



УДК 669/621.745

Поступила 07.10.2021

ПЕРЕРАБОТКА И УТИЛИЗАЦИЯ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛООТХОДОВ

С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет, Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65. E-mail: rovin@bntu.by. Тел.: +375 (17) 292-50-60

Л. Е. РОВИН, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, Беларусь, г. Гомель, пр. Октября, 48. E-mail: lerovin@mail.ru. Тел.: +375 (29) 633-95-99

И. С. НАСЕВИЧ, УП «Технолит», Беларусь, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by. Тел. + 375 (17) 292-30-92

Представлен анализ ситуации с утилизацией дисперсных железосодержащих отходов, а также применяемых сегодня способов их переработки с целью извлечения металла и возвращения его в производство. Описан альтернативный метод рециклинга таких отходов, основанный на использовании ротационных наклоняющихся печей нового поколения. Предлагаемый метод позволяет перерабатывать и использовать дисперсные металлоотходы непосредственно на машиностроительных и металлообрабатывающих предприятиях, где они образуются практически без предварительной подготовки и окомкования. Такой подход позволяет получить значительный экономический и экологический эффект.

Ключевые слова. Рециклинг, дисперсные железосодержащие отходы, восстановление, плавка, ротационные печи, экология.

PROCESSING AND DISPOSAL OF DISPERSED METAL WASTE

S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave. E-mail: rovin@bntu.by, tel.: +375 (17) 292-50-60

L. E. ROVIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus, 48, Ocyabrya ave. E-mail: lerovin@mail.ru, tel.: +375 (29) 633-95-99

I. S. NASEVICH, "Technolit" Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: technolit@tut.by, tel.: + 375 (17) 292-30-92

The analysis of the situation with the disposal of dispersed iron-containing waste, as well as the methods of their processing used today in order to extract the metal and return it to production, is presented. An alternative method of recycling such waste based on the use of rotary tilting furnaces of a new generation is presented. The proposed method makes it possible to process and use dispersed metal waste directly at machine-building and metalworking enterprises, where they are formed practically without preliminary preparation and pelletizing. This approach allows you to get a significant economic and environmental effect.

Keywords. Recycling, dispersed iron-containing wastes, recovery, melting, rotary furnaces, ecology.

Введение

Ресурсо- и энергосбережение наряду с экологическими проблемами являются наиболее актуальными проблемами современной индустрии, особенно в таких материал- и энергоемких отраслях, как литейное производство и металлургия. Извлечение металлов из отходов имеет особое значение для Беларуси, не имеющей полнопрофильной металлургии. Рециклинг металлов в этом случае одновременно означает импортозамещение. Сокращение отвалов, особенно дисперсных материалов, наиболее опасных для окружающей среды, является весомым вкладом в улучшение экологических характеристик региона.

Научно-исследовательские работы в области переработки и утилизации металлоотходов активно ведутся во всех странах с развитым машиностроением и металлообработкой. Выполненные в последние годы в БНТУ и ГГТУ им. П. О. Сухого исследования по рециклингу дисперсных металлосодержащих отходов с получением качественных шихтовых материалов в ротационных печах представляют значительный интерес, так как открывают новое направление в решении этой глобальной задачи [1]. Внедрение разработанных технологий позволит значительно сократить количество не только вновь образующихся металлоотходов, в первую очередь железосодержащих, но и уже накопленные отвалы, объемы которых сегодня сопоставимы с рудными месторождениями. Их главным преимуществом является возможность организации рентабельного децентрализованного рециклинга дисперсных металлосодержащих отходов непосредственно на тех предприятиях, где они образуются, и, таким образом, реализация замкнутого оборота металлов в промышленности.

Металлоотходы и традиционные подходы к их утилизации

Металлоотходы в соответствии с природой их образования можно разделить на две группы. Первая группа – продукты физического и морального износа в процессе эксплуатации машин, механизмов, конструкций и т.д. Количество их объективно возрастает пропорционально не только масштабам производства изделий, но и сокращению сроков эксплуатации, что обусловлено темпами развития индустрии и потребительского рынка. Конечно, сюда же попадают продукты аварийных разрушений, кусковые продукты технологических процессов (обрезы, брак деталей, отходы монтажных работ и т.п.). Это то, что принято именовать металлическим ломом. Отходы этой группы хорошо изучены и классифицированы (ГОСТ 2787-75 и СТБ 2026-2010) и уже давно превратились в востребованную товарную позицию.

Вторая группа – дисперсные материалы, которые являются отходами технологических процессов получения и обработки металлов и сплавов. В свою очередь, они могут быть разделены на металлические (стружка, мелкий скрап, отсеивы дробы, пыль распиловки проката и т.п.), оксидные и многокомпонентные (окалина, шламы металлообработки, аспирационные пыли плавильных агрегатов, омагниченные продукты переработки шлаков и т.д.). С точки зрения переработки целесообразно также дисперсные металлоотходы разделить по фракциям на собственно дисперсные: от 0,1 до ~15–20 мм и ультрадисперсные – менее 0,1–0,05 мм. В настоящее время многие дисперсные материалы остаются вне нормативной классификации, что свидетельствует, в частности, о недостаточной изученности этой группы металлоотходов, составляющих до 50% всего объема их образования.

Дисперсные металлические отходы (ДМО) являются наиболее ценным сырьевым материалом и их утилизации уделялось наибольшее внимание металлургов начиная с середины прошлого века. В частности, все технологии брикетирования базируются именно на этой категории отходов. Характеристики стружки более всего изучены, хотя и недостаточно, если говорить о ее непосредственном переплаве без предварительной подготовки, в частности без окомкования или брикетирования.

Дисперсные и ультрадисперсные оксидные и многокомпонентные отходы (ОММ) содержат значительно меньше основного металла и с этой точки зрения, конечно, являются менее ценными материалами для использования в качестве шихты. Содержание железа общего (Feобщ) в таких отходах, как правило, не превышает 70%, а доля оксидов или других соединений, в том числе не содержащих железо (карбиды, нитриды, сульфиды, сложные минералы и т.п.), может составлять от 10 до 90%. Часть этих соединений является “пустой породой” по аналогии с аналогичным понятием в классической металлургии, в процессе плавки эта часть переходит в шлак [2].

ОММ до настоящего времени практически оставались вне поля зрения исследователей, хотя содержание железа в некоторых из них находится на уровне богатых железных руд и даже рудных концентратов. Технические трудности и высокий уровень затрат на их переработку традиционными способами привели к тому, что сегодня отвалы таких отходов, измеряемые миллионами тонн, уже создают серьезные экологические проблемы, а уровень их утилизации не превышает 15–20% от объемов ежегодного образования [3].

Схема основных источников и применяемых в настоящее время способов переработки дисперсных железосодержащих отходов представлена на рис. 1.

Стружка составляет основную часть дисперсных металлических отходов, в большинстве случаев она загрязнена СОЖ и маслами. Их содержание в общей массе стружки может составлять от 3 до 10%. При транспортировке и длительном хранении стружки происходит снижение этого показателя до 3–7% за счет оттаивания и стекания. Однако и в таком состоянии «грязная» стружка практически непригодна для дальнейшего применения в качестве шихтового материала в традиционных плавильных печах как по технологическим, так и по экологическим требованиям.

Стальная стружка, как правило, является сливной или витой, перед переработкой, в том числе перед брикетированием, она требует не только очистки от загрязнений, масел и СОЖ, но и дробления, для чего применяются молотковые, роторные, дисковые и другие дробилки. Дисперсной в исходном состоянии является лишь хрупкая чугунная стружка, чаще всего она представляет собой элементную стружку или стружку надлома и имеет форму пластинок (чешуек) толщиной 0,1–1,5 мм и длиной от 1–3 до 10–15 мм.

При транспортировке и перегрузках частички стружки ломаются, и кажущаяся дисперсность возрастает с $l_{50} \approx 5-10$ мм до $l_{50} \approx 2-3$ мм (здесь l_{50} – наибольший медианный размер). Еще более существенные изменения происходят с дисперсными металлоотходами при нагреве, особенно при нагреве в динамическом слое. Так, при нагреве до 700–800 °С во вращающейся печи в течение 30–35 мин дисперсность чугунной стружки увеличивается в 2–3 раза. Стальная стружка имеет существенно большую прочность

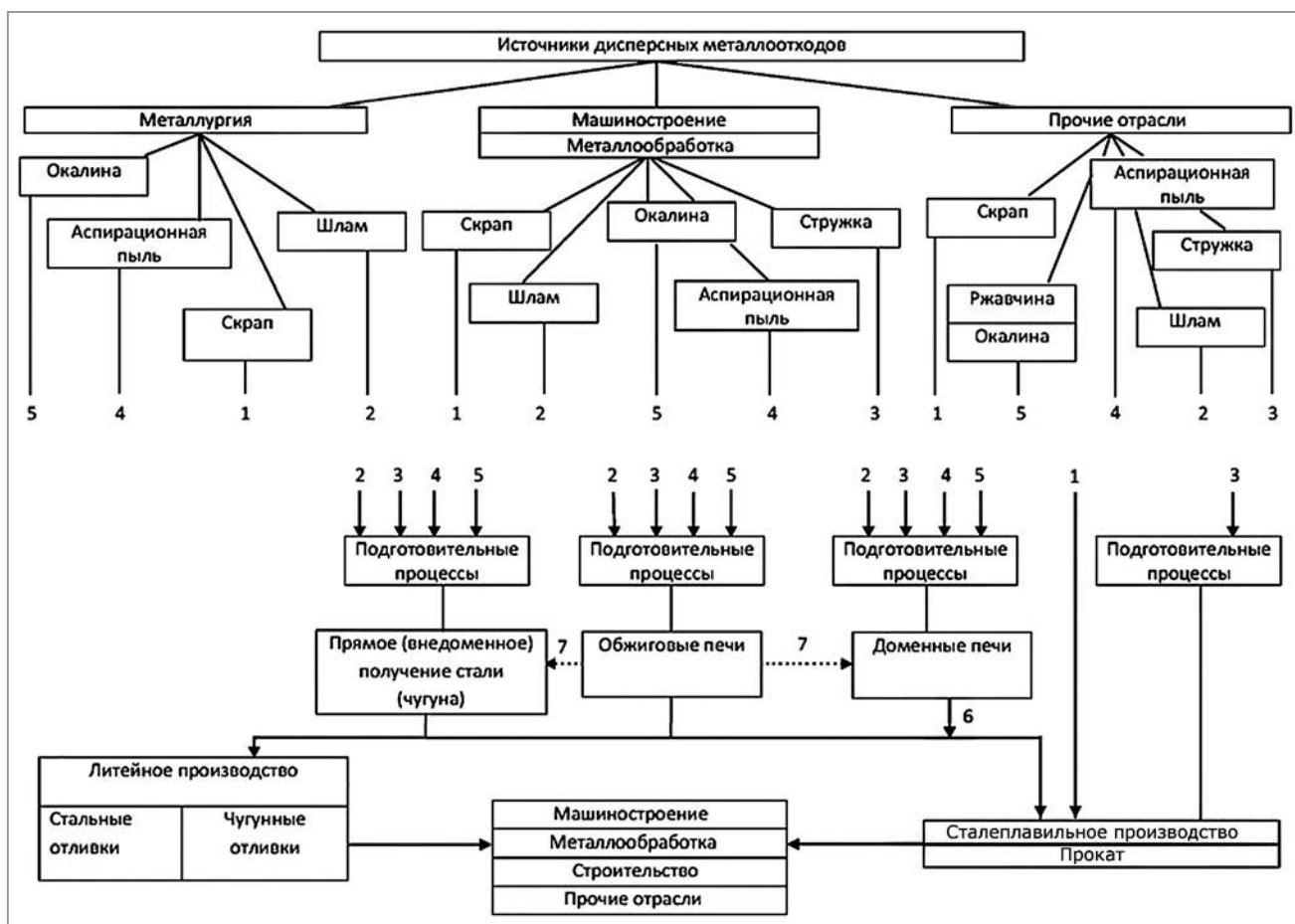


Рис. 1. Основные источники и применяемые схемы переработки отходов

и меньшую хрупкость: после часовой обработки при тех же режимах степень измельчения стальной дробленой стружки не превышает 10–15%.

Стружка, как правило, содержит значительное количество оксидов: чугунная – до 0,5%, стальная – 2–10%. При длительном хранении стружки особенно на открытых площадях в отвалах окисленность стружки может вырасти на порядок [4].

В настоящее время в Беларуси стружка централизованно собирается предприятиями ГО «Белвтормет» и частично перерабатывается непосредственно на предприятиях, где она образуется. Однако объемы переработки и возвращения в производство стружки в нашей стране по-прежнему не превышают 60–65% [5]. В то же время за рубежом ежегодно закупается около 1,5 млн. т стального и чугунного лома. Импорт лома при низком уровне переработки собственных технологических отходов, в том числе стружки, представляется совершенно неоправданным.

Основную часть железосодержащих отходов, накапливающихся в отвалах, составляют оксидные и многокомпонентные металлоотходы (ОММ). Универсальных технологий для их переработки, обеспечивающих хотя бы незначительную рентабельность, в настоящее время нет. В относительно небольших количествах подобного рода материалы используются лишь в качестве добавок при изготовлении агломерата для доменных печей, хотя по содержанию железа они вполне могут конкурировать с природными материалами – железными рудами (см. таблицу).

Основным источником окалина и аспирационной металлургической пыли в Беларуси является Белорусский металлургический завод, на котором ежегодно образуется 30–35 тыс. т окалина и около 40 тыс. т железосодержащей аспирационной пыли. Свою долю вносят и машиностроительные предприятия, имеющие кузнечное и термическое производство, строительство и другие отрасли, особенно если учесть, что к этому виду отходов можно отнести гидратированные оксиды ($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$, $FeO(OH)$, $Fe(OH)_3$) – ржавчину.

Объем образования шламов металлообработки (в первую очередь шлифовальных шламов) составляет 11–13% от общего объема стружкообразования, т.е. в масштабах Беларуси – 25–30 тысяч тонн в год. На сегодняшний день шламы металлообработки, в том числе и шламы дорогостоящих инструментальных и нержавеющей сталей, практически полностью вывозятся в отвалы [5].

Химический состав исследованных железосодержащих отходов, %

Наименование материала	Fe _{мет}	Fe _{общ}	FeO	Fe ₂ O ₃ расч.	C	Mn	Cr	Ni	Cu	S	Si	P
Стружка углеродистой стали	95,2	97	1,0	1,5	0,42	0,6	0,25	0,2	0,25	0,03	0,3	0,03
Стружка стальная окисленная	40,7	83,0	28,1	29,0	0,5	0,6	0,2	0,2	0,2	0,02	0,25	0,02
Стружка чугунная	79	85	4,2	3,6	3,4	0,8	0,08	-	0,03	0,12	1,8	0,17
Пыль аспирационная металлообработки (МТЗ)*	13,0	59,0	30,6	31,8	0,6	0,65	0,25	0,15	0,22	0,05	0,5	0,035
Шлам металлообработки (МТЗ)*	49,7	63,2	6,3	12,4	0,6	0,64	0,12	0,12	0,15	0,06	0,21	0,02
Пыль аспирационная ДСП (СЛЦ, МТЗ)**	0,4	24,9	13,7	20	1,7	2,4	0,8	0,2	0,1	0,35	0,28	0,024
Аспирационная пыль вагранок**	-	18,5	16,5	8,1	36,3	0,55	0,2	-	-	2,4	-	0,042
Окалина кузнечная (МТЗ)	0,2	65,2	38,7	54,5	0,4	0,65	0,21	0,15	0,23	0,03	0,38	0,03
Пыль дробеочистки отливок (МТЗ)****	24,4	30,5	2,6	6,3	0,5	0,7	0,11	-	0,05	0,08	0,61	0,02
Шлак (БМЗ)***	17,4	38,0	8,0	21,0	1,42	0,85	0,6	0,2	-	0,01	0,4	0,04
Пыль аспирационная (ЭСЦ, БМЗ)**	0,7	35,2	9,2	39,3	1,90	2,7	1,2	0,4	0,2	0,82	0,21	0,011
Окалина (СПЦ, БМЗ)	1,3	73	61	34,3	0,15	0,43	0,05	0,08	0,15	0,02	0,13	0,010
Шлам (БМЗ)	9,1	65,3	49,4	26,0	1,9	0,37	0,11	-	0,10	0,08	0,09	0,012
Пыль горячей и холодной резки проката	12,1	84,1	33,0	49,0	0,93	0,61	0,08	0,06	0,18	0,5	0,3	0,01
Пыль аспирационная дробеструйной установки (БМЗ)	36	80,6	38,0	22,0	0,42	0,89	0,14	0,07	0,20	0,02	0,52	0,011
Рудный концентрат	1,5	71,5	61,1	32,2	-	-	-	-	-	-	-	-

* В пыли аспирационной и шламах металлообработки содержится также до 15–30% абразива, состоящего в основном (до 90–92%) из Al₂O₃.

** В состав пыли аспирационной входят также SiO₂, Al₂O₃, CaO, MgO, ZnO и др.

*** В состав металлургического шлама, полученного после дробления (≤ 10 мм) и магнитной сепарации, входят также SiO₂, Ca₃SiO₅, Al₂O₃, Ca_{1,7}Mg_{0,3}SiO₄, Ca₂(Al(AlSi)O₇) и другие соединения.

**** В составе пыли дробеочистки отливок около 70–73% SiO₂.

В таблице приведены результаты исследования элементного состава дисперсных железосодержащих отходов, наиболее характерных для белорусских машиностроительных и металлургических предприятий и значимых с точки зрения объемов их образования. Помимо металлоотходов, в таблицу включен примерный состав рудного концентрата в качестве сырья – очевидно, что химические составы некоторых отходов (окалина, шлак) достаточно близки по составу рудному концентрату. Это позволяет использовать идентичные технологии их восстановления.

Из всех исследованных отходов, пожалуй, только состав прокатной окалины, образующейся на металлургических предприятиях со стабильной технологией, отличается более-менее постоянными параметрами и сравнительно низким уровнем загрязненности.

Окалина, как правило, представляет собой твердые, хрупкие пластинки (чешуйки) неправильной формы (коэффициент формы частиц окалины f колеблется от 1,5–2,0 до 7,0–7,5) толщиной от 0,3–0,5 до 2–3 мм и размерами от 2–3 до 10–20 мм. Насыпная плотность прокатной окалины в исходном состоянии колеблется в пределах от 2200–2500 кг/м³, через 2–3 месяца хранения в отвалах насыпная плотность окалины возрастает до 2700–2800 кг/м³. Угол естественного откоса окалины составляет около 40–43°.

Особую группу металлоотходов составляют ферросплавы: пыль, отсева мелочи, богатые силикатами шлаки. Рециклинг ферросплавов в настоящее время по ряду причин практически не проводится, хотя ценность этих материалов достаточно велика. В то же время результаты поисковых экспериментов свидетельствуют о перспективности рециклинга и этой категории отходов с применением РНП.

Переработка дисперсных металлоотходов в ротационных печах

В соответствии с приведенной выше классификацией для различных видов металлоотходов целесообразно использовать и различные виды технологий переработки. Прежде всего следует учитывать принципиальные различия в переработке кусковых и дисперсных материалов.

Первые могут успешно переплавляться в традиционных плавильных агрегатах (вагранках, дуговых и индукционных печах), что с середины прошлого века и осуществляется в широких масштабах. Кусковой металлолом превратился в ценный и достаточно дефицитный шихтовой материал, предмет

импорта-экспорта. Рециклинг кусковых отходов сегодня является технически отработанным и экономически оправданным решением: одна тонна переработанных металлоотходов позволяет сократить 1,5–1,7 т железной руды и 600 кг кокса.

Однако для того чтобы переплавить дисперсные материалы в тех же печах, необходимо их предварительно окомковать или брикетировать. Брикетирование в настоящее время – наиболее распространенный процесс в металлургии и литейном производстве. В то же время, несмотря на многолетние изыскания, так и не удалось разработать такую технологию, которая бы позволила получить брикеты, равные по качеству плотному шихтовому материалу, хотя бы кусковому металлолому.

Холодные брикеты имеют недостаточную плотность (до 5500 кг/м³) и высокую загрязненность. При использовании в шихте таких брикетов снижаются все технико-экономические характеристики плавильного агрегата, увеличиваются выбросы, особенно при электроплавке, снижается и качество полученного металла.

Горячее брикетирование позволяет повысить качество продукции, хотя и не до уровня плотного металла – сохраняются ржавчина, вредные примеси и нестабильность состава, при этом многократно увеличивается стоимость брикетов, достигая и даже превышая стоимость первичного металла – доменного чугуна.

Дисперсные отходы образуются рассредоточенно на сотнях источников – в литейных, термических и механических цехах машиностроительных предприятий, на металлургических заводах, предприятиях строительной отрасли и т.д. На каждом из них номенклатура, состав и свойства отходов различны. Вместе с тем, количество каждой составляющей металлоотходов на предприятии зачастую сравнительно невелико. При организации централизованной переработки для унификации продукции требуется создание соответствующего крупнотоннажного технологического оборудования, развитой в масштабах страны периферийной сети сбора, транспортировки, сортировки и подготовки отходов. Все это требует крупных капиталовложений и времени.

В условиях Беларуси необходимы технология и техника, адаптированные к параметрам и порционным, относительно небольшим объемам исходного материала, позволяющие перерабатывать различные дисперсные металлоотходы, причем не просто переплавлять, но и восстанавливать при необходимости. Для этого нужен специальный агрегат, предназначенный для работы с дисперсной шихтой с широкими возможностями управления параметрами рабочего пространства и режимами плавки. В этом отношении безусловными преимуществами обладают вращающиеся печи. Из них наиболее эффективными являются на сегодняшний день ротационные наклоняющиеся печи (РНП) с петлеобразным движением газов. Достоинства таких печей при обработке дисперсных материалов обеспечивают высокий КПД, гибкость технологии и универсальность в выборе шихтовых материалов, топлива и восстановителей.

Все гетерогенные процессы, происходящие на границе газ – твердое тело, включая нагрев, твердофазное восстановление, расплавление, требуют максимально развитой удельной поверхности реагентов. Скорость процессов восстановления (окисления) прямо зависит от дисперсности и пористости материала, прежде всего открытой. При вращении печи динамический слой дисперсных материалов обеспечивает высокую скорость конвективного теплообмена и равнодоступность (стабильный градиент концентраций и давлений) всех частиц при нагреве и восстановлении. Это позволяет интенсифицировать процессы обработки в 5–10 раз и более в зависимости от сырья, и делает возможным и рентабельным осуществление рециклинга в малотоннажных печах периодического действия.

Окомкование не только многократно увеличивает затраты на рециклинг, но и нивелирует все положительные качества дисперсных материалов, их высокие реакционные способности при брикетировании не используются.

Компьютерное исследование режимов движения газов и дисперсных материалов в РНП позволило получить качественную и количественную картину теплообменных процессов в рабочем пространстве печи, в том числе движения слоя и отдельных частиц, перемешивания и переноса тепла в слое за счет конвекции [6].

На рис. 2 представлены траектории движения отдельных частиц слоя материала, позволяющие определить скорость частицы в различные моменты времени и отследить ее перемещения: от зоны контакта с поверхностью печи к свободной поверхности слоя, из циркуляционной зоны в глубь слоя и обратно.

Комплексные исследования, включавшие использование имитационных моделей, компьютерное моделирование и натурные эксперименты на опытно-промышленных установках, позволили получить новые данные о скоростях и траектории движения материалов, разработать новые представления о структуре и конфигурации слоя, а также процессах смешивания дисперсных материалов. Кроме того, были установлены оптимальные геометрические параметры рабочего пространства, требования к мощности,

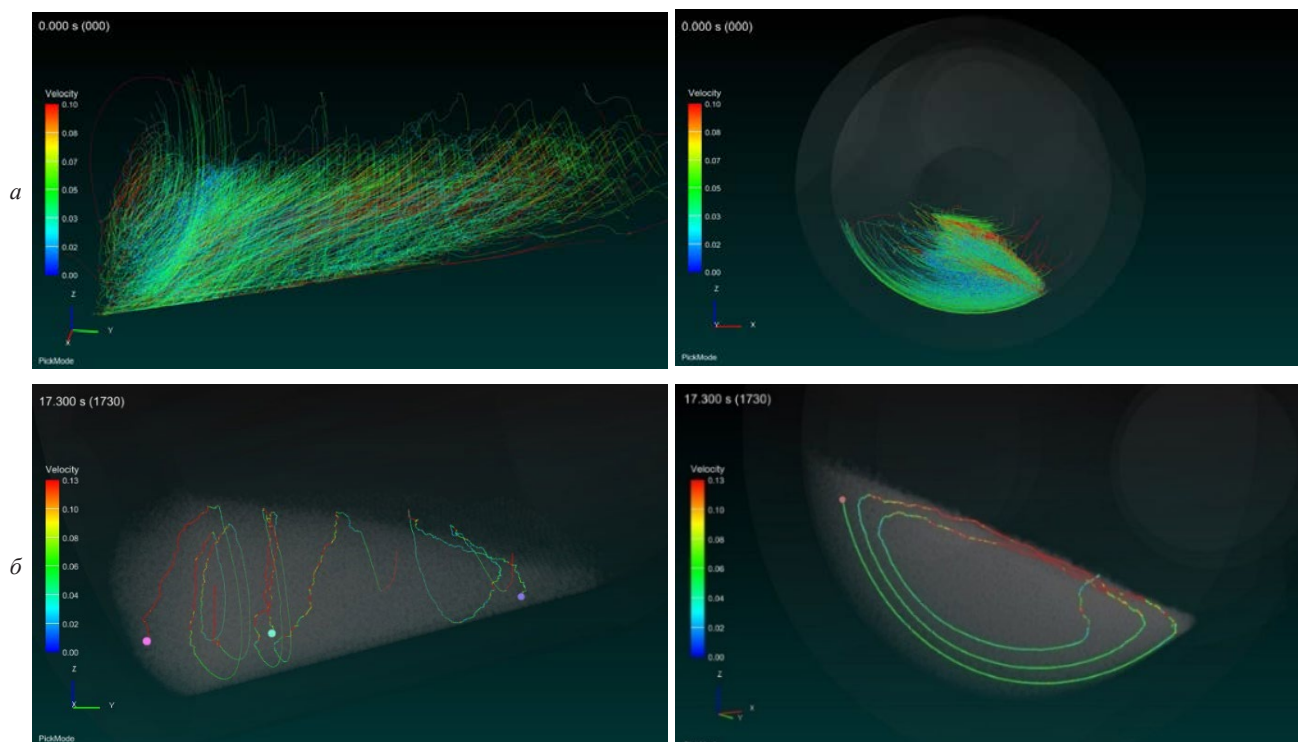


Рис. 2. Траектории движения частиц дисперсного материала в РНП:
a – множество частиц; *б* – выборка по трем частицам

месту расположения и углу поворота горелки, размерам выходного патрубка и другие параметры, позволившие усовершенствовать конструкции печей [6].

Благодаря высокой мобильности, технологической гибкости РНП является агрегатом, который позволяет осуществить процесс восстановления в наиболее энергетически выгодном режиме.

Рециклинг, осуществляемый в РНП, представляет собой последовательное сочетание твердо- и жидкофазного восстановления в одном агрегате без остановок и перегрузок в отличие от большинства агрегатов прямого восстановления в бездоменной металлургии железа.

При рециклинге в РНП не требуется сушка, удаление масел и брикетирование железосодержащих отходов. Более того, при загрузке замасленной стружки или окалины происходит даже некоторое сокращение удельных затрат топлива – пропорционально содержанию масла. Еще одним преимуществом предлагаемого процесса является возможность использования в качестве восстановителя отходов твердых углеродсодержащих материалов: коксик, отсеvy графита, угля, лигнин и т.п.

Скорость процесса твердофазного восстановления в смеси дисперсных материалов значительно (в 3–5 раз) выше, чем в известных агрегатах получения губчатого или кричного железа из окускованного сырья. Переход к динамическому, постоянно перемешиваемому, слою дисперсных материалов позволяет увеличить скорости восстановления еще в 1,5 раза и более.

Завершающей стадией предлагаемого процесса рециклинга в отличие от известных технологий твердофазного получения железа является расплавление и жидкофазное довосстановление, а также, если требуется, рафинирование и доводка расплава до заданного состава. Перевод в эту стадию производится путем увеличения расхода природного газа до максимума при соотношении «газ/воздух» 1/7–1/6 и обогащении дутья кислородом до стехиометрического количества. Температура в печи при этом повышается до 1700–1800 °С. Материал расплавляется, образуется вспененный шлак и в течение 30–45 мин проводится процесс жидкофазного довосстановления, выдержки и выдачи металла в разливочный ковш.

Решающую роль на этой стадии играет темп нагрева. При увеличении скорости повышения температуры в рабочем пространстве РНП до 1–2 К/с в интервале 1100–1800 °С спекания шихты до критических размеров не происходит: гранул с размерами более 15–20 мм перед расплавлением не обнаруживалось ни в одной пробе. Весь период перевода рабочего пространства в высокотемпературную область, а шихтовых материалов в жидкое состояние занимает 5–10 мин.

Выход металла из окалины при реализации разработанной технологии по практическим данным достигает 90% от железа общего ($Fe_{общ.}$) в исходном сырье.

Расход восстановителя распределяется на собственно восстановление – 50–60%, горение и газификацию – до 30–35%, пылеунос – 2–4% (по практическим данным), остальное – выгружаются вместе с шлаком. Таким образом, на 100 кг окалины необходимо загрузить в печь 40–45 кг угля или 35–40 кг кокса.

Расход топлива – природного газа и твердого топлива (роль которого здесь выполняет восстановитель: кокс, уголь и т.п.) определяется температурным режимом и рассчитывается по тепловому балансу восстановительной плавки. С учетом термического КПД ~ 40% общий расход природного газа составляет 14–16 м³ на 100 кг окалины (или 22–24 м³ на 100 кг жидкого металла), что соответствует 450–500 МДж.

При удельном расходе 40 кг кокса и 14 м³ природного газа на 100 кг окалины образуется около 360–380 м³ отходящих газов (после дожигания СО) [7].

Аналогично описанному выше технологическому процессу рециклинга окалины в ротационных наклоняющихся печах может быть реализована переработка и других оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов: проржавленной стружки (доменного присада), шлама, сырья, полученного при дроблении и магнитной сепарации металлургического шлака и др. Процесс существенно упрощается и сокращается по времени в сравнении с известными попытками переработки перечисленных отходов путем предварительного брикетирования [1].

Процесс рециклинга дисперсных металлических отходов, которые содержат относительно небольшое количество оксидов железа и других неметаллических примесей (не более 5–10%) – стружки, отсевов дробли, металлической пыли и т.п., в отличие от ОММ не требует проведения твердофазного восстановления и включает в себя безокислительный нагрев при сжигании газа (или жидкого топлива) с недостатком воздуха ($\alpha \sim 0,9$) и/или в присутствии твердого восстановителя (коксовый, отсев угля, антрацита и т.п., в количестве 3–6% от металлозавалки) до температуры 1100–1200 °С; расплавление шихты путем повышения температуры за счет обогащения дутья кислородом (до 27–28%); выдержку расплава до прекращения кипа, скачивание шлака и слив жидкого металла. Весь процесс плавки дисперсных металлических отходов занимает в РНП не более 30–40 мин, при этом угар металла не превышает 1,5–2,5%. При необходимости в РНП может быть проведено науглероживание или рафинирование расплава.

Весьма перспективным представляется применение РНП и для рециклинга отсевов и пыли ферросплавов. Высокую рентабельность эта технология демонстрирует при переработке практически любых дисперсных металлоотходов с размером частиц от 0,05–0,1 мм и содержанием извлекаемого металла не менее 45–50%.

На рис. 3 представлены варианты рециклинга наиболее типичных дисперсных железосодержащих отходов с применением РНП в сравнении с традиционными методами.

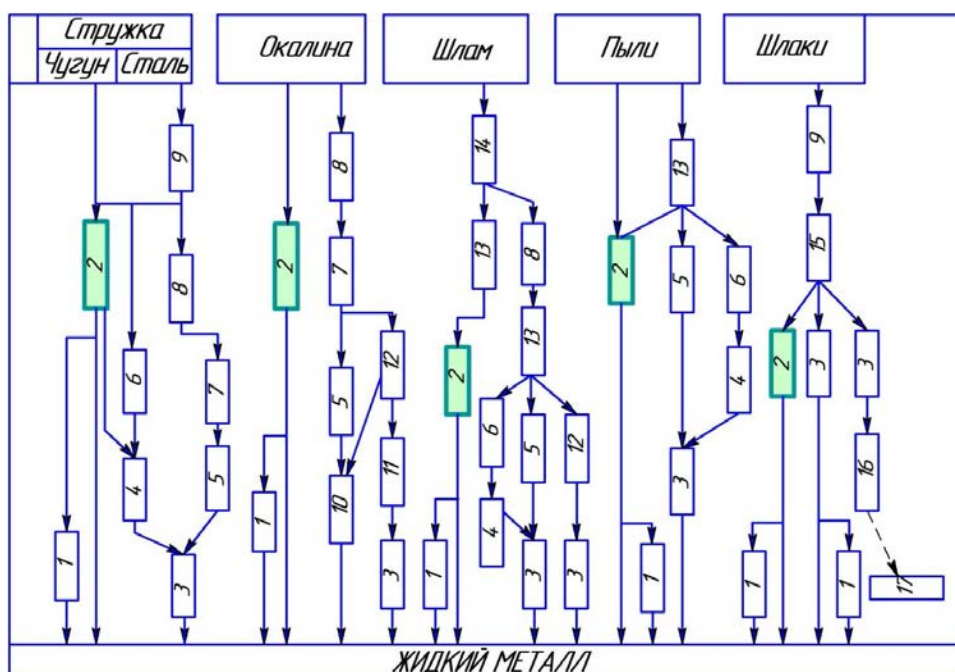


Рис. 3. Способы переработки металлоторходов:

- 1 – доводка; 2 – переработка в РНП; 3 – плавка; 4 – горячее брикетирование; 5 – холодное брикетирование; 6 – нагрев;
- 7 – сушка; 8 – очистка; 9 – дробление; 10 – выплавка чугуна в домне; 11 – производство агломерата на ГОК;
- 12 – агломерация; 13 – смешивание; 14 – сгущение; 15 – магнитная сепарация; 16 – грануляция;
- 17 – утилизация (использование в качестве строительных материалов) или захоронение

Выводы

Разработанные технологии рециклинга, основанные на применении ротационных наклоняющихся печей, открывают новые перспективы в области переработки и утилизации дисперсных металлоотходов. Значительным преимуществом этих технологий является отсутствие обязательной подготовки шихты и брикетирования, возможность с одинаковой эффективностью перерабатывать как небольшие, так и значительные объемы сырья. Благодаря высокой технологической гибкости РНП является агрегатом, который позволяет осуществить процесс не только плавки, но и восстановления, причем реализовать его в наиболее энергетически выгодном режиме.

Внедрение разработанных технологий и получение высококачественных шихтовых материалов или непосредственно литейных сплавов из металлоотходов позволит решить важные экономические и экологические народнохозяйственные задачи: создать новую сырьевую базу для отечественного литейного производства, сократить импорт первичных шихтовых материалов и металлов, организовать безотходный оборот металлов в промышленности, ликвидировать накопленные металлоотходы. В масштабах Беларуси переработка только вновь образующихся железосодержащих отходов позволит ежегодно возвращать в производство до 150–200 тыс. т чугуна и стали. Расчетная рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлоотходов, организованных на предприятиях, составляет не менее 50%, а срок возврата инвестиций – не более 9–12 месяцев. Производственная мощность таких участков может составлять от 0,5–1,0 до 50–100 тыс. т ежегодно перерабатываемых отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ровин С.Л.** Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
2. **Ровин С.Л., Ровин Л.Е.** Классификация и свойства дисперсных металлоотходов // *Литье и металлургия*. 2015. № 2. С. 5–13.
3. **Шатоха В.И.** Вторичные ресурсы металлургии. Днепр: РИА Днепр, 2009. 338 с.
4. **Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Заяц Т.М., Валицкая О.М.** Переработка стружки черных металлов // *Литье и металлургия*. 2017. № 4. С. 94–101.
5. **Дьяконов, О.М.** Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
6. **Ровин С.Л., Ровин Л.Е., Жаранов В.А., Мазуров В.С.** Движение и смешивание дисперсных материалов в ротационных печах // *Литье и металлургия*. 2017. № 2. С. 117–127.
7. **Ровин С.Л., Ровин Л.Е.** Применение ротационных наклоняющихся печей для прямого получения железа из окалины и шламов // *Металлургия: Республ. межвед. сб. науч. тр. В 2-х ч.* Минск: БНТУ, 2020. Вып. 41. Ч. 1. С. 41–61.