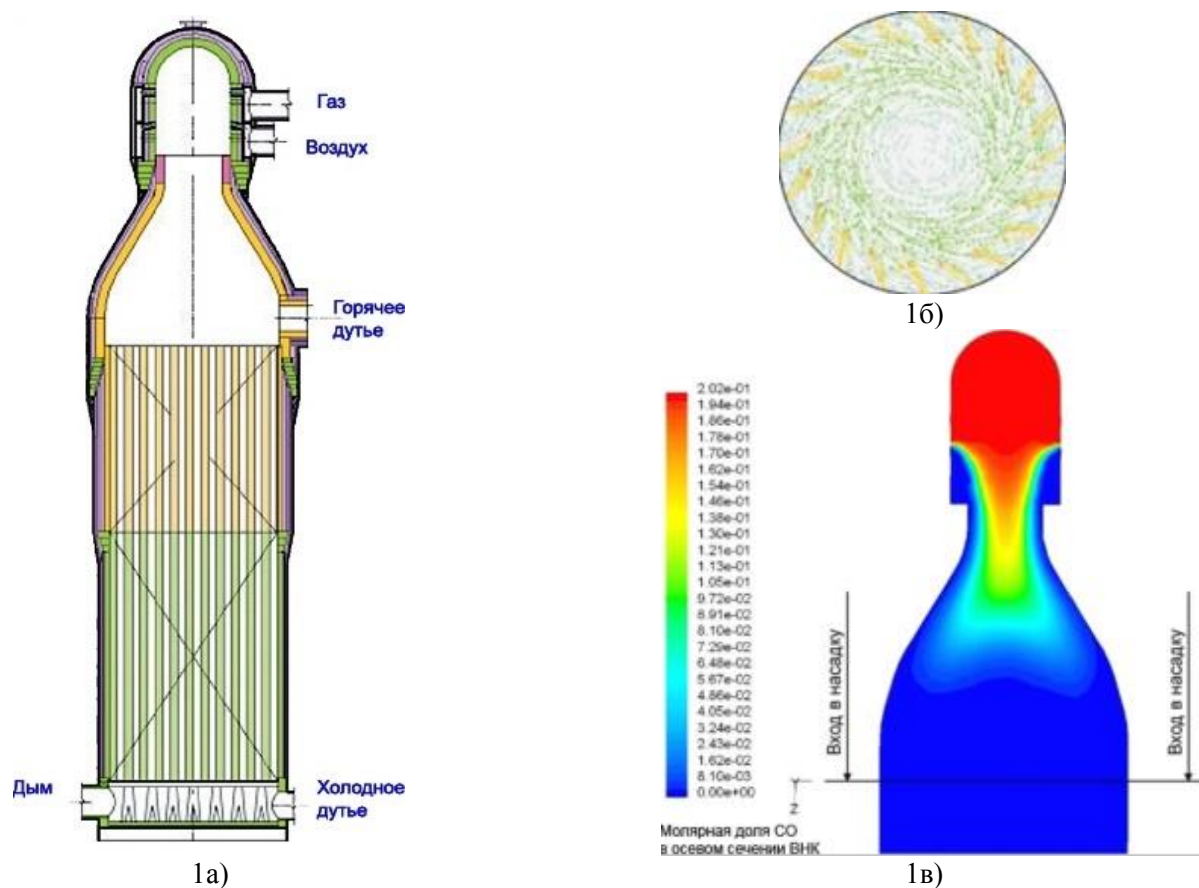


Рисунок 1 – а) принципиальная схема воздухонагревателя конструкции Калугина; б) закрученный поток газов в форкамере; в) тепловой расчет положение зоны горения газа в ВНК.

Тесное сотрудничество между компаниями АО «БКО» и АО «КАЛУГИН» началось в 2008 году, когда по запросу Проектировщика было освоено промышленное производство необходимых для футеровки ВНК огнеупорных изделий заявленного дизайна и с заданными параметрами физико-химических характеристик.

В ходе масштабной и кропотливой работы при поддержке Центра совершенствования технологий и производства (ЦСТиП) АО «БКО» были разработаны и внедрены в серийное производство следующие огнеупорные материалы для футеровки ВНК [1]:

- муллитокремнезёмистые огнеупорные изделия марки HRK для кладки форкамеры;
- муллитокорундовые изделия марки DRL-150 для кладки воздухопроводов горячего дутья,
- насадочные изделия марок ШВ-37 и ШВ-42, включая 37- и 65-канальную насадки.

При повышении температуры дутья воздухопроводы испытывают повышенную тепловую нагрузку. Учитывая, что их футеровка выполнена кольцевой кладкой клиновыми огнеупорами, то

при повышенной температуре на воздуховоды дополнительно будут действовать сжимающие нагрузки за счет теплового расширения. Поэтому изделия, кроме высокой прочности при комнатной температуре, должны иметь очень низкую скорость ползучести при сжатии (крип). Данный параметр обусловлен малым количеством стеклофазы в изделиях, обладающей высокой вязкостью, и формированием плотной структуры за счет реакций, протекающих в материале продукции под воздействием высокой температуры. Разработанные на 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  $T=1500^{\circ}\text{C}$  в интервале 15...25 часов составляет 0,003 %/час, в интервале 25...50 часов – 0,002 %/час.

Таблица 2 – Физико-химические свойства муллитокорундовых изделий DRL-150 для воздуховодов горячего дутья бесшахтных ВНК

| Показатели   | Норматив | Факт*     |
|--|----------|-----------|
| Массовая доля, % :   |          |           |
| - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , не менее   | 80,0     | 85,0      |
| - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , не более   | 1,20     | 0,51      |
| Огнеупорность, $^{\circ}\text{C}$ , не ниже  | 1770     | 1770      |
| Пористость открытая, % не более  | 19       | 15,2      |
| Кажущаяся плотность, $\text{г}/\text{см}^3$ , не менее                             | 2,8      | 2,91      |
| Предел прочности при сжатии, $\text{Н}/\text{мм}^2$ , не менее                     | 60       | 87        |
| Ползучесть при $T=1500^{\circ}\text{C}$ и выдержке 50 часов, %, не более           | 0,8      | 0,5 – 0,6 |
| Температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 МПа, $^{\circ}\text{C}$ , не ниже | 1600     | 1630      |
| Термостойкость ( $1300^{\circ}\text{C}$ – вода), теплосмен, не менее               | 5        | 18        |

\*средние фактические результаты по результатам многочисленных выборок

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

| Показатели   | Норматив | Факт*  |
|--|----------|--------|
| Массовая доля, %:  |          |        |
| - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , не менее   | 52       | 57,5   |
| - $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , не более   | 2,0      | 1,38   |
| Огнеупорность, $^{\circ}\text{C}$ , не менее                                       | 1750     | > 1750 |
| Температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 МПа, $^{\circ}\text{C}$ , не ниже | 1400     | 1500   |
| Кажущаяся плотность, $\text{г}/\text{см}^3$ , не ниже                              | 2,35     | 2,40   |
| Пористость открытая, % не более  | 22       | 17,2   |
| Предел прочности при сжатии, МПа, не менее   | 45       | 98     |
| Термостойкость ( $1300^{\circ}\text{C}$ – вода), теплосмен, не менее               | 100      | > 100  |

\*средние фактические результаты по результатам многочисленных выборок

Изделия форкамеры воздухонагревателя служат в сложном термонапряженном состоянии в условиях переменного теплового режима (нагрев – охлаждение), что предъявляет повышенные требования к огнеупорам по термостойкости. На АО «БКО» была внедрена инновационная технология производства специальных высокоглиноземистых изделий для футеровки данного узла воздухонагревателей. В сочетании с высокой механической прочностью и низкой пористостью продукция обладают очень высокой устойчивостью к термоударам. Изделия при открытой пористости менее 22 % и предела прочности при сжатии не менее 50 Н/мм<sup>2</sup> выдерживают более 100 водяных термоциклов. Так, например, фактически выпущенное и принятое изделие HRK, предназначенное для футеровки форкамеры бесшахтных ВНК, имеет уникальные технические характеристики: при открытой пористости 17 % и пределом прочности при сжатии 98 Н/мм<sup>2</sup> выдерживает свыше 100 водяных теплосмен.



2а)



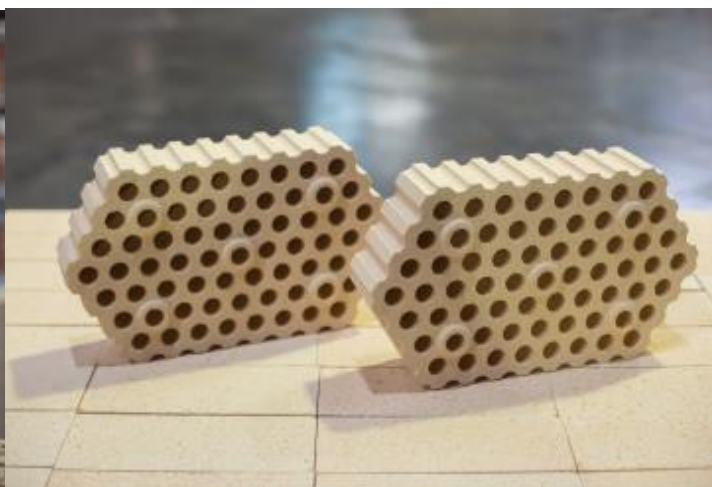
2б)

Рисунок 2 – Внешний вид изделий: а) DRL-150; б) HRK.

Параллельно на «БКО» проходил процесс кропотливого освоения технологии выпуска 37- и 65-канальных насадочных изделий марок ШВ-37 и ШВ-42 по чертежам компании АО «КАЛУГИН». Впоследствии данные изделия также были признаны соответствующими требованиям нормативной документации и рекомендованы для использования при строительстве ВНК.



3а)



3б)

Рисунок 3 – Изделия марки ШВ-37: а) 37-канальная насадка; б) 65-канальная насадка.

Таким образом, в короткие сроки в условиях АО «БКО» было освоено производство специализированной продукции, максимально адаптированной к жестким условиям эксплуатации воздухонагревателей, разрабатываемых компанией АО «КАЛУГИН». Наличие на комбинате огнеупоров качественного и высокотехнологичного оборудования (дробильно-помольного, смесительного, прессового) на всех переделах производства, богатой научно-технической базы, высококвалифицированных кадров позволили оперативно разработать и освоить промышленную технологию производства данных огнеупорных материалов с заданными техническими параметрами, произвести необходимую прессовую оснастку для выпуска особосложных изделий и обеспечить требуемую точность геометрических размеров [2]. На всех этапах данная сложная работа на АО «БКО» проводилась под пристальным, постоянным вниманием и особым контролем специалистов компании 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 на АО «БКО» и осуществления комплексных поставок огнеупорной продукции для ВНК по проектам и требованиям компании АО «КАЛУГИН», соответствие фактических характеристик выпускаемых огнеупорных изделий заявленным проектным требованиям.

Особенность взаимодействия предприятий АО «БКО» и АО «КАЛУГИН» является 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;
- трубопроводов горячего дутья.

Сборка выполняется на специализированных стендах АО «БКО».

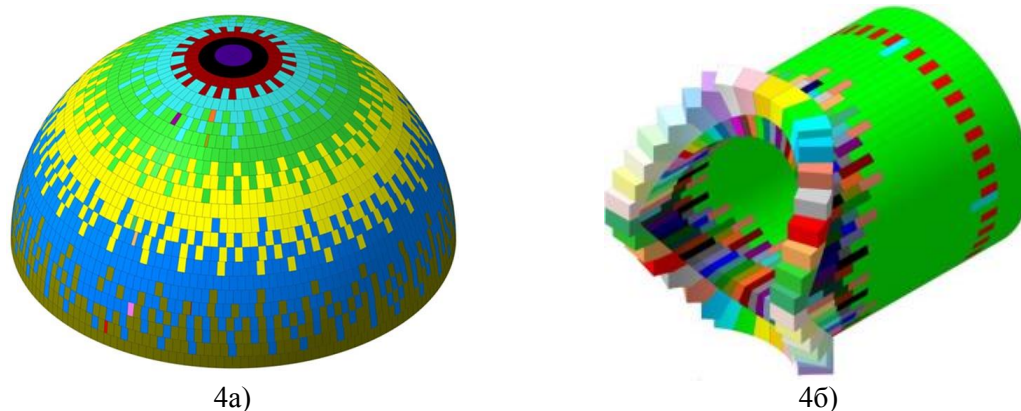


Рисунок 4 – Компьютерное 3-D моделирование стендовой сборки: а) купола форкамеры по фактическим размерам изделий марки HRK; б) арки и штуцера воздухопровода горячего дутья по фактическим размерам изделий марки DRL-150.

Предварительно выполняется компьютерное 3-D моделирование сборки каждого элемента с учётом фактических размеров уже изготовленных изделий. С помощью моделирования разрабатываются рекомендации по выполнению сборки каждого из элементов ВНК.

За время партнерства с 2013 г. по 2020 г. компании АО «КАЛУГИН» и АО «БКО» реализовали более 15 крупных проектов по поставкам огнеупорных материалов (общим объемом более 21 000 тонн продукции) 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».

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

АО «КАЛУГИН», АО «БКО» и ПАО «Северсталь» (г. Череповец, Вологодской области) имеют многолетние партнёрские отношения в области производства, реализации и эксплуатации широкого спектра высококачественных огнеупорных материалов, предназначенных 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». Выделим основные показатели эффективности реализуемого проекта:

- высота ВНК составляет около 40 метров, масса металлоконструкций каждого воздухонагревателя – 500 тонн;
- 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 срок службы ВНК без ремонтов до 30 лет;
- повышение температуры дутья и получение существенной экономии кокса;
- проектная производительность модернизированной домны - более 3 млн. тонн чугуна в год.

Данный крупный проект состоит из следующих огнеупорных материалов в виде комплексной поставки суммарной емкостью 6585 тонн:

- шамотные 37-канальные и 65-канальные насадочные изделия из 2-х марок для камеры насадки ВНК общим объемом около 4100 тонн. При этом каждая марка изделий включает 80 различных форматов насадочных изделий, в том числе резанных;
- шамотные стеновые изделия для футеровки ВНК из 2-х марок и 13 типоразмеров суммарным объемом более 1500 тонн;
- высокоглиноземистые огнеупорные изделия 2-х марок со специальными теплофизическими требованиями для футеровки отдельных узлов кладки воздухонагревателя общим количеством 870 тонн их 125 особосложных форматов (изделия для форкамеры, воздухопроводов, штуцеров, арок);



- высокоглиноземистый мертель объемом 115 тонн.

В процессе поэтапного выпуска данного заказа были проведены приемки продукции специалистами компаний 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 (рисунки 5а, б, в, г). Выполнение предварительной контрольной сборки позволило обеспечить:

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

По окончании контрольныхборок на каждом огнеупорном изделии была нанесена дополнительная маркировка (адрес в кладке) с указанием:

- номер воздухонагревателя;
- номер ряда по высоте;
- порядковый номер в ряду, начиная от линии отсчета (рисунок б).

Представители заказчика и проектировщика были полностью удовлетворены качеством представленной к инспекциям продукции и сроками выполнения заказа в целом.



а)



б)



в)



г)



Рисунок 5 - Стендовые сборки в условиях АО «БКО» и приемка продукции в присутствии представителя компании АО «КАЛУГИН»: а) купол ВНК; б) воздушный коллектор; в) газовый коллектор; г) арка штуцера горячего дутья.



а)



б)

Рисунок 6 - Маркировка изделий на примере купола форкамеры: а) порядок идентификации б) внешний вид изделий

Вся выпущенная огнеупорная продукция для строительства четырех ВНК была поэтапно отгружена в Череповец. На период июнь 2020 г. на площадке строительства агрегатов ведутся футеровочные работы. Специалисты отметили удобство футеровочных операций после качественно выполненной контрольной сборки элементов воздухонагревателя в условиях АО «БКО». Задувка новой ДП №3 и пуск в работу ВНК планируются во второй половине 2020 года.



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

Слаженная совместная деятельность по реализации такого сложного и масштабного проекта позволило обеспечить запуск в эксплуатацию модернизированных металлургических агрегатов четко в срок и повысить эффективность функционирования доменного цеха.

В начале 2019 года АО «ЕВРАЗ НТМК» приступил 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 большой заказ на поставку огнеупорной продукции и принимало непосредственное участие в реализации этой масштабной реконструкции. Модернизация ДП № 6 даст АО «ЕВРАЗ НТМК» возможность выпускать чугун на двух новых современных домнах (включая построенную в 2018 году ДП №7, в строительстве воздухонагревателей для которой также принимали активное участие АО «БКО» и специалисты компании АО «КАЛУГИН»). После запуска печи будет остановлена выработавшая свой срок ДП № 5. Объем новой печи после технического перевооружения составит 2200 м<sup>3</sup>, мощность 2,5 млн. тонн 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» произвело и поставило следующую огнеупорную продукцию суммарным объемом 4265 тонн в период апрель 2019 г. – февраль 2020 г. для строительства трех ВНК ДП №6 «ЕВРАЗ НТМК»:

- шамотные насадочные изделия для камеры насадки ВНК общим объемом 2078 тонн;
- шамотные стеновые изделия для футеровки ВНК из 2-х марок и 11 типоразмеров суммарным количеством 611 тонн;
- высокоглиноземистые огнеупорные изделия для кладки воздухопроводов горячего дутья в объеме 385 тонн из 14 форматов изделий;
- высокоглиноземистые огнеупорные изделия 2-х марок со специальными теплофизическими требованиями для футеровки отдельных узлов кладки воздухонагревателя общим количеством 984 тонн из 170 особосложных форматов (изделия для форкамеры, воздухопроводов, штуцеров, арок);
- муллитокремнеземистые изделия в количестве 168 тонн для выполнения арматурной футеровки отдельных конструкций воздухонагревателей;
- специальный огнеупорный клей объемом 39 тонн.

В процессе последовательного выпуска изделий были проведены приемки продукции специалистами компаний 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.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 8 - Стендовые сборки в условиях АО «БКО» и приемка продукции в присутствии представителя АО «КАЛУГИН» и АО «ЕВРАЗ НТМК: а) штуцер горячего дутья; б) нижняя арка штуцера; в) совместная инспекция; г) комплект купола.

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 футеровочных операций после качественно выполненной контрольной сборки элементов воздухонагревателя в условиях АО «БКО». Сейчас на площадке строительства агрегатов закончены монтажные и футеровочные работы.





Рисунок 9 - Внешний вид воздухонагревателей ДП №6 АО «ЕВРАЗ НТМК».

Проектное окончание техперевооружения – третий квартал 2020 года. Внедряются так называемые безлюдные технологии, предусматривающие автоматизированное управление новой ДП №6 и воздухонагревателей, 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 компании АО «КАЛУГИН» позволило при реализации проекта внедрить новые и самые перспективные виды огнеупорных изделий, обеспечить новым воздухонагревателям увеличенный ресурс эксплуатации.

Расширяя спектр своей деятельности, 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 инжиниринговой компании АО «КАЛУГИН» повышает инновационные возможности двух предприятий, позволяет осуществлять масштабные проекты по строительству и реконструкции воздухонагревателей, обеспечивает повышение эффективности работы доменного производства, способствует развитию и повышению 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.