



МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ  
КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО  
И МЕТАЛЛУРГИЯ 2017.  
БЕЛАРУСЬ»



УДК 621.745

Поступила 14.09.2017

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РОТАЦИОННЫХ ПЕЧЕЙ. РЕЦИКЛИНГ МЕТАЛЛООТХОДОВ

## OUTLOOKS FOR APPLICATION OF ROTARY FURNACES. METAL WASTE RECYCLING

С. Л. РОВИН, УП «ТЕХНОЛИТ», Беларусь, г. Минск, ул. Я. Коласа, 24. E-mail: [technolit@tut.by](mailto:technolit@tut.by)

S. L. ROVIN, Technolit Co, Minsk, Belarus, 24, Kolasa str. E-mail: [technolit@tut.by](mailto:technolit@tut.by)

*Доклад посвящен проблеме утилизации дисперсных железосодержащих отходов, образующихся на машиностроительных и металлургических предприятиях. Рассматриваются возможности и перспективы малотоннажного рециклинга металлоотходов в ротационных наклоняющихся печах (РНП). Представлены результаты внедрения разработанных технических решений на предприятиях Беларуси и Российской Федерации.*

*The report focuses on the problem of disposal of dispersed iron-bearing wastes generated at the machine-building and metallurgical enterprises. Discusses the possibilities and prospects of low-tonnage recycling of metal wastes into the rotary tilting furnaces (RTF). The report presents the results of the implementation of the developed technical solutions on enterprises of Belarus and the Russian Federation.*

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

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

В условиях возрастающего дефицита на качественные шихтовые материалы и постоянного увеличения их стоимости особую значимость представляет рециклинг дисперсных железосодержащих отходов (стружки, окалины, аспирационной пыли, шламов и т. п.), накопление которых в отвалах уже достигает величин, соизмеримых с добычей руды.

Задача рециклинга металлоотходов – приведение их в состояние, позволяющее заменить первичные шихтовые материалы (чушку) или непосредственное использование при производстве марочных сплавов вместо плотной (кусковой) шихты. Эта проблема особенно актуальна для Республики Беларусь, металлургическое и литейное производство которой практически полностью зависит от импортируемых шихтовых материалов, а рост их цен неизбежно приводит к росту себестоимости конечной продукции.

По ориентировочным оценкам, вновь образующиеся металлоотходы в Беларуси составляют 450–550 тыс. т в год. Из них почти 70% приходится на оксидные железосодержащие отходы: стальную и чугунную стружку (около 220–240 тыс. т), окалину (40–50 тыс. т), шламы металлообработки (до 40 тыс. т) и т. д. Переработка наиболее ценной металлической части этих отходов – стружки и мелкого скрапа, проволочной обрезки и т. п. не достигает 50% от их образования [1]. Что же касается оксидных и многокомпонентных металлоотходов, то их использование не только в Беларуси, но и в других странах постсоветского пространства не превышает 15–20%, все остальное остается в отвалах предприятий, дополнительно создавая серьезную экологическую проблему.

Традиционное оборудование, которым располагают сегодня литейные цеха и металлургические мини-заводы, предназначены для переплавки плотной кусковой шихты, что не позволяет перерабатывать дисперсные материалы. В то же время многие из этих отходов по содержанию железа не уступают и даже превосходят железорудные концентраты (табл. 1).

Специфика металлоотходов как шихтового материала заключается в большом различии по химическому и фракционному составу небольших по объему партий (порядка сотен или тысяч тонн), образующихся на сотнях предприятий. Использование технологий, разработанных в металлургии, для переработки подобных материалов невозможно без создания мощной развитой системы их сбора, накопления

Т а б л и ц а 1. Химический состав железосодержащих отходов машиностроительных предприятий

Наименование отходов (предприятие-источник)	Содержание компонентов, %											
	Fe <sub>мет</sub>	Fe <sub>общ</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> расч	C	Mn	Cr	Ni	Cu	S	Si	P
Стружка углеродная (ст. МАЗ)	95,2	97	1,0	1,5	0,42	0,6	0,25	0,2	0,15	0,03	0,3	0,03
Стружка чугунная (МЗОО)	81	87	4,2	3,6	3,4	0,8	0,08	0,08	0,03	0,12	1,8	0,17
Пыль распиловки заготовок (ММЗ, г. Могилев)	76,4	84,1	3,0	9,0	0,93	0,61	0,08	0,06	0,18	0,5	0,3	0,01
Пыль аспирационная механической обработки (МТЗ)*	13,0	59,0	30,6	31,8	0,6	0,65	0,25	0,15	0,12	0,05	0,5	0,03
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 (МАЗ)**	0,4	24,9	13,7	20	1,7	2,4	0,8	0,2	0,1	0,35	0,28	0,02
Аспирационная пыль вагранок (МАЗ)**	–	18,5	16,5	8,1	36,3	0,55	0,2	–	–	2,4	16,2	0,04
Прокатная окалина (БМЗ)	2,3	73	61	34,3	0,15	0,43	0,05	0,08	0,15	0,02	0,13	0,010
Окалина кузнечного цеха (МПЗ)	0,4	70,15	54,6	39	0,35	0,7	1,55	0,2	0,45	0,02	0,61	0,02
Пыль аспирационная дробеструйной установки (МТЗ)	36	80,6	38,0	22,0	0,42	0,89	0,14	0,07	0,20	0,02	0,52	0,01
Рудный концентрат	1,5	71,5	61,1	32,2								

\* В пыли аспирационной и шламах металлообработки содержится до 15–30% абразива, в котором до 90–92% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в шламах СИИТО содержатся V, W, Mo и др. легируемые элементы до 8–10% суммарно.

\*\* В состав пыли аспирационной плавильных печей входят также SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, ZnO.

и подготовки к последующей переплавке, включая гомогенизацию (обеспечение однородности по размерам и химсоставу) и брикетирование. Создание же такой системы делает рециклинг дисперсных металлоотходов нерентабельным.

При этом следует отметить, что если металлостружечные брикеты хотя и не достигают качества плотного кускового лома и тем более первичных шихтовых материалов, но используются при плавке литейных сплавов в вагранках, дуговых и индукционных печах, пусть и в ограниченном количестве (до 10–15% от металлозавалки), то все попытки создания брикетов из оксидных дисперсных материалов в виде комплексных композиций (смесей) с восстановителями, связующими и флюсующими добавками, не увенчались успехом, так как в традиционных плавильных печах литейных цехов нет условий для восстановления оксидных шихтовых материалов подобного рода.

При отказе от окомкования необходима разработка новых процессов, своего рода «нанотехнологий», реализующих переход к обработке множества отдельных элементов (частиц): пластинок (чешуек) окалины и стружки, сферических частиц аспирационной пыли и т. д.

Перспективу комплексного решения этих проблем открывает применение ротационных наклоняющихся печей (РНП) с петлеобразным движением газов. Появившись в 90-х годах прошлого столетия, эти печи благодаря существенным технологическим преимуществам уже нашли широкое применение в процессах термообработки и плавки цветных сплавов.

Вместе с тем, использование РНП для плавки и в особенности для рециклинга отходов черных сплавов требует проведения масштабных исследований процессов тепломассообмена и движения газов и дисперсных материалов с учетом специфических свойств железосодержащих отходов и значительно более высоких температур при их восстановлении и расплавлении.

Такие комплексные исследования с использованием натуральных экспериментов, имитационного физического и компьютерного моделирования были выполнены совместно в УП «Технолит», БНТУ и ГГТУ им. П. О. Сухого [2].

Для анализа и математического описания движения газов использовали систему уравнений Навье-Стокса для реальных неизотермических потоков, уравнения неразрывности, сохранения энергии и состояния. Передача тепла нагреваемому материалу в печах подобного типа осуществляется в основном конвекцией и, следовательно, описывается уравнением Ньютона, решаемым в критериальном виде. Кроме того, особенно в зоне температур выше 1300К, учитывалась передача тепла излучением от газов к футеровке и слою материалов, а также от нагретой футеровки к материалу. Изменения температуры в газовом потоке описывали с помощью уравнения Фурье-Кирхгофа.

Для моделирования аэродинамических и тепловых процессов, протекающих в печах в условиях высоких градиентов температур и скоростей, были применены прикладные программные пакеты (ППП) ANSYS CFX (ANSYS, Inc.) и Solid Works Flow Simulation (SolidWorks Co.). Компьютерное моделирова-



Рис. 1. Общий вид РНП и результаты 3D-моделирования движения газов в печи

ние с помощью этих универсальных программных комплексов позволило получить представление о траектории и распределении скоростей и температур неізотермического газового потока в печи с учетом ее вращения, геометрии и расположения слоя, а также характеристик дисперсных материалов (рис. 1).

Уже первые расчеты показали, что характер движения газов в печах РНП значительно отличается от традиционных представлений, базирующихся в основном на упрощенных моделях. Течение газов в РНП носит сложный циркуляционный вихревой характер и определение «петлеобразное» движение далеко не исчерпывает его особенностей. Газовый поток в рабочем пространстве печи совершает вращение со скоростью, превышающей его поступательную скорость в 5–6 раз (до 30 м/с) и зависящей от входной скорости, температуры и начального направления (вектора) факела продуктов сжигания топлива. Естественно формирование потока зависит и от скорости вращения печи, и от конфигурации динамического слоя материала.

Циркуляция газов происходит в вертикальной и горизонтальной плоскостях, причем при определенных режимах может происходить смена направления вращения. Высокая скорость вращения газового потока повышает эффективность теплообмена ( $\alpha_v \sim v_r^{0,65}$ ) и уменьшает унос высокодисперсных фракций материала (благодаря возникновению циклонного эффекта). В процессе моделирования было отмечено, что аэродинамика потока очень чувствительна к исходным параметрам и режимам работы горелки и конструкции входной зоны печи, включая расположение горелок, их количество и угол атаки (направление оси факела по отношению к поверхности материала).

Управление расходом топлива и углом атаки позволяет без конструктивных изменений непосредственно в процессе плавки изменять интенсивность тепло- и массообменных процессов, тем самым, обеспечивая гибкость технологии рециклинга.

До последнего времени внимание специалистов, работающих с вращающимися печами, в большей степени было направлено исключительно на изучение движения газовых потоков. При этом движение самих материалов в печи практически не исследовалось. Одна из причин этого – объективные трудности проведения натуральных экспериментов и даже наблюдений в высокотемпературном рабочем пространстве вращающихся печей, например, установка датчиков во вращающемся динамическом слое дисперсного материала.

Вместе с тем очевидно, что эффективность тепловой обработки и процессов восстановления определяется не только и даже не столько интенсивностью тепломассообменных процессов между газом-теплоносителем и слоем материала, сколько эффективностью усвоения, т. е. «закачки» (переноса) тепла и восстановителей внутрь слоя.

Тепломассообмен в слое происходит в первую очередь за счет перемешивания, своеобразной конвекции, но уже не газов, продувающих поток, что характерно для верхней, относительно тонкой части слоя, а непосредственно самого материала, т. е. характером движения и смешивания. Неподвижный слой дисперсного материала при его высокой порозности является практически теплоизоляцией с теплопроводностью, близкой к теплопроводности воздуха ( $\lambda_{сл} \sim 0,4$  Вт/(м·К)).

С целью исследования особенностей движения дисперсных материалов в условиях РНП была разработана методика и проведено имитационное моделирование. Модель выполняли на основе принципов гидродинамического подобия ( $Re_{мод} \approx Re_{РНП}$ ) с учетом масштабного фактора, в частности, соотношения размеров модели и частиц материала [2, 3].

Было установлено, что скорость «вращения» материала в ротационных печах значительно выше, чем скорость вращения корпуса печи. Это превышение зависит от относительного объема загрузки и вели-

чины сегмента, занимаемого материалом. При коэффициенте загрузки печи  $v_{\text{мат}}/v_{\text{печ}} \approx 0,3$ , что чаще всего используется, скорость вращения материала примерно втрое превышает скорость вращения печи.

Материал в РНП в отличие от печей с горизонтальной осью вращения перемещается не только в сечении, перпендикулярном оси вращения печи, но и в продольном направлении, совершая характерное винтовое возвратно-поступательное движение, обеспечивающее активное перемешивание и усреднение температуры и состава по всему сечению слоя как в радиальном, так и в осевом направлении.

Для определения количественных характеристик движения дисперсных материалов в РНП было проведено компьютерное моделирование с использованием ППП CD-Adapco Star CCM+ и метода DEM (конечных элементов).

В результате впервые были получены не только принципиальные представления о характере движения дисперсных материалов в ротационных печах с наклонной осью вращения и структуре слоя по всей длине печи, но и значения скоростей отдельных частиц, частей слоя, их траектории, а также характеристики процесса смешивания (конвекции) во взаимосвязи с параметрами работы и конструкции печи [3].

Постоянное обновление (перемешивание) слоя и его интенсивная продувка турбулентным и газовым потоком многократно ускоряют процессы массопереноса и теплообмена: в РНП объемный коэффициент теплопередачи ( $\alpha_v$ ) достигает 2000–3000 Вт/(м<sup>3</sup>·К), что почти на три порядка выше, чем в неподвижном слое материала в стационарных печах, где  $\alpha_v = 3–5$  Вт/(м<sup>3</sup>·К).

Можно отметить, что результаты исследования процессов движения и смешивания дисперсных материалов в РНП имеют более широкое применение и могут использоваться для смесителей различного назначения, окрасочных камер, установок плакирования и других агрегатов вращающегося типа.

Полученные результаты позволили приступить к реализации и практической проверке технических решений, направленных на создание как самих РНП, так и технологий рециклинга на их основе.

Одним из первых проектов была ротационная установка «С-03», внедренная на производственном участке ООО «Эрни» и предназначенная для сушки свинцового шлама. Оригинальная конструкция позволила в 2 раза интенсифицировать процесс сушки и в 1,5–2,0 раза снизить потери высокодисперсных частиц, имеющие место при использовании традиционных барабанных установок.

В 2006 г. была разработана и установлена в литейном цехе ООО «Авангард-Юнион» (п. Камешково, Владимирская обл., РФ) первая отечественная ротационная наклоняющаяся печь «РНП-3,0», которая предназначалась для восстановительной плавки черного свинца из оксидно-сульфатного шлама аккумуляторных батарей (рис. 2). Апробация установки показала, что по основным техническим характеристикам она не уступает лучшим зарубежным аналогам. Расчетный экономический эффект, полученный предприятием от снижения удельных затрат на топливо и увеличения выхода годного металла, благодаря внедрению РНП, составил около 350 тыс. долл. США в год. Конструкция печи и принципиальные технические решения были защищены патентом Республики Беларусь.

УП «Технолит» совместно с ГГТУ им П. О. Сухого разработаны ротационные наклоняющиеся печи различного назначения с полезным объемом от 0,3 до 3,75 м<sup>3</sup>, позволяющие одновременно переплавлять до 15 т шихтовых материалов. Сегодня на различных предприятиях Беларуси и России работает уже 15 таких установок (рис. 3).



Рис. 2. РНП для переработки аккумуляторного лома, внедренная в литейном цехе ООО «Авангард-Юнион» (Владимирская обл., РФ)



Рис. 3. Ротационные печи, разработанные УП «Технолит»: а, б – РНП-2,0, переработка стружки ГЛЗ «Центролит» (г. Гомель); в – С-03, сушка свинцового шлама ООО «Эрни» (г. Волковыск); г – РНП-3,0, рециклинг свинца ООО «Авангард-Юнион» (Владимирская обл., РФ); д – РНП-3,0 рециклинг свинца ООО «БелИнвестТорг» (г. Волковыск); е – РНП-0,5, рециклинг окалины БМЗ (г. Жлобин); ж – РНП-0,8, переработка железного огарка ООО «Карбона-Проминтех» (г. Пермь, РФ); з – РНП-9,0, рециклинг свинца ЗАО «КПВР СПЛАВ» (г. Рязань, РФ); и – РНП-1,5, рециклинг алюминиевых отходов «БелТОР 7» (г. Мозырь)

Печи оснащаются блочными или двухпроводными газовыми и жидкотопливными горелками, имеют электромеханический привод вращения и гидравлический привод подъема (наклона) корпуса и поворота крышки. Скорость вращения корпуса ротационных печей от 0,1–0,5 до 5–6 об/мин. Привод вращения печи выполняется с возможностью регулирования скорости в процессе обработки материала – оснащается инвертором.

Во время вращения печи возникают несбалансированные нагрузки, вызываемые движением материала в печи, возможным спеканием и обрушением шихты, и образованием настывов на поверхности футеровки. Изгиб и вибрация корпуса печи должны быть сведены к минимуму, особенно при передаче усилий привода вращения на днище печи. Так как толщина стенки корпуса меньше 1/20 радиуса кривизны его сечения, при расчете корпуса на прочность применима гипотеза двухосного напряженного состояния. Приведенные нормальные напряжения следует определять исходя из энергетической теории прочности, результаты которой для стальных листовых конструкций наиболее тесно согласуются с практическими данными. Коэффициент запаса прочности при расчете корпуса не должен выбираться меньше четырех. Для разработанных РНП расчетная величина прогиба составляет не более 0,0001 от длины пролета между задней опорой и опорными роликами [4].

Крышка печи выполняется на поворотной стойке, связанной с неподвижной несущей рамой, и поворачивается на 120–180°. В верхней половине крышки располагаются дымоход и зонты системы аспира-

ции, которые должны обеспечивать полное улавливание вредных веществ, выделяющихся при плавке, загрузке и сливе расплава. Для печей большой емкости предусматривается наличие в поворотной крышке рабочего окна, что позволяет производить дополнительную завалку шихты или взятие проб, не останавливая плавку.

РНП, предназначенные для переработки оксидных металлоотходов, оснащаются газогорелочными устройствами с регулируемым соотношением «газ-воздух» от  $\alpha = 1,05-1,1$  при разогреве печи и шихтовых материалов до  $\alpha = 0,6-0,7$  при проведении восстановительных процессов. Для переработки железосодержащих отходов печь оборудуется системой обогащения дутья кислородом (до 27–30%  $O_2$  в дутье).

Тепловой КПД разработанных УП «Технолит» ротационных наклоняющихся установок в 2–3 раза превышает КПД традиционных короткобаранных печей.

Удельное количество энергии (плотность теплового потока), подводимое к шихте во время нагрева и расплавления, а, следовательно, и интенсивность обработки дисперсного материала в РНП существенно выше, чем в индукционных и дуговых печах: в 8–10 раз и более в зависимости от исходного сырья. При этом тепловой КПД на стадии нагрева дисперсных материалов по данным, полученным на Гомельском заводе «Центролит» при высокотемпературном нагреве стружки в РНП-2,0, достигает 51%, что в 3–5 раз выше, чем в индукционных, дуговых или стационарных топливных печах.

Достоинствами РНП являются относительно низкие инвестиционные затраты, компактность, удобство обслуживания и высокая степень управляемости металлургических процессов.

В зависимости от поставленной задачи и имеющихся на предприятии технических возможностей РНП позволяют реализовать различные технологические схемы рециклинга металлоотходов. Простейшая из них: высокотемпературный безокислительный нагрев стружки и мелкого скрапа в РНП с последующим использованием горячей шихты при плавке металла в индукционных печах. Установка 2-тонной ротационной печи РНП-2,0 и внедрение этой технологии на Гомельском литейном заводе «Центролит» позволили увеличить количество стружки в шихте с 10–15 до 20–25%, при этом повысить качество чугуна, полностью освободиться от влаги, масел и органических примесей, содержащихся в стружке и исключить залповые выбросы дыма при загрузке стружки в индукционные печи. По заводским данным: при расходе природного газа на уровне 8–14  $m^3/t$  (меньшие цифры соответствуют замазанной стружке) продолжительность нагрева стружки до 700–800 °С составила 15–20 мин, при этом удельные затраты электроэнергии на расплавление стружки снизились на 200–250 кВт·ч и на 30–35% время расплавления стружки в индукционных тигельных печах.

При обеспечении плавильного участка кислородом появляется возможность проведения в РНП восстановления и плавки дисперсных железосодержащих отходов.

Технологический процесс переделки металлических отходов (стружки, металлической пыли, мелкого скрапа и т. п.) включает в себя нагрев, расплавление, при необходимости – науглероживание, выдержку, скачивание шлака и выдачу расплава в разливочный ковш или изложницы. Окисление металла при нагреве в РНП предотвращается благодаря высокой скорости нагрева (60–80 К/мин) и поддержанию восстановительной атмосферы в печи за счет добавления в завалку 6–8% твердого восстановителя (например, коксика) и сжигания топлива с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 0,85-0,9$ .

Примерные удельные (отнесенные к 1 тонне получаемого расплава) затраты материалов и энергоносителей на процесс плавки стружки следующие: восстановитель – 60–80 кг, флюс – 55–65 кг, природный газ – 80–90  $m^3$ , кислород – 10–12  $m^3$ , электроэнергия – 5–6 кВт·ч. Продолжительность плавки – 40–45 мин.

Техпроцесс рециклинга оксидных и многокомпонентных отходов условно может быть разделен на две стадии:

- первая включает в себя загрузку, нагрев шихты, твердофазное восстановление при температуре 1000–1200 °С;
- во вторую стадию входит перегрев, расплавление, жидкофазное восстановление, выдержка, скачивание шлака, доводка (если требуется), слив расплава. Выход металла из окалины при оптимальных режимах достигает 85–90% от теоретически возможного (по данным опытно-экспериментальных плавков, проведенных на Белорусском металлургическом заводе).

Усредненные данные по удельному расходу основных компонентов шихты и затратам энергоносителей на процесс рециклинга окалины в РНП следующие: восстановитель (отсев кокса или угля) – 600–700 кг, флюс – 100–150 кг, природный газ – 200–220  $m^3$ , кислород – 35–45  $m^3$ , электроэнергия – 15 кВт·ч.

Продолжительность двухстадийного твердо-жидкофазного процесса рециклинга окалины в РНП от момента завалки шихты до слива металла и шлака составляет 3,0–3,5 ч. Полученный в результате реци-

клинга металл соответствует требованиям, предъявляемым к высококачественным шихтовым материалами и с успехом может использоваться в любых плавильных печах при получении марочных чугунов и сталей. Некоторые результаты экспериментальных плавок различных железосодержащих отходов, проведенных на Белорусском металлургическом заводе в опытно-промышленном образце РНП-0,5, приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Химический состав металла, полученного в РНП из чугунной и смешанной стружки (с. 1 и с. 2), окалины (3, 4, 7, 8) и аспирационной пыли (п. 5 и п. 6) при использовании различных режимов плавки**

Номер образца	Содержание компонентов, %											
	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>мет</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C	S	Mn	Si	P	Cr	Ni	Cu
с. 1	96,1	96,1	—	—	3,2	0,12	0,41	0,71	0,040	0,080	0,14	0,24
с. 2	96,2	95,8	0,4	—	1,8	0,10	0,25	0,14	0,034	0,140	0,08	0,18
3	96,0	95,2	1,1	—	2,3	0,07	0,02	0,05	0,011	0,004	0,10	0,23
4	97,8	97,8	0,2	—	1,3	0,14	0,01	0,17	0,012	0,010	0,11	0,22
7	95,3	93,8	2,6	0,3	2,1	0,10	0,02	0,50	0,015	0,006	0,10	0,24
8	93,8	91,5	1,5	0,1	3,8	0,05	0,02	0,45	0,022	0,015	0,12	0,34
п. 5	92,5	87,4	4,9	1,2	0,9	0,15	0,24	1,20	0,030	0,025	0,10	0,26
п. 6	93,9	89,4	3,5	1,9	0,6	0,04	0,36	1,50	0,040	0,020	0,09	0,20

При наличии на производстве электрических плавильных печей наиболее рациональным является реализация дуплекс-процесса: «РНП – индукционная печь» или «РНП – дуговая печь». В этом случае на первом этапе в РНП осуществляется переплавка или восстановительная плавка исходного дисперсного сырья по одному из двух представленных выше технологических процессов, а на втором этапе – полученный в РНП расплав передается в индукционную или дуговую печь, где осуществляется его доводка по химсоставу, выдержка и разливка в литейные формы для получения фасонных отливок. При этом исключается необходимость повторного расплавления металла, а энергозатраты на получение марочного сплава в электропечах могут быть сокращены до 100–300 кВт·ч на 1 т (в зависимости от доли жидкого металла из РНП в общей металлозавалке).

Успешная апробация такого варианта была проведена в БНТУ, где при плавке СЧ20 и СЧ25 в индукционной печи металлом, полученным в РНП, был полностью заменен весь покупной лом и первичные шихтовые материалы. Полученный в результате металл и изготовленные из него фасонные отливки соответствовали требованиям ГОСТ и не уступали ни по структуре, ни по физико-механическим свойствам отливкам из контрольных партий.

Широкое внедрение разработанных решений в производство позволит вернуть в металлургию сотни тысяч дисперсных металлосодержащих отходов, большая часть которых остается в отвалах предприятий или вывозится на промышленные полигоны. В масштабах Беларуси переработка только вновь образующихся отходов такого рода позволит ежегодно возвращать в производство до 150–200 тыс. т чугуна и стали. Учитывая расчетную стоимость получаемого металла (115–130 долларов США за 1 т), рентабельность производственных участков по переработке собственных дисперсных металлоотходов, организованных на металлургических и машиностроительных предприятиях, составит не менее 50%, а возврат инвестиций – не более 9–12 мес. Производственная мощность таких участков может составлять от 1–2 до 50–100 тыс. т ежегодно перерабатываемых металлоотходов.

### Литература

1. Дьяконов О. М. Комплексная переработка стружки и металлосодержащих шламов. Минск: Технология, 2012. 262 с.
2. Ровин С. Л. Рециклинг металлоотходов в ротационных печах. Минск: БНТУ, 2015. 382 с.
3. 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.
4. Ровин С. Л. Конструкция ротационных наклоняющихся печей: моделирование и расчет / С. Л. Ровин // Механическое оборудование металлургических заводов. 2016. № 1. С. 30–47.