

Ресурсосберегающие технологии в литейном и металлургическом производствах

Ровин С. А., к.т.н., директор НП РУП «Технолит»

Ровин А. Е., к.т.н., зав. кафедрой «МиТЛП» ГГТУ им. П. О. Сухого

Повышение эффективности работы оборудования, снижение материало- и энергоёмкости продукции, сокращение и вторичное использование отходов — важнейшие задачи любого производства.

В то же время сегодня металлургия и литейное производство являются наиболее энерго- и материалоемкими отраслями промышленности. При этом наиболее энергоёмкий процесс — плавка. Сокращение удельных энергозатрат на плавку становится с каждым днём все более актуальной задачей в связи с постоянным ростом цен на энергоносители.

Наиболее дорогостоящим энергоносителем является электроэнергия. В то же время, благодаря непрерывному совершенствованию электроплавильных агрегатов (индукционных и дуговых печей), доля жидкого металла, получаемого в электропечах постоянно растет. Однако термический к.п.д. (т. к.п.д.) электроплавки и сегодня не превышает 55—65%: при энтальпии жидкого чугуна и стали, примерно, 1300 и 1500 МДж/т, соответственно, затраты при плавке составляют от 2 до 2,7 тыс. МДж/т или 550—750 кВт·ч/т. При стоимости электроэнергии в Беларуси из России на уровне 0,1—0,12\$ за 1 кВт·ч, энергозатраты на 1 тонну расплава составляют 55—85\$ США.

«Теряемая» тепловая энергия в действительности не просто рассеивается в атмосфере, а

расходуется на «производство» загрязнений окружающей среды: образование пыли, вредных веществ, высокотемпературных газов и т. д. Для осуществления природоохранных мероприятий приходится затрачивать эквивалентное или большее количество энергии (в соответствии с первым законом термодинамики). Отсюда следует, что экономическая эффективность внедрения способов, сокращающих энергопотребление при плавке, с учетом экологических факторов возрастает более чем вдвое.

В настоящее время разработан и апробирован ряд технологических процессов, прежде всего в металлургии, которые позволяют существенно интенсифицировать работу печей и сократить удельный расход электроэнергии и одновременно обеспечить высокое качество жидкого металла.

Среди них — интенсивное применение кислорода как для продувки жидкой ванны, так и в топливно-кислородных горелках, продувка инертными газами, вдувание углеродосодержащих материалов и вспенивание шлака, работа на длинных дугах, использование в завалке до 25—30% жидкого чугуна, работа «с болотом», дожигание СО непосредственно в рабочем пространстве печи, подогрев шихты в печи и в автономных установках, расширение использования электродуговых печей постоянного тока и индук-

ционных печей средней и повышенной частоты. Эти мероприятия позволяют снизить средние удельные затраты электроэнергии на плавку с 600—750 кВт·ч/т до 400—450 кВт·ч/т и менее.

Если оценивать способы интенсификации плавки по такому интегральному показателю как сокращение удельных затрат электроэнергии, то ориентировочно можно расположить их следующим образом (по максимальным значениям в % от удельного расхода): дожигание СО в рабочем пространстве печи ~6, работа со вспененными шлаками ~9, повышение удельной мощности с поддержанием длинных дуг ~10, вдувание кислорода ~10, использование жидкого чугуна ~10, использование топливно-кислородных горелок (ТКГ) ~12, подогрев шихты ~25.

Наибольший эффект сокращения удельных энергозатрат при электроплавке обеспечивает предварительный подогрев шихты. На нагрев и расплавление металлозавалки в плавильной печи расходуется, примерно, 70—75 % энергии, перегрев и доводку жидкого металла ~25—30 %. Нагрев шихты до температуры 550—750 °С сокращает на 30—35 % затраты энергии в первый период плавки. Следует также учитывать, что нагрев слоя кускового материала, каким является металлошихта, точечным источником (дугой) за счет излучения имеет достаточно низкий т. к.п.д. (~20 %), работа дуги на холодной шихте менее устойчива, все это удлиняет продолжительность плавки, увеличивает расход электродов, износ футеровки, угар. Не намного больше т. к.п.д., при нагреве холодной шихты в индукционных печах, особенно промышленной частоты (~25 %).

При нагреве шихты происходит удаление влаги, выжигание масел, СОЖ и др. загрязнений, частичное удаление пыли за счёт продувки слоя. Более чистая шихта и сокращение времени пребывания в печи способствует повышению качества жидкого металла за счёт уменьшения количества неметаллических включений и газонасыщенности.

Подогрев шихты может быть осуществлен несколькими способами. Наиболее простое техническое решение — нагрев газовыми или газокислородными горелками непосредственно в рабочем пространстве печи. Однако продуть шихту на сколь-нибудь значительную глубину без организации принудительного движения газов через слой невозможно. Поэтому при использовании топливных горелок в электропечах прогреть удастся не более 10—15 % металлозавалки и т. к.п.д. процесса не превышает 10 %.

Для нагрева кускового материала в слое наиболее эффективным способом является его продувка высокотемпературными газами (фльтрация) при конвективном теплообмене. Такой режим, существующий, например, в шахтных печах, обеспечивает при нагреве т. к.п.д. 65—70 %. При скоростях продувки 15—25 м/с коэффициент объемного теплообмена достигает 1,2—1,8 МВт/м³.

Наиболее привлекательным с точки зрения теплового баланса является использование при этом тепла отходящих газов. Развитием способа нагрева шихты в слое путем продувки отходящими газами можно считать шахтно-дуговые печи, в последние годы введенные в эксплуатацию на некоторых предприятиях металлургии. Шахта, в которую загружается металлозавалка, устанавливается непосредственно на свод электродуговой печи. Газы проходят с температурой 750—1200 °С сквозь слой материала (без дожигания) и отводятся в систему дожигания СО и очистки. Шихта удерживается водоохлаждаемыми пальцами. Однако подобные агрегаты существенно сложнее и дороже традиционных электропечей и не могут использоваться в действующих цехах без капитальной реконструкции длительной остановки производства.

Наиболее надежным и наименее дорогостоящим способом предварительного нагрева шихты при электроплавке является подогрев вне печи на автономной установке, отапливаемой

природным газом или жидким топливом. Экономический эффект при этом обуславливается двумя факторами. Стоимость единицы тепловой энергии, полученной от сжигания природного газа в Беларуси и России в 10—8 раз меньше, чем от преобразования электроэнергии. Второе — т. к.п.д. нагрева шихты за счет продувки составляет 65—70 %, что, примерно, втрое превышает эффективность нагрева шихты в электропечах и, следовательно, суммарные затраты тепла существенно ниже.

УП «Технолит» совместно с кафедрой «МиТЛП» ГГТУ им. П. О. Сухого предлагает технологию и установку высокотемпературного газового нагрева шихты (до $T_{cp} = 500—550^{\circ}\text{C}$) непосредственно в загрузочных бадах специальной конструкции — бады-термосах.

Установки данного типа для предварительного нагрева металлозавалки при плавке чугуна и стали в электродуговых и индукционных печах были успешно внедрены на ряде предприятий Беларуси, в том числе на РУП «ГЛЗ „Центролит“», на «Белорусском автозаводе», сейчас на стадии ввода в эксплуатацию находится установка подогрева шихты на «Минском тракторном заводе». По данным предприятий, внедривших эти установки, подогрев шихты обеспечивает сокращение удельных затрат электроэнергии на 150—160 кВт·ч на тонну расплава при расходе природного газа 13—14 м³ на тонну шихты или снижение стоимости жидкого металла на 10\$ за 1 т. При годовом производстве отливок 10000 т и выходе годного на уровне 55—60 %, экономия на энергозатратах составляет около 150 тыс. \$, что в 5—6 раз превышает стоимость установки подогрева шихты в загрузочной корзине (баде).

В предлагаемых установках успешно решены основные проблемы нагрева кусковых материалов в ограниченных емкостях (бадах): неравномерность нагрева и перегрев стенок ёмкости.

Для уменьшения градиента температур по высоте столба шихты разработан и апробирован

в промышленных условиях на установках подогрева 2 и 6 т бадей метод методического нагрева: после достижения требуемой температуры в верхних слоях шихты осуществляется ступенчатое, либо плавное снижение подачи топлива при этом соответственно уменьшаются температуры факела и верхнего слоя шихты, а тепло перераспределяется в нижележащие слои шихты.

Выравнивание температур в слое может быть достигнуто за счет циркуляции отходящих из газов. В этом случае вместо подсосывания воздуха и разбавления продуктов горения газа, что неизбежно снижает температуру факела и температурный напор, интенсивность теплообмена и т. к.п.д., в установку возвращается тепло отходящих газов. При циркуляционном режиме возникает возможность не только выравнивания, но и повышения средней температуры нагрева шихты (до $T_{cp} = 600—650^{\circ}\text{C}$), что позволяет дополнительно увеличить эффективность работы плавильных печей и экономию электроэнергии.

Устранение перегрева корпуса загрузочной бады (корзины) достигается путем наружного обдува бады и установки внутри нее дополнительной сменной обечайки с зазором 30—50 мм. По кольцевому зазору за счет организованной тяги (приток от дутьевого вентилятора, установленного на своде, и разрежение, создаваемое дымососом под бадей) продувается холодный воздух. Для того, чтобы в зазор не попадали высокотемпературные продукты горения газа, диаметр свода (крышки) делается меньшим, чем внутренний диаметр вставки, а зазор между сводом и поверхностью шихты (200—350 мм) перекрывается огнестойкой тканью.

Помимо указанных выше экономических и технологических преимуществ предварительный внепечной подогрев шихты позволяет существенно улучшить экологические параметры плавки, условия труда и безопасность работы на электропечах, особенно при работе с «болотом» на индукционных печах.

Для топливных нагревательных и плавильных печей наиболее эффективным способом повышения КПД и снижения энергозатрат является использование вторичных энергоресурсов (ВЭР).

Большинство топливных плавильных агрегатов, используемых в Белоруссии имеют тепловой КПД на уровне (35—45)%, у термических печей этот показатель находится в пределах (25—30)%, а нагревательные печи, работающие на жидком или газообразном топливе, имеют тепловой КПД всего 7—12%. При этом энергия, не используемая в технологическом процессе, не просто рассеивается, но, как уже было сказано, выбрасывается вместе с отходящими газами в атмосферу загрязняя окружающую среду. Таким образом, утилизация ВЭР важна не только с точки зрения энергосбережения, но и с позиций охраны природы.

Существует несколько способов утилизации ВЭР, содержащихся в отходящих газах: рекуперация, подогрев воздуха для технологических целей или отопления цеха, нагрев воды для технологических или бытовых нужд. Каждый из них имеет свои особенности и технические средства, выбор определяется экономическими показателями и конкретными заводскими условиями. В первом приближении можно считать, что с помощью воздухоподогревателей можно использовать 60—70% тепла отходящих газов, охладив их, таким образом, до 180—120°C на выходе. Водоподогреватели (экономайзеры) позволяют получать даже несколько большую эффективность утилизации тепла — до 70—75% и использовать низкотемпературные отходящие газы (со средней температурой 150—200°C). Вместе с тем использование воздухоподогревателей носит сезонный характер, а установки подогрева воды требуют ресиверов, компенсирующих несинхронность подачи и потребления воды.

Использование горячего воздуха для других технологических агрегатов, например, для сушилки песка, предварительного нагрева заготовок,

сушки стержней после покраски и т. п., предполагает параллельный режим работы и уменьшает маневренность оборудования. Как правило, в подобных случаях необходимо сохранять альтернативные источники тепла: газовые горелки, электронагреватели и т. п.

Рекуперация (возврат) части тепловой энергии в печь — один из наиболее рациональных способов использования высокотемпературных ($\geq 700^\circ\text{C}$) ВЭР, и хотя КПД большинства рекуператоров не превышает 30—40% их использование сохраняет автономность печной установки, обеспечивает сокращение удельного расхода топлива и позволяет существенно улучшить технологические характеристики печи.

Наиболее эффективным является объединение систем реализующих в себе все перечисленные способы утилизации ВЭР, что позволяет довести тепловой КПД плавильной или нагревательной установки до 75—80%.

Такие комплексные решения были разработаны УП «Технолит» и кафедрой «МиТЛП» ГГТУ для нагревательных и плавильных газовых и жидкотопливных печей и для ваграночных установок. Однако внедрение таких комплексов достаточно дорогостоящая задача, стоимость их в 5—10 раз превышает стоимость самой печи. И, несмотря на высокий экономический эффект и относительно небольшой срок окупаемости 9—12 месяцев, в нынешней сложной экономической ситуации немногие предприятия Республики могут позволить себе строительство таких систем.

Учитывая это обстоятельство, в УП «Технолит» были разработаны относительно простые, существенно более дешевые, но, тем не менее, эффективные схемы модернизации существующих плавильных и нагревательных печей.

Предлагаемая модернизация действующих вагранок предполагает:

- ✦ оснащение печи двухходовым радиационным встроенным рекуператором, который

обеспечивает подогрев дутьевого воздуха до 350—450 °С;

- ✧ установку или модернизацию существующего узла дожигания, оборудование его автоматикой безопасности и системой рационального расходования газа, такой узел дожигания обеспечивает стабильное горение отходящих ваграночных газов при минимальном расходе природного газа на их поджигание, что позволяет высвободить (и затем использовать на рекуперацию) энергию, содержащуюся в отходящих ваграночных газах в виде химической (скрытой) теплоты (в виде СО, Н₂ и других горючих веществ);
- ✧ реконструкцию завалочного окна, с целью снижения паразитных подсосов воздуха и повышения температуры в зоне горения отходящих газов;
- ✧ автоматизацию контроля и управления работой вагранки, что обеспечивает стабилизацию основных режимов плавки и улучшение управляемости агрегата.

Такая модернизация обеспечивает существенное повышение технико-экономических показателей ваграночной установки:

- ✧ тепловой КПД возрастает с 40—45 % до 55—60 %;
- ✧ средний расход кокса снижается на 20—25 % со 180—200 кг на тонну металлозавалки до 140—150 кг;
- ✧ средний расход природного газа на узле дожигания стабилизируется на уровне 2—3 м³ на 1 тонну жидкого металла;
- ✧ температура дутьевого воздуха — 350—450 °С;
- ✧ температура чугуна на жёлобе 1380—1400 °С;
- ✧ время выхода на рабочую температуру дутья 25—35 мин.;
- ✧ уровень СО на выходе из печи не более 0,015 %, уровень пыли и других вредных веществ в пределах норм ПДВ;

✧ отсутствие выбросов в колошниковой зоне;

✧ собственное сопротивление рекуператора движению дутьевого воздуха составляет не более 100—150 мм вод. столба.

Затраты на осуществление описанной схемы модернизации составляют, примерно, 50—70 тысяч долларов США в зависимости от размеров и производительности вагранки. Экономический эффект только от снижения удельного расхода кокса составляет около 12—13 долларов на тонну выплавляемого чугуна. При годовой программе выплавки на уровне 10000 тонн жидкого чугуна годовой экономический эффект составляет около 120—130 тысяч долларов, причем это без учета дополнительных преимуществ, связанных с повышением качества чугуна за счёт роста температуры и снижения содержания серы и других вредных примесей, переходящих в металл из кокса, снижением выбросов СО и других вредных веществ в атмосферу.

В соответствии с представленной схемой в 2003г. была модернизирована 12-тонная вагранка на «Минском автомобильном заводе», в 2005 г. 8-тонная вагранка на «Могилевском металлургическом заводе». На обеих вагранках получили своё подтверждение высокие проектные показатели роста энергетической эффективности агрегатов. Положительным опытом белорусских литейщиков уже заинтересовались многие российские и украинские предприятия, в частности «Ростсельмаш» (РФ), и «Макеевский литейный завод» (Украина).

Не менее важная проблема современного промышленного производства — утилизация и вторичное использование металлоотходов (рециклинг).

Все возрастающее накопление железосодержащих отходов, удорожание энергоресурсов и шихтовых материалов ужесточение природоохранных нормативов приводят к необходимости поиска экономичных и эффективных спосо-

бов и оборудования для переработки и возврата в производство (рециклинга) металлоотходов: стружки, металлургической пыли, окалина, мелкого низкосортного скрапа, шламов, обрезков проволоки и т. п.

По ориентировочным оценкам вновь образующиеся металлоотходы, например в Беларуси, составляют около 250 тыс. т в год, в отвалах нашей страны на сегодняшний день накоплено не менее 8—10 млн. тонн различных, в большей мере сильно окисленных металлоотходов.

Проблема утилизации железосодержащих отходов является актуальной во всем мире. Например, в РФ накоплено более 450—550 млн. тонн металлоотходов, ежегодно образуется около 3,5 млн. т, а перерабатывается только 5% от этого количества. В то же время очевидно, что металлоотходы представляют собой ценное металлургическое сырье, содержание основного металла в них может достигать до 75—90%.

В литературе предлагается ряд способов рециклинга, в основном, в металлургии, однако все они, за исключением традиционного доменного переплава, а также использования в качестве добавок при производстве металлизированных окатышей, находятся в лучшем случае на стадии опытно-промышленных установок.

Специфика решения этой проблемы в РБ и европейской части России обусловлена наличием большого количества небольших по объему источников подобных отходов, что увеличивает трудности со сбором, транспортировкой, унификацией по видам и химическому составу и, соответственно, осложняет переработку и повторное использование металлоотходов. Львиную долю (до 90%) металлоотходов составляют отходы черных металлов.

Железосодержащие отходы можно разделить на две категории. Первая — стружка (чугунная и стальная), скрап, проволока и другие металлоотходы. Вторая — окисные материалы, к которым относятся окалина, пыль систем аспирации, шла-

мы и другие отходы, в которых железо присутствует в виде FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 .

Первая представляет собой наиболее ценное и привлекательное с точки зрения металлургии сырье, так как имеет тот же состав что и годная продукция, то есть марочные чугуны и стали. При сборе и смешивании подобных отходов с разных предприятий ценность этого вида сырья снижается из-за неопределенности их состава. Поэтому для условий РБ предпочтительным решением явился бы рециклинг металлоотходов на тех же предприятиях, где они образуются, что предполагает создание эффективных и небольших по производительности установок для их переплавки.

Практика показала, что использовать традиционные плавильные печи, обслуживающие литейные цеха, для переплавки стружки нерационально.

Так, начиная с 60-х годов прошлого столетия велись постоянные поиски способов переплавки чугунной стружки в открытых вагранках холодного дутья. Стружка вводилась с дутьем через фурмы, шнеком непосредственно в плавильную зону и в виде брикетов — с шихтой через завалочное окно. К сожалению, отрицательные результаты получены при любых способах ввода стружки в традиционные вагранки: увеличивается расход флюсов, растет количество шлака, брикеты в процессе плавки (в верхней части холостой колоши) разрушаются и увеличивают выброса пыли, снижается качество металла, увеличивается расход кокса.

Более перспективным является создание специализированных вагранок для переплавки брикетов из металлоотходов. Вагранки для переплава должны иметь увеличенную (до 8—10 диаметров) полезную высоту и расширенную зону подогрева (восстановительную зону), это обеспечит увеличение времени пребывания брикетов при температуре (900—1300) °С до 20—25 мин, что достаточно для восстановления оксидов

в твердом виде. Полученный в таких вагранках чугуны можно использовать как полупродукт для использования в шихте, например индукционных или дуговых печей, как заменитель чушкового чугуна или непосредственно в жидком виде, что дает экономию электроэнергии при плавке в электропечах печах до 100 кВт·ч/т. К настоящему времени в мире работает свыше 20 электродуговых печей, использующих в шихте жидкий, в том числе ваграночный чугун.

Привлекательность вагранок для рециклинга дополняется и тем обстоятельством, что стружку и другие металлоотходы, загружаемые в вагранку, не нужно предварительно очищать или подогревать. Все органические загрязнители полностью сгорают в шахте вагранки, а неорганические — ошлаковываются, главная задача не допустить унос тонкодисперсных металлоотходов (стружки) из вагранки с потоком газов.

С развитием индукционной плавки начались попытки использования стружки в шихте тигельных печей промышленной, а затем и средней частоты. Однако переплавка стружки в индукционных печах требует преодоления ряда технологических трудностей. Из-за того, что стружка плохо разогревается существенно снижается к.п.д. печей и производительность. Насыпной вес стружки около 1—2 т/м³, поэтому она всплывает и удерживается в холодном шлаке. Оксиды, вносимые стружкой, приводят к обезуглероживанию сплава, накоплению неметаллических включений, газонасыщенности и т. п. Как правило доля стружки в шихте при индукционной плавке не превышает 10—15%, окалину вообще не удается переработать в традиционных печах.

Для переработки небрикетируемой стружки возможно использование установок электрошлакового переплава (ЭШП). Использование полых электродов с засыпкой из стружки, пресованной и предварительно спеченной, позволяет эффективно переплавлять стружку без окисления, как это имеет место в других плавильных

агрегатах, рафинировать сплав, пропуская его по каплям через слой активного высокотемпературного шлака, управлять химсоставом и т. п. Преимуществом установок ЭШП является универсальность (можно плавить чугун и любые марки стали), сравнительная дешевизна оборудования, компактность, простота управления. Минус — высокая энергоёмкость и малая производительность процесса.

Естественно, как и в случае использования других электропечей, экологические параметры плавки зависят от качества шихты. При использовании загрязненной песком и цеховым мусором, замасленной, с остатками СОЖ стружки образование и выбросы продуктов деструкции органических соединений, сажи, пыли неизбежны. Загрязнения могут составлять до 10 % от массы стружки, соответственно, велики и объемы выбросов. Поэтому загрязненная стружка должна предварительно подвергаться сушке и очистке при температуре не менее 250—300 °С.

Конечно наиболее привлекательным представляется рециклинг дисперсных металлоотходов без предварительной подготовки, брикетирования или окусковывания, что должно значительно снизить себестоимость металла полученного из отходов. Работы в этом направлении привели к созданию систем Redsmelt, Hismelt, российской Ромелт и некоторых аналогичных. Системы предусматривают получение жидкого металла (чугуна или полупродукта). Однако из них лишь Ромелт основан на непосредственной переплавке дисперсных материалов. Прочие фактически на предварительных стадиях процесса осуществляют окомковывание, обжиг и частичное восстановление сырья.

Переплав дисперсных оксидных материалов вместе с науглероживателями имеет определенные преимущества, прежде всего высокие скорости нагрева и восстановления.

Однако, обработка материала в слое затрудняет использование этих преимуществ: высокая

плотность слоя, спекание частиц вблизи температуры плавления, необходимость использования высокотемпературных теплоносителей и, как следствие, низкий термический к.п.д. (высокая температура отходящих газов).

УП «Технолит» предлагает альтернативное комплексное решение этих проблем: рециклинг дисперсных металлоотходов в ротационных качающихся газовых или жидкотопливных печах (пат. РБ № 2770). Этот тип плавильных агрегатов позволяет перерабатывать любое сырье благодаря тому, что нагрев и массообмен осуществляется в динамическом слое. В отличие от обычных барабанных печей поток газов находится в ротационной печи вдвое дольше, а при подаче закрученного завихрителем газового потока взаимодействие его с материалом может быть интенсифицировано в несколько раз при увеличении скорости вращения до 10—15 м/с против 0,5—1,5 м/с (поступательная скорость потока в барабанных печах). Благодаря возможности качания в такие печи легко загрузить шихту и слить жидкий расплав, причем емкость подобных печей лимитируется только технологическими потребностями и может варьироваться от 0,1 до 2 м³. Ротационные печи позволяют вести методический режим обработки как по температуре, так и по составу атмосферы печи: на первой стадии может быть реализован процесс восстановления при температурах 900—1200 °С и содержании СО ≈ 25—35 %, затем, на второй стадии, за счёт использования обогащенного ду-

тья температура может быть поднята до 1600—1850 °С, что позволяет получить расплав и довести его до требуемой температуры. Шлак в таких печах перегрет и имеет высокую активность. Печи позволяют в случае необходимости произвести доводку сплава и его рафинирование перед разливкой. Ротационные печи могут работать на жидком и газообразном топливе, а в качестве восстановителей использовать любые углеродосодержащие материалы, в том числе, отходы (например, отсев кокса). Достоинством таких печей являются относительно низкие капитальные затраты и простота изготовления, удобство обслуживания и высокая степень управляемости металлургических процессов. Первая такая печь была изготовлена в 2006 г. для получения черного свинца из окисно-сульфатного свинецсодержащего шлама (отходы аккумуляторных батарей). В декабре она была введена в эксплуатацию в литейном цехе в п. Камешки Владимирской области и подтвердила на практике свои высокие проектные характеристики: при удельном расходе 40 л жидкого топлива на 1 тонну расплава эта установка обеспечивает проведение всего цикла восстановления, расплавления, рафинирования за 1,5—2 часа. Ёмкость установки — 6 тонн по свинцу, производительность — до 3 тонн черного свинца в час. Рабочие температуры в печи составляют 1000—1200 °С. Сегодня аналогичная установка изготавливается по заказу «Белорусского металлургического завода» для переработки железосодержащей окалины.