



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-4-19-23>
УДК 669/621.745

Поступила 12.10.2021
Received 12.10.2021

ПОЛУЧЕНИЕ ФЕРРОСПЛАВОВ В РОТАЦИОННЫХ НАКЛОНЯЮЩИХСЯ ПЕЧАХ

С. Л. РОВИН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, 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,
г. Гомель, Беларусь, пр. Октября, 48. E-mail: lerovin@mail.ru, Тел.: +375 (29) 633-95-99

В статье представлен анализ методов, которые могут быть использованы для малотоннажного получения ферромарганца, ферросилиция и других ферросплавов в условиях машиностроительного предприятия с использованием собственных отходов, в том числе дисперсных. Предлагается осуществлять производство ферросплавов в ротационных наклоняющихся печах (РНП) нового поколения, которые имеют максимальный КПД при нагреве и расплавлении дисперсных материалов, позволяют активно осуществлять окислительные и восстановительные процессы и способны обеспечить необходимую рентабельность даже при небольших объемах производства.

Ключевые слова. Рециклинг, ферросплавы, металлоотходы, дисперсность, восстановление, плавка, ротационные печи, экология.

Для цитирования. Ровин, С.Л. Получение ферросплавов в ротационных наклоняющихся печах / С.Л.Ровин, Л.Е.Ровин // Литье и металлургия. 2021. №4. С. 19–23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-4-19-23>.

PRODUCTION OF FERROALLOYS IN ROTARY TILTING FURNACES

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

The article presents an analysis of methods that can be used for low-tonnage production of ferromanganese, ferrosilicon and other ferroalloys in the conditions of a machine-building enterprise using its own waste, including dispersed. It is proposed to carry out the production of ferroalloys in rotary tilting furnaces (RNP) of a new generation, which have maximum efficiency when heating and melting dispersed materials, allow active oxidation and reduction processes and are able to provide the necessary profitability even with small production volumes.

Keywords. Recycling, ferroalloys, metal wastes, dispersion, recovery, melting, rotary furnaces, ecology.

For citation. Rovin S. L., Rovin L. E. Production of ferroalloys in rotary tilting furnaces. Foundry production and metallurgy, 2021, no. 4, pp. 19–23. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2021-4-19-23>.

Введение

Рециклинг металлоотходов является задачей, актуальность которой трудно переоценить как с экономической, так и с экологической точки зрения. Составной частью этой проблемы является переработка и использование образующихся отходов ферросплавов. Производство качественных сплавов, прежде всего стали и чугуна, невозможно представить без применения ферросплавов для раскисления, легирования и модифицирования. Естественно, использование материала сопровождается образованием отходов. Если массовая доля используемых ферросплавов, как и образующихся отходов по сравнению с металлоотходами, невелика, то в стоимостном выражении они составляют значимую величину. Беларусь импортирует ферросплавы для нужд металлургии и литейного производства на десятки миллионов долларов в год. Затраты можно значительно сократить путем создания системы рециклинга. Хорошие перспективы имеют здесь технологии с использованием ротационных печей. Поисковые исследования, выполненные по этой проблеме, позволяют сделать вывод об эффективности переработки не только отходов собственно ферросплавов, но и силикатов из шлаков сталеплавильных печей.

Немалое значение имеет и экологический аспект проблемы. Сегодня перерабатывается не более 15–20% оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов, а все остальное захоранивается на промышленных полигонах и в отвалах предприятий [1].

Ферросплавы – сплавы железа с другими элементами, применяемые главным образом для раскисления, модифицирования и легирования стали и чугуна. Львиную долю среди них по объему производства и потребления составляют ферросилиций и ферромарганец, так называемые «большие ферросплавы». В среднем на сталеплавильных заводах расход ферросилиция, приведенного к ФС45, на 1 т стали составляет 6,5–7,5 кг, на 1 т чугуна с учетом угара уходит до 25 кг ферросилиция [2]. В год Республика Беларусь импортирует порядка 15 тыс. т ферросилиция в пересчете на ФС45. Сравнимые цифры представляет и импорт ферромарганца. Из этого количества 8–15% теряется при отсеве некондиционной мелочи миллиметрового диапазона, которая образуется при дроблении, перегрузках и транспортировке.

Однако наибольшую долю потерь составляют силикаты железа, входящие в состав шлаков, образующихся при производстве стали в электроплавильных печах. Это прежде всего фаялит ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$), кнебелит ($\text{FeO}\cdot\text{MnO}\cdot\text{SiO}_2$) и оливин ($2\text{MgO}\cdot\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$), составляющие 5–7% общего объема шлака. Кроме силикатов, в шлаках присутствует еще целый ряд комплексных соединений, в состав которых входят Fe, Mn и Si. Только на БМЗ за год образуется около 50 тыс. т силикатов, из которых утилизируется не более 35–40%, а остальное уходит в отвал.

В настоящее время выплавка ферросилиция и ферромарганца производится в основном в рудовосстановительных электродуговых печах большой мощности углеродотермическим или металлотермическим способом. В первом случае в качестве восстановителя используются углеродсодержащие материалы: кокс, полукокс, уголь, графит (отходы), коксик и др. При производстве высокоуглеродистых ферросплавов именно этот процесс является наиболее универсальным и популярным, он обеспечивает высокую производительность и позволяет получить практически любые ферросплавы. Однако процессы получения ферросплавов в электродуговых печах являются чрезвычайно энергоемкими. Так, например, средний удельный расход электроэнергии при производстве ферросилиция ФС45-ФС75 в электродуговых печах находится в пределах от 4500 до 9000 кВт·ч/т, что почти в 10–20 раз выше энергозатрат на выплавку стали. Кроме высоких затрат на электроэнергию, весьма существенной статьёй расходов (до 20–25% от стоимости готового продукта) при получении ферросплавов является предварительная подготовка сырья и его окомкование (агломерация, окатывание или брикетирование) [3,4]. Для обеспечения требуемой рентабельности производители ферросплавов, как правило, ориентируются на крупнотоннажные источники сырья – рудные месторождения и организацию производства непрерывного цикла. При небольших объемах исходного сырья и соответственно производства, необходимости порционного получения ферросплавов применение рудовосстановительных электродуговых печей становится нерентабельным.

Поиски новых малотоннажных процессов получения ферросплавов продолжаются во всем мире. Японские ученые разработали технологию восстановительной плавки агломерированной марганцевой руды в индукционной тигельной печи с перемешиванием ванны и провели пробные плавки в лабораторной установке емкостью 70 кг. Восстановительная индукционная плавка обеспечивает снижение угара компонентов и некоторое сокращение удельных энергозатрат относительно плавки в электродуговой печи, уступая при этом в производительности. При сравнении эффективности выплавки ферромарганца (ФМн) в электропечах с топливными шахтными печами были получены следующие данные: для выплавки 1 т ферромарганца в индукционной печи расходуется 2400–2800 кВт·ч электроэнергии и 360–380 кг кокса, а в шахтной печи – около 200 кВт·ч электроэнергии и 1500–1700 кг кокса [2].

В последние годы в области рециклинга дисперсных отходов черных сплавов, в том числе оксидных и многокомпонентных, достаточно успешно разрабатываются технологии, основанные на применении ротационных наклоняющихся печей (РНП). Значительным преимуществом этих технологий является отсутствие обязательной подготовки шихты, возможность проведения порционных плавки и эффективной переработки как небольших, так и крупных объемов сырья. Благодаря высокой технологической мобильности РНП является агрегатом, который позволяет проводить процессы восстановления в наиболее энергетически выгодном режиме (как в твердой, так и в жидкой фазе), а при использовании обогащения дутья кислородом осуществлять обработку при температурах от 1500 до 1800–1850 °С, что необходимо при получении ферросплавов из силикатов.

За модель предлагаемого процесса переработки отсевов ферросплавов может быть принят процесс рециклинга стружки в РНП как самый близкий по технологии. Отсевы являются чистыми и ценными отходами – сырьем для переработки, так как их состав уже представляет собой сплавы ФС или ФМн.

Процесс рециклинга дисперсных металлических отходов, которые содержат относительно небольшое количество оксидов железа и других неметаллических примесей (не более 5–10%), включает в себя предварительный разогрев печи (только при первой плавке); загрузку шихты, восстановителя и флюсов; безокислительный нагрев в присутствии твердого восстановителя (коксик, отсев угля, антрацита и т. п., – до 5–6% от металлозавалки) до температуры 1150–1200 °С; расплавление шихты путем повышения температуры 1600–1700 °С за счет обогащения дутья кислородом (до 27–28%); выдержку расплава до прекращения кипа и слив расплава и шлака. Весь процесс плавки дисперсных металлических отходов занимает в РНП не более 35–45 мин, при этом угар металла не превышает 1,5–2,5%. При необходимости в РНП может быть проведено и рафинирование расплава [5].

На рис. 1 показана структурная схема производственного процесса переплавки отсевов ферросилиция от этапа дробления и отсева кускового ферросилиция до получения готовой продукции.

Аналогичным образом может быть представлен и процесс рециклинга ферромарганца:

1. Набор и взвешивание исходных шихтовых материалов: отсевы ферромарганца, флюсы и восстановитель (в качестве восстановителя могут использоваться любые твердые углеродсодержащие материалы, в Беларуси наиболее доступным является коксик).

2. Загрузка исходных материалов в предварительно прогретую печь (~900–1000 °С) с помощью вибротолка. Загрузка осуществляется в печь, вращающуюся со скоростью ~1 об/мин.

3. Разогрев шихты. Разогрев ведется до температуры 1150–1200 °С при непрерывном вращении печи (1–2 об/мин) за счет сжигания природного газа с коэффициентом избытка воздуха (α), равным 0,85–0,90. Сжигание природного газа с недостатком воздуха и в присутствии коксика обеспечивает поддержание в печи восстановительной атмосферы ($CO > CO_2$).

4. Расплавление. После разогрева материала часть воздуха (~25%) замещается кислородом, температура в печи поднимается до 1600–1700 °С, и шихта расплавляется. Контроль температуры в печном пространстве осуществляется по показаниям термопары, встроенной в крышку печи, а расплава – при сливе с помощью пирометра.

5. Выдержка и слив расплава в изложницы. Перед сливом расплава вращение печи останавливается, крышка печи с горелочным устройством отводится в сторону и печь из рабочего положения – горловиной вверх под углом – (15–20)° наклоняется в положение горловиной вниз – +(20–25)°.

Значительно более сложным является процесс получения ферросплавов из силикатов, который включает стадию восстановления оксидов железа, кремния, марганца и других основных элементов. Физико-химические процессы восстановления, как и взаимодействия компонентов, шлаковая фаза,



Рис. 1. Структурная схема рециклинга отсевов ферросилиция

температурные режимы и другие факторы, характерные для рудовосстановительных процессов при выплавке ферросплавов в доменных и электродуговых печах, достаточно хорошо изучены. Основные положения этих технологий были использованы при разработке режимов плавки в РНП. Кроме того, были использованы данные восстановительных плавов, полученные при отработке технологии рециклинга оксидных и многокомпонентных железосодержащих отходов [1,5].

В отличие от базового варианта – рециклинга окалины, при переработке силикатов может быть сокращен этап твердофазного восстановления, так как минералы в отличие от окалины не имеют развитой пористой структуры, из-за чего данный процесс становится малоэффективным. Соответственно возрастают длительность жидкофазного периода восстановления, а также удельные энергозатраты.

В первом приближении температуру начала восстановления можно определить по эмпирическим формулам М. С. Хрущева и В. П. Елютина [2]:

$$T_{\text{нв}} = 2,2 \Delta G_{f298}^{\circ} - 85, \text{ К},$$

$$T_{\text{нв}} = 0,45 T_{\text{пл}} + 250, \text{ К},$$

где ΔG_{f298}° – энергия Гиббса, кДж/(моль O_2); $T_{\text{пл}}$ – температура плавления оксидов.

Исходя из этого, технологическая схема процесса может быть представлена следующим образом:

1. Набор и взвешивание исходных шихтовых материалов: силикаты, железная стружка, восстановитель, флюсы.

2. Загрузка исходных материалов в предварительно прогретую печь (~900–1000 °С) с помощью вибротолка или мульды. Загрузка осуществляется во вращающуюся печь (~1 об/мин).

3. Разогрев шихты. Разогрев ведется до температуры ~1200 °С при непрерывном вращении печи (1–2 об/мин). Сжигание природного газа ведется с недостатком воздуха ($\alpha=0,75-0,80$) и в присутствии коксика, что обеспечивает поддержание в печи восстановительной атмосферы ($\text{CO}/\text{CO}_2 > 2/1$).

4. Расплавление. После разогрева материала подается кислород таким образом, чтобы в дутье его количество составляло не менее 30% при $\alpha=1,05$. Температура в рабочем пространстве печи быстро поднимается до 1750–1850 °С (время разогрева составляет 15–20 мин), шихта расплавляется, и процесс переходит в жидкую фазу.

5. После расплавления (частично растворения) шихтовых материалов и разогрева ванны до температуры 1600–1700 °С происходит вспенивание шлака. Данная стадия свидетельствует об интенсивной газофикации восстановителя $\text{C}+\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$ и протекании восстановительных реакций.

Первым будет восстанавливаться оксид железа по реакции: $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2 + 2\text{CO}$.

Затем начинается восстановление диоксида кремния: $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow 2\text{Si} + 2\text{CO}$.

В качестве промежуточного процесса: $\text{SiO}_2 \rightarrow \text{SiO} \rightarrow \text{SiC} \rightarrow \text{Si}$.

Затем образование сплава: $\text{Fe} + \text{Si} \rightarrow \text{FeSi}$.

Железо, растворяя кремний, способствует разрушению карбида кремния.

6. Выдержка, при необходимости – введение кварцита для регулирования концентрации кремния, слив сплава и шлака. Перед сливом сплава вращение печи останавливается, тем самым уменьшается перемешивание, что способствует осаждению капель сплава из слоя шлака.

На рис. 2 представлена структурная схема предлагаемого процесса восстановления силикатов железа от образования и переработки сталеплавильного шлака до получения ферросплава и литой заготовки.

Исследования показали, что переход из диапазона 800–900 °С, характерного для большинства известных процессов твердофазного восстановления, в зону 1100–1200 °С увеличивает скорость восстановления дисперсных материалов более чем в 2 раза. Наилучшими восстанавливающими способностями в этом диапазоне температур обладает графит, затем по убывающей: кокс, антрацит, лигнин [1].

В ротационных наклоняющихся печах процесс нагрева сопровождается интенсивным перемешиванием слоя и переход в жидкую фазу осуществляется при высокой скорости нагрева (до 1–2 К/с), что препятствует спеканию и окомковыванию шихты.

Выводы

Предлагаемый процесс получения ферросплавов в ротационных наклоняющихся печах позволяет вести порционную переработку материалов и дает возможность осуществлять рентабельный децентрализованный, в том числе малотоннажный, рециклинг дисперсных отходов ферросплавов и переработку сталеплавильных шлаков непосредственно на предприятиях, где эти отходы образуются, таким образом повышая эффективность и экологичность литейного и металлургического производства.

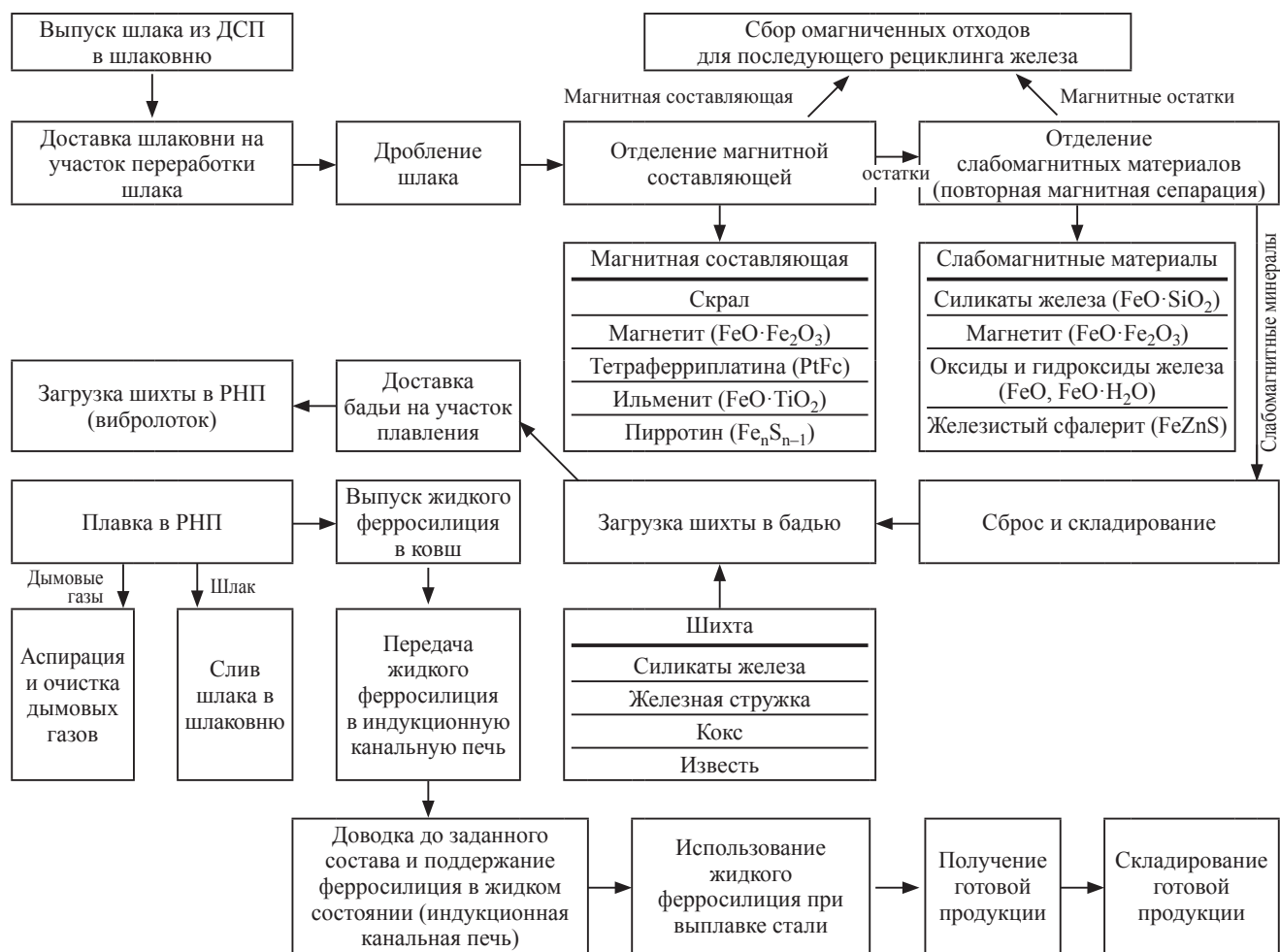


Рис. 2. Структурная схема восстановления силикатов

ЛИТЕРАТУРА

1. Ровин, С.Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С.Л. Ровин. Минск: БНТУ, 2015. 382 с
2. Мысик, В.Ф. Metallurgy ferrosplavov / В.Ф. Мысик, А.В. Жданов, В.Ф. Павлов. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2018. 536 с.
3. Шкирмонтов А.П. Выплавка ферросилиция с позиции энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // Черная металлургия. Бюл. науч.-техн. и эконом. информации. 2018. № 8. С. 43–49.
4. Ярошенко, Ю.Г. Основные направления энерго- и ресурсосбережения в технологиях производства ферросплавов / Ю.Г. Ярошенко, В.И. Жучков // Бакунинские чтения: материалы XII Всерос. науч. конф., посвящ. 90-летию Заслуж. деятеля науки России, д-ра ист. наук, проф. А.В. Бакунина. Екатеринбург, 4–5 декабря 2014 г. Т. 1. Екатеринбург: Ин-т истории и археологии, УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2014. С. 624–633.
5. Rovin, S.L. Recycling of metalwastes in rotary furnaces / S.L. Rovin, A.S. Kalinichenko, L.E. Rovin // Journal of Casting & Materials Engineering (JCME). 2019. Vol 3. No. 2. P. 43–49.

REFERENCES

1. Rovin S.L. *Recikling metalloothodov v rotacionnyh pechah* [Recycling of metal waste in rotary furnaces]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
2. Mysik V.F., Zhdanov A.V., Pavlov V.F. *Metallurgiya ferrosplavov* [Metallurgy of ferroalloys]. Ekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo un-ta Publ, 2018, 536 p.
3. Shkirmontov A.P. *Vyplavka ferrosiliciya s pozicii energotekhnologicheskogo kriteriya raboty ferrosplavnoj elektropechi* [Ferrosilicon smelting from the position of energy technology criteria for the operation of a ferroalloy electric furnace]. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8, pp. 43–49.
4. Yaroshenko Yu.G., Zhuchkov V.I. *Osnovnye napravleniya energo- i resursosberezheniya v tekhnologiyah proizvodstva ferrosplavov* [The main directions of energy and resource conservation in technologies for the production of ferroalloys]. *Bakuninskie chteniya: materialy XII Vseros. nauch. konf., posvyashch. 90-letiyu Zasluzh. deyatelya nauki Rossii, d-ra ist. nauk, prof. A. V. Bakunina*, Ekaterinburg, 4–5 dekabrya 2014 g., 2014, vol. 1, pp. 624–633.
5. Rovin S.L., Kalinichenko A.S., Rovin L.E. Recycling of metalwastes in rotary furnaces. *Journal of Casting & Materials Engineering (JCME)*, 2019, vol. 3, no. 2, pp. 43–49.