



УДК 621.745
DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-45-48

Поступила 27.02.2019
Received 27.02.2019

ВОЗВРАЩЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ МЕТАЛЛООТХОДОВ В ПРОИЗВОДСТВО

С. Л. РОВИН, А. С. КАЛИНИЧЕНКО, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: rovinsl@mail.ru,

Л. Е. РОВИН, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель,
Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: lerovin@mail.ru

В статье представлен альтернативный способ рециклинга дисперсных металлоотходов, основанный на непрерывном твердо-жидкофазном процессе, реализуемом в ротационных наклоняющихся печах (РНП). Новый способ позволяет перерабатывать отходы практически любого состава и состояния: от металлических до оксидных и многокомпонентных, в том числе железосодержащих (стружку, окалину, шламы, металлургическую пыль и т. п.), загрязненные влагой, маслами, органическими примесями без их предварительной подготовки (очистки, гомогенизации, окомкования и т. д.) с получением в результате металлического слитка (чушки) или марочных литейных сплавов.

Ключевые слова. Рециклинг, дисперсные металлоотходы, ротационные наклоняющиеся печи.

Для цитирования. Ровин, С. Л. Возвращение дисперсных металлоотходов в производство / С. Л. Ровин, А. С. Калиниченко, Л. Е. Ровин // *Литье и металлургия*. 2019. № 1. С. 45–48. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-45-48.

THE RETURN OF THE DISPERSED METAL WASTE INTO PRODUCTION

S. L. ROVIN, A. S. KALINICHENKO, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus,
65, Nezavisimosti ave. E-mail: rovinsl@mail.ru,

L. E. ROVIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoi, Gomel, Belarus, 48, Ocyabrya ave.
E-mail: lerovin@mail.ru

The article presents an alternative method of recycling of dispersed metal waste, based on a continuous solid-liquid-phase process, implemented in rotary tilting furnaces (RTF). The new proposed method of recycling allows processing wastes with almost any composition and state from metal to oxide and multicomponent wastes (shavings, fine scrap, mill scale, aspiration dust, sludge, etc.). The wastes can be even contaminated with moisture, oil, and organic impurities. The method developed does not require preliminary preparation of the initial materials (cleaning, homogenization, pelletizing, etc.). The finished products are ingots (pigs) for subsequent processing aiming the particular chemical composition or cast alloys of certain brand.

Keywords. Recycling, dispersed metal wastes, rotary tilting furnaces.

For citation. Rovin S. L., Kalinichenko A. S., Rovin L. E. The return of the dispersed metal waste into production. *Foundry production and metallurgy*, 2019, no. 1, pp. 45–48. DOI: 10.21122/1683-6065-2019-1-45-48.

В условиях растущего дефицита и удорожания качественных шихтовых материалов для литейного производства особую значимость приобретает рециклинг дисперсных металлоотходов, в первую очередь железосодержащих, накопление которых сегодня соизмеримо с объемами добычи руды. Проблема имеет не только экономическое, но и большое экологическое значение, а ее решение позволяет добиться безотходного оборота металла в промышленности и создает перспективы утилизации уже накопленных отходов.

Предлагаемый способ рециклинга в ротационных наклоняющихся печах (РНП) позволяет переработать отходы практически любого состава и состояния: от металлических до оксидных и многокомпонентных (стружку, мелкий скрап, окалину, аспирационные пыли, шламы и др.), загрязненных влагой, маслами, органическими примесями, без их предварительной подготовки (очистки, гомогенизации, окомкования и т. д.) с получением в результате слитка (чушки) или марочных литейных сплавов.

Традиционные плавильные агрегаты литейного производства (вагранки, индукционные и дуговые печи, топливные печи отражательного типа) не приспособлены для плавки дисперсных материалов. Все способы рециклинга дисперсных металлоотходов, применяемые сегодня в литейном производстве и чер-

ной металлургии, предполагают предварительную подготовку и окомкование (брикетирование, окатыживание, агломерацию) исходных материалов, причем ориентированы они, в первую очередь, на крупномасштабное, многотоннажное производство и стабильное, однородное по составу и свойствам сырье [1].

Переработка даже наиболее ценного из дисперсных отходов материала – стружки без предварительной подготовки приводит к большим потерям (угару) металла при плавке, значительному увеличению удельных энергозатрат и снижению качества сплава [2]. Широко применяемым способом подготовки стружки является холодное брикетирование, но качество холодных брикетов не удовлетворяет требованиям плавки, сохраняя большую часть проблем, характерных для исходного сырья. Повысить качество брикетов, в том числе их плотность до $(6,0-6,5) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, можно с помощью горячего брикетирования, однако это приводит к удорожанию продукции до стоимости первичных шихтовых материалов, таких, как доменный чугун, при этом качество брикетов все равно не достигает качества плотного металла [3].

В то же время известно, что нагрев, расплавление и все гетерогенные процессы, происходящие на границе «газ–твердое тело», включая твердофазное восстановление, требуют максимально развитой удельной поверхности реагентов. Исследования дисперсных железосодержащих отходов говорят об их существенной размерной, структурной и химической неоднородности, большом количестве дефектов, высокой пористости на макро- и микроуровне, соответственно высоких значениях их удельной реакционной поверхности, которая в сотни раз превышает удельную поверхность брикетов, окатышей и агломерата. Таким образом, с точки зрения тепломассообменных процессов окомкование является вредной операцией, гораздо перспективнее обработка дисперсных материалов в исходном состоянии, однако для этого необходимо применение специальных технологий и оборудования.

Такие процессы могут быть реализованы благодаря применению нового типа плавильных агрегатов – ротационных наклоняющихся печей, в которых дисперсные материалы находятся в динамическом постоянно перемешивающемся слое под воздействием скоростного высокотемпературного циркуляционного потока газов-теплоносителей-восстановителей. Постоянное обновление (перемешивание) слоя и его интенсивная продувка многократно ускоряют процессы массопереноса и теплопередачи: в РНП объемный коэффициент теплопередачи (a_v) достигает 2000–3000 Вт/(м³·К), в то время как в неподвижном слое материала он находится на уровне 3–4 Вт/(м³·К) [4].

Комплексные исследования движения газов и дисперсного материала в РНП, включающие компьютерное моделирование движения неизотермических газовых потоков, а также численное и имитационное моделирование движения материалов в рабочем пространстве печи, позволили установить новые особенности и закономерности процессов тепломассообмена, разработать способы управления этими процессами и их интенсификации [5, 6].

Разработанные технические решения позволили реализовать высокотемпературные, высокоскоростные процессы нагрева, восстановления и плавки дисперсных металлоотходов в РНП с КПД 50% и более, что в 3–5 раз выше, чем у электрических (индукционных и дуговых) или стационарных топливных печей при работе на подобных материалах.

Предлагаемый процесс рециклинга оксидных железосодержащих отходов осуществляется как двухстадийный непрерывный процесс в одном агрегате – РНП. Исходный материал (металлоотходы) и твердый восстановитель загружаются в печь без всякой предварительной подготовки и нагреваются с помощью газового или жидкого топлива до температуры 1000–1100 °С. Далее коэффициент избытка воздуха (α) снижается до 0,6–0,7 и процесс переводится в стадию твердофазного восстановления (ТФВ). Продолжительность этой стадии составляет 1,5–2,0 ч, при этом в печи поддерживается температура 1000–1200 °С и восстановительная атмосфера: $\text{CO}/\text{CO}_2 = 1,5-2,5$.

После того как степень восстановления достигает 70–80%, процесс переводится в стадию жидкофазного восстановления (ЖФВ). В печь загружаются флюсы, при необходимости добавляется восстановитель, подается кислород и температура повышается до 1700–1800 °С. Процесс перехода к расплаву осуществляется за 5–6 мин, скорость повышения температуры при этом достигает 2–3 К/с, что позволяет исключить спекание материала и крицеобразование. В процессе ЖФВ степень металлизации достигает 98–99%, о завершении процесса свидетельствует прекращение кипа металлической ванны. Продолжительность жидкофазной стадии составляет 25–30 мин.

Полученный металл может быть разлит в слитки с последующим использованием в качестве шихты в традиционных плавильных агрегатах, передан в жидком состоянии в электропечи для получения марочного сплава (дуплекс-процессы: «РНП – индукционная печь» или «РНП – дуговая печь») либо доведен до заданного состава непосредственно в РНП (путем науглероживания, рафинирования, легирования).

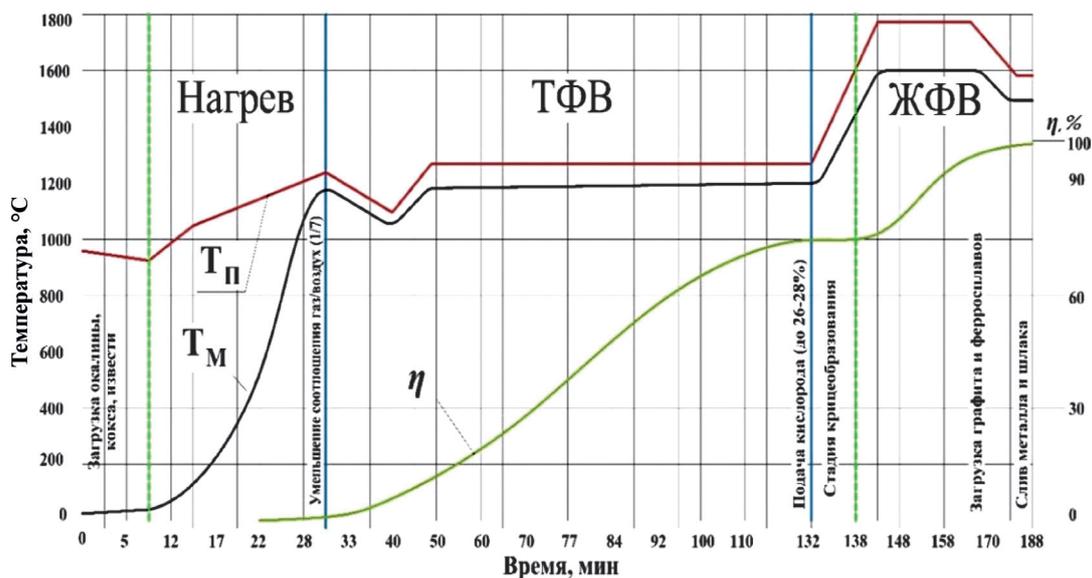


Рис. 1. Режим восстановительной плавки окалины в РНП: $T_{\text{П}}$ – температура в печи; $T_{\text{М}}$ – температура материалов; η – степень металлизации

Опробывание разработанной технологии в производственных условиях и отработку технологических режимов осуществляли на опытно-промышленном образце РНП полезной емкостью 500 кг. В качестве исходного сырья при этом использовали окалину и металлургические шламы, в качестве восстановителя – отсеvy кокса, угля и графита, а также лигнин (отходы гидролизного производства спирта). Расход восстановителя находился в пределах 40% от массы оксидов (в зависимости от их состава). Удельный расход топлива при рециклинге окалины составляет около 200–220 м³ на 1 т полученного металла, кислорода – ~40 м³/т. Основные технологические параметры опытно-экспериментальных плавок окалины и шлама в РНП приведены на рис. 1 [4].

При оптимальном технологическом режиме рециклинга железосодержащих отходов в РНП выход металла (стали или чугуна) составляет около 90% от теоретически возможного, при этом интенсивность процесса в 5–8 раз превышает скорости ТФВ в известных процессах Corex и Midrex, а удельные энергозатраты в 3–5 раз меньше, чем в жидкофазных процессах, таких, как РОМЕЛТ и Hismelt. Разработанный процесс позволяет проводить порционную переработку материалов, что дает возможность осуществлять децентрализованный, в том числе малотоннажный рециклинг дисперсных металлоотходов без какой-либо их предварительной подготовки непосредственно на предприятиях-источниках образования отходов.

Отличия рециклинга дисперсных железосодержащих отходов в РНП, основанного на непрерывном твердо-жидкофазном процессе восстановления, от доменного процесса (BF) и известных технологий внедоменного получения железа (Midrex, HYL, Fastmet, ITMk-3) можно представить, выделив характерные области реализации процессов (температурные интервалы и содержание углерода в получаемом продукте) на диаграмме «железо-углерод» (рис. 2).

Рециклинг неокисленных металлических отходов (стружки, металлической пыли, мелкого скрапа) в РНП сводится к процессу переplавки, а весь цикл занимает 40–45 мин при удельном расходе природного газа на уровне 80–90 м³/т. Окисление металла при нагреве предотвращается благодаря высокой скорости нагрева (60–80 К/мин) и восстановительной атмосфере в печи. Содержание масла в стружке снижает удельный расход используемого топлива.

Помимо рециклинга железосодержащих отходов, разработаны и внедрены в производство технологические процессы и ротационные печи, предназначенные для переработки дисперсных алюминиевых, медных и свинецсодержащих отходов, включая лом аккумуляторных батарей (рис. 3).

Разработанные технологии и оборудование ввиду технологической гибкости, возможности вести методический режим как по температуре, так и по атмосфере в печи хорошо адаптируются к условиям действующего производства, не требуют больших инвестиций и окупаются в течение 9–12 мес. Их внедрение позволяет создать новую сырьевую базу для литейного производства, сократить зависимость от первичных шихтовых материалов, организовать безотходный оборот металлов в промышленности, ликвидировать накопленные металлосодержащие техногенные отходы, использовать отходы твердых углеродсодержащих материалов, и, таким образом, получить значительный экономический и экологический эффект.

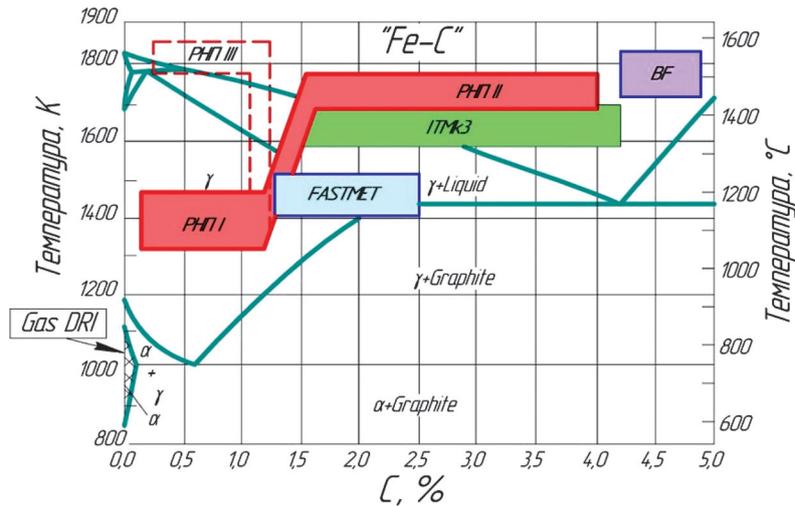


Рис. 2. Технологический интервал получения железоуглеродистых сплавов в РНП



Рис. 3. Ротационные печи для рециклинга дисперсных металлоотходов: а – РНП емкостью 2 т для рециклинга стружки черных металлов на ОАО «ГЛЗ «Центролит» (г. Гомель); б – РНП емкостью 10 т для получения чернового свинца из аккумуляторного шлама на ЗАО «КПВР «СПЛАВ» (г. Рязань, РФ); в – РНП емкостью 1,4 т для переплавки отходов алюминиевых сплавов на ООО «БелТор 7» (г. Мозырь)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бондаренко Б. И.** Теория и технология бескоксовой металлургии / Б. И. Бондаренко, В. А. Шаповалов, Н. И. Гармаш; под ред. Б. И. Бондаренко. Киев: Наукова думка, 2003. 506 с.
2. **Терлецкий С. В.** О некоторых проблемах переработки стружки в современных дуговых сталеплавильных печах / С. В. Терлецкий // *Литье и металлургия*. 2005. № 3. С. 76–78.
3. **Комплексная переработка металлоотходов методом горячего брикетирования** / П. А. Витязь [и др.] // *Порошковая металлургия*. 2009. Вып. 32. С. 41–59.
4. **Ровин С. Л.** Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
5. **Ровин С. Л.** Движение газов в ротационных наклоняющихся печах / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов // *Литье и металлургия*. 2016. № 3. С. 11–19.
6. **Ровин С. Л.** Движение и смешивание дисперсных материалов в ротационных печах / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, В. А. Жаранов, В. С. Мазуров // *Литье и металлургия*. 2017. № 2. С. 117–127.

REFERENCES

1. **Bondarenko B. I., Shapovalov V. A., Garmash N. I.** *Teoriya i tehnologiya beskoksovoj metallurgii* [Theory and technology of coke-free metallurgy]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2003, 506 p.
2. **Terletskiy S. V.** O nekotorykh problemah pererabotki struzhki v sovremennykh dugovykh staleplavil'nykh pechah [On some problems of chips processing in modern arc steel-making furnaces]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2005, no. 3, pp. 76–78.
3. **Vitjaz' P. A.** Kompleksnaja pererabotka metallootходов metodom gorjacheho briketirovanija [Integrated processing of metal waste by hot briquetting]. *Poroshkovaja metallurgija = Powder Metallurgy*, 2009, Vyp. 32 pp. 41–59.
4. **Rovin S. L.** *Recikling metallootходов v rotacionnykh pechah* [Recycling of metal waste in rotary kilns]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
5. **Rovin S. L., Rovin L. E., Zharanov V. A.** Dvizhenie gazov v rotacionnykh naklonjajushhihsja pechah [The movement of gases in rotary kilns]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2016, no. 3, pp. 11–19.
6. **Rovin S. L., Rovin L. E., Zharanov V. A., Mazurov V. S.** Dvizhenie i smeshivanie dispersnykh materialov v rotacionnykh pechah [Movement and mixing of dispersed materials in rotary kilns]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2017, no. 2, pp. 117–127.