



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-9-13>
УДК 621.745

Поступила 11.02.2020
Received 11.02.2020

ПРИМЕНЕНИЕ РОТАЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ПЛАВКИ ЧЕРНЫХ СПЛАВОВ

С. Л. РОВИН, 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: kaf_metallurgy@gstu.by,
И. С. НАСЕВИЧ, УП «Технолит», г. Минск, Беларусь, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: technolit@tut.by

В статье представлен опыт применения ротационных наклоняющихся печей (РНП) для плавки черных сплавов, а также для рециклинга дисперсных железосодержащих отходов (стружки, окалины, шламов) с получением марочных литейных сплавов непосредственно в РНП или при реализации дуплекс-процесса РНП-индукционная или РНП-дуговая печь. Приведены основные технические характеристики РНП, созданных белорусскими учеными и конструкторами. Обозначены наиболее перспективные области применения РНП. Выполнен ориентировочный расчет экономического эффекта, связанного с применением РНП при производстве стальных и чугуновых отливок.

Ключевые слова. Рециклинг, дисперсные металлоотходы, чугун, сталь, ротационные наклоняющиеся печи.
Для цитирования. Ровин, С. Л. Применение ротационных печей для плавки черных сплавов / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, И. С. Насевич // *Литье и металлургия*. 2020. № 1. С. 9–13. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-9-13>.

APPLICATION OF ROTARY FURNACES FOR MELTING FERROUS ALLOYS

S. L. ROVIN, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosty ave.
E-mail: rovinsl@mail.ru,
L. E. ROVIN, Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoj, Gomel, Belarus, 48, Ocyabrya ave.
E-mail: kaf_metallurgy@gstu.by,
I. S. NASEVICH, Technolit Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: technolit@tut.by

The article presents the experience of using rotary tilting furnaces (RTF) for melting ferrous alloys, as well as for recycling of dispersed iron-containing wastes (chips, dross, sludge) to obtain high – quality casting alloys directly in the RTF or when implementing the duplex process: RTF-induction furnace or RTF-arc furnace. The main technical characteristics of RTF that developed by Belarusian scientists and designers are described. The most promising areas of application of RTF were shown. An approximate calculation of the economic effect associated with the use of RTF in the production of steel and cast iron castings is performed.

Keyword. Recycling, dispersed metal wastes, cast iron, steel, rotary tilting furnaces.
For citation. Rovin S. L., Rovin L. E., Nasevich I. S. Application of rotary furnaces for melting ferrous alloys. *Foundry production and metallurgy*, 2020, no. 1, pp. 9–13. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-1-9-13>.

Ротационные (вращающиеся) или барабанные печи широко применяются для тепловой обработки дисперсных (в том числе полидисперсных) материалов в различных областях промышленности: металлургии, машиностроении, производстве стройматериалов, химической промышленности и т. д. В основном их использование ограничивается нагревом (сушка, обжиг, прокаливание и т. п.), где их эффективность в 3–5 раз выше, чем у печей других типов, например, камерных. Прогрев слоя материалов во вращающихся печах происходит, в первую очередь, за счет конвекции (постоянного перемешивания) самого материала, что на несколько порядков эффективнее передачи тепла за счет теплопроводности неподвижного слоя в камерных печах: как известно, теплопроводность слоя дискретного материала существенно ниже его собственной теплопроводности [1].

Однако использовать это преимущество в интенсивности процесса передачи тепла в слое возможно лишь при эффективной теплопередаче от газов-теплоносителей – продуктов сжигания топлива к нагре-

ваемому материалу. Этот процесс осуществляется конвекцией и излучением от потока газов, проходящих над слоем материала вдоль оси печи (для обычных вращающихся печей с прямоточным движением газового потока). Соответственно скорость газов должна быть достаточно высокой, обеспечивающей турбулентный режим (обычно не менее 10 м/с), но при этом сокращается время пребывания газов в печи и их взаимодействия с материалом. Это противоречие в нагревательных и обжиговых печах снимается путем увеличения длины агрегатов вплоть до 150–200 м. Однако такое наращивание габаритов и мощности печей сужает спектр их применения. Понятно, что подобные печи использовать для плавки сплавов нельзя: невозможно на такой длине обеспечить равные условия нагрева, расплавления и обработки жидкого металла.

Для плавки применяются так называемые короткобарабанные печи, длина которых не превышает 2–3 диаметров (обычно это длины в диапазоне от 1,0–1,5 до 5–6 м). КПД таких печей находится в пределах 10–20% именно из-за невозможности осуществить за краткий период пребывания теплоносителей в рабочем пространстве (0,1–0,5 с) эффективную передачу тепла нагреваемому материалу. Некоторое увеличение количества передаваемого тепла происходит за счет излучения и путем теплопроводности от стен печи, но доля этого тепла составляет не более 15% получаемого от газового потока. Преимущества вращающихся печей, таким образом, нивелируются и их применение обычно ограничивается цветными сплавами.

Преодолеть этот недостаток традиционных короткобарабанных печей позволили ротационные наклоняющиеся печи (РНП), появившиеся в конце XX в. Благодаря организации винтового петлеобразного движения газов в рабочем пространстве эти печи обеспечили значительное повышение термического КПД и позволили практически снять ограничения по скорости газов в рабочем пространстве: эффективность плавильных печей, работающих на дисперсной шихте, впервые достигла уровня современных вагранок и электропечей, работающих на кусковой шихте.

Помимо повышения КПД в 2–3 раза по сравнению с традиционными короткобарабанными печами, РНП благодаря возможности поворота (наклона) корпуса вокруг горизонтальной оси позволили значительно снизить трудоемкость и продолжительность операций загрузки шихты и слива расплава и соответственно сократить время полного цикла плавки [2, 3].

Совершенствование РНП, оснащение их газокислородными горелками, применение дутья, обогащенного кислородом, открыли возможность использования вращающихся печей и для плавки черных сплавов. РНП, разработанные для плавки чугуна, как альтернатива вагранкам и индукционным печам, сегодня уже применяются в Италии, Чехии, Германии, США и других странах [4].

Исследованиями и разработкой высокотемпературных РНП нового поколения успешно занимаются и белорусские ученые – сотрудники УП «Технолит», БНТУ и ГГТУ им. П. О. Сухого. Именно Беларуси принадлежит приоритет разработки концепции применения РНП для рециклинга дисперсных железосодержащих отходов (стружки, металлической пыли, окалины, шламов металлообработки и др.) без их предварительной подготовки и компактирования (брикетирования, окатывания, агломерации и т. п.) и технологии прямого получения железа в результате непрерывного интенсивного твердо-жидкофазного процесса восстановления оксидов с получением железоуглеродистого сплава, реализуемой в одном агрегате – ротационной наклоняющейся печи [5].

Новый способ малотоннажного рециклинга дисперсных металлоотходов на базе РНП практически решает проблему переработки отходов даже в странах, не имеющих полнопрофильного металлургического производства. Он позволяет рентабельно перерабатывать отходы чугуна и стали непосредственно на тех предприятиях, где они образуются, тем самым открывая возможность организации экологического безотходного (замкнутого) производства без дорогостоящей системы централизованного сбора и переработки металлоотходов.

Гамма ротационных наклоняющихся печей, разработанных белорусскими специалистами, сегодня включает установки различного назначения полезной емкостью от 0,3 до 4,0 м³ (см. рисунок) и производительностью от 0,5 до 8 т жидкого металла в 1 ч (при переработке чугунной стружки). Новые конструкции печей, оригинальные технические и технологические решения защищены 8 патентами, в том числе патентом Евразийского патентного ведомства № 033560 от 31.10.2019 г. [6].

Использование газокислородных горелок и/или обогащение дутья кислородом является не только необходимым условием при переплавке или проведении восстановительной плавки железосодержащих отходов, обеспечивая быстрый подъем температуры и требуемый температурный напор при переходе к жидкофазной стадии процесса, но позволяет использовать комбинированное топливо – газ и твердое



a



б



в



г



д



e

Белорусские ротационные наклоняющиеся печи различной емкости и назначения: *a* – РНП-2,0 для рециклинга стружки на ОАО «ГЛЗ «Центролит» (г. Гомель); *б* – РНП-9,0 для рециклинга аккумуляторного шлама в ЗАО «КПВР СПЛАВ» (г. Рязань, РФ); *в* – РНП-0,5 для рециклинга окалины на ОАО «БМЗ» (г. Жлобин); *г* – опытно-экспериментальный образец РНП для рециклинга металлургического шлама в ООО «Экопром» (г. Лысьва, Пермский край, РФ); *д* – РНП-3,0 для рециклинга свинца в ООО «Авангард-Юнион» (Владимирская обл., РФ); *e* – РНП-1,4 для рециклинга алюминиевых отходов в ООО «БелТОР 7» (г. Мозырь)

топливо: уголь, антрацит, отсев кокса, отходы графита, отходы гидролизного производства – лигнин и т. п. Обогащение дутья кислородом до 26–28%, как показывает опыт, позволяет осуществить плавку чугуна из неподготовленной (влажной, замасленной) стружки россыпью примерно за 30–35 мин с расходом 80–90 м³ природного газа и 10–15 м³ кислорода на 1 т расплава. Для исключения окисления стружки на стадии разогрева используется режим работы горелки с коэффициентом избытка воздуха ниже единицы – $\alpha \leq 0,8-0,9$. Если используется окисленная стружка, дополнительно применяется восстановитель (углеродсодержащие отходы) в количестве до 80–100 кг на 1 т.

Наиболее эффективным вариантом применения РНП при переработке дисперсных отходов с задачей получения марочных литейных сплавов в условиях действующего литейного производства является использование дуплекс-процесса, например, применение дуплекса РНП – индукционная печь при плавке чугуна. В этом случае в РНП производится переплавка или восстановительная плавка отходов, а доводка сплава до заданного состава осуществляется в традиционной индукционной тигельной или канальной печи.

При отсутствии на предприятии кислорода РНП также могут значительно облегчить задачу переработки дисперсных металлических отходов, подготовив их к плавке в традиционных печах. Технологический процесс в этом случае может быть организован следующим образом: в РНП осуществляются удаление влаги, выжигание масел и высокотемпературный безокислительный нагрев дисперсной шихты (стружки, мелкого скрапа, отходов дробы и т. п.) до 750–850 °С, а затем горячая шихта перегружается на «болото» в ИЧТ, где проводится расплавление и доводка сплава до заданного состава. Такой процесс при использовании чугунной стружки был, в частности, внедрен на ОАО «ГЛЗ «Центролит», что позволило довести содержание стружки в металлозавалке до 25–30% при сохранении всех технико-экономических показателей плавки на уровне работы индукционной печи с традиционной кусковой шихтой. При этом затраты природного газа на высокотемпературный нагрев стружки в РНП не превышали 10–12 м³ на 1 т, а темп нагрева 2 т стружки составил 15–20 мин. Согласно заключению энергоаудита, КПД ротационной наклоняющейся печи при высокотемпературном нагреве стружки составил 49–51%.

Современные РНП позволяют активно управлять основными параметрами плавки. Это относится и к окислительно-восстановительному составу атмосферы в рабочем пространстве печей. За счет изменения коэффициента избытка воздуха, подаваемого на горелку (от 1,1 до 0,6) и/или количества восстановителя (твердых углеродосодержащих материалов), загружаемого в печь, соотношение CO/CO_2 или точнее $\text{CO}+\text{H}_2/\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ регулируется от 40/60 до 70/30. Создание восстановительной атмосферы позволяет провести не только высокотемпературный нагрев металлической шихты, снимая ограничения по температуре из-за окисления, но и осуществить восстановление оксидов железа.

Апробация непрерывного твердо-жидкофазного процесса рециклинга, проведенная на опытно-промышленном образце ротационной наклоняющейся печи с использованием прокатной окалины и металлургического шлама, образующихся на ОАО «БМЗ», показала, что разработанная технология позволяет получить близкую к теоретически возможной степень восстановления – более 90% от общего содержания железа в исходном сырье ($\text{Fe}_{\text{общ}}$). Причем при желании в результате рециклинга в РНП можно получать как низкоуглеродистую сталь (<0,1% C), так и чугун с содержанием углерода >3,5%. Весь процесс твердо-жидкофазного рециклинга окалины в РНП занимает около 2,5–3,0 ч, что значительно меньше, чем в известных агрегатах прямого восстановления железа [5]. Важнейшим преимуществом РНП является также возможность перерабатывать сырье без предварительной подготовки: сушки, очистки, гомогенизации, окомкования или брикетирования, науглероживания и т. д.

На сегодняшний день разработаны и зарегистрированы технологические процессы получения в РНП железистых сплавов из окалины и железосодержащих шламов, металлической пыли и отходов производства дроби, а также чугуна и стальной стружки.

В качестве ограничения области использования разработанных технологий можно считать лишь нежелательность применения ультрадисперсного сырья (например, некоторых видов аспирационной пыли) и восстановителя с размером частиц менее 10 мкм, так как это может привести к большим потерям на пылеунос. При рециклинге такого рода отходов в РНП наиболее рациональное решение – предварительное смешивание железосодержащего сырья с восстановителем и грануляция. Оптимальным диапазоном размеров для сырья можно считать пределы от 0,05–1,5 до 20–30 мм, для восстановителя – 1–15 мм, для флюсов – от 10 до 50 мм. Экономически нецелесообразным является также пирометаллургический рециклинг в РНП металлоотходов с общим содержанием железа менее 40–50% (шлаки, аспирационные пыли и т. п.). Для таких отходов необходимо проведение предварительного обогащения путем омагничивания, классификации и т. д.

Разработанная технология малотоннажного рециклинга в ротационных наклоняющихся печах позволяет из разнородных дисперсных железосодержащих отходов, в том числе оксидных и многокомпонентных, получать жидкий металл, высококачественные шихтовые материалы – стальную и чугунную чушку, или путем дополнительной доводки – марочные литейные железистые сплавы.

Так, при проведении серии экспериментальных плавов на среднечастотной индукционной тигельной печи ИСТ-0,06 с получением серого чугуна марок СЧ20, СЧ25 с частичной и полной заменой традиционных компонентов металлошихты: чугуна и стального лома, передельного и литейного чугуна материалами, полученными в РНП, были подтверждены высокая эффективность процесса и качество сплавов. Исследования показали, что чугун экспериментальных плавов полностью соответствует требованиям ГОСТ по химическому составу и физико-механическим свойствам и обладает высокими литейными свойствами, не уступая металлу контрольных плавов, выполненных с применением традиционных шихтовых материалов. Отливки опытной партии имели плотную однородную структуру, соответствовали требованиям конструкторской и технической документации и ГОСТ 1215-85, не уступая отливкам из контрольной партии, и даже превосходя их по прочности, что возможно связано с меньшим содержанием фосфора и отсутствием в их структуре фосфидной эвтектики [7].

Расчеты, выполненные с учетом действующих тарифов Министерства энергетики Республики Беларусь на энергоносители и рыночных цен на исходные материалы, показывают, что себестоимость шихтовых материалов (чугунных и стальных слитков), полученных из оксидных железосодержащих отходов в РНП, составляет не более 240–260 руб./т (около 110–120 долларов США), из стружки – 250–280 руб./т (около 120–130 долларов США), что соответственно на 20–30% ниже цен кускового стального (марок 1А, 2А, 4А) и чугуна (марок 17А, 18 А) лома и в 2–3 раза ниже цен на первичные шихтовые материалы (доменные чугуны). Таким образом, замена традиционных шихтовых материалов на металл, полученный в РНП, позволяет не только утилизировать металлоотходы, но и снизить себестоимость получаемых отливок.

Следующим шагом экономии ресурсов и снижения себестоимости литья может стать реализация дуплекс-процесса «РНП-индукционная печь» с использованием жидкой завалки, которая позволяет пропорционально увеличить производительность электроплавки, сократить угар компонентов и значительно снизить удельные затраты электроэнергии. Замена чугунного и стального лома, которые составляют при традиционной плавке в индукционных печах около 50% шихты, на жидкую завалку металлом, полученным в РНП, позволит на 40–45% сократить удельные затраты электроэнергии на получение 1 т чугуна с 620–680 кВт·ч/т при плавке на среднечастотных печах (средний показатель по литейным цехам Беларуси) до 380–420 кВт·ч/т и соответственно на 85–95 руб. (около 40–45 дол. США) снизить себестоимость 1 т чугуна. Учитывая, что средний выход годного при производстве чугунных отливок находится в пределах 65–70%, снижение себестоимости годных отливок составит около 125–135 руб./т (около 57–62 долларов США). Аналогичный и даже больший эффект может быть получен при использовании дуплекс-процесса для производства стальных отливок, учитывая, что выход годного при производстве стального литья машиностроительного назначения не превышает, как правило, 52–57%. В качестве агрегата для доводки расплава до требуемого состава при этом могут использоваться как обычные дуговые или индукционные печи, так и установки печь-ковш. Дополнительный, не менее значимый эффект, дает снижение экологического сбора и сокращение затрат на захоронение металлоотходов.

Решение проблемы накопления и переработки дисперсных отходов черных и цветных металлов благодаря использованию предлагаемой малотоннажной технологии рециклинга в РНП открывает возможность создания собственной сырьевой базы для литейного производства, позволяет значительно сократить импорт дорогостоящих шихтовых материалов и металлов, организовать безотходную систему металлооборота, улучшить экологическую обстановку, снизить себестоимость продукции и повысить конкурентоспособность отечественных машиностроительных и металлообрабатывающих предприятий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисиенко В. Г. Вращающиеся печи: теплотехника, управление и экология: справ. изд. в 2-х кн. / В. Г. Лисиенко, Я. М. Щелоков, М. Г. Ладыгичев. М.: Теплотехник, 2004. 592 с.
2. Новичков С. Б. Теория и практика переработки отходов алюминия в роторных наклонных печах: дис. ... д-ра техн. наук. Иркутск, 2008. 348 с.
3. Шмитц К. Технологии плавления материалов с большой удельной поверхностью / К. Шмитц // Цветные металлы. 2006. № 9. С. 109–113.
4. Sogemi Engineering S. r. l. Rotary Oxy-Combustion Melting Furnaces for Cast Iron // Web Site – Mode of access: <http://www.sogemieng.it>. 2013.
5. Ровин С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах / С. Л. Ровин. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
6. Способ малотоннажного рециклинга дисперсных железосодержащих отходов без их предварительной подготовки путем твердо-жидкофазного восстановления в ротационной наклоняющейся печи с получением чугуна или стали: Евразийский патент № 033560 / С. Л. Ровин, А. С. Калиниченко, Л. Е. Ровин. заявка № 201700350 от 23.06.2017. Оpubл. в бюлл. «Изобретения (евразийские заявки и патенты)» № 10/2019. Выдан 31.10.2019.
7. Ровин С. Л. Создание собственной сырьевой базы для литейного производства машиностроительных предприятий / С. Л. Ровин, Л. Е. Ровин, А. С. Калиниченко, Л. П. Долгий, В. А. Шейнерт // Литье и металлургия. 2018. № 2. С. 29–36.

REFERENCES

1. Lisienko V. G., Shhelokov Ja. M., Ladygichev M. G. *Vrashhajushhiesja pechi: teplotehnika, upravlenie i jekologija* [Rotary kilns: heating technology, management and ecology]. Moscow, Teplotehnik Publ., 2004, 592 p.
2. Novichkov S. B. *Teorija i praktika pererabotki othodov aljuminija v rotornyh naklonnyh pechah. Diss. dokt. tehn. nauk* [Theory and practice of processing aluminum waste in rotary inclined furnaces. Dr. tech. sci. diss.]. Irkutsk, 2008, 348 p.
3. Shmits K. *Tehnologii plavlenija materialov s bol'shoj udel'noj poverhnost'ju* [Technology of melting materials with a large specific surface]. *Cvetnye metally = Non-ferrous metals*, 2006, no. 9, pp. 109–113.
4. Sogemi Engineering S. r. l. Rotary Oxy-Combustion Melting Furnaces for Cast Iron // Web Site Mode of access: <http://www.sogemieng.it>. 2013.
5. Rovin S. L. *Recikling metalloothodov v rotacionnyh pechah* [Waste recycling in rotary kilns]. Minsk, BNTU Publ., 2015, 382 p.
6. Rovin S. L. *Sposob malotonnazhnogo reciklinga dispersnyh zhelezosoderzhashhih othodov bez ih predvaritel'noj podgotovki putem tvrdo-zhidkofaznogo vosstanovlenija v rotacionnoj naklonjajushhejsja pechi s polucheniem chuguna ili stali* [The method of small-tonnage recycling of dispersed iron-containing wastes without their preliminary preparation by solid-liquid phase reduction in a rotary tilting furnace to produce cast iron or steel]. *Evrazijski patent, no. 033560*, 2019.
7. Rovin S. L., Rovin L. E., Kalinichenko A. S., Dolgij L. P., Shejner V. A. *Sozdanie sobstvennoj syr'evoj bazy dlja litejnogo proizvodstva mashinostroitel'nyh predpriyatij* [Creation of own raw-material base for foundry production on machine-building enterprises]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 2, pp. 29–36.