

УДК 669.162.262

к.т.н. Русанов И. Ф.,  
к.т.н. Куберский С. В.,  
к.т.н. Проценко М. Ю.,  
Завгородний С. Р.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, rusanova-2011@inbox.ru)

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЖЕЛЕЗОФЛЮСА НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Приведены результаты выполненных теоретических расчетов по определению возможности и эффективности использования на предприятиях черной металлургии собственных техногенных отходов при производстве железоблины. Установлено влияние замены природного сырья техногенными отходами на ход процесса агломерации, показатели процесса и качество получаемого агломерата.

**Ключевые слова:** агломерация, техногенные отходы, сталеплавильный шлак, шлам, мелкодисперсная окалина, высокоосновный агломерат, железоблины, спекание, прочность, выход годного агломерата.

**Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.** В результате промышленных революций XVII–XIX веков уже во второй половине XX столетия значительно ухудшилось состояние окружающей человека среды и природных ресурсов. Необходимость рационального их использования привело к созданию в 1983 году Генеральной Ассамблеей ООН Международной комиссии по окружающей среде и развитию («Комиссия Брундтланд»). В отчете комиссии «Наше общее будущее», подготовленном для ООН и опубликованном в 1987 году, введено понятие «устойчивое развитие» — развитие, которое удовлетворяет потребности нынешнего поколения, не угрожая возможности будущих поколений удовлетворять свои собственные нужды.

Концепция устойчивого развития имеет три составляющие: экономическую, социальную и экологическую. Поэтому такое развитие предполагает комплексное решение экономических, социальных и экологических проблем, достижение равновесия и сбалансированности между ними, а также обязанность нынешнего поколения перед будущими оставить достаточные ресурсы, необходимые для обеспечения

уровня благосостояния не ниже существующего.

Одной из важнейших проблем развития общества является рациональное использование природных ресурсов, которое невозможно без «рециркуляционной экономики».

Первой в мире страной, провозгласившей себя страной с рециркуляционной экономикой стала Япония, в которой в 2001 году вступил в силу Закон № 110 от 2 июня 2000 г. («Базовый закон о формировании общества с оборотным использованием ресурсов»). Под термином «оборотные (вторичные) ресурсы» понимается пригодная для использования часть отходов производства и потребления. В качестве приоритетных подходов в отношении вторичных ресурсов закон определяет: 1) ограничение образования, 2) утилизацию, 3) обратное использование, 4) утилизацию тепла и 5) безопасное для окружающей среды и человека депонирование отходов. Первые три направления (соответственно — reduce, reuse, recycling) часто сокращенно обозначают «3R», иногда добавляя к ним и четвертое понятие — recovery — восстановление вторичных материалов.

К вторичным ресурсам относят сырье, материалы, отходы производства, образующиеся в процессе хозяйственной деятельности, которые можно использовать в дальнейшем при изготовлении нового продукта.

Особенно актуально использование вторичных ресурсов в старопромышленных регионах. К таким регионам относятся и Донбасс, в котором горно-металлургические комплексы создавались в конце XIX — начале XX века, и поэтому к настоящему времени они существенно отстают как по структуре, так и по физическому состоянию от передовых зарубежных производств.

Это сказывается и на уровне вовлечения в производственный и хозяйственный рециклинг вторичных ресурсов, которые накопились в огромном количестве.

Основными техногенными отходами черной металлургии являются доменные и сталеплавильные шлаки, шламы и пыли газоочисток, мелкодисперсная окалина, мелкая чугунная стружка. В этих отходах содержатся такие полезные компоненты, как металлическое железо и его оксиды, оксиды кальция, магния, марганца и других металлов. Их химический состав зависит от шихтовых условий, в которых работает предприятие, а также от его регионального размещения. Все они рассматриваются как эффективные заменители природного сырья. Значительная часть этих отходов, которые образуют техногенные месторождения, расположенные вблизи металлургических предприятий, может быть переработана при агломерации железорудного сырья.

Как известно, для придания металлургическим шлакам (как доменным, так и сталеплавильным) необходимых физических и химических свойств в агрегаты вводятся флюсы, главным образом флюсовые известняки. Основные месторождения известняков в нашем регионе (с добычей в сумме 18,2 млн т известняка в год) расположены на территории Донецкой области.

Из них Каракубское (Комсомольское рудоуправление) и Еленовское (Докучаевский флюсо-доломитный комбинат) находятся на территории Донецкой народной республики, а Новотроицкое (Новотроицкое рудоуправление) — на подконтрольной Украине территории. За почти вековую эксплуатацию часть рудников практически полностью выработана, а часть значительно истощена. В целом все месторождения при возрождении промышленности к 2050 году будут выработаны.

В сложившихся условиях возникает необходимость поиска эффективных заменителей природного флюсового известняка как природными материалами, так и материалами техногенного происхождения.

С целью замены природных флюсов в металлургии ведутся работы по созданию искусственных шлакообразующих, таких как железофлюс (называемый также железной известью), содержащий оксиды железа и известь и имеющий основность, определяемую отношением  $\text{CaO}$  к  $\text{SiO}_2$ , в пределах от 3,5–4 до 7,5–8.

Опыт производства железофлюсов и их последующего использования при агломерации руд, в доменном и сталеплавильном производствах показал, что они являются эффективным заменителем природного известняка.

Для производства железофлюсов, как правило, использовались железорудные концентраты, богатые малокремнистые руды, окалина, известняк и известь.

Вместе с тем привлекательным с точки зрения экономических, технических и экологических показателей является производство на существующих агломашинах железофлюса из шихты, включающей техногенные железосодержащие отходы, офлюсованные минимальным количеством известняка. Так, например, в работе В. П. Хайдукова [1] рассматривается получение комплексных шлакообразующих (железофлюсов) для конвертерного производства из шихты, в которой в качестве железосодержащего материала использо-

вался шлам кислородно-конвертерных цехов НЛМК.

Помимо шламов для производства железоблинов могут использоваться и другие техногенные отходы металлургического производства. При этом необходимо провести оценку влияния техногенных отходов, как в отдельности, так и в смеси, на состав железоблинов и его качество.

**Постановка задачи.** На основании изложенного выше в данной работе поставлена задача провести сравнительный анализ состава железоблинов, полученного при использовании различных комбинаций техногенных отходов в шихте, и в лабораторных условиях оценить параметры спекания такого железоблинового сырья.

**Изложение материала и его результаты.** Черная металлургия использует значительное количество как собственных мелких твердых техногенных отходов, так и отходов других производств, которые в качестве заменителей железосодержащих материалов и флюсов вводятся в агломерационную шихту. Такие отходы, как металлургические шлаки, шламы газоочисток, замасленная окалина, располагаются в непосредственной близости от предприятий, образуя по запасам техногенные месторождения. Однако степень их рециклинга незначительна, что является следствием целого ряда причин.

Прежде всего, отсутствует единая методика определения ценности техногенных отходов, позволяющая определять их адекватность природному минеральному сырью.

В черной металлургии сравниваются содержание железа, оксидов кальция, кремния, алюминия, магния, вредных примесей цинка, свинца, мышьяка в отходе с их содержанием в концентрате или в железной руде по принципу «больше — меньше». Такая оценка является дифференциальной и производится как для полезных, так и для вредных составляющих отхода. Достоинством такой оценки является ее простота. В то же время наличие нескольких показателей, значимость кото-

рых различна, затрудняет однозначную и объективную оценку качества техногенного отхода. Поэтому чаще всего сравнение производится по содержанию железа (наиболее важной характеристике), примеси цинка и свинца, а также по основности, определяемой отношением  $\text{CaO}$  к  $\text{SiO}_2$ . В целом дифференцированный метод не всегда гарантирует объективную оценку качества отхода, что необходимо учитывать при его использовании. Учитывая сказанное выше, можно сделать вывод, что для оценки качества отходов необходим комплексный показатель.

Для объективной оценки качества техногенных отходов могли бы использоваться методы квалитрии недр (горной квалитрии) [2].

Комплексный показатель качества полезного ископаемого определяется по формуле

$$q_k = \sum_{i=1}^n q_i^{нол} \cdot a_i - \sum_{j=1}^m q_j^{вред} \cdot a_j, \quad (1)$$

где  $n$  и  $m$  — количество учитываемых эксплуатационно-потребительских полезных и вредных единичных качеств соответственно;  $q_i^{нол}$ ,  $q_j^{вред}$  — количественные значения соответственно каждого  $i$ -го полезного и  $j$ -го вредного качества;  $a_i$  и  $a_j$  — коэффициенты значимости соответственно полезного и вредного качества. Количественный результат по этой формуле выражается в стоимостной форме, но может быть выражен и в безразмерном виде.

Коэффициенты значимости соответственно  $a_i$  и  $a_j$  имеют технолого-экономический смысл, характеризуя степень изменения затрат с учетом ценности полезного ископаемого на переработку минерального сырья и до получения продукции регламентированного качества.

К сожалению, применение описанной методики для оценки качества техногенных отходов невозможно. Причиной этого является то, что химический состав отхо-

дов нестабилен и колеблется в широком диапазоне, а его анализ делается в лучшем случае один раз в сутки. Кроме того, учет затрат на подготовку отходов производится с недостаточной точностью, а цена носит в большинстве случаев договорной характер.

В работе [3] для определения металлургической ценности шламов рассчитывается содержание в них эффективного (приведенного) железа по формуле

$$Fe_{эф} = \frac{Fe_{общ} \cdot 100}{100 - CaO - MgO - Mn - nnn}, \quad \%, \quad (2)$$

где  $Fe_{общ}$  — общее содержание железа в окисленном и металлическом виде, %;  $Mn$ ,  $CaO$ ,  $MgO$  — полезные компоненты, %;  $nnn$  — потери при прокаливании, в результате удаления которых при высоких температурах содержание железа повышается, %.

Недостатком этой формулы является то, что при расчете эффективного железа не учитывается увеличение массы спека в результате окисления  $FeO$  при агломерации сырья, а также влияние на содержание железа добавок флюса для получения агломерата заданной основности.

С учетом высказанных замечаний содержание эффективного железа в материале (фактического после его офлюсования и спекания) следует определять по формуле

$$Fe_{ф} = \frac{Fe_{общ} \cdot 100}{100 - nnn + \Delta O_2 + \Delta CaO}, \quad (3)$$

где  $\Delta O_2$  — количество присоединенного кислорода в результате окисления  $FeO$  до  $Fe_2O_3$ , %;  $\Delta CaO$  — количество добавляемого  $CaO$  для получения материала заданной основности, %.

Для материалов, не содержащих металлическое железо,  $\Delta O_2$  определяется по формуле

$$\Delta O_2 = \frac{1}{9}(FeO_{mat} - FeO_{act}). \quad (4)$$

Для материалов, в составе которых присутствует металлическое железо, величина

$\Delta O_2$  увеличится на  $0,34 \cdot Fe_{мет}$ . Коэффициент 0,34 учитывает, что при агломерации около 80 % металлического железа окисляется до  $Fe_2O_3$  [4].

Количество  $CaO$ , добавляемого для получения материала заданной основности, определяется по формуле

$$\Delta CaO = B \cdot SiO_2 - CaO, \quad (5)$$

где  $B$  — заданная основность, определяемая отношением  $CaO$  к  $SiO_2$ ;  $SiO_2$  и  $CaO$  — содержание  $SiO_2$  и  $CaO$  в материале, %.

Для проведения всех расчетов использованы средние за продолжительный период данные химического анализа природных материалов и железосодержащих отходов (табл. 1), являющихся сырьем для производства агломерата на Алчевском металлургическом комбинате (АМК).

Помимо традиционных отходов (шлак и окалина) в таблице приведен химический состав МОС-1 — обогащенного мартеновского отвального шлака. Подробная информация о получении этого материала и его свойствах приведена в работе [5].

В таблице также приведены рассчитанные численные значения показателей  $Fe_{эф}$  и  $Fe_{ф}$ . Их расчет выполнен для условий спекания агломерата основностью 1,5 с содержанием в нем  $FeO = 11$  %.

Как видно из результатов расчета, показатель  $Fe_{ф}$  более точно отражает изменение содержания железа после спекания материала.

При спекании двухкомпонентной шихты (без учета топлива) при изменении ее основности, естественно, изменяется количество добавляемого  $CaO$  (независимо от вида флюса) в соответствии с уравнением (5). При этом содержание и остальных компонентов как в шихте, так и в конечном продукте изменяется.

На рисунке 1 показан расход  $CaO$  при изменении основности шихты для материалов, химический состав которых приведен в таблице 1.

Таблица 1

Химический анализ железосодержащего сырья АМК

Материал	$Fe_{общ}$	$FeO$	$SiO_2$	$CaO$	$MgO$	$Al_2O_3$	$nnn$	$F_{эф}$	$Fe_{ф}$
Аглоруда	52,6	0,50	14,6	0,80	1,50	1,30	0,5	54,1	44,0
Концентрат	64,5	22,5	8,1	0,10	0,34	0,60	1,7	65,9	57,8
Шлам	34,4	12,3	15,6	12,5	1,8	3,5	15,5	49,0	36,0
Окалина	71,0	63,5	0,64	0,16	0,62	0,14	0,5	71,9	66,9
МОС-1	58,1*	11,9	9,0	9,6	5,9	5,4	0,7	69,3	49,7

\* В МОС-1 в  $Fe_{общ}$  включено металлическое железо в количестве 40,1 %.

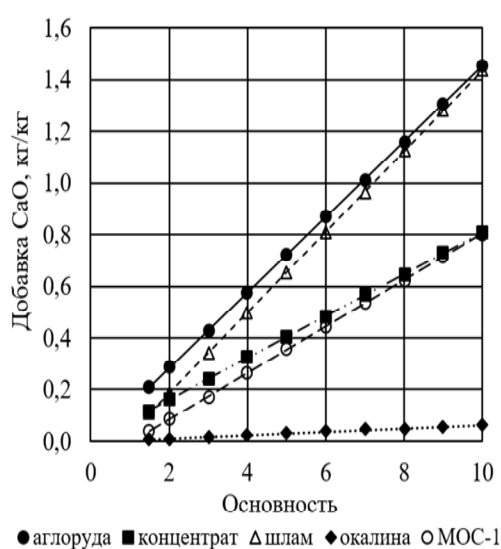


Рисунок 1 Добавка CaO в шихту (кг/кг) в зависимости от ее основности

Ввод в шихту дополнительного количества CaO приводит к снижению в шихте остальных компонентов ее химического состава. Больше других снижается содержание общего железа и его оксидов, также кремнезема.

Изменение содержания фактического железа и кремнезема в спеченном железоблюсе при увеличении его основности приведено на рисунках 2 и 3 соответственно.

Снижение содержания железа в готовом продукте тем меньше, чем больше его содержание в исходном материале.

Так, при спекании шихты, состоящей из окалины с добавкой CaO, при увеличении основности железоблюса уменьшение содержания железа на единицу индекса ос-

новности  $\Delta Fe_{ф} / \Delta B$  составляет 0,4 %. Для остальных материалов, на офлюсование которых требуется в несколько раз больше CaO, снижение содержания железа составляет 2,3–2,6 % на единицу основности.

Содержания  $SiO_2$  и  $Fe_{ф}$  в материалах тесно коррелированы между собой — связь характеризуется коэффициентом детерминации, близким к единице. Поэтому и характер изменения их содержания при возрастании основности железоблюса идентичен.

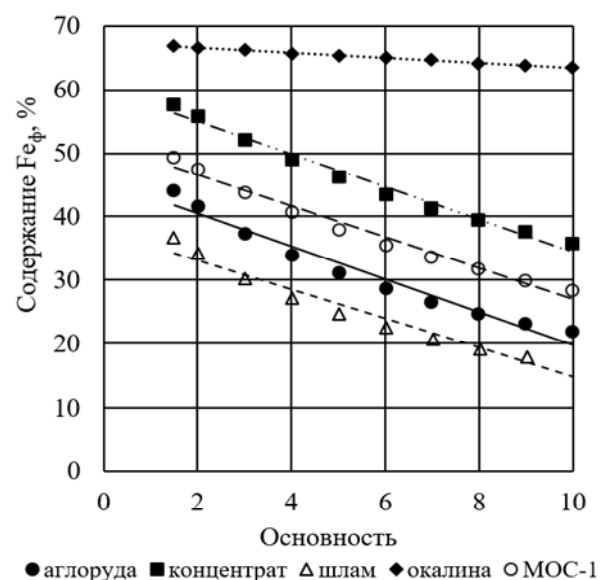


Рисунок 2 Содержание  $Fe_{ф}$  в железоблюсе разной основности после его спекания

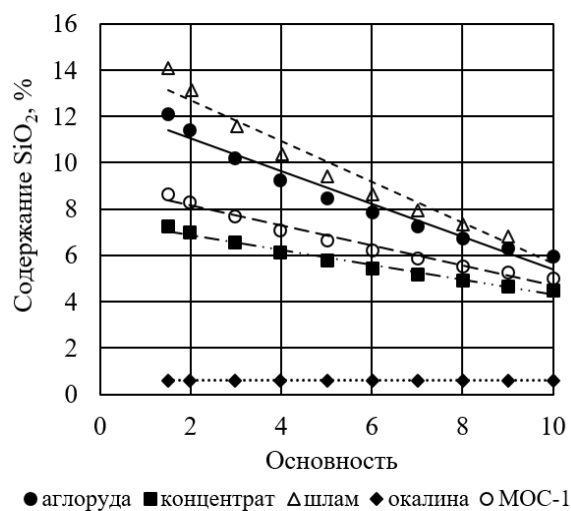


Рисунок 3 Содержание SiO<sub>2</sub> в железоблюсе разной основности после его спекания

Изменение содержания остальных оксидов при увеличении основности особого интереса не представляет ввиду их небольшого количества в отходах, что не оказывает решающего влияния на образование минералов в агломерате.

Не вдаваясь в процесс изменения минералогического состава шихты в процессе ее спекания, отметим, что, как установлено многими исследователями, в итоге кристаллизации жидкой фазы в агломерате повышенной основности, и в том числе в железоблюсе, в связке содержатся силикаты и ферриты кальция.

Согласно правилу кристаллизации железистых расплавов переменной основности, сформулированному В. Ф. Вегманом [5], в состав ферритов кальция может входить CaO, оставшийся в избытке после полного обеспечения известью кристаллизующихся из расплава силикатов кальция.

На рисунке 4 приведены две зависимости, характеризующие изменение содержания Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO, которые могут участвовать в образовании ферритов кальция в железоблюсе при увеличении его основности.

Анализ данных, представленных на рисунке, показывает, что только при спекании железоблюса на базе окалины возможно получение продукта с основностью,

близкой к 10 единицам (линии Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO в рассмотренном диапазоне изменения основности не пересекаются). Однако количество расплава при этом будет недостаточным для пропитки шихты и получения прочного агломерата.

При спекании железоблюсов из шихты, железорудная часть которой представлена природными материалами (концентратом и агломерационной рудой), максимальная основность железоблюса может быть около 6 и 3 единиц соответственно (см. точки пересечения линий на графике). При более высокой основности (справа от точек пересечения линий) избыток CaO в железоблюсе в виде обожженной извести приведет к распаду железоблюса с образованием пыли.

По той же причине получение железоблюсов при использовании шлама или МОС-1 возможно только с основностью менее 2 и около 4 единиц соответственно.

Таким образом, как показывает проведенный выше анализ, получение железоблюсов высокой основности с использованием шихты, в составе которой железорудная часть представлена одним из рассмотренных техногенных отходов, невозможно.

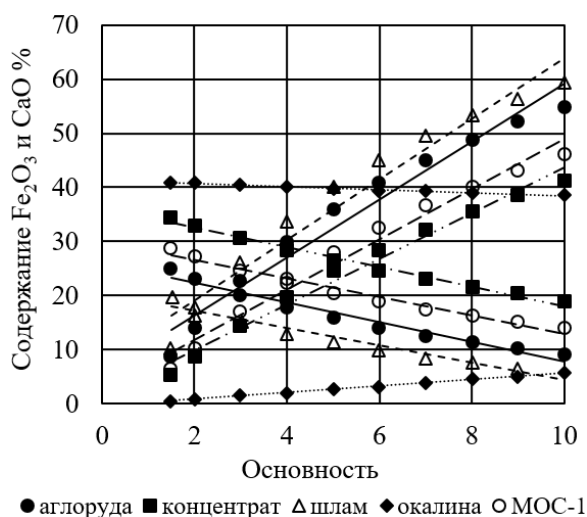


Рисунок 4 Содержание Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (убывает) и CaO, входящее в состав ферритов кальция (возрастает) в железоблюсе в зависимости от его основности

Как установлено расчетом, получение железофлюса повышенной основности без свободного СаО возможно при спекании шихты, состоящей из шлама или МОС-1 с добавкой окалина.

Так, для получения железофлюса основностью 5 единиц можно использовать шихту, железорудная часть которой состоит из шлама и окалина, при ее доле 0,4, а основностью 10 единиц — 0,65.

При спекании железофлюса из шихты на основе МОС-1 такой же основности доля окалина в железосодержащей смеси должна составлять 0,1 и 0,55 соответственно.

Для проверки возможности спекания железофлюса из шихты, включающей шлам или МОС-1 с добавкой окалина, в лабораторных условиях были проведены опытные спекания.

Шлам имел исходную влажность 20 %, при которой он был несипучим, что затрудняло его ввод в шихту и последующую ее подготовку. Поэтому шлам предварительно подсушивался до влажности 9 %. Для офлюсования шихты в нее вводился известняк в количестве, обеспечи-

вающим необходимую основность железофлюса. Расход топлива (коксовой мелочи) коррелировался с учетом тепла, необходимого для разложения известняка. Общая масса шихты составляла 10 кг с учетом прихода топлива. Состав шихты и результаты опытных спеканий приведены в таблице 2.

Лабораторные эксперименты по производству железофлюсов из техногенных отходов показали, что изменений технологии спекания обычных высокоосновных агломератов при их получении не требуется.

В то же время результаты спеканий, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о том, что для производства железофлюса целесообразно использовать МОС-1 в смеси с окалиной. В этом случае при лучших показателях процесса железофлюс имеет лучшее качество.

Скорость спекания железофлюсов несколько выше, чем при спекании обычных агломератов. При этом с увеличением основности скорость спекания шихты со шламом увеличивается, а для МОС-1 — уменьшается.

Таблица 2

Состав опытных шихт и результаты их спеканий

Параметр	Шлам + окалина		МОС-1 + окалина	
	5	10	5	10
Основность железофлюса	5	10	5	10
Доля окалина в железорудной части шихты, %	0,39	0,65	0,10	0,55
Расход материалов, кг:				
шлам	3,3	3,65	—	—
окалина	2,1	2,0	0,5	2,4
МОС-1	—	—	5,3	2,75
известняк	3,9	3,5	3,6	4,35
топливо	0,7	0,85	0,6	0,5
Высота слоя, мм	300	300	300	300
Выход спека, кг/%	7,2/72,0	7,19/71,9	7,63/76,3	7,49/74,9
Усадка, %	14,5	13,7	10,1	11,3
Вертикальная скорость спекания, мм/мин	17,6	19,1	22,4	21,7
Выход фракции > 5 мм, %	76,8	72,4	73,6	75,4
Выход фракции > 10 мм, %	58,3	56,4	60,7	61,2
Средняя крупность железофлюса, мм	14,5	19,6	27,3	26,4
Барабанные испытания:				
более 5 мм	64,4	69,7	75,3	72,3
менее 0,5 мм	4,5	4,2	4,4	5,2

Причиной этого является различие в процессах формирования гранул окомкованной шихты.

Шихта «шлам-окалина» мелкая, и в ней недостаточно центров окомкования. В результате образующиеся гранулы имеют пониженную прочность и разрушаются в зоне переувлажнения.

При разрушении гранул усадка слоя повышается, слой уплотняется и его газопроницаемость уменьшается, что в итоге приводит к снижению скорости спекания и, как следствие, к падению производительности. Увеличение содержания окалины в шихте, по-видимому, улучшает качество гранул окомкованной шихты. Об этом свидетельствует уменьшение усадки шихты и рост скорости спекания.

Окомкование шихты «МОС-1» — окалина происходит по другой схеме. Шлак имеет такую же крупность, как и возврат. Поэтому окомкование происходит при наличии центров окомкования. В результате гранулы имеют большую прочность и меньше разрушаются в зоне переувлажнения: усадка слоя меньше и скорость спекания увеличивается.

Увеличение доли окалины в шихте вызывает уменьшение центров окомкования, что приводит к ухудшению показателей спекания и качества получаемого железоблисса.

### Библиографический список

1. Хайдуков, В. П. Теоретические и технологические основы получения комплексных шлакообразующих и их использование в кислородно-конвертерном производстве [Текст] : дис. д-ра техн. наук : 05.16.02 / Хайдуков Владислав Павлович ; Липец. гос. техн. ун-т. — Липецк, 1996. — 484 с.
2. Ломоносов, Г. Г. Горная квалиметрия [Текст] : учеб. пособ. / Г. Г. Ломоносов. — [2-е изд., стер.]. — М. : Горная книга, 2007. — 201 с.
3. Металлургическая оценка шламов АМК [Текст] / С. Н. Петрушов, И. И. Ровенский, С. Д. Кузьминова, Ю. В. Изюмов // Сборник науч. трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2002. — № 15. — С. 214–221.
4. 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.
5. Вегман, Е. Ф. Теория и технология агломерации [Текст] / Е. Ф. Вегман. — М. : Металлургия, 1974. — 286 с.

Повышение прочности железоблисса может быть результатом того, что шихта с МОС-1 спекалась при более высокой температуре за счет окисления металлического железа.

К сожалению, отсутствие химического анализа полученных железоблиссов не дает возможности провести более детальный анализ.

Очевидно, что окалина в шихте может быть заменена мелкой железной стружкой.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Проведенный анализ показывает, что производство железоблиссов возможно и целесообразно из шихты, состоящей из техногенных отходов. При этом максимум основности при использовании одного отхода ограничен из-за нехватки гематита для образования ферритов кальция.

Для увеличения максимума основности возможно к отходам добавлять окалину или мелкую железную стружку. Однако такая замена нуждается в дополнительном анализе в ходе дальнейших исследований.

Кроме того, в работе не рассмотрены отходы конвертерного производства стали, такие как пыль и шлак. В дальнейшем необходимо сделать оценку этих отходов с целью включения их в рециклинг.



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

*Статья поступила в редакцию 12.03.2021.*

**PhD in Engineering Rusanov I. F., PhD in Engineering Kuberskiy S. V., PhD in Engineering  
Protsenko M. Yu., Zavgorodniy S. R. (DonSTI, Alchevsk, LPR, rusanova-2011@inbox.ru)**

**ASSESSMENT OF POSSIBILITY FOR PRODUCING THE STAFLUX BASED  
ON TECHNOGENIC WASTES**

*The results of the theoretical calculations performed to determine the possibility and efficiency of using own technogenic wastes at ferrous metallurgy enterprises in staflux production are presented. The effect of replacing natural raw materials with technogenic wastes on agglomerating process, process indicators and quality of the obtained agglomerate has been determined.*

**Key words:** *agglomerating, technogenic wastes, steelmaking slag, sludge, finely-divided oxide scale, high-base agglomerate, staflux, sintering, strength, yield of suitable agglomerate.*