

УДК 669.162.262

*к.т.н. Русанов И. Ф.,
к.т.н. Куберский С. В.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru),
к.т.н. Мищенко И. М.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР),
к.т.н. Кузьменко В. Ф.
(Филиал № 12 ЗАО «Внешторгсервис», г. Алчевск, ЛНР)*

АНАЛИЗ РАБОТЫ АГЛОМЕРАЦИОННОГО ЦЕХА АМК В УСЛОВИЯХ НЕСТАБИЛЬНОГО ПОСТУПЛЕНИЯ ПРИРОДНОГО СЫРЬЯ

Проанализированы данные работы агломерационного цеха АМК в период нестабильной поставки концентрата и железной руды комбинату, что вызвало необходимость использования шихты с высоким расходом шламов и обогащенных мартеновских шлаков (до 455 кг/т агломерата и до 135 кг/т агломерата соответственно). Установлено влияние замены природного сырья техногенными отходами на ход процесса агломерации, показатели работы цеха и качество получаемого агломерата.

***Ключевые слова:** агломерация, концентрат, шлам, руда, железосодержащие отходы, агломерат, содержание железа, суточное производство, газодинамические условия, показатели работы.*

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В современных условиях при стабильном обеспечении металлургических предприятий черной металлургии природным железорудным сырьем основой агломерационной шихты являются аглоруда и концентрат. Доля концентрата в железорудной части шихты близка к 80 %. С целью экономии природных материальных ресурсов и снижения себестоимости агломерата в шихту вводят железосодержащие техногенные отходы, такие как шлаки, шламы и окалину. Общий их расход обычно невелик и в сумме составляет не более 50–60 кг/т агломерата.

Изучению металлургических свойств техногенных отходов, целесообразности и особенностям их ввода в агломерационную шихту посвящено достаточно много исследований, в том числе и исследований, проведенных на кафедре металлургии черных металлов ДонГТИ [1, 2].

Обычно в этих исследованиях техногенные отходы рассматривались как добавки, позволяющие снизить расход природного сырья.

В отдельные периоды работы агломерационного цеха ПАО «Алчевский металлургический комбинат» (АМК) в 2010 году, характеризующиеся нестабильной поставкой концентрата, возникла необходимость увеличения расхода шлама в агломерационной шихте с 95 до 455 кг/т агломерата. При этом отмечались значительные колебания удельных расходов аглоруды и концентрата в составе шихты, а в отдельные месяцы концентрат не использовался вовсе.

Одновременно в шихту вводился обогащенный мартеновский шлак крупностью до 10 мм — МОС–1 — в количестве от 50 до 135 кг/т агломерата.

Опыт производства агломерата из такой шихты отсутствует и нуждается в глубоком анализе получаемых технико-экономических показателей.

Постановка задачи. В связи с изложенным выше в данной работе поставлена задача проанализировать результаты работы агломерационного цеха АМК в условиях частичной замены природного железорудного сырья техногенными отходами и установить влияние их ввода в шихту в боль-

шом количестве на показатели производства агломерата.

Изложение материала и его результаты. Для производства качественного агломерата общим требованием, отраженным в технологических инструкциях всех металлургических предприятий, является обеспечение на рудных дворах или усреднительных складах необходимого нормативного запаса природного сырья: аглоруды, концентрата и флюсов.

На АМК удельный расход природных железорудных материалов обычно равен около 800 кг/т агломерата. При этом доля концентрата в смеси составляет более 80 %.

В таблице 1 приведены удельные расходы как природных материалов, так и основных техногенных отходов за период, когда их вводили в достаточно большом количестве. При этом в 2010 г. среднегодовой расход шлама составил 170 кг/т агломерата.

Таблица 1

Удельный расход железосодержащих материалов на производство агломерата

Материалы	Расход по годам, кг/т агломерата				
	2008	2009	2010	2011	2012
Природные железорудные материалы, в том числе:	810	731	727	804	812
концентрат	678	584	498	646	722
аглоруда	132	147	229	158	89,6
Шлам	17,3	113	181	107	80,6
Обогащенный мартеновский шлак (МОС-1)	33	87,4	78,5	36,3	35,6
Суммарный расход материалов	860,3	931,4	986,5	947,3	927,8

Ввод в шихту шлама в большом количестве в условиях АМК обусловлен колебаниями и снижением объемов поставок комбинату концентрата. В результате среднегодовое содержание концентрата в его штабеле снизилось с 79 % в 2008 г. до 49 % в 2010 г. (рис. 1). Недостаток концентрата покрывался вводом в штабель шлама и обогащенного мартеновского шлака МОС-1.

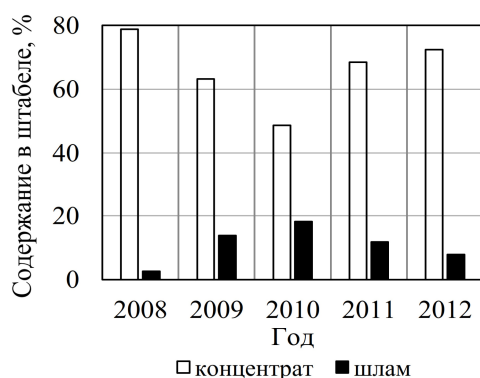


Рисунок 1 Среднегодовое содержание концентрата и шлама в штабеле концентрата

При этом основным материалом, компенсирующим его недостаток, являлся шлак из карт обезвоживания. В 2009 г. его расход по отношению к концентрату составил 26,5 %, а в 2010 г. — 37,3 %. В пересчете на тонну агломерата расход шлама составлял 14–17 %. Среднегодовой расход шлама на тонну концентрата и тонну агломерата приведен на рисунке 2.

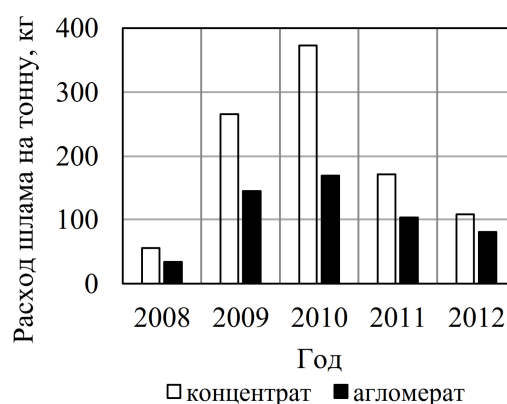


Рисунок 2 Среднегодовой расход шлама на тонну концентрата и тонну агломерата

Особенно значительная нехватка концентрата и неритмичность его поставки на комбинате наблюдалась в 2010 г. В результате ежемесячно расход железосодержащих материалов изменялся в широком диапазоне (рис. 3).

Наиболее сильно изменялся расход концентрата. В первом квартале его расход составлял в среднем 685 кг/т, в мае, июне и августе — около 400 кг/т агломерата, а в июле он полностью отсутствовал в шихте. Затем ситуация стала улучшаться: в четвертом квартале поставки концентрата стабилизировались и его расход возрос до 600 кг/т агломерата. Среднегодовой расход концентрата составил 498 кг/т агломерата.

В июле, когда концентрат в шихте отсутствовал, основными железосодержащими материалами являлись аглоруда и шлам. Их соотношение в шихте было близким к 1:1 при расходе руды 477, а шлама 455 кг/т агломерата. Замена природных железорудных материалов шламом, естественно, не равнозначна. Прежде всего, это объясняется разницей в их химическом составе. Как видно из данных, приведенных в таблице 2, в шламе содержание железа примерно в 1,4 и в 1,7 раза меньше чем в руде и концентрате соответственно (табл. 2).

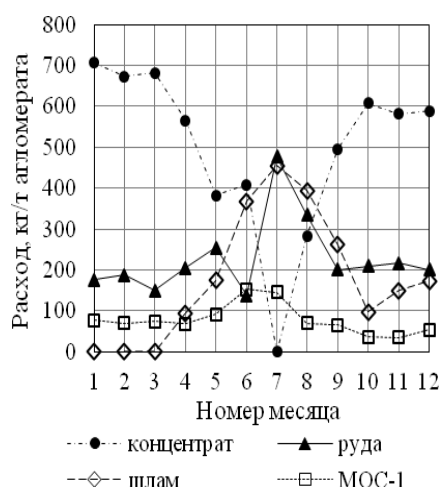


Рисунок 3 Колебания удельных расходов железосодержащих материалов в 2010 г.

Таблица 2
Среднее содержание основных компонентов в шихтовых материалах

Материал	Компоненты, %			
	Fe	FeO	CaO	SiO ₂
Концентрат	65,4	23,4	<0,3	7,6
Аглоруда	54,5	13,5	0,6	13,6
Шлам	38,3	7,9	9,5	9,6
МОС-1	45,0	13,6	21,9	11,9
Отсев агломерата	54,8	11,7	10,8	8,3
Окалина	70,0	62,2	2,1	3,0
Известняк	0,5	—	41,0	1,8
Известь	0,1	—	87,0	0,9
Топливо*	6,0	—	2,0	47,1

*Зола составляет 15,6 %.

Авторы работы [1], делая оценку шламов АМК, отмечают наличие в них большого количества горючего углерода (10–12 %). По их мнению, это значительно увеличивает металлургическую ценность шламов. Однако проведенные нами опытные спекания агломерата из шихты, состоящей из шлама с добавкой флюса, показали, что при агломерации сгорает лишь незначительная часть углерода шлама. Связано это с тем, что подавляющее большинство частиц шлама (87–88 %) имеет размер меньше 0,05 мм и лишь около 1–2 % частиц крупнее 0,1 мм. Топливо такого размера, как установлено многими исследованиями, при окомковании шихты закатывается в гранулы и в процессе не участвует. Косвенным подтверждением сказанного является факт увеличения в 2–3 раза содержания углерода в возврате при спекании шихты с большим количеством шлама.

К сожалению, данные о содержании углерода в агломерате отсутствуют, и это не позволяет сделать более объемный анализ участия углерода шлама в процессе спекания агломерата.

С целью обеспечения заданного содержания железа в агломерате в шихту вводился МОС–1 в количестве до 150 кг/т агломерата.

Влияние на ход и показатели процесса агломерации ввода в шихту МОС–1 описано авторами работы [2]. Особенностью этого продукта является то, что в его состав входит металлическое железо. По данным авторов среднее содержание металлического железа в МОС–1 составляет около 39 %, а общего железа — около 58 %. В то же время продукт МОС–1 крайне неоднороден. Содержание металлического железа в исследованных пробах находилось в пределах от 19 до 60 %. В большинстве случаев содержание металлического железа находится в пределах 30–43 %. Количество проб, в которых содержание железа было меньше 30 % составило 7,3 %, а в которых оно превышало 43 % — около 29 %.

Металлическое железо в ходе процесса агломерации практически полностью окисляется, и выделяющееся при этом тепло позволяет снизить расход топлива. Опытные спекания агломерата из шихты, состоящей только из продукта МОС–1 и коксика, показали, что качественный по прочности агломерат может быть получен при содержании углерода в шихте около 1 %. Обычно для производства агломерата, как известно, его содержание в шихте составляет 3,5–4,0 %.

Анализ данных работы агломерационного цеха АМК за 2010 год показал, что в условиях, в которых он работал, в зависимости от расхода основных железосодержащих материалов, при увеличении или уменьшении их расхода в шихту, изменение содержания железа в агломерате может быть ориентировочно рассчитано по уравнению

$$\Delta Fe_{агл} = Fe_{агл}^{\delta} - Fe_{агл}^p = 0,024 \cdot \Delta P + 0,02 \cdot \Delta Ш + 0,08 \cdot \Delta M - 0,016 \cdot \Delta K, \quad (1)$$

где $Fe_{агл}^{\delta}$ и $Fe_{агл}^p$ — содержание железа в агломерате в базовый и расчетный период соответственно, %; ΔP , $\Delta Ш$, ΔM и ΔK — изменение расходов руды, шлама, МОС-1

и концентрата соответственно в сравниваемых периодах работы цеха, кг.

Эмпирические коэффициенты в уравнении (1) определены регрессионным анализом.

Расчет при сравнении шихтовых условий, в которых цех работал в январе (шлам в шихте отсутствовал) и июле (в шихте отсутствовал концентрат), показал, что в результате перешихтовки содержание железа в агломерате должно было снизиться на 10,4 % и составлять 44,4 %. По отчетным данным содержание железа в агломерате равно 44,53 %.

Предложенная зависимость (1) не позволяет точно рассчитать изменение содержания железа ввиду того, что она не учитывает колебания содержания железа в материалах, однако она может быть рекомендована для оперативного анализа влияния измененных условий на его содержание без расчета шихты или составления соответствующего баланса.

Колебание содержания железа в шламе не позволяло производить агломерат, отвечающий требованиям по содержанию железа и диапазону его колебаний. Количество анализов агломерата, укладываемых в диапазон $\pm 0,5$ % от среднего содержания железа в агломерате, уменьшалось при увеличении доли шлама в шихте. Так, если при работе без шлама в указанный диапазон укладывалось в среднем 40–50 %, то при максимальном расходе шлама 455 кг/т агломерата — только около 5 %. Влияние расхода шлама на количество кондиционного агломерата носит линейный характер. Теснота связи характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,83.

В период работы агломерационного цеха с максимальным расходом шлама и МОС–1 в шихте было отмечено резкое повышение содержания FeO в агломерате. Если в обычных условиях производится агломерат с содержанием закиси железа около 11 %, то при значительной замене концентрата шламом и МОС–1 (расход первого возрос до 370–455, а второго — до

145–153 кг/т агломерата) содержание FeO в агломерате возросло до 18–22 %. Этот факт объясняется окислением содержащегося в МОС–1 металлического железа, механизм которого описан в работе [2]. Как установлено в результате настоящего анализа, при увеличении расхода МОС–1 на каждые 10 кг/т агломерата содержание FeO в агломерате возрастало на 0,6 %.

Заданная основность агломерата обеспечивалась вводом в шихту извести и известняка. Их расход также варьировался в широком диапазоне. Среднегодовой расход извести составил 57 кг/т агломерата при минимальном ее расходе 51 и максимальном 68 кг/т агломерата. Известняка в шихту в среднем за год вводилось 76 кг/т агломерата при минимальном его расходе 43 и максимальном 126 кг/т агломерата. При этом основность агломерата также колебалась в широком диапазоне от 1,16 до 1,48. Ее среднее значение равнялось 1,31, а среднеквадратичное отклонение — 0,13. Качественного агломерата по основности (по укладке в требуемый диапазон $\pm 0,05$ от среднего) в разные месяцы получено от 21 до 47 %.

Как показал анализ, колебания основности не были вызваны колебаниями расходов в шихту ни шлама, ни МОС–1. Повидимому, они явились следствием недостаточно точной дозировки.

Также установлено, что при увеличении расходов шлама и МОС–1 в агломерационной шихте содержание MgO в агломерате возрастает. Изменение содержания MgO в агломерате удовлетворительно описывается эмпирическим уравнением

$$\Delta MgO_{agl} = 0,003 \cdot (\Delta P + \Delta Ш) + 0,015 \cdot \Delta M - 0,002 \cdot \Delta K. \quad (2)$$

В анализируемом периоде существенно снизилась производительность агломерационного цеха. Основной причиной этого явились значительные простои цеха производственного характера. Среднемесячные простои к номинальному времени работы цеха по факту составили 15,3 % при плановых 6,0 %.

Кроме того, к снижению производства привело изменение состава железосодержащей части шихты. На рисунке 4 приведена наблюдаемая зависимость суточного производства от удельных расходов концентрата (K), агломерационной руды (P) и шлама (Ш). Эти зависимости описываются соответствующими уравнениями

$$P_{сут} = 0,004 \cdot K + 11,64, R^2 = 0,39,$$

$$P_{сут} = -0,007 \cdot P + 15,42, R^2 = 0,20,$$

$$P_{сут} = -0,0061 \cdot Ш + 14,92, R^2 = 0,45.$$

В теории и на практике установлено, что в смеси тонко измельченного концентрата с рудой увеличение его доли приводит к снижению производительности. Причиной этого является снижение газопроницаемости спекаемого слоя в результате разрушения гранул шихты в зоне переувлажнения и сушки.

Согласно же данным, приведенным на рисунке 4, в условиях работы агломерационного цеха АМК в рассматриваемом периоде наблюдалась обратная зависимость производительности от расхода концентрата в шихту. Несмотря на большой разброс фактических данных, наблюдается достаточно четкая линейная зависимость, характеризующаяся коэффициентом корреляции, равным 0,62.

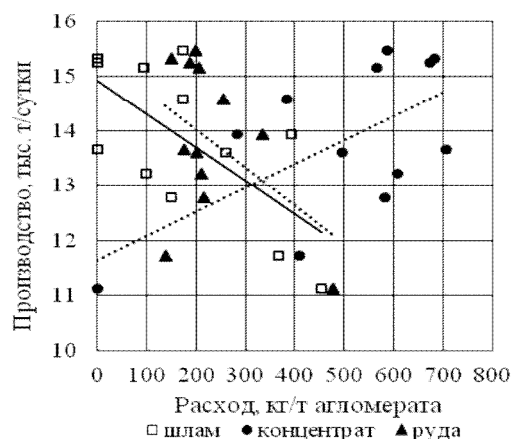


Рисунок 4 Зависимость суточного производства от удельных расходов железосодержащих материалов

Увеличение удельного расхода концентрата на 100 кг/т агломерата приводило к повышению суточного его производства на 440 т агломерата.

При этом увеличение удельного расхода шлама в шихте на 100 кг сопровождалось снижением суточного производства агломерата на 610 т. Коэффициент корреляции, характеризующий эту связь, равен 0,67.

Одновременное уменьшение удельного расхода концентрата и увеличение расхода шлама на 100 кг приводит к снижению производства агломерата примерно на одну тысячу тонн в сутки.

Наблюдаемое влияние концентрата и шлама на производство, по-видимому, объясняется следующим.

При уменьшении в шихте концентрата снижается количество разрушающихся гранул, образовавшихся без центров окомкования. Это приводит к повышению газопроницаемости спекаемого слоя.

С другой стороны, шлам имеет повышенную влажность — около 20 %. При такой влажности образуются комки, которые в процессе окомкования не разрушаются. В зоне сушки эти комки распадаются, образуя малопроницаемую грязеподобную массу. По нашим данным это происходит при влажности комков свыше 9 %. В результате образовавшаяся масса забивает пустоты в спекаемом слое и его газопроницаемость снижается.

В целом газопроницаемость слоя при больших расходах шлама, заменяющего концентрат, значительно снижается.

Косвенным подтверждением этого является снижение вакуума (В) в коллекторе при увеличении расхода шлама (рис. 5). Полученные зависимости имеют вид

$$B = -0,003 \cdot \text{Ш} + 7,46, R^2 = 0,62,$$

$$B = 0,0023 \cdot K + 5,69, R^2 = 0,47.$$

Если при полном отсутствии шлама в соответствии с установленными зависимостями вакуум был 7,46 кПа, то при полном

отсутствии концентрата он снизился до 5,7 кПа. Взаимосвязь вакуума с расходом шлама характеризуется коэффициентом корреляции, равным 0,78, а с расходом концентрата — 0,68.

Составленные материальные балансы основных химических компонентов шихты показали, что при вводе в шихту неподготовленного шлама увеличивается вынос мелкодисперсной пыли примерно в 1,5–2 раза.

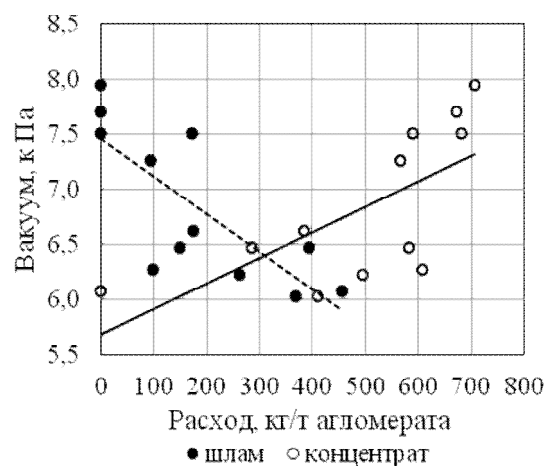


Рисунок 5 Влияние состава шихты на величину вакуума в коллекторе

Выводы и направление дальнейших исследований. Проведенный анализ показал, что ввод в агломерационную шихту шлама в большом количестве, а тем более полная замена концентрата шламом без подготовки последнего, не рационален даже в условиях неритмичной поставки природного железорудного материала.

В ходе дальнейших исследований необходимо установить влияние ввода в агломерационную шихту техногенных отходов в большом количестве на выход годного агломерата, его прочность и ситовый состав, восстановимость и другие характеристики. Необходимо также проанализировать результаты доменной плавки на агломерате, произведенном из шихты, содержащей большое количество техногенных отходов.

Библиографический список

1. Петрушов, С. Н. *Металлургическая оценка шламов АМК [Текст] / С. Н. Петрушов, И. И. Ровенский, С. Д. Кузьмина, Ю. В. Изюмов // Сборник науч. трудов ДГМИ. — Алчевск : ДГМИ, 2002. — № 15. — С. 214–221.*

2. Петрушов, С. Н. *Перспективы разработки техногенных месторождений на примере переработки шлаков сталеплавильного производства Алчевского меткомбината [Текст] / С. Н. Петрушов, И. Ф. Русанов, Р. И. Русанов и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2002. — № 4. — С. 123–125.**

© Русанов И. Ф.
 © Куберский С. В.
 © Мищенко И. М.
 © Кузьменко В. Ф.

*Рекомендована к печати к.т.н., доц. каф. МЧМ ДонГТИ Должиковым В. В.,
 зам. нач. ЦЛК филиала № 12 ЗАО «Внешторгсервис» Тарасовым В. Н.*

Статья поступила в редакцию 21.10.2020.

**PhD in Engineering Rusanov I. F., PhD in Engineering Kuberskiy S. V. (DonSTI, Alchevsk, LPR),
 PhD in Engineering Mishchenko I. M. (DonNTU, Donetsk, DPR), PhD in Engineering
 Kuzmenko V. F. (Branch № 12 ZAO “Vneshtorgservis” (Closed Joint-Stock Company), Alchevsk,
 LPR)**

**OVERVIEW THE WORK OF SINTERING SHOP OF ALCHEVSK IRON-AND-STEEL
 WORKS IN CONDITIONS OF UNSTABLE INPUT OF NATURAL RAW MATERIALS**

There have been analyzed the work data of sintering shop of Alchevsk Iron-and-Steel Works during the period of unstable supply of concentrate and iron ore to the plant, which caused the need to use burden with a high-tailing consumption and enriched open-hearth slag (up to 455 kg/t of sinter and up to 135 kg/t of sinter, respectively). There has been determined the impact of replacement of natural raw materials with man-caused waste on sintering process, the performance of the shop and the quality of the received sinter.

Key words: *sintering, concentrate, tailing, ore, iron-containing waste, sinter, iron content, daily production, gas dynamic condition, performance.*