

## **Анализ методов плазменной переработки металлургических шлаков в электропечах постоянного тока**

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского "ХАИ"*

Показано, что проблема переработки шлаков остро стоит во всем мире и особенно актуальна для Украины. Решение данной проблемы возможно за счет технологий плазменно-дуговой переработки в печах постоянного тока. В современных условиях это позволит создать экономически выгодные и экологически безопасные технологии переработки различного рода шлаков.

**Ключевые слова:** плазменно-дуговая переработка, шлаки, МГД перемешивание.

### **Введение**

Образование шлаков – неизбежное следствие всех существующих пирометаллургических процессов. До настоящего времени основным способом утилизации металлургических шлаков остается складирование. Такой способ представляет угрозу для окружающей среды – большинство шлаков содержит существенное количество тяжелых металлов, которые могут выщелачиваться дождями.

Другим источником опасных для окружающей среды шлаков являются мусоросжигательные заводы (МСЗ). Технологии сжигания мусора с производством электроэнергии некоторое время рассматривались как наиболее перспективное направление в переработке муниципальных отходов. Опыт эксплуатации таких заводов выявил фундаментальные недостатки такой технологии. В отходящих газах МСЗ образуются крайне токсичные вещества – диоксины, высокомолекулярные смолы, пары металлов, что требует использования дорогостоящих систем газоочистки.

По данным Агентства по защите окружающей среды США (USEPA) по состоянию на 2000 г. на одного жителя в США образовывалось более 400 кг муниципальных отходов в год, а всего – свыше 120 млн. т. Из этого количества отходов на 102 мусоросжигательных заводах США было переработано только 35 млн. т (29 % от общего объема), что привело к образованию 8,75 млн т шлака и пепла (25 % от исходного объема переработанных отходов) [1].

Состояние вопроса, касающегося ситуации в Украине можно проиллюстрировать выдержкой из постановления Кабинета Министров Украины от 28 июля 1997 года «Про Програму використання відходів виробництва і споживання на період до 2005 року»: «Основное место в структуре экономики Украины сейчас и в ближайшей перспективе будет принадлежать отраслям и производствам, которые образуют сотни миллионов тонн отходов, что часто превышает объем полезной продукции».

Ежегодно в Украине образуется около 1 млрд т отходов производства и потребления. Отходы занимают площадь около 160 тыс. га, суммарный их объем достиг 25 млрд т. Они являются одним из наиболее существенных факторов загрязнения окружающей среды и негативного влияния практически на все его компоненты».

Таким образом, создание эффективных технологий переработки шлаков является остроактуальной мировой проблемой. Ключевым элементом таких технологий должно стать извлечение из шлаков опасных элементов, которые зачастую являются ценным сырьем. Полученные экологически безопасные материалы могут иметь самое широкое применение. А реализация веществ, содержащихся в шлаках, может сделать этот процесс не только экологически, но и экономически выгодным. Для создания таких процессов наиболее перспективным является применение плазменных технологий, что подтверждается целым рядом известных на сегодня примеров.

### Обзор известных результатов

**Восстановление кобальта из шлаков.** Одним из мировых лидеров в области создания технологий переработки металлургических шлаков является фирма Mintek (ЮАР). Для этих целей с конца 70-х годов фирма использует электропечи постоянного тока с перенесенными плазменными дугами [2]. Эти печи работают на постоянном токе. В качестве катода используется полый графитированный электрод с центральной подачей плазмообразующего газа, в качестве анода – ванна жидкого металла. Содержимое печи (расплав) является частью электрической цепи.

Печь состоит из облицованной огнеупором стальной цилиндрической оболочки и крышки (рис. 1). Крышка содержит центральное отверстие для графитового электрода и загрузочные отверстия, равномерно распределенные вокруг электрода. Металлоприемник выложен графито-магнезитными кирпичами, поверх которых уложен слой бронированных кирпичей (чтобы сделать их электропроводными). Металлоприемник находится в контакте с расплавом и связан с анодными шинами. Особенность источника питания – высокое значение напряжения (1200 В). Это продиктовано высоким сопротивлением шлака.

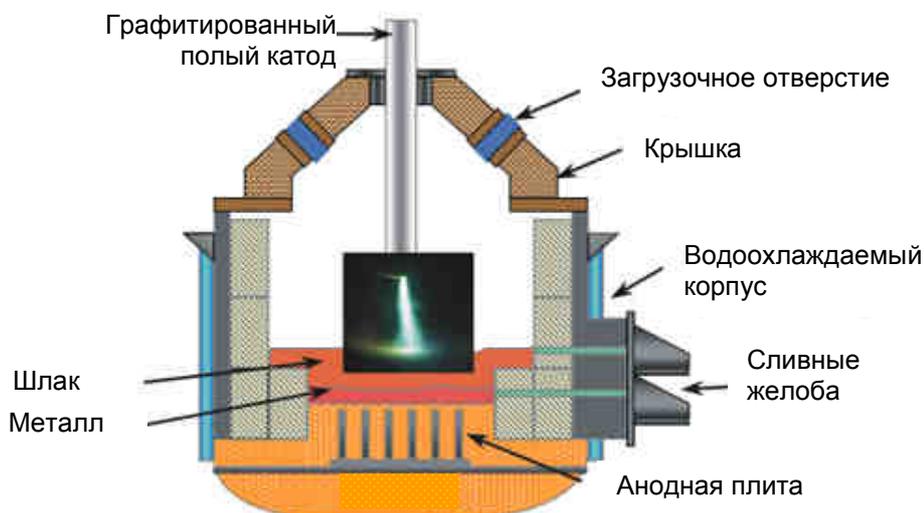


Рис. 1. Схема плазменно-дуговой печи фирмы Mintek

Описанная плазменно-дуговая печь используется в разработанном фирмой Mintek процессе Enviroplas, который успешно применяется для переработки различных металлургических шлаков. Так, например, в июле 1999 г. фирма Anglovaal Mining Limited (ЮАР) купила шлаковый отвал Nkana и объявила о планах вложения 100 млн долларов в завод для переработки шлака, имея целью

производство 4000 т кобальта и 3500 т меди в год. Данный отвал образовался в результате шестидесяти лет добычи медной руды и выплавки меди, занимает площадь в 1 кв. км и содержит приблизительно 20 млн т шлака, содержащего от 0,3 до 2,6 % кобальта.

Т.к. кобальт присутствует в шлаке в форме оксида, процент его восстановления был бы очень низким, если бы применялась переработка шлака в печи переменного тока, поскольку этот процесс предполагает использование механизма гравитационного осаждения. Для получения необходимого эффекта необходимо создать восстановительные условия в печи, и как показал опыт Mintek, эти условия могут быть достигнуты путем добавления углерода в шихту дуговой электропечи постоянного тока.

Углерод, добавленный к шлаку, восстанавливает содержащиеся в нем металлы в различной степени. Это позволяет организовать процесс таким образом, чтобы получать заданные значения восстановления в ходе плавки. В ходе отработки технологического процесса была достигнута степень восстановления кобальта свыше 80 % [3, 4]. Завод по переработке шлака с извлечением из него кобальта начал работу в 2001 году и до настоящего времени работает успешно.

**Восстановление цинка из шлаков и пыли производства стали.** На основе процесса Enviroplas разработаны технологии извлечения цинка и свинца из шлаков производства свинца и пыли дуговых сталеплавильных печей [5, 6]. Процесс позволяет достичь уровня извлечения цинка свыше 85 % при обработке свинцовых шлаков и 95 % при обработке пыли ДСП. Тесты подтвердили, что шлак после такой обработки соответствует нормам USEPA. Таким образом, в результате переработки крайне токсичных материалов удается получить два безопасных продукта – инертный шлак и гранулированный цинк. Для обеспечения экологической чистоты процесс требует применения современного оборудования для газоочистки.

При переработке цинкосодержащих шлаков и пыли (рис. 2) используется дополнительная обработка в печи предварительной плавки. Её проводят при пониженной температуре – 1200–1250 °С при обработке свинцового шлака и 1300–1400 °С при обработке пыли ДСП. Основная цель предварительной обработки – удаление лишней влаги, а также таких элементов как хлор, фтор, сера, кадмий, которые могут существенно затруднить выделение цинка в конденсаторе. В качестве восстановителя используется кокс или уголь.

При плавке необходимо обеспечить перемешивание расплава в печи с целью устранения местного перегрева в зоне привязки дуги и равномерного протекания реакций в расплаве. Для этого используется продувка расплава азотом, что повышает уровень извлечения цинка до 90–91 % при обработке свинцовых шлаков.

Следует отметить, в отечественной практике задачи переработки шлаков и пыли успешно решались специалистами ИЭС НАН Украины [7]. Однако, к сожалению, результаты этих работ не получили широкого распространения, хотя идеи, заложенные в этих устройствах по своему уровню превосходят решения реализованные фирмой Mintek.

**Восстановление никеля из шлаков.** На медно-никелевых комбинатах образующийся шлак в настоящее время перерабатывают с использованием флотации для восстановления остающейся в шлаке меди. Затем шлак сыпается в ямы и засыпается грунтом [3, 8].

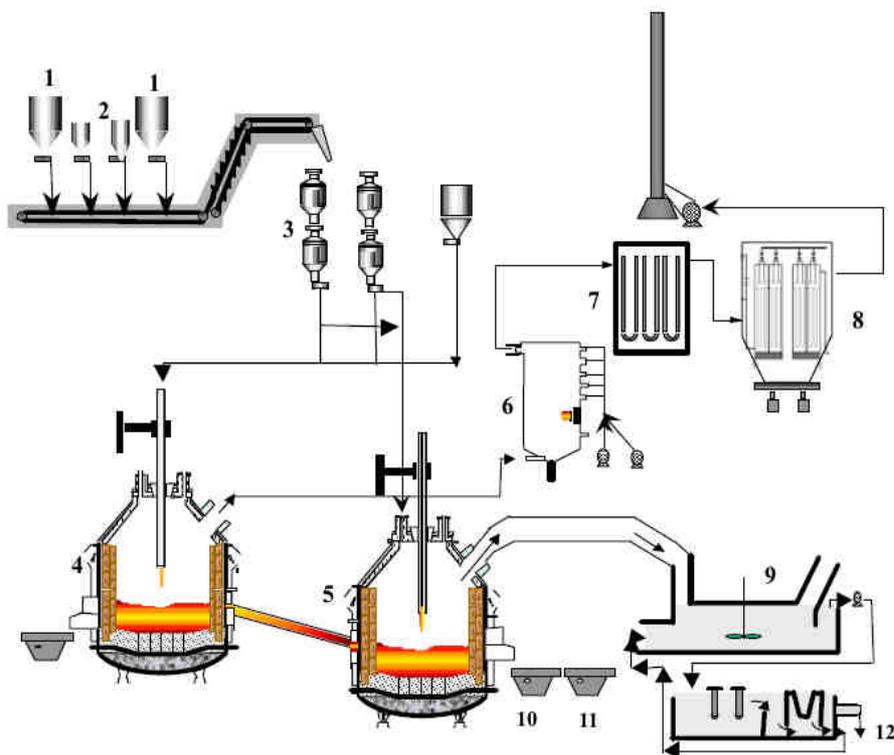


Рис. 2. Схема процесса Enviroplas переработки цинкосодержащих шлаков:  
 1 – подача шлака; 2 – подача флюса и кокса; 3 – смесители; 4 – плазменная печь предварительной плавки; 5 – плазменная печь; 6 – камера дожигания газов; 7 – теплообменник; 8 – газоочистка; 9 – конденсатор; 10 – металл; 11 – шлак; 12 – цинк

**Производство металлов платиновой группы.** Плазменно-дуговая электропечь постоянного тока – ключевой компонент процесса ConRoast [9], который рассматривается как существенное продвижение в развитии технологии получения металлов платиновой группы (МПГ). Существующие технологии производства МПГ основаны на традиционном процессе выплавки штейна, где МПГ сконцентрированы в сульфидной фазе и связаны сульфидами основного металла. Плавка сопровождается высокими выбросами  $SO_2$ . Процесс ConRoast решает задачу выброса  $SO_2$  полным окислительным обжигом сульфидного концентрата до выплавки в дуговой печи постоянного тока. Плавка окисленной шихты выполняется в плазменно-дуговой печи постоянного тока при восстановительных условиях. Опыты показали, что образующийся после обработки шлак имеет настолько низкое содержание МПГ, может сбрасываться на свалку или использоваться для других целей. Другой тип сырья с низким содержанием серы (например, низкосортные высокохромистые концентраты или возвратные хвосты), может вводиться в дуговую электропечь постоянного тока без предварительного обжига.

**Остекловывание шлаков мусоросжигания.** Во всех описанных выше процессах стоимость металлов, полученных в ходе переработки шлаков, превышала затраты на переработку. В случае переработки шлаков и пепла мусоросжигательных заводов такая цель не ставится. Необходимость такой переработки определяется экологическими требованиями. Поэтому считается, что если в результате обработки плазмой шлаки и пепел будут остеклованы, а

полученный материал будет безопасным с точки зрения действующих норм, поставленная цель будет достигнута.

Основным требованием к технологическому процессу переработки шлаков МСЗ является уничтожение всего содержащегося в них диоксида и фурана и предотвращение их повторного синтеза при последующем охлаждении отходящих газов. Для этого газы быстро охлаждаются в интервале температур от 600 до 200 °С. Кроме того требуется, чтобы процесс плавления шлака проходил в окислительной среде. Это требование обусловлено тем, что микрочастицы углерода являются катализаторами синтеза диоксинов. Поэтому считается, что восстановление потенциально ценных металлов из шлаков МСЗ неоправданно, т.к. этот процесс сопряжен с добавлением в шихту углерода в качестве восстановителя [10]. Такой вывод убедительно опровергается описанными выше результатами работ по плазменному восстановлению цинка, в которых проблема была решена введением предварительной обработки шихты.

Разработке плазменных технологий нейтрализации отходов МСЗ посвящено большое количество исследований, и технологии уже перешли в область промышленных применений, главным образом в Японии, где проблема переработки таких шлаков стоит наиболее остро. При переработке используются как металлические водоохлаждаемые плазменные горелки [11, 12], так и полые графитовые электроды [13].

Для горелок с охлаждаемыми электродами ресурс работы не может быть обеспечен на должном уровне из-за частых прожогов сопел паразитными дугами и попадания охлаждающей воды в печное пространство [14]. Поэтому на современном этапе до создания надежных водоохлаждаемых плазменных горелок для решения проблемы переработки шлаков оправдано использование графитированных электродов. Для этих целей перспективным выглядит применение плазменно-дуговых нагревателей (ПДН) комбинированного типа на основе коаксиально расположенных графитированных электродов, предложенных в ИЭС НАН Украины [15, 16].

Таким образом, на сегодня чуть ли не единственным примером успешной реализации экономически выгодной переработки шлаков являются результаты фирмы Mintek. Промышленные технологии плазменной переработки шлаков, реализованные на ряде предприятий Японии, Франции, Швеции вряд ли можно считать оптимальными, поскольку при их реализации в шлаке остается большое количество ценных металлов. По крайней мере, часть этих металлов могла бы быть извлечена на основе двухэтапного процесса типа Enviroplas. В свою очередь установки Mintek также не лишены недостатков. Это в первую очередь высокий уровень напряжения. Необходимость продувки расплава азотом усложняет технологический процесс и оборудование и снижает эффективный КПД. Тем не менее, объединение описанных выше идей и их дополнение может, по мнению авторов, позволить создать значительно более эффективные и безопасные технологии переработки шлаков.

### **Перспективы совершенствования технологий плазменной переработки шлаков**

В качестве одной из таких новых идей в переработке шлаков могут рассматриваться дуговые печи постоянного тока нового поколения, разработанных фирмой «ЭКТА». Эти печи успешно применяются в литейном производстве и по ряду показателей превосходят современные аналоги [17, 18].

При создании печей за основу взята конструкция дуговой печи без водоохлаждаемых элементов под футеровкой подины. Для подвода тока к шихте используются подовые электроды в виде стальных листов в глубине футеровки, приваренные к медно-стальной базе, охлаждение которой вынесено за кожух подины. Для защиты подового электрода от пробоя на кожух печи между подовым электродом и кожухом установлена активная защита от пробоев, связанная с системой сигнализации и отключения источника электропитания.

Уникальной особенностью печей «ЭКТА», делающих перспективными для использования при переработке шлаков, является применение магнитогидродинамического (МГД) перемешивания расплава [19]. Этот эффект достигается за счет растекания тока от опорного пятна дуги к расположенным на периферии ванны подовым электродам (рис. 3а). Взаимодействие горизонтальной и вертикальных составляющих тока с развиваемым электромагнитным полем вызывает торoidalное перемешивание расплава в вертикальном сечении и вращательное движение в горизонтальном. Система управления током дуги удерживает постоянную форму перемешивания, регулирует его интенсивность, устраняет вихревые потоки расплава над подовыми электродами (рис. 3б и 3в).

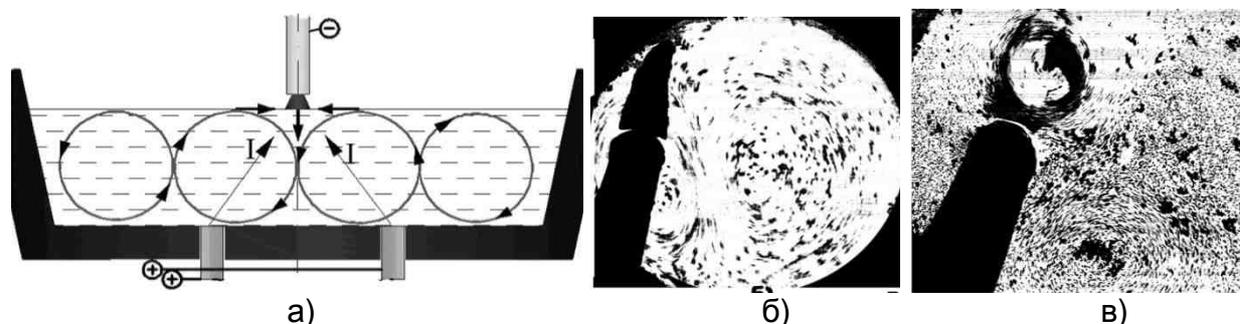


Рис. 3. Схема работы печи с МГД перемешиванием расплава (а) и вид на расплав со стороны электрода с включенным (б) и отключенным (в) перемешиванием

МГД перемешивание и управление расплавлением шихты предотвращает локальный перегрев металла. Об эффективности такого способа можно судить хотя бы по тому, что в дуговых печах с МГД перемешиванием успешно производят плавку алюминия, что в обычных дуговых печах невозможно. Стабилизация тока подавляет колебания мощности дуги, что позволяет избегать колебаний температуры печных газов и предотвращает поступление в печь кислорода. Состав печных газов при этом зависит от продуктов плавки. Практическое отсутствие кислорода и высокая температура печных газов препятствует окислению металла, образованию окислов азота, цианидов, диоксинов, фуранов.

Указанные преимущества печей с МГД перемешиванием могут решить целый ряд проблем установок для плазменной переработки шлаков. Еще ярче они должны проявиться при совместном использовании с плазменно-дуговым нагревателем, применение которого может существенно снизить напряжение, необходимое для инициации и поддержания дуги на начальном этапе процесса. В будущем возможна замена ПДН с коаксиальными электродами на плазменные генераторы с охлаждаемыми электродами при условии устранения их конструктивных недостатков. Следует заметить, что при использовании углеводородов в качестве плазмообразующих газов можно подобрать условия, при которых графитированный электрод будет работать в режиме

самовосстановления. Это существенно повысит конкурентные преимущества ПДН с коаксиальными электродами.

Для создания эффективных установок и технологий для плазменно-дуговой переработки шлаков необходимо решить несколько основных задач:

– доработать алгоритмы управления дугой для печей с МГД перемешиванием расплава с учетом особенностей переработки различного рода шлаков и реализовать их в виде интегрированной автоматизированной системы управления;

– доработать источники питания дуговых печей с МГД перемешиванием для обеспечения работы на режимах, характерных для плазменной переработки шлаков;

– доработать конструкцию ПДН с графитированными электродами с целью повышения их прочности к вибрационным нагрузкам; параллельно следует продолжать работы по созданию высокоресурсных ПДН для задач переработки отходов;

– разработать комплекс автоматизированного оборудования для реализации технологий переработки шлаков, включая эффективные системы газоочистки.

Решение этих задач требует выполнения большого объема работ в рамках комплексной программы. Однако на сегодняшний день перспективы их успешного выполнения выглядят вполне реальными. Такая уверенность основана на том, что большинство оборудования из предлагаемой технологической цепочки уже создано и требует только интеграции, а возможность экономически эффективной и экологически безопасной переработки шлаков на сегодня является доказанной.

### **Выводы**

1. На основе технологий плазменно-дуговой переработки в печах постоянного тока в современных условиях возможно создание экономически выгодных и экологически безопасных технологий переработки различного рода шлаков. При этом возможно решение задачи более глубокой переработки шлаков мусоросжигания с извлечением из них ценных металлов.

2. Наиболее перспективной схемой для плазменной обработки шлаков является дуговая печь с МГД перемешиванием расплава в комплекте с плазменно-дуговыми нагревателями комбинированного действия. На первом этапе создания такого оборудования целесообразно использование ПДН с графитированными электродами.

3. Проблема переработки шлаков остро стоит во всем мире и особенно актуальна для Украины. Решения этой проблемы на основе предложенных подходов возможно в рамках комплексной государственной программы.

### **Список литературы**

1. City of Honolulu review of plasma arc gasification and vitrification technology for waste disposal [Text] : final report / R.W. Beck Inc. – Honolulu, 2003. – 159 p.

2. Jones, R.T. Plasma Developments in Africa [Electronic resource] / R.T. Jones, N.A. Barcza, T.R. Curr // World progress in plasma applications : Proceedings of Second Int. Plasma Symposium, Palo Alto, California, 9-11 February 1993. – Palo Alto, 1993. – Режим доступа: <http://www.mintek.co.za/Pyromet/Plasma/Plasma.htm>.

3. Jones, R.T. Recovery of cobalt, nickel, and copper from slags, using DC-arc furnace technology [Text] / R.T. Jones, D.A. Hayman, G.M. Denton // International

Symposium on Challenges of Process Intensification : Proceedings of 35th Annual Conf. of Metallurgists, Montreal, Canada, 24-29 August 1996. – Montreal, 1996. – P. 451 – 466.

4. Jones, R.T. Using a Direct-Current Arc Furnace to recover cobalt from slags [Text] / R.T. Jones, A.C. Deneys // Journal of Minerals, Metals and Materials Society. – 1998. – Vol. 50, No. 10. – P. 57 – 61.

5. Schoukens, A.F.S. Pilot-plant production of Prime Western grade zinc from lead blast-furnace slags using the Enviroplas process [Text] / A.F.S. Schoukens, G.M. Denton, R.T. Jones // Recycling of Metals and Engineered Materials : Proceedings of the Third Int. Symposium, Point Clear, Alabama, 12-15 November 1995. – Point Clear, 1995. – P. 857 – 868.

6. Abdel-latif, M.A. Fundamentals of zinc recovery from metallurgical wastes in the Enviroplas process [Text] / M.A. Abdel-latif // Minerals Engineering. – 2002. – Vol. 15, Iss. 11. – P. 945 – 952.

7. Некоторые особенного плазменно-дуговой технологии извлечения металлической составляющей из шлаков металлургического производства и пылевидных отходов шлифования [Текст] / Г.А. Мельник, О.С. Забарило, А.А. Поболь [и др.] // Проблемы специальной электротехнологии. – 1997. – № 3. – С. 71 – 77.

8. Jones, R.T. Economic and environmentally beneficial treatment of slags in DC arc furnaces [Text] / R.T. Jones // Molten Slags, Fluxes and Salts : Proceedings of the VII Int. Conference, Cape Town, South Africa, 25-28 January 2004. – Johannesburg, 2004. – P. 363 – 376.

9. Jones, R.T. DC arc smelting of difficult PGM-containing feed materials [Text] / R.T. Jones, I.J. Kotzé // Platinum Adding Value : Proceedings of the Int. Platinum Conf., Johannesburg, South Africa, 3-7 October 2004. – Johannesburg, 2004. – P. 33 – 36.

10. Neuschütz, D. Plasma processing of dusts and residues [Text] / D. Neuschütz // Pure and Applied Chemistry. – 1996. – Vol. 68, No. 5. – P. 1159 – 1165.

11. Klein, H. Thermische Aufarbeitung toxischer Stäube mit Plasmatechnik [Text] / H. Klein // Elektrowärme international. Edition B, Industrielle Elektrowärme. – 1992. – Vol. 50, No. 2. – P. B120 – B126.

12. Stüber, A. Processing tests of filter dusts from a waste incineration plant in a 600 kW plasma melting furnace [Text] / A. Stüber, A. Hauck, D. Neuschütz // Thermal Plasma Processes / ed. by D. Neuschütz. – VDI Verlag Düsseldorf, 1995. – P. 583 – 590.

13. Oberlin, C. Plasma processes for industrial applications. State of research and development activities undertaken by EDF [Text] / C. Oberlin // Journal of high temperature chemical processes. – 1994. – Vol. 3, No. 6. – P. 719 – 732.

14. Кривцов, В.С. Проблемы создания высокоресурсных сильноточных электродуговых плазмотронов [Текст] / В.С. Кривцов, С.И. Планковский // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 7 (23). – С.7 – 21.

15. Электрические и тепловые параметры плазменно-дугового нагрева объектов комбинированной дугой [Текст] / Ю.В. Латаш, О.С. Забарило, С.А. Донской [и др.] // Проблемы специальной электротехнологии. – 1992. – № 2. – С. 71 – 78.

16. Параметры электрической дуги плазменно-дугового нагревателя с полыми коаксиальными электродами [Текст] / В.И. Кулинич, В.А. Матвиенко, О.С. Забарило, Г.А. Мельник // Проблемы специальной электротехнологии. –

1995. – № 4. – С. 49 – 55.

17. Афонаскин, А.В. Результаты первого этапа освоения дугового плавильного агрегата постоянного тока нового поколения на ОАО «Курганмашзавод» [Текст] / А.В. Афонаскин, В.С. Малиновский // Литейное производство – 2000. – № 11. – С. 20 – 23.

18. Сравнение характеристик дуговых печей постоянного тока нового поколения и индукционных печей [Текст] / В.С. Малиновский, В.Д. Малиновский, Л.В. Ярных [и др.] // Литейщик России. – 2002. – № 1. – С. 24 – 27.

19. Пат. 2104450 РФ, МПК<sup>7</sup> F27B3/08, C22B9/21. Способ электроплавки и дуговая печь для его осуществления [Текст] / Малиновский В.С.; заявитель и патентообладатель Малиновский В.С. – № 95100068/02; заявл. 04.01.1995; опубл. 10.02.1998, Бюл. № 4. – 3 с.: ил.

Поступила в редакцию 21.06.2016

## **Аналіз методів плазмової переробки металургійних шлаків в електродугових печах постійного струму**

Показано, що проблема переробки шлаків гостро стоїть в усьому світі й особливо актуальна для України. Вирішення даної проблеми можливо за рахунок технологій плазмово-дугової переробки в печах постійного струму. У сучасних умовах це дозволить створити економічно вигідні й екологічно безпечні технології переробки різного роду шлаків.

**Ключові слова:** плазмово-дугова переробка, шлаки, МГД перемішування

## **Analysis of Metallurgical Slag Plasma Processing in Electric DC Furnaces**

It is shown that the problem of slag processing is acute in the world and is particularly relevant for Ukraine. Solving this problem is possible due to the technology of plasma arc processing DC furnaces. Under present conditions it will create a cost-effective and environmentally friendly technology for processing different kinds of toxins.

**Keywords:** plasma-arc processing, slag, MHD stirring

### **Сведения об авторах:**

**Планковский Сергей Игоревич** – д-р техн. наук, профессор, декан факультета самолетостроения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.

**Брега Дмитрий Андреевич** – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.

**Цегельник Евгений Владимирович** – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.

**Алкиб Ахмет М.** – аспирант кафедры технологии производства летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский Авиационный Институт», Украина.