
НОВЫЕ ЛИТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 621.365.5:661.665.2

А. М. Верховлюк*, д-р техн. наук, зам. директора,
e-mail: vam@ptima.kiev.ua

П. В. Русаков*, канд. техн. наук, e-mail: prmarus@ukr.net

В. Л. Лахненко*, канд. техн. наук, ученый секретарь,
e-mail: lakhnenko@ptima.kiev.ua

Р. В. Петровский*, аспирант, e-mail: ruslan.p@galcat.com

И. Ф. Червоний, д-р техн. наук, проф., e-mail: rot44@yandex.ru

*Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

ПРОЦЕСС ПОЛУЧЕНИЯ ВТОРИЧНЫХ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНДУКЦИОННОЙ ПЛАВКИ

Рассмотрена конструкция печи, которая позволяет осуществлять плавку, дисперсный помол тугоплавких соединений, а также в режиме помольной экстракции отделять тяжелые металлы, содержащиеся в стеклах отработанных электронных приборов и различных видах хрустальных стекол. Ее также можно использовать для получения композиционных материалов путем проведения в печи операций расплавления, измельчения и смешивания отдельных ингредиентов. При этом электродинамический реактор способен осуществлять регенерацию металлов из окислительных соединений, находящихся в скрапе, шлаках, тяжелых стеклах и других материалах, которые сложно перерабатывать с использованием индукционных тигельных печей.

Ключевые слова: индукционные печи, тигель, шихтовые материалы, электрическая энергия, тяжелые металлы.

В машиностроительной промышленности достаточно распространены плавильные агрегаты, известные как индукционные тигельные печи [1–4]. Их применяют в литейных цехах для выплавки, рафинирования и модифицирования металлов и сплавов. Типовые конструкции индукционных тигельных печей имеют огнеупорный тигель, в который загружают шихтовые материалы для осуществления процессов термического воздействия на шихту и выплавки металла. Тигель помещают внутри электрической катушки, которая служит индуктором высокочастотного электромагнитного поля, и для ее питания используют электрический генератор. Ток, протекающий по катушке, нагревает тигель и шихтовые материалы в середине тигля.

Благодаря эффективному преобразованию электрической энергии в тепло, индукционные тигельные печи более привлекательны по сравнению с другими плавильными агрегатами и имеют более высокий коэффициент полезного действия

(КПД). Индукционные тигельные печи обеспечивают простоту управления процессом плавки, короткое время приготовления расплавов и гарантируют высокую производительность. С их появлением существенно расширились технологические возможности литейного производства, повысилась качество выплавляемого металла, а также уменьшилось количество загрязняющих выбросов в окружающую среду. Индукционные тигельные печи имеют высокий КПД в режиме плавки лома и приготовления металлических расплавов, однако их использование становится менее эффективным при переработке оксидных материалов, шлама, пыли, скрапа. Также эти агрегаты не совсем приемлемы для обработки расплавов неметаллическими порошками, которые содержат частицы наноразмерного модификатора.

Наряду с индукционными тигельными печами распространение получили также конструкции индукционных канальных печей, которые обеспечивают более высокий КПД в процессах, связанных с переплавкой металлов [5–7]. Они не требуют предварительного преобразования электрической энергии в ток высокой частоты, поэтому значительно упрощается их силовая электрическая часть и повышается уровень безопасности для обслуживающего персонала. Однако, в эксплуатации они требуют проведения дополнительных процедур для запуска и обеспечения стабильного режима функционирования. Также, для старта канальных печей необходимо дополнительное оборудование, которое обеспечивает приготовление и заливку расплава в рабочие каналы перед началом работы. Проведенный анализ технических возможностей индукционных печей показал, что они наиболее эффективны в процессах переплавки лома и приготовления металлических сплавов, однако в металлургии существуют другие проблемы, для решения которых применение вышеуказанных технических устройств не гарантирует эффективного достижения результата.

Задача утилизации свинцового стекла и извлечения из него тяжелых металлов является одной из проблем, которая требует создания специального оборудования. Начало третьего тысячелетия приблизило конец эры кинескопов, и на смену им пришли более совершенные жидкокристаллические мониторы и плазменные дисплеи. По отдельным оценкам ежегодно в индустриально развитых странах выбрасывается в лом от нескольких тысяч до одного миллиона мониторов и телевизоров, а общее количество устаревшей техники, еще сохраняющейся в домах жителей, может исчисляться миллионами. Прогнозируется, что поток этого «электронного мусора» иссякнет лишь через 15–25 лет. Отработанные кинескопы могут создавать проблемы для окружающей среды, так как при их пребывании на свалках происходит выщелачивание свинца и других тяжелых металлов в грунтовые воды [8]. Как показали результаты исследований, проведенные ведущими исследовательскими центрами, разработанные технологии и оборудование для добычи свинца из расплавов стеклянной массы характеризуются значительной энергоемкостью и не обеспечивают достаточной эффективности процессов осаждения свинца, что в первую очередь вызвано высокой вязкостью стеклянных расплавов [9–11].

Исследуя указанную проблему, ученые института «Guangdong Institute of Eco-environmental and Soil Sciences» предложили извлекать свинец из стекла восстановительной реакцией [12, 13]. Ключевым фактором этого метода является возможность осуществления процесса удаления свинца из стекла при более низких температурах в реакционной камере.

Работа в данном направлении проводилась также сотрудниками «PANASONIC IP MAN CORP», которые предложили для экстракции свинца нагревательную камеру с мешалкой, в которой обеспечивают процесс регенерации свинца при температуре ниже температуры плавления стекла [14]. Однако, показанные в [13, 14] конструкции устройств недостаточно эффективны для экстракции свинца, и они нуждаются в дальнейшем совершенствовании.

В связи с этим *целью данной работы* является создание многофункционального устройства, имеющего возможности проведения процессов нагрева, плавления, измельчения твердых частиц материала, функции смешивания и приготовления

из них жидко-твердых взвесей, а также позволяющего осуществлять раздельный отбор и транспортировку получаемых продуктов с выходных портов устройства.

Поставленная цель достигается тем, что плавильная печь для обработки дисперсионных расплавов содержит емкость для обработки сырья, связанную с питающим трансформатором. На концах трубного колена выполнена загрузочная камера и шлаковый желоб, имеющие смежную стенку, которая обеспечивает контакт между концами трубы и формирует вторичный замкнутый виток питающего трансформатора. В средней зоне трубного колена сформированы реакционная камера и сливной патрубок. Внутреннее пространство реакционной камеры находится в зазорах узла магнитодинамических жерновов, состоящего, по меньшей мере, из двух электромагнитов постоянного тока. Последние включены последовательно таким образом, что создают в поперечном направлении пространства реакционной камеры смежно расположенные и противоположно направленные пучки магнитной индукции. В зоне стыковки сливного патрубка с трубным коленом установлен статор. Узел магнитодинамических жерновов собран из двух или большего количества постоянных магнитов, установленных вдоль реакционной камеры так, что они создают в поперечном направлении пространства реакционной камеры смежно расположенные и противоположно направленные пучки магнитной индукции. Он может состоять из объединенных в последовательные электрические пары регулируемых электромагнитов постоянного тока и дополнительно установленных постоянных магнитов.

Как показано на рис. 1, 2, конструкция плавильной печи для обработки дисперсионных расплавов содержит емкость С100 для обработки сырья В101, которая выполнена в форме трубного колена 1 из электропроводящего материала. Труба протянута через магнитопровод 2, который является частью силового трансформатора 3. На магнитопроводе установлена электрическая катушка 4, которая выполняет функцию первичной обмотки трансформатора 3 (Т100). Трубное колено 1 содержит несколько последовательно расположенных зон, предназначенных для выполнения ряда технологических операций при прохождении в трубе обрабатываемого сырья. На левом входном конце трубного колена образована загрузочная камера 5, которая предназначена для приема сырья В101. В качестве сырьевого материала может быть использована шихта, включая металлический лом, шлаки, свинцовое стекло, абразивную пыль, отходы гальванического производства и пластины электрических аккумуляторных батарей, подлежащих утилизации. Шихта может также включать и другие ингредиенты в соответствии с заданным регламентом технологического процесса.

На правом выходном конце трубного колена сформирован шлаковый желоб 6, который обеспечивает выпуск из печи переработанных шлаков. Загрузочная камера 5 и шлаковый желоб 6 имеют смежную стенку 7, которая обеспечивает электрический контакт между концами трубы и формирует вторичный замкнутый виток питающего трансформатора Т100.

В средней зоне трубного колена сформирована реакционная камера 8, входящая в зазоры узла размольных магнитодинамических жерновов, конструктивно обозначенных на рис. 1 как MS9. Данный узел предназначен для генерирования магнитного потока в реакционной камере и создания силовых нагрузок в сырьевом материале. Узел MS9 состоит из двух магнитодинамических жерновов ЭМ1, ЭМ2, которые имеют конструкцию электромагнитов постоянного тока. Катушки электромагнитов подключаются к регулятору постоянного тока DCR (DC Regulator) путем последовательного соединения, как показано на рис. 3.

Для возможности формирования противоположно направленных сил катушки электромагнитов постоянного тока включены последовательно таким образом, что они могут формировать в поперечном направлении пространства реакционной камеры смежно расположенные и противоположно направленные пучки магнитной индукции, которые при взаимодействии с магнитным потоком от тока во вторичном контуре обеспечивают генерирование внутри обрабатываемого сырьевого матери-

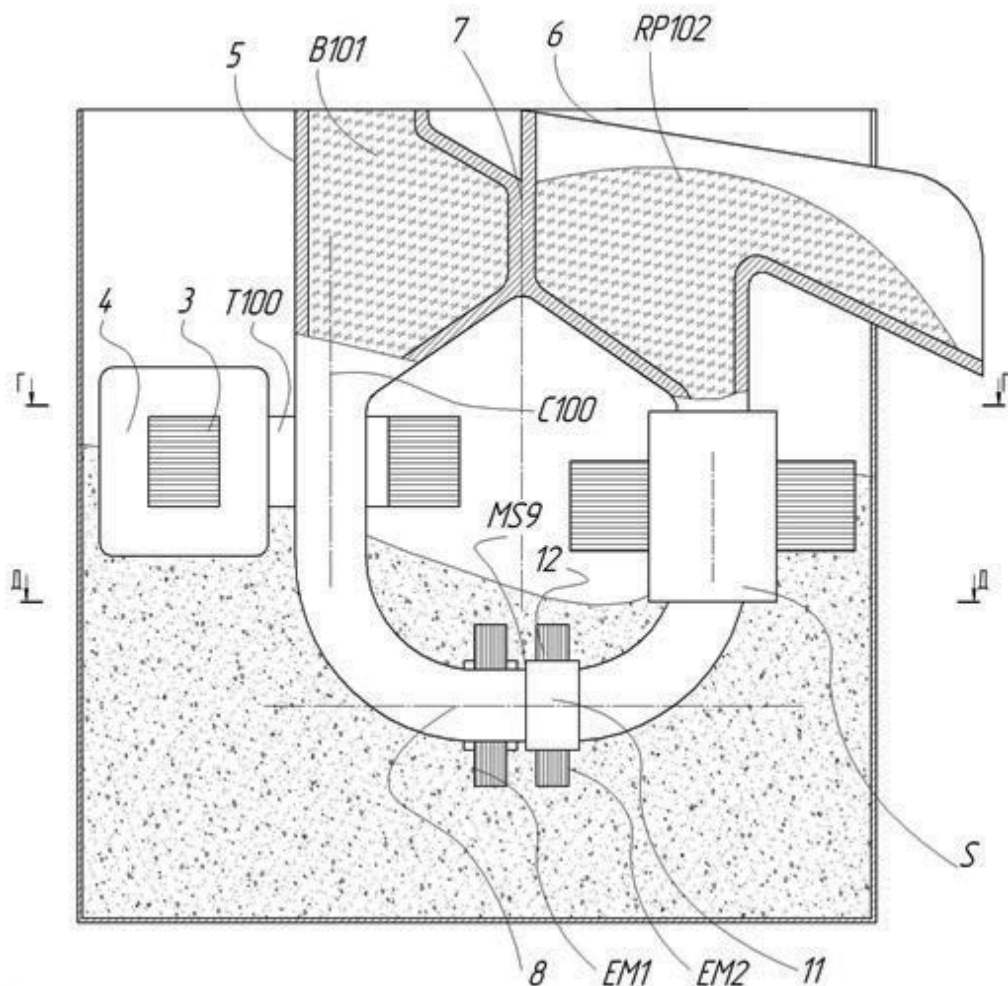


Рис. 1. Общий вид плавильной печи для обработки дисперсионных расплавов

ала ряда размольных сил F , которые, в свою очередь, приводят к взаимодействию между собой частиц твердого материала в расплавленной среде.

Как показано на рис. 4, два пучка магнитной индукции при взаимодействии с током во вторичном контуре обеспечивают генерацию в сырьевом материале двух размольных сил F_1 и F_2 . Они действуют так, что образуют в реакционной камере область встречных столкновений, обозначенных как «Collision area», в которой происходит ударное взаимодействие твердых частиц, их измельчение и помол.

Количество узлов MS9 и, соответственно, количество электромагнитов постоянного тока устанавливаются в зависимости от заданной производительности оборудования и конструктивных размеров трубного колена. Большее количество узлов MS9 вводят для повышения мощности реактора, и их число рассчитывают, исходя из характеристик перерабатываемого сырья, а также с учетом заданных качественных показателей получаемых из нее продуктов.

Основными конструктивными деталями, из которых состоят вибраторы, входящие в узел MS9 (рис. 1, 2), являются электрическая катушка 9 и магнитопровод 10. Для удобства управления процессами возбуждения размольных сил F при переработке сырья электрические катушки магнитодинамических жерновов соединяются между собой последовательно и подключаются к регулятору постоянного напряжения. Следовательно, при наличии в устройстве большого количества магнитодинамических

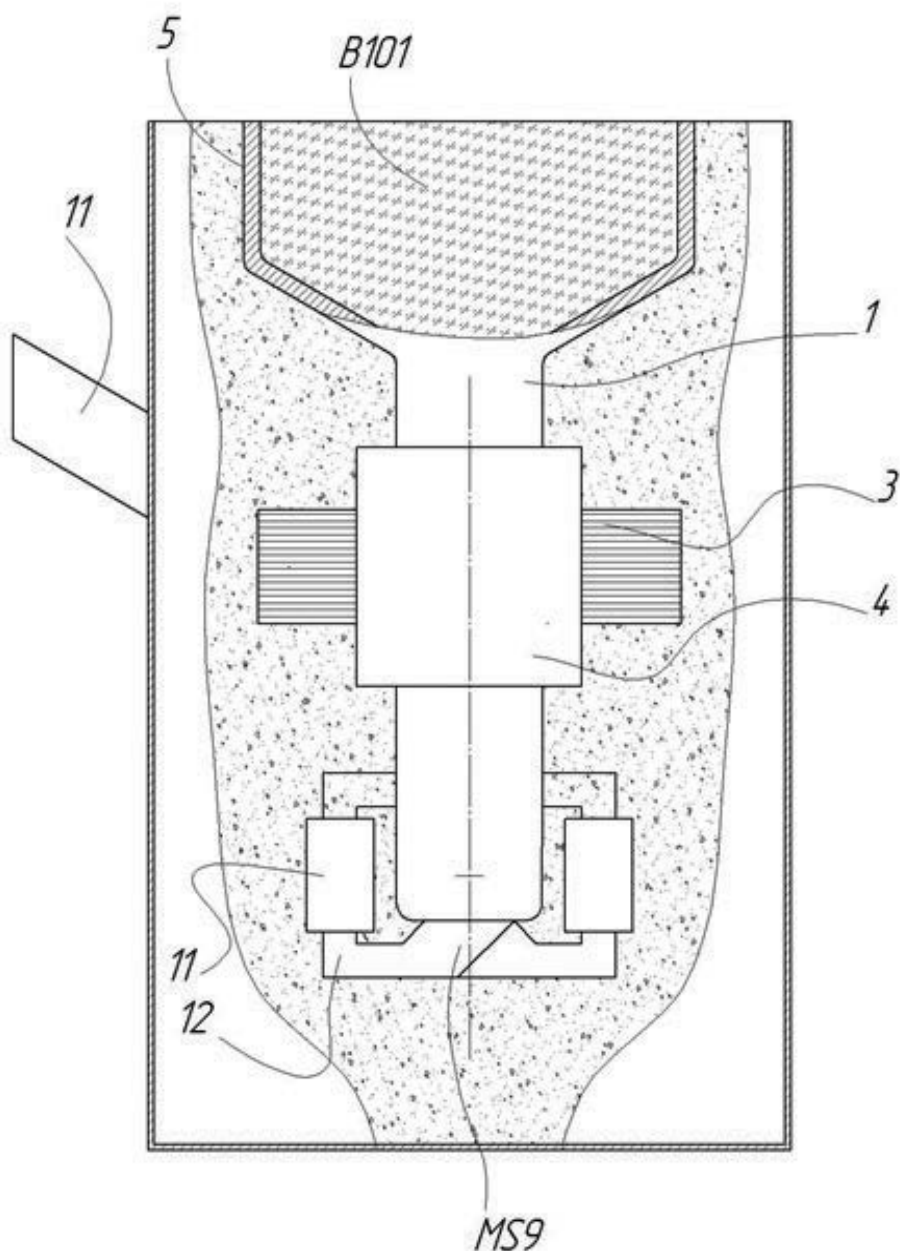


Рис. 2. Схема плавильной печи для обработки дисперсионных расплавов

жерновов, подключенных к регулятору постоянного напряжения (DC Regulator), упрощается регулировка силы тока, протекающего по катушкам 11 и, соответственно, обеспечивается гибкость и легкость управления генерированием размольных сил.

В целом, при наличии группы магнитодинамических вибраторов, пучки магнитной индукции B будут взаимодействовать с переменным током I , так что в электропроводящей среде будет генерироваться группа размольных сил $F_1, F_2, F_3, \dots, F_{i-1}, F_i$, количество которых будет соответствовать количеству i установленных магнитодинамических вибраторов, взаимодействующих с пространством реакционной камеры. При этом каждая из отдельно взятых размольных сил F_i представляет электродинамическую силу, а ее величина определяется характером взаимодействия тока в потоке электропроводящей сырья с пучком магнитной индукции на участке длиной l , который пронизывает пучок магнитной индукции:

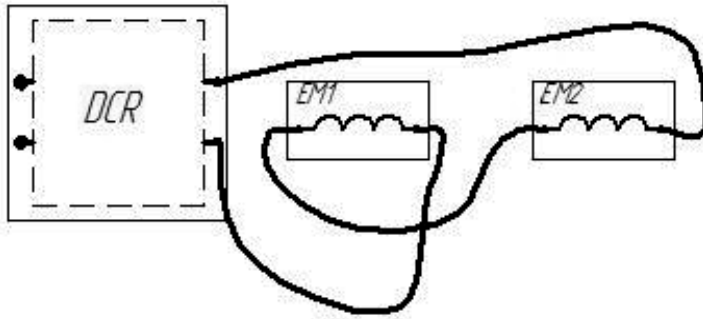


Рис. 3. Схема электрического соединения двух магнитодинамических вибраторов с регулятором постоянного тока

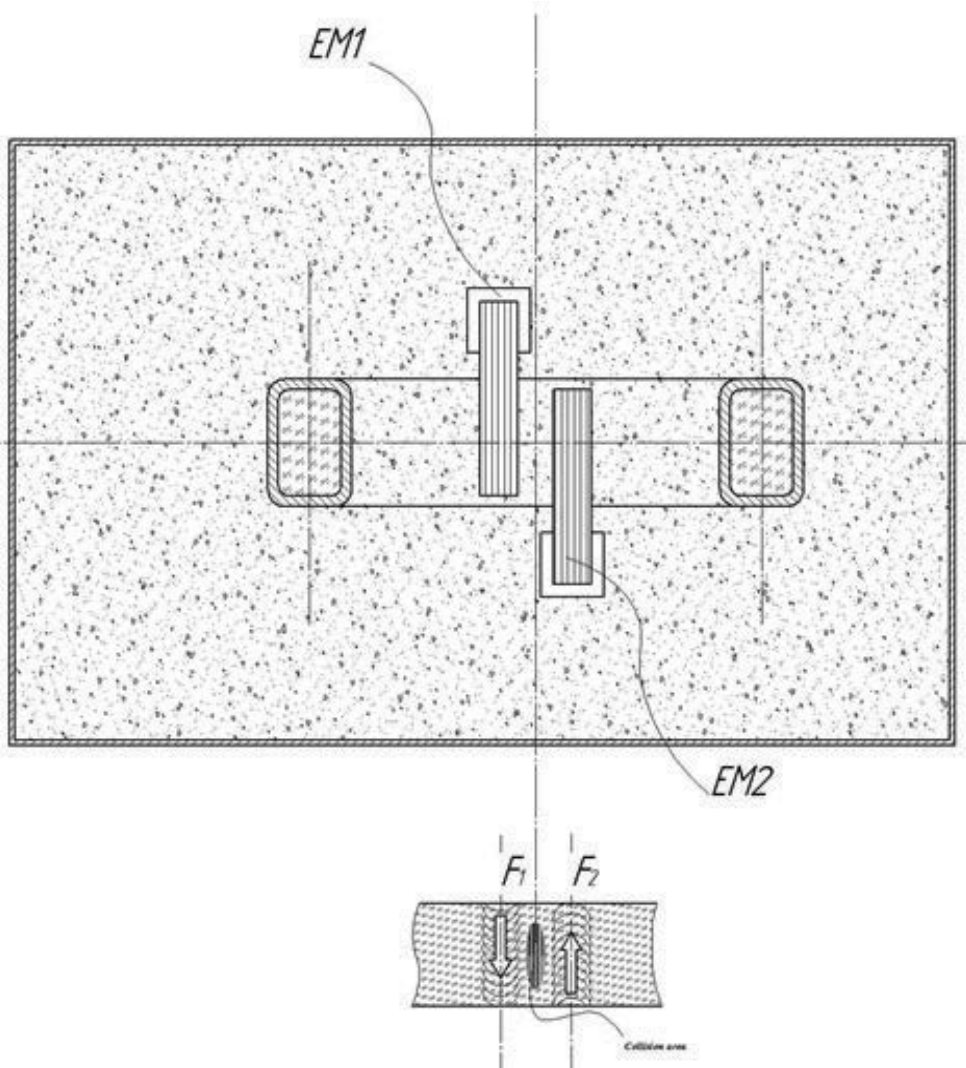


Рис. 4. Узел магнитодинамических вибраторов, состоящий из двух электромагнитов, и схема формирования активной зоны при взаимодействии двух сил

$$\vec{F}_i = \vec{B}_i \vec{I}l.$$

Для проведения отдельных технологических процессов магнитодинамические жернова могут состоять не только из электромагнитов постоянного тока, но они также могут быть собраны из постоянных магнитов, изготовленных из сплавов, имеющих магнитные свойства. Так, на рис. 5 показан вид плавильной печи с установленными на ней двумя подковообразными магнитами М1 и М2. Кроме подковообразных магнитов могут применяться плоские постоянные магниты, которые устанавливаются таким образом, чтобы они были способны генерировать встречно параллельные пучки магнитной индукции.

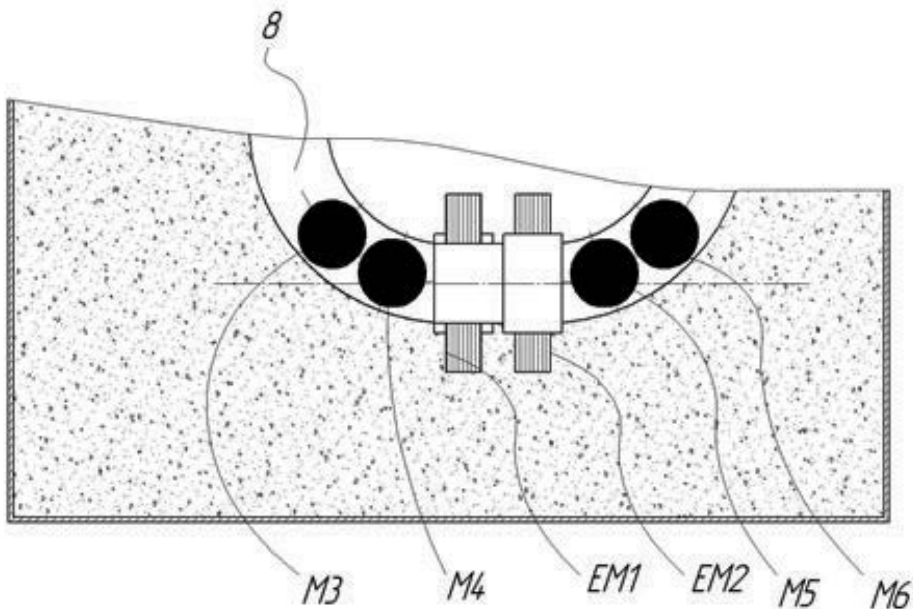


Рис. 5. Узел магнитодинамических вибраторов, состоящий из комбинации двух электромагнитов и четырех постоянных магнитов, установленных в зоне реакционной камеры

В качестве примера на рис. 5 показан узел реакционной камеры 8 с установленными двумя жерновами на базе электромагнитов постоянного тока ЭМ1, ЭМ2 и четырьмя жерновами на базе постоянных магнитов М3, М4, М5, М6. Вместе они обеспечивают последовательное возбуждение цепи областей встречных столкновений как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях.

При подключении электрического питания на силовой трансформатор Т100 и магнитодинамический вибратор начинается процесс разогрева емкости С100, и вместе с ней разогревается сырье В101, которое загружено в емкость. После перехода части сырья, находящегося в реакционной камере, в жидкое состояние начинается интенсивная обработка сырья магнитодинамическими вибраторами. Твердые куски сырья, находящиеся в жидкой фазе, сталкиваются, трутся и измельчаются. Расплавленный металл оседает на дно емкости и в процессе обработки сырьевого материала постепенно накапливается так, что образует столб жидкого расплава.

Шлак, освобождающийся от металлических частиц, всплывает и удаляется через шлаковый желоб 6. Процесс переработки сырьевого материала в печи может носить

непрерывный характер: в загрузочную камеру 5 подается сырьевой материал, а выпуск переработанных шлаков RP102 (рис. 1) осуществляется через шлаковый желоб 6. Периодически в процессе накопления жидкого металла в средней зоне трубного колена проводится его выпуск через сливной патрубок 11, для чего периодически включают статор S.

Например, при переработке отходов, содержащих свинец, основным сырьем для его получения является отработанные пластины аккумуляторных батарей, а также хрустальное стекло, которое содержится в кинескопах мониторов, телевизоров и рентгеновских трубках. Утилизация сырья, содержащего оксиды свинца, позволяет защитить окружающую среду от вредных веществ и предотвратить токсическое заражение почвы.

Такая переработка предусматривает проведение вначале восстановительной плавки лома, состоящего из сухих пластин аккумуляторных батарей. По мере накопления в реакционной камере «болота» из расплавленного свинца добавляют бой свинцового стекла, смешанного с добавками, содержащими углерод. При этом протекают два процесса восстановления и экстракции Pb из частиц стекла в жидком свинцовом болоте. Реакции протекают в энергосберегающем режиме без расплавления частиц стекла. Физическое воздействие магнитодинамических жерновов приводит к столкновению частиц стекла, температурных расширений и раскалывания. Шлак выпускают во внешний отстойник, из которого он идет на дальнейшую переработку.

Очищенный свинец разливается в формы, куда также добавляется каустическая сода. Этот компонент позволяет окончательно избавиться от примесей, оставшихся в свинце после проведенных очисток: свинец будет иметь повышенный уровень чистоты.

Такая утилизация в комплексной технологии переработки пластин свинцовых аккумуляторов и экстракции свинца из стекла кинескопов и рентгеновских трубок позволяет нейтрализовать все их вредные компоненты, не нанося при этом экологический ущерб окружающей среде.

References

1. Mohand N. Jawad , Jabir K. Tahir and Sattar I. Musa (2008) Design and Application of Medium Frequency Coreless Induction Melting Furnace for Aluminum. Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 3, Issue 6, pp. 440–442 [in English].
2. Pat. CN105043097 (A). Energysaving steel housing stove. 2015.11.11, nomer zayavki: CN20151342991 20150619. MPK: F27B14/02; F27B14/06; F27B14/08; F27B14/14.
3. Pat. KR100266858 (B1) – Induction furnace having a modular induction coil assembly 2000-09-15, nomer zayavki: KR19930028271 19931217, MPK: F27B3/00.
4. Pat. JP2004108666 (A) 2004-04-08 – Crucible-Shaped Induction Furnace, nomer zayavki JP20020272489 20020919. MPK: 27B14/08; F27D27/00; H05B6/18; H05B6/24.
5. Pat. WO2017009811 (A1) 2017-01-19 – Channel Type Induction Furnace, nomer zayavki WO2016B54249 20160715. MPK: F27B14/06; F27B14/08; F27D1/04; F27D11/06; F27D27/00.
6. Pat. GB2144527 (A) 1985-03-06 – Cnannel Type Induction Furnace, nomer zayavki GB19840016441 19840628 .MPK: B22D35/00; H05B6/16; H05B6/20. (IPC1-7): F27B14/08; F27D11/06.
7. Pat. RU2185583 (C2) 2002-07-20 – Channel Type Insuction Furnace, nomer zayavki RU20000110705 20000428. MPK: F27B14/08; F27D11/06.
8. Materuals Recovery From Waste Cathode Ray Tubes (CRTS) Project code: GLA15-006 Published by: The Waste & Resources Action Programme The Old Academy, 21 Horse Fair, Banbury, Oxon OX16 0AH, www.wrap.org.uk, WRAP Business Helpline: March 2004.
9. Report Prepared Byicer For Dti, AUGUST 2003 GW-12.10-130: New Approach To Cathode Ray Tube (CRT) RECYCLING.
10. Kang, H. Y., Schoenung, J. M. (2005) Electronic waste recycling: A review of US infrastructure and technology options. Resou.r Conserva.t Recycl, Vol. 45, pp. 368–400 [in English].
11. Feasibility of lead extraction from waste Cathode-Ray-Tubes (CRT) funnel glass through a lead smelting process: Waste Management, Vol. 57, November 2016, pp. 198–206 [in English].
12. Extraction of metallic lead from cathode ray tube (CRT) funnel glass by thermal reduction with metallic iron. Environmental Science and Technology, Vol. 47, no. 17, pp. 9972–9978, 2013. [in English].
13. Pat. US2015232962 (A1) 2015-08-20 – Method Fot Recovering Lead From Lead-Containing

Discarded Electronic Waste Cathode Ray Tube Glass, nomer zayavki US201214428517 20121017 MPK, C22B1/24; C22B13/02; C22B7/00.

14. Pat. JP2016130335 (A) 2016-07-21 – Method And Appartus For Separating Lead Fron Ead Glass, nomer zayavki JP20150004356 20150113 MPK: B09B3/00; C22B13/02; C22B5/10; C22B7/00.

Received 10.01.2019

A. М. Верховлюк*, д-р техн. наук, заст. директора, e-mail: vam@ptima.kiev.ua

П. В. Русаков*, канд. техн. наук, e-mail: prmarus@ukr.net

В. Л. Лахненко*, канд. техн. наук, вч. секретар, e-mail: lakhnenko@ptima.kiev.ua

Р. В. Петровський*, аспірант, e-mail: ruslan.p@galcat.com

І. Ф. Червоний, д-р техн. наук, проф., e-mail: rot44@yandex.ru

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Київ

ПРОЦЕС ОДЕРЖАННЯ ВТОРИННИХ КОЛЬОРОВИХ СПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНДУКЦІЙНОЇ ПЛАВКИ

Розглянуто проблеми переробки вторинних відходів кольорових металів з використанням індукційної плавки. Показано нову конструкцію печі, що дозволяє здійснювати плавку, дисперсний помел тугоплавких сполук, а також в режимі помольної екстракції відокремлювати важкі метали, які містяться в стеклах відпрацьованих електронних приладів і різних видах кристалевих стекол. Нова конструкція печі також ефективна для формування композиційних матеріалів і проведення операцій розплавлення, подрібнення і змішування окремих інгредієнтів. Функціональні можливості нового плавильного апарату дозволяють здійснювати регенерацію металів з окисних сполук, що знаходяться в скрапі, шлаках, важких стеклах та інших матеріалах, які складно переробляти з використанням високочастотних індукційних тигельних печей.

Ключові слова: індукційна плавка, канална піч, тигель, шихтові матеріали, важкі метали.

A. M. Verkhovlyuk*, Doctor of Engineering Sciences, Deputy Director, e-mail: vam@ptima.kiev.ua

P. V. Rusakov*, Candidate of Engineering Sciences, e-mail: prmarus@ukr.net

V. L. Lakhnenko*, Candidate of Engineering Sciences, Scientific Secretary, e-mail: lakhnenko@ptima.kiev.ua

P. V. Petrovskiy*, Postgraduate Student, e-mail: ruslan.p@galcat.com

I. F. Chervonyy, Doctor of Engineering Sciences, Prof., e-mail: rot44@yandex.ru

*Phisico-Technological Institute of Metals and Alloys NAS of Ukraine, Kyiv

THE PROCESS OF OBTAINING SECONDARY NON-FERROUS ALLOYS USING INDUCTION MELTING

The issues of recycling non-ferrous metal waste using induction melting are considered. A new design of the furnace is shown, which allows melting, dispersed grinding of refractory compounds, as well as in the mode of grinding extraction to separate heavy metals contained in the glasses of used electronic devices and various types of crystal glasses. The new furnace design is also effective for obtaining composite materials and carrying out operations for melting, grinding and mixing individual ingredients. The functionality of the smelting apparatus allows the regeneration of metals from oxide compounds found in scrap, slag, heavy glass, and other materials that are difficult to process using high-frequency induction crucible furnaces.

Keywords: induction melting, channel furnace, crucible, charge materials, heavy metals.