

УДК 669.162

**И.М. Мищенко /к.т.н./, А.В. Кузин /д.т.н./**

*ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

**Н.Н. Коробкин, А.В. Полохин**

*Енакиевский металлургический завод (Енакиево)*

**В.Ф. Кузьменко /к.т.н./, А.В. Кнышенко**

*Алчевский металлургический комбинат (Алчевск)*

**И.Ф. Русанов /к.т.н./**

*ГОУ ВПО «Донбасский государственный технический университет» (Алчевск)*

## **ОПЫТ УТИЛИЗАЦИИ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ В АГЛОМЕРАЦИОННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРЕДПРИЯТИЙ ДОНБАССА**

*Проведен анализ работы аглоцехов Енакиевского металлургического завода и Алчевского металлургического комбината при использовании в шихте вторичных железосодержащих ресурсов. Показано, что при условии качественной подготовки их введение в шихту в количестве до 200 кг/т агломерата не оказывает негативного влияния на прочность высокоосновного агломерата и показатели процесса спекания.*

***Ключевые слова:** агломерат, высокоосновная шихта, вторичные ресурсы, шлам, утилизация, прочность агломерата.*

### **Постановка проблемы**

Рециклинг вторичных железосодержащих ресурсов экономически оправдан и способствует повышению экологической безопасности предприятий черной металлургии. Но одновременно возможны серьезные потери, которые следует учитывать при планировании утилизации больших количеств отходов [1,2].

В агломерации используют мелкие, сыпучие отходы металлургии, содержащие в достаточном количестве полезные элементы и соединения – железо, марганец, горючий углерод, легирующие металлы, оксиды кальция, магния, алюминия и другие. Агломерационные фабрики преднамеренно сооружены в основном на территориях предприятий полного металлургического цикла в расчете на использование в шихте колошниковой пыли, почти столетие назад включенной в состав аглошихты, а также других пылей и шламов, некоторых шлаков, продуктов шлаковой переработки, прокатной окалины, флюсовых отходов, прежде всего, собственных цехов. Исключение необходимости складирования больших объемов отходов на предприятиях создает возможности обеспечения беспрепятственной, непрерывной работы металлургических агрегатов.

Колошниковая пыль, отсеvy агломерата и окатышей, незамасленная прокатная окалина утилизируются практически без существенных затруднений, и только использование неконди-

ционных шламов, тонких пылей, замасленной окалины является весьма проблематичным.

В целом решение проблемы утилизации некондиционных пылей и шламов в практике сводится к их гомогенизации путем перемешивания при обязательном участии сухих известьсодержащих отходов и других водопоглощающих материалов. Это позволяет обеспечить минимально необходимый уровень главных свойств смеси отходов – сыпучести, а, следовательно, дозируемости и способности к смешиванию и окомкованию.

В периоды устойчивой работы предприятий отрасли (80-е годы прошлого века) средний удельный расход отходов в агломерации составлял 160...170 кг/т агломерата, в том числе по видам: колошниковая пыль – 35; окалина – 30; шламы – 36; отсеvy агломерата и окатышей – 54; прочие отходы (шлаки, шламоскраповая, металлшлаковая смеси и др.) – 10.

В связи с дефицитом и повышением стоимости первичного рудного сырья (аглоруд, железорудных концентратов), особенно резко возросших в 2014...2020 гг., в агломерационных цехах Енакиевского металлургического завода (ЕМЗ) и Алчевского металлургического комбината (АМК) при производстве агломерата повышенной и высокой основности потребление металлургических отходов увеличено более чем вдвое. Таким образом, анализ существующего опыта использования в аглошихте повышенного количества вторичных железосодержащих ре-

сурсов и разработка рекомендаций по повышению эффективности их утилизации являются актуальной задачей.

**Анализ последних исследований и публикаций**

В ходе обширных исследований доказано, что введение в шихту повышенного количества подготовленных железо- и известьсодержащих отходов не является существенным препятствием для производства высокоосновного агломерата удовлетворительного качества [3...6]. В публикациях [7, 8] также отмечена возможность получения достаточно прочного агломерата при спекании шихт, содержащих однородную по физико-химическим свойствам смесь вторичных ресурсов металлургического производства.

Результаты лабораторных опытов по агломерации шихт основностью 1,3 и 2,0 абс. ед. (здесь и далее под основностью понимается CaO/SiO<sub>2</sub>) с добавкой смеси железосодержащих отходов, представленных шламами и пылями агломерационных, доменных и конвертерных газоочисток, в количестве 60...220 кг/т агломерата позволили сделать вывод о том, что вводимые отходы не вызывают ухудшения показателей процесса спекания [9].

В работе [10] отмечено, что путем оптимизации расхода твердых отходов можно значительно уменьшить поступление вредных элементов в аглошихту, а затем и в доменные печи. Этот метод рециклинга целесообразен с экономической и экологической точек зрения и соответствует концепции устойчивого развития общества. Также авторы оценили возможность снижения удельного расхода топлива, вводимого в шихту. Для конкретных условий определены коэффициенты замены углерода топлива углеродом, присутствующим в отходах разных типов.

Перед введением в аглошихту смесь железосодержащих отходов эффективно гранулировать с добавкой бентонитового связующего [11].

Оптимальный размер гранул – 5...8 мм. В ходе опытных спеканий шихты основностью 2,2 абс. ед., содержащей гранулированные отходы, производительность аглоустановки возросла почти на 27 %, при этом прочность агломерата осталась на приемлемом уровне, но снизилась его восстановительная способность.

В работах [12,13] отмечено, что для улучшения работы агломерационных машин вторичные ресурсы целесообразно подготавливать в интенсивных смесителях «Айрих». Полученная таким образом смесь отходов гомогенная, в ней сформированы гранулы, служащие центрами при последующем окомковании шихты.

**Цель (задачи) исследования**

Целью исследования является анализ технологии использования вторичных железосодержащих ресурсов при производстве высокоосновного агломерата для дальнейшей разработки рекомендаций по совершенствованию их подготовки и утилизации.

**Основной материал исследования**

В связи с рассмотрением опыта утилизации отходов в сложных условиях работы предприятий Л/ДНР в последние годы, вплоть до 2019 г., представляются интересными для практики результаты более ранних проведенных в аглоцехе ЕМЗ исследований влияния больших расходов самых проблемных, трудноутилизуемых шламов доменного и сталеплавильного производства на показатели агломерации [14]. Отходы подготавливались по гранулометрическому составу и влажности по упрощенной схеме. Промышленные показатели спекания аглошихты при вводе в нее большого количества шламов приведены в табл. 1. Химический состав исследуемой в прошлом смеси шламов представлен следующими данными, %: 48,7 Fe; 10,6 FeO; 8,8 SiO<sub>2</sub>; 7,8 CaO; 1,1 MgO; 1,35 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 0,45 K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O; 0,04 P; 0,17 Zn; 0,28 S; 4,0 Cr; 8,5 П.П.П. Влажность смеси 14...19 %.

Табл. 1. Влияние расхода шлама на производительность агломашин и прочность агломерата Енакиевского металлургического завода [15]

| Показатели агломерации                                       | Удельный расход шлама, кг/т агломерата |            |         |             |           |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------|---------|-------------|-----------|
|                                                              | 30                                     | 200...250  | 400     | 600         | 800       |
| Удельная производительность агломашин, т/(м <sup>2</sup> ·ч) | 1,0...1,1                              | 1,0...1,05 | 0,85    | 0,7...0,65* | 0,62*     |
| Содержание мелочи класса 0...5 мм в агломерате, %            | 18,5                                   | 18,5...21  | 20...22 | 22...25     | 26,5...28 |

\* Показатели худшего (зимнего) периода работы.

При увеличении расхода шлама от 30 до 250 кг/т агломерата наблюдается незначительное уменьшение производительности агломашии и снижение прочности агломерата по выходу из него мелких классов крупности 0...5 мм на 2,5 % (абс.). Дальнейшее увеличение расхода шлама до 400...800 кг/т агломерата сопровождается снижением производительности на 17...39 %, прочность агломерата уменьшается на 13,5...27,5 %.

Такое значительное ухудшение показателей процесса обусловлено тем, что:

- гранулометрический состав и влажность смеси шламов не соответствуют рациональным уровням, наличие в шламах значительного количества некондиционных классов (более 8...10 мм), а также практически некоммуемых топливных и иных компонентов приводит к недостаточной степени грануляции, снижению газопроницаемости шихты;

- неизбежно образующиеся при плохом смешивании и окомковании шихты крупные, более 10...15 мм, гранулы и комки из шламов и пылей не спекаются и являются очагами разрушения агломерата;

- при большом расходе шламов и соответствующем уменьшении расхода твердого топлива в шихту (с учетом наличия в шламах горючего углерода) структура зоны горения в слое зачастую ухудшается – наблюдается очаговое выгорание топлива при недостаточном плавлении шихты в отдельных макрообъемах слоя.

В лабораторных условиях аналогичная замена 40 % массы аглоруды и концентрата шламом, что соответствует удельному расходу последнего 360 кг/т агломерата, приводит к снижению производительности процесса на 5...6 %. Прочность агломерата также проявляет тенденцию к снижению: содержание мелочи в агломерате повышается примерно на 1...2 % (абс.).

Увеличение расхода шлама до 570...810 кг/т агломерата, несмотря на лучший лабораторный контроль технологического регламента, сопровождается так же, как и в промышленных условиях, резким ухудшением показателей: производительность процесса снижается на 12...23 %, выход мелких классов из малопрочного спека увеличивается на 20 %.

Таким образом, при недостаточной подготовке шламов несколько сниженные, но вполне приемлемые результаты процесса спекания шихты возможны только при их удельном расходе до 150...250 кг/т агломерата. Сохранение удельной производительности агломашины и показателей качества агломерата гарантировано, если шламовая смесь имеет высокую сыпучесть, представлена мелкозернистой (не более 5...6

мм), хорошо окомкованной массой, а расход ее не превышает 180...200 кг/т агломерата.

Продолжительный опыт утилизации больших количеств металлургических отходов в аглоцехе ЕМЗ представлен показателями 2018 г., подробно рассмотренными в работе [15], и показателями 2019 г. (табл. 2), в течение которого изменялись расходы концентратов и отходов, параметры и показатели процесса агломерации.

Средняя по году массовая доля трудноутилизуемых шламов в составе вторресурсов составляла около 57 %. Расход шламов изменялся в диапазоне 15...528 кг/т агломерата. Общий расход различных вторичных ресурсов (колошниковая пыль, отсев агломерата, окалина, аспирационная рудная и известковая пыль доменного и конвертерного цехов, отсев качественной извести барабанных печей) также колебался в широких пределах от 233 до 772 кг/т агломерата. Причина таких недопустимых изменений шихтовых условий – в дефиците железорудных концентратов и аглоруд.

Подготовка отходов к спеканию (их разукрупнение, смешивание) осуществляется на ЕМЗ на специальном участке, оснащенный разгрузочно-погрузочной и смесительной техникой (бульдозерами, экскаваторами, фронтальными перегрузчиками). При вводе в шихту большого количества шламов, тем более недостаточно подготовленных, показатели производства агломерата значительно снижаются.

Удельная производительность, по данным табл. 2, уменьшалась от 0,7...0,9 до 0,5...0,6 т/м<sup>2</sup>·ч, т. е. на 31 %, при вынужденном снижении высоты слоя на 30...50 мм в связи с ухудшением газопроницаемости перегруженной отходами шихты, уменьшении выхода годного продукта из спека пониженной прочности.

Отмеченное снижение высоты слоя при больших расходах отходов (507...772 кг/т агломерата) сопровождалось увеличением содержания мелочи в агломерате от 12,8...17,3 до 20,4...21,8 %, т. е. в среднем на 6 % (абс.). Последующее в четвертом квартале 2019 г. уменьшение содержания шламов в шихте от 528 до 34...138 кг/т агломерата, повышение основности шихты обеспечило соответствующее повышение ее газопроницаемости, позволило увеличить высоту спекаемого слоя от 300 до 350...360 мм. Как результат – повысилась прочность агломерата, содержание мелочи в нем снизилось до 16...17 %, т. е. на 4,6 % (абс.).

На прочность агломерата оказывают самостоятельное влияние и другие факторы, в частности, повышенное содержание FeO в агломерате вследствие повышенного расхода топлива

Табл. 2. Показатели работы аглоцеха Енакиевского металлургического завода в 2019 г. при производстве высокоосновного агломерата и больших расходах металлургических отходов

| Показатели                                         | январь | февраль | март | апрель | май  | июнь | июль | август | сентябрь | октябрь | ноябрь | декабрь |
|----------------------------------------------------|--------|---------|------|--------|------|------|------|--------|----------|---------|--------|---------|
| <b>Расход сырьевых материалов, кг/т агломерата</b> |        |         |      |        |      |      |      |        |          |         |        |         |
| Рудная часть, всего, в т.ч:                        | 677    | 704     | 681  | 653    | 634  | 439  | 558  | 513    | 417      | 393     | 493    | 533     |
| концентрат                                         | 483    | 199     | 437  | 380    | 553  | 439  | 558  | 390    | 417      | 393     | 493    | 53      |
| аглолюда                                           | 194    | 505     | 244  | 273    | 81   | -    | -    | 123    | -        | -       | -      | -       |
| Вторресурсы, всего, в т.ч:                         | 233    | 319     | 399  | 445    | 507  | 772  | 601  | 638    | 720      | 634     | 394    | 338     |
| шламосмесь                                         | 15     | 152     | 301  | 277    | 194  | 331  | 232  | 348    | 501      | 528     | 138    | 34      |
| отсев агломерата                                   | 116    | 40      | 14   | 38     | 188  | 216  | 194  | 30     | 43       | 10      | 92     | 159     |
| пыль колошниковая                                  | 46     | 29      | 22   | 26     | 76   | 139  | 113  | 194    | 63       | 18      | 78     | 75      |
| окалина                                            | 11     | 74      | 16   | 9      | 7    | 40   | 23   | 19     | 48       | 12      | 26     | 17      |
| Флюсы, всего, в т.ч.:                              | 117    | 194     | 149  | 155    | 65   | 61   | 41   | 132    | 174      | 305     | 405    | 430     |
| известь                                            | 45     | 24      | 38   | 22     | 38   | 46   | 39   | 47     | 65       | 66      | 60     | 53      |
| известняк                                          | 72     | 170     | 103  | 60     | 23   | 15   | 2    | 85     | 109      | 239     | 345    | 377     |
| конвертерный шлак                                  | -      | -       | 8    | 73     | 4    | -    | -    | -      | -        | -       | -      | -       |
| Топливо                                            | 58     | 60      | 63   | 52     | 56   | 53   | 47   | 39     | 35       | 45      | 55     | 67      |
| <b>Показатели процесса спекания</b>                |        |         |      |        |      |      |      |        |          |         |        |         |
| Объемы производства, тыс. т                        | 52     | 58      | 89   | 95     | 90   | 57   | 63   | 48     | 35       | 38      | 59     | 62      |
| Удельная производительность, т/(м <sup>2</sup> ·ч) | 0,7    | 0,9     | 0,9  | 0,7    | 0,6  | 0,6  | 0,6  | 0,5    | 0,5      | 0,6     | 0,6    | 0,6     |
| Разрежение, кПа                                    | 4,0    | 3,3     | 4,6  | 5,0    | 5,7  | 4,0  | 4,5  | 4,0    | 4,4      | 5,0     | 4,7    | 4,3     |
| Высота слоя шихты, мм                              | 350    | 350     | 350  | 330    | 300  | 300  | 300  | 320    | 340      | 360     | 350    | 360     |
| Вертикальная скорость спекания, мм/мин             | 1,6    | 3,7     | 3,9  | 1,7    | 9,6  | 9,8  | 8,9  | 8,7    | 8,0      | 9,12    | 9,1    | 8,8     |
| <b>Химический состав агломерата, %</b>             |        |         |      |        |      |      |      |        |          |         |        |         |
| Основность, абс. ед.                               | 1,86   | 1,83    | 2,02 | 1,92   | 1,71 | 1,80 | 1,84 | 1,99   | 2,43     | 3,14    | 3,74   | 4,06    |
| Fe <sub>общ</sub>                                  | 57,2   | 55,1    | 54,5 | 51,8   | 57,0 | 56,3 | 57,8 | 53,3   | 50,8     | 45,7    | 44,4   | 43,5    |
| FeO                                                | 16,0   | 16,3    | 17,8 | 17,0   | 21,1 | 7,7  | 18,0 | 18,2   | 5,1      | 13,1    | 2,0    | 0,4     |
| CaO                                                | 10,4   | 12,4    | 12,4 | 13,5   | 8,4  | 8,6  | 7,4  | 12,6   | 6,0      | 23,0    | 26,2   | 29,1    |
| SiO <sub>2</sub>                                   | 5,6    | 6,8     | 6,1  | 7,0    | 4,9  | 4,8  | 4,0  | 6,3    | 6,6      | 7,3     | 7,0    | 7,2     |
| MgO                                                | 0,9    | 0,9     | 1,5  | 2,2    | 2,2  | 2,6  | 3,2  | 1,6    | 2,4      | 2,4     | 1,6    | 1,5     |
| Содержание кл. 0...5 мм в агломерате               | 12,8   | 13,0    | 16,2 | 17,3   | 20,8 | 20,4 | 21,8 | 20,4   | 17,5     | 16,0    | 6,6    | 7,0     |

на процесс спекания, увеличение основности агломерата и др. Однако основное негативное влияние на прочность агломерата оказывает высокий расход отходов и особенно шламов.

Обращаем внимание на то, что высокая основность агломерата положительно влияла на его прочность, что убедительно было показано в сентябре – декабре 2019 г., когда основность планомерно увеличивали, и в отдельные периоды декабря она достигала 5 абс. ед. Видно (см. табл. 2), что в сентябре – декабре прочность агломерата восстановилась до уровня марта-апреля. Нужно особо подчеркнуть, что уровень показателей прочности агломерата, достигнутых при неблагоприятных шихтовых условиях аглоцеха ЕМЗ, вполне удовлетворяет требованиям технологии доменной плавки.

Даже в наилучшие 80-е годы прошлого века устойчивой работы аглофабрик бывшего СССР минимальное содержание фракций 0...5 мм в агломерате (10,6...15,7 %) имели 12 аглофабрик из 35-ти. Остальные 23 аглофабрики предлагали доменным цехам агломерат с более высоким содержанием мелочи – 16,9...23,0 %. Таким образом, несмотря на отмеченные проблемные шихтовые условия аглоцеха ЕМЗ, прочность агломерата и его ситовый состав удалось удерживать в основном на нужном уровне за счет спекания шихты в повышенном слое и применения двух стадий грохочения агломерата: на стационарных грохотах агломашин и на вибрационных грохотах под бункерами доменного цеха.

Другие шихтово-технологические условия сложились в аглоцехе АМК. Техничко-экономические показатели его работы в 2019 г. приведены в табл. 3.

В аглоцехе АМК шламы карт обезвоживания вводят в штабель концентрата. В течение года их расход составлял 2...79 кг/т агломерата. Средняя массовая доля шламов в составе отходов была не более 6 %. Общий расход различных отходов изменялся в диапазоне от 123 до 510 кг/т агломерата. Факторами, вызвавшими такие колебания, как и в вышерассмотренной ситуации, сложившейся в аглоцехе ЕМЗ, являются неритмичные поставки железорудного сырья.

Самая низкая за год удельная производительность 0,94 т/м<sup>2</sup>·ч, по данным табл. 3, имела место в период наибольшего расхода в шихту шламов в количестве 79 кг/т агломерата при практически полном отсутствии агломерационной руды. Основность спекаемой шихты была увеличена до 3,48 абс. ед., что обеспечило повышение ее газопроницаемости. Высота слоя не была снижена и поддерживалась на уровне 330 мм. Таким образом, удалось избежать суще-

ственного снижения прочности агломерата – содержание мелочи класса 0...5 мм составило 8,9 %. В другие периоды, когда шламы в шихту не вводили, содержание в агломерате мелочи было ниже на 1...2,9 % (абс.).

Графики зависимости показателя прочности агломерата по содержанию в нем мелочи класса 0...5 мм от доли вторичных ресурсов в железорудной части шихты для условий ЕМЗ и АМК указывают на разные тенденции (рис. 1). При увеличении содержания вторичных материалов в шихте АМК содержание мелочи в агломерате снижается, что коренным образом отличается от ситуации, имевшей место на ЕМЗ. При доле отходов в железорудной части шихты на уровне 50 % содержание мелочи в агломерате АМК почти в три раза ниже, чем в условиях ЕМЗ при аналогичном расходе отходов. Объяснить этот факт можно тем, что в смеси отходов АМК преобладает железосодержащая добавка, представляющая собой отмагниченные компоненты сталеплавильных шлаков, а основным компонентом смеси отходов ЕМЗ являются трудноутилизируемые шламы.

Однако при анализе следует учесть и влияние основности спекаемой шихты на прочность агломерата (рис. 2).

Экономическая выгода применения отходов, как известно, состоит в замене дорогих и дефицитных железорудных концентратов, аглоруд, известняка, твердого топлива. При использовании в аглошихте 1000 кг отходов вышеуказанного химического состава достигается экономия шихтовых материалов: железорудного концентрата – 560 кг; агломерационной руды – 242 кг; известняка – 155 кг; коксовой мелочи – 27,5 кг. В ценах 2019 г. – это снижение затрат на 4 тыс. руб./т использованных отходов.

Проблемы утилизации металлургических отходов рассмотрены в основном в приложении к технологии производства высокоосновного агломерата. Проплавка такого агломерата в доменных печах сопровождается достижением экономических и экологических выгод. Так, в монографии [1] показано, что удельный расход твердого топлива на спекание при увеличении основности агломерата (к примеру, от 1,23 до 2,38 абс. ед.) не повышается, несмотря на рост удельного расхода сырого известняка, что объясняется в основном резким снижением температуры плавления ферритов кальция и железокальциевых силикатов, других образовавшихся в твердой фазе минералов. В отдельных опытах достигнуто снижение расхода топлива на 5...10 % (отн.) при увеличении основности агломерата от 0,8...1,25 до 1,8...2,5 абс. ед. [15].

Табл. 3. Техничко-экономические показатели работы аглоцеха  
Алчевского металлургического комбината в 2019 г.

| Показатели                                          | январь | февраль | март | апрель | май  | июнь | июль | август | сентябрь | октябрь | ноябрь | декабрь |
|-----------------------------------------------------|--------|---------|------|--------|------|------|------|--------|----------|---------|--------|---------|
| <b>Расход сырьевых материалов, кг/ т агломерата</b> |        |         |      |        |      |      |      |        |          |         |        |         |
| Рудная часть, всего, в т.ч:                         | 868    | 774     | 810  | 818    | 841  | 777  | 852  | 770    | 489      | 565     | 824    | 792     |
| концентрат                                          | 528    | 188     | 405  | 578    | 88   | 76   | 52   | 13     | 82       | 65      | 24     | 92      |
| аглоруда                                            | 340    | 586     | 405  | 240    | 52   | 1    | -    | 7      | 7        | -       | -      | -       |
| Вторресурсы, всего, в т.ч:                          | 174    | 290     | 162  | 123    | 32   | 03   | 51   | 28     | 10       | 98      | 67     | 96      |
| шламы карт обезвоживания                            | -      | 13      | 2    | -      | 0    | 9    | -    | -      | 4        | 5       | -      | -       |
| железосодержащая добавка                            | 93     | 210     | 47   | 12     | -    | -    | -    | 12     | 34       | 88      | 8      | 4       |
| отсев агломерата и окатышей                         | 61     | 42      | 80   | 82     | 9    | 93   | 19   | 98     | 10       | 79      | 60     | 79      |
| пыль колошниковая                                   | 10     | 10      | 11   | 15     | 19   | 15   | 3    | 7      | 9        | 7       | 9      | 9       |
| окалина                                             | 10     | 15      | 12   | 14     | 14   | 16   | 9    | 1      | 23       | 9       | 0      | 4       |
| Флюсы, всего, в т.ч.:                               | 183    | 162     | 266  | 267    | 232  | 210  | 47   | 64     | 48       | 47      | 187    | 66      |
| известь                                             | 19     | 9       | 3    | 9      | 4    | 2    | 26   | 23     | 6        | 25      | 25     | 32      |
| известняк                                           | 164    | 153     | 253  | 248    | 208  | 188  | 121  | 141    | 32       | 22      | 162    | 34      |
| Топливо                                             | 45     | 45      | 48   | 53     | 50   | 43   | 43   | 54     | 38       | 34      | 38     | 41      |
| <b>Показатели процесса спекания</b>                 |        |         |      |        |      |      |      |        |          |         |        |         |
| Объемы производства, тыс.т                          | 182    | 107     | 248  | 241    | 223  | 150  | 120  | 189    | 133      | 208     | 220    | 235     |
| Удельная производительность, т/(м <sup>2</sup> ·ч)  | 1,18   | 1,21    | 1,17 | 1,07   | 1,07 | 0,94 | 1,09 | 1,23   | 1,13     | 1,15    | 1,16   | 1,10    |
| Разрежение, кПа                                     | 7,5    | 7,9     | 8,0  | 8,5    | 8,5  | 8,7  | 8,9  | 8,3    | 8,1      | 7,7     | 7,1    | 7,1     |
| Высота слоя шихты, мм                               | 315    | 315     | 320  | 315    | 335  | 330  | 330  | 330    | 330      | 330     | 330    | 315     |
| Вертикальная скорость спекания, мм/мин              | 7,9    | 8,3     | 9,4  | 18,2   | 17,7 | 15,2 | 15,3 | 17,3   | 16,8     | 17,9    | 18,2   | 17,8    |
| <b>Химический состав агломерата, %</b>              |        |         |      |        |      |      |      |        |          |         |        |         |
| Основность, абс. ед.                                | 1,55   | 1,47    | 2,45 | 2,68   | 2,66 | 3,48 | 2,45 | 1,53   | 2,05     | 1,65    | 2,53   | 2,02    |
| Fe <sub>общ</sub>                                   | 56,5   | 54,5    | 52,5 | 52,8   | 54,7 | 54,8 | 57,2 | 55,4   | 50,2     | 51,4    | 55,4   | 56,0    |
| FeO                                                 | 11,5   | 12,4    | 9,2  | 9,3    | 9,1  | 9,41 | 11,0 | 12,1   | 1,8      | 11,9    | 0,4    | 0,2     |
| CaO                                                 | 11,1   | 12,0    | 16,6 | 16,1   | 14,3 | 14,0 | 10,7 | 12,2   | 16,9     | 14,5    | 3,8    | 2,8     |
| SiO <sub>2</sub>                                    | 7,1    | 8,1     | 6,8  | 6,0    | 5,4  | 4,0  | 4,3  | 7,9    | 8,2      | 8,8     | 5,4    | 6,3     |
| MgO                                                 | 1,2    | 1,7     | 1,4  | 2,1    | 2,4  | 3,2  | 2,7  | 1,6    | 2,8      | 2,8     | 1,6    | 1,3     |
| Содержание класса 0...5мм в агломерате              | 7,9    | 7,6     | 8,6  | 9,4    | 8,6  | 8,9  | 10,1 | 8,0    | 6,7      | 7,7     | 6,2    | 6,0     |

Особого внимания заслуживает тот факт, что содержание серы в высокоосновном агломерате возрастает почти втрое по сравнению с агломератом пониженной основности. Происходит улавливание SO<sub>2</sub> отходящего газа хемосорбентами шихты, такими как CaO, Ca(OH)<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub> и CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Атмосферный воздух значительно меньше загрязняется сернистыми выбросами агломерации. Увеличение содержания серы в агломерате не имеет существенного значения для обеспечения производства качественного пере-

дельного чугуна. Повышение основности агломерата позволяет исключить применение сырого известняка в доменной плавке и в расчете на 1 млн. т выплавленного чугуна уменьшить расход кокса на 20 тыс. т. Исключение из объемов коксохимического производства такого количества кокса означает уменьшение выбросов в атмосферу около 400 т исключительно ядовитых веществ коксохимии, среди которых оксиды серы и азота, сероводород, аммиак, цианистый водород, бензапирен, диоксины, фураны и др. (табл. 4).

Табл. 4. Возможное снижение вредных выбросов при использовании кокса и агломерата в связи с различными способами офлюсования доменной шихты в расчете на 1 млн. т чугуна [1]

| Расход кокса      | Масса выбросов, т |      |                 |                 |                  |                 |     |                                  |                               |                                 | Итого  |
|-------------------|-------------------|------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|-----|----------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--------|
|                   | пыль              | CO   | SO <sub>2</sub> | NO <sub>x</sub> | H <sub>2</sub> S | NH <sub>3</sub> | HCN | C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH | C <sub>n</sub> H <sub>m</sub> | C <sub>20</sub> H <sub>12</sub> |        |
| А 5180            | 6395              | 2283 | 1686            | 238             | 37               | 74              | 5,3 | 482                              | 3821                          | 2,0                             | 775,2* |
| Б 4980            | 6225              | 2222 | 1266            | 232             | 36               | 72              | 5,2 | 469                              | 3719                          | 1,9                             |        |
| Снижение выбросов | 170               | 61   | 420*            | 6               | 1                | 2               | 0,1 | 13                               | 102                           | 0,1                             |        |

**Примечание:** Способы офлюсования: А – сырым известняком; Б – высокоосновным агломератом; \* включая 375 т SO<sub>2</sub> процесса агломерации.

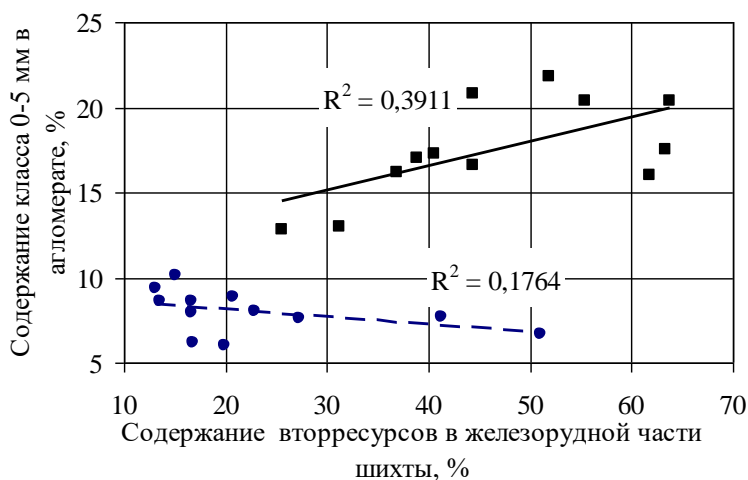


Рис. 1. Влияние содержания вторичных ресурсов в железорудной части аглошихты на содержание класса 0...5 мм в агломерате: ■ – EM3; ● – AMK

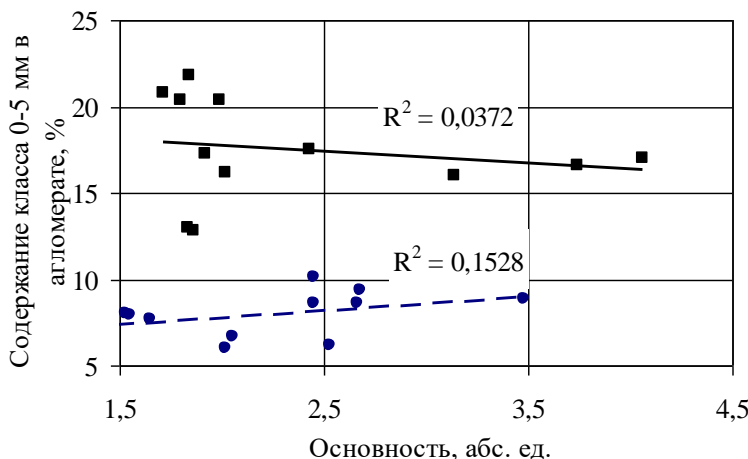


Рис. 2. Влияние основности агломерата на содержание в нем класса 0...5 мм: ■ EM3; ● AMK

По выполненным исследованиям увеличение основности шихты по  $\text{CaO/SiO}_2$  от 1,25 до 2,38 абс. ед. приводит к повышению содержания серы в агломерате от 0,055 до 0,159 %. При увеличении основности агломерата от нынешней 1,23 абс. ед. до необходимой для отраслевых условий 1,65 абс. ед. содержание серы в агломерате возрастает от 0,055 до 0,085 %. При среднем расходе агломерата – 1,25 млн. т на 1 млн. т чугуна ожидаемое снижение выбросов оксидов серы в атмосферу составит при агломерации 375 т (см. табл. 4).

С учетом уменьшения удельного расхода кокса приход серы в доменную печь с шихтой или сохраняется, или несущественно возрастает. Возможное увеличение поступления серы в доменную печь с железорудной частью шихты на 0,3...0,5 кг/т чугуна является незначительным, поскольку в приходной части баланса серы это всего лишь 5...10 %. К тому же следует учитывать достаточные резервы серопоглотительной способности шлака, а также то, что на многих предприятиях действуют установки внедоменной десульфурации чугуна. Сера, связанная в шлаке в виде  $\text{CaS}$  и других соединений, обычно в небольших количествах (примерно 1,7 % от исходной массы) выделяется в атмосферу в виде  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{H}_2\text{S}$  при грануляции шлака. Применение современных грануляционных установок воздушно-водяной или воздушной грануляции шлака со скрубберами, работающими с использованием известковой суспензии, может практически полностью ликвидировать указанные выбросы соединений серы.

### Выводы

Согласно исследованиям, результаты которых опубликованы во многих отечественных и зарубежных источниках, использование повышенного количества железосодержащих отходов, в том числе трудноутилизируемых шламов доменных и агломерационных газоочисток, не является препятствием для производства качественного агломерата. Рециклинг вторичных ресурсов позволяет получить не только эффект за счет экономии дорогостоящего сырья, но и экологические выгоды. При подготовке отходов к утилизации важно учитывать их влажность, наличие в них токсичных компонентов, цветных и щелочных металлов, нефтепродуктов, а также физико-химическую неоднородность и малую сыпучесть.

На металлургических предприятиях ДНР и ЛНР в сложившихся шихтово-технологических условиях работы, характеризующихся неритмичными поставками сырьевых ресурсов, ис-

пользование в аглошихте больших количеств железо- и известьсодержащих отходов как заменителей первичного сырья является актуальной задачей. Компонентный состав смеси утилизируемых в аглошихте отходов оказывает существенное влияние на прочность агломерата повышенной и высокой основности.

Показатели работы агломерационных цехов ЕМЗ и АМК в 2019 г. свидетельствуют о том, что переход к производству высокоосновного агломерата при повышенном расходе в шихту подготовленных железосодержащих отходов – это крупное эколого-экономическое мероприятие, позволяющее снизить себестоимость чугуна за счет сокращения расхода кокса и уменьшить выбросы преимущественно сернистых веществ в окружающую среду.

Проведенная оценка опыта утилизации вторичных железосодержащих ресурсов при производстве агломерата повышенной и высокой основности позволит в дальнейшем разработать мероприятия, направленные на совершенствование технологии их подготовки.

### Список литературы

1. Мищенко, И.М. Черная металлургия и охрана окружающей среды: учебное пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – 452 с.
2. Перспективы организации ресурсосберегающих малоотходных процессов в черной металлургии / Г.С. Клягин [и др.] // Металл и литье Украины. – 2002. – №7-8. – С. 64-67.
3. Технология подготовки шламов и известковой пыли конвертерного производства / Е.И. Перлухин [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 1986. – №17. – С.43-44.
4. Технология подготовки и агломерации железосодержащих отходов металлургического производства / В.И. Ростовский [и др.] // Сталь. – 1980. – №1. – С. 4-7.
5. Ростовский, В.И. Опыт освоения технологии утилизации пылей и шламов конвертерного производства / В.И. Ростовский, А.В. Кравченко, М.М. Перистый // Сотрудничество для решения проблемы отходов: труды 1-й Международной конференции, 5-6 февраля 2004 г., Харьков. – Харьков: Независимое агентство экологической информации, 2004. – С. 117-119.
6. Агломерация шихт с большим содержанием шламов на фабриках Украины / И.М. Мищенко [и др.] // Производство чугуна на рубеже столетий: труды V Международного конгресса доменщиков, 07-12.06.1999 г.,



- Днепропетровск – Кривой Рог (Украина). – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 106-110.
7. Лукьянов, А.В. Эффективная работа агломерационного производства филиала № 2 ЕМЗ ЗАО «Внешторгсервис» при расширении использования в шихте вторичных ресурсов и окатышей / А.В. Лукьянов, А.В. Зубенко, В.В. Ивасенко // Сборник научных трудов Донбасского государственного технического университета. – Алчевск: ДонГТУ, 2017. – №7. – С. 86-91.
  8. Дембицкий, Ю.В. Технология использования в агломерационной шихте частично подготовленных шламов металлургического производства / Ю.В. Дембицкий, Н.Т. Демюра, В.П. Падалка // Металл и литье Украины. – 1997. – №6-7. – С. 9-10.
  9. Grigороva, D. Utilization of waste powder and sludge in iron ore sintering process / D. Grigороva, T. Tsanev, M. Marinov // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2014. – Vol.49. – P. 615-620.
  10. Sintering of solid waste generated in iron and steel manufacturing process in Shougang Jingtang / Yuan-dong Pei [et al.] // Journal of Iron and Steel Research. – 2017. – Iss.7. Vol.24. – P. 697-704.
  11. Agglomeration behaviour of steel plants solid waste and its effect on sintering performance / Prince Kumar Singh [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. – 2017. – Iss.3. Vol.6. – P. 289-296.
  12. Состояние и перспективы развития технологии производства агломерата. Часть 11. Технологические методы защиты окружающей среды от вредных выбросов агломерационных фабрик / Ю.А. Фролов [и др.] // Черная металлургия. – 2018. – №2. – С. 17-31.
  13. Совершенствование технологии и оборудования агломерационного производства / И.М. Мищенко [и др.] // Металлургические процессы и оборудование. – 2011. – №3. – С. 35-44.
  14. Совершенствование агломерационного процесса / Ф.Ф. Колесанов [и др.]. – Киев: Техніка, 1983. – 110 с.
  15. Опыт производства высокоофлюсованного агломерата на агломерационной фабрике Енакиевского металлургического завода / И.М. Мищенко [и др.] // Черная металлургия. – 2018. – №12. – С. 33-45.

**I.M. Mishchenko /Cand. Sci. (Eng.), A.V. Kuzin /Dr. Sci. (Eng.)/**

*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**N.N. Korobkin, A.V. Polokhin**

*Yenakievo Metallurgical Plant (Yenakievo)*

**V.F. Kuz'menko /Cand. Sci. (Eng.), A.N. Knysenko**

*Alchevsk Iron and Steelworks (Alchevsk)*

**I.F. Rusanov /Cand. Sci. (Eng.)/**

*Donbas State Technical University (Alchevsk)*

## EXPERIENCE IN UTILISATION OF SECONDARY RESOURCES OF FERROUS METALLURGY IN THE SINTER PRODUCTION OF DONBAS ENTERPRISES

**Background.** *The shortage of raw materials and environmental problems make it necessary to use secondary resources in agglomeration. Analysis of the experience of using waste in sintering high-base charges will help to find ways to improve the efficiency of their preparation and utilisation.*

**Materials and/or methods.** *To obtain data on the impact of waste consumption on the quality of sinter and sintering process, used the reports on the technical and economic performance of the sinter plants of the Yenakievo Metallurgical Plant (EMZ) and Alchevsk Iron and Steelworks (AIS).*

**Results.** *Full utilisation of waste in sinter production is difficult due to the environmental hazard, high content of harmful impurities, high humidity, differences in physical and chemical properties. You can solve the problem by getting a homogeneous, loose mixture of waste.*

*In the course of previous experimental and industrial research conducted at EMZ, found that with an increase in waste consumption from 30 to 250 kg/t of agglomerate, its strength in terms of the content of classes 0...5 mm decreased by 2.5 % (abs.). An increase in waste consumption to 400...800 kg / t of sinter was accompanied by a decrease in the productivity of sinter machines by 17...39 %, and the strength of the sinter – by 13.5...27.5 %. The cost of producing high-base agglomerate decreased by 4 thousand rubles/t of used waste. The melting in blast furnaces was accompanied by a reduction in the consumption of coke and the emission of sulfur compounds into the environment.*

**Conclusion.** *Production of high-base agglomerate with increased consumption of prepared iron-containing waste allows reducing the cost of pig iron and improving the environmental situation,*

which is evidenced by the performance of sinter plants in the LPR.

**Keywords:** agglomerate, high-base charge, secondary resources, sludge, utilisation, sinter strength.

**Сведения об авторах**

**И.М. Мищенко**

SPIN-код: 2288-8916  
Телефон: +380 (71) 412-25-04  
Эл. почта: mim37@mail.ru

**А.В. Кузин**

SPIN-код: 4470-0976  
Author ID: 7102276525  
Researcher ID: P-8105-2015  
ORCID iD: 0000-0002-5369-433  
Телефон: +380 (62) 310-08-42  
Эл. почта: yarosh@fizmet.donntu.org

**Н.Н. Коробкин**

Телефон: +380 (62) 529-22-31  
Эл. почта: Nikolay.Korobkin@emzsteel.com

**А.В. Полохин**

Телефон: +380 (62) 529-30-55  
Эл. почта: Andrey.Polokhin@emzsteel.com

**В.Ф. Кузьменко**

Телефон: +380 (64) 427-39-04  
Эл. почта: amk@vts012.ru

**А.В. Кнышенко**

Телефон: +380 (64) 427-39-04  
Эл. почта: amk@vts012.ru

**И.Ф. Русанов**

Эл. почта: rusanova-2011@inbox.ru

*Статья поступила 25.06.2020 г.*

*© И.М. Мищенко, А.В. Кузин, Н.Н. Коробкин, А.В. Полохин,  
В.Ф. Кузьменко, А.В. Кнышенко, И.Ф. Русанов,  
Рецензент д.т.н., проф. В.В. Шаповалов*

