



УДК 669.187.826

НОВАЯ ПЕЧЬ VT02 ДЛЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ ПЛАВКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ, РАЗРАБОТАННАЯ В МК «АНТАРЕС»

О. Е. Собко-Нестерук, Н. Г. Третьяк, Н. В. Чайка,
Ю. В. Непорожний, В. Н. Васюра

Обобщен опыт МК «АНТАРЕС» в создании и развитии электронно-лучевых печей для металлургического производства титана. Рассмотрены некоторые технические и технологические аспекты организации производства слитков и слябов (слитки прямоугольной формы) на основании технологии электронно-лучевой плавки. Представлены технические характеристики новой печи VT02. Изложены новые принципы проектирования вакуумных камер, реализованные при разработке печи VT02, которые обеспечивают более рациональное использование их объема, сокращение массы камер, увеличение жесткости и безопасности при эксплуатации. Проведено сравнение технических и экономических параметров существующей печи VT01 и новой VT02.

Experience of IC «Antares» in the design and updating of electron beam furnaces for metallurgical production of titanium is generalized. Some technical and technological aspects of management of production of ingots and slabs (rectangular ingots) on the basis of electron beam melting technology are considered. Technical characteristics of the new furnace VT02 are presented. New principles of designing the vacuum chambers, realized in the design of furnace VT02, are given, thus providing the more rational use of their volume, reduction in mass of chambers, increase in their rigidity and safety in service. Comparison of technical and economical parameters of existing VT01 and new furnace VT02 was made.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; вакуум; печь для плавки; вакуумная камера; электронные пушки; слитки; слябы; титан

Интерес многих отраслей промышленности к электронно-лучевой плавке (ЭЛП) титана и его сплавов объясняется главным образом высоким качеством литого металла, которое может быть получено за один переplав, по сравнению с широко распространенным способом вакуумно-дуговой плавки. Среди основных преимуществ ЭЛП можно выделить следующие [1–4]:

отсутствие операции прессования расходоуемого электрода, возможность использования лома, стружки, губки;

производство слитков не только круглого сечения, но и слябов-слитков прямоугольного сечения, используемых непосредственно для производства листового проката;

экономия меди при изготовлении проходных кристаллизаторов, по сравнению с глухонными на всю длину слитка;

повышение структурной и химической однородности слитков за счет применения промежуточной емкости (холодного пода), что позволило пол-

ностью разделить процессы плавления и кристаллизации и обеспечить удаление в процессе плавки включений высокой и низкой плотности;

высокая концентрация энергии и управляемость электронного луча, что дает возможность регулировать в широких пределах температурные условия в зоне плавления и кристаллизации, влиять на кинетику реакций рафинирования и процессов диффузии и дегазации в процессе плавки.

Расширению объемов выплавки титана и его сплавов способом ЭЛП способствовало создание новых универсальных установок, способных производить товарные слитки из первичного сырья. Основной тенденцией в создании современного оборудования для ЭЛП является разработка мощных установок, позволяющих выплавлять слитки до 10 т и более, что способствует повышению экономических показателей процесса [4].

С учетом накопленного опыта в области электронно-лучевой металлургии и запросов потребителей в МК «АНТАРЕС» разработана новая печь VT02 с улучшенными технико-экономическими показателями.



Сравнительные технические характеристики электронно-лучевых печей ВТ01 и ВТ02

Параметр	Печь ВТ01					Печь ВТ02					
Размеры получаемых слитков и слэбов:											
длина, мм	4100	4100	3900	4100	4100	5100	5100	5100	5100	5100	5100
ширина, мм	1325	1325	1325	—	—	1325	1325	1325	—	—	—
толщина, мм	190	260	420	—	—	190	260	420	—	—	—
диаметр, мм	—	—	—	640	820	—	—	—	640	820	950
масса, кг	4640	6350	9720	5930	9720	5770	7900	12770	7370	12100	15270
Максимальная масса заготовки (по брикетированной титановой губке), кг	10 000					16 800					
Производительность по титану при максимальной массе слитка, т/год	2 500					3 000					
Скорость подачи шихты, мм/мин	3...30					3...30					
Скорость вытягивания слитков, мм/мин	3...30					3...30					
Остаточное давление в рабочем пространстве, Па	1,33...0,133					1,33...0,133					
Электронные пушки:											
количество, шт.	7					7					
ускоряющее напряжение, кВ	30					30					
Установленная мощность, кВт:											
вакуумного оборудования	340					340					
приводов	60					60					
системы анодного питания пушек	2800					2800					
Давление охлаждающей воды, МПа	3...4					3...4					
Расход охлаждающей оборотной воды, м ³ /ч, не более	120					250					
Номинальное напряжение питающей сети трехфазного переменного тока частотой 50 Гц с заземленной нейтралью, В	380					380					

Технические и технологические характеристики печи ВТ01. Основу промышленного производства компании в настоящее время составляют две вакуумные электронно-лучевые печи ВТ01 с установленной мощностью 2,5 МВт и проектной производительностью 2,5 тыс. т в год каждая.

Технология переплава в электронно-лучевых печах типа ВТ01 позволяет следующее:

реализовывать плавильный процесс с холодным подом и максимальным эффектом рафинирования;

осуществлять экономичный процесс плавки за счет встречной горизонтальной подачи при одновременном плавлении расходоуемых заготовок;

переплавлять некомпактную, брикетированную или прутковую шихту при минимальных затратах на ее предварительную подготовку;

вести высокопроизводительный процесс плавки за счет использования электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) мощностью 400 кВт;

управлять процессом кристаллизации с целью получения заданной структуры слитков.

Конструктивно электронно-лучевая печь ВТ01 состоит из вакуумной плавильной камеры диамет-

ром 3 м, высотой 1,8 м, к верхней части которой пристыковывается плита электронных пушек ВТР, к нижней части — модуль технологической оснастки, а также камера слитка с механизмом вытягивания на подвижной платформе, с двух сторон на уровне плавильной камеры расположены две загрузочные камеры с механизмами подачи шихтовых материалов в зону плавки.

Технические характеристики печи ВТ02 в сравнении с печью ВТ01 приведены в таблице.

Для проведения регламентных работ в промежутках между плавками блок электронно-лучевого нагревателя и камера слитка разъезжаются относительно плавильной камеры для обслуживания и подготовки печи к следующей плавке.

Важнейшей конструктивной и технологической особенностью печи ВТ01 является организация плавильного процесса, запатентованного компанией, со встречной подачей расходоуемых заготовок (шихты). Следует отметить, что встречная подача в зону плавки шихты для увеличения ее массы известна и была использована еще на электронно-лучевых печах ЭМО-200 и ЭМО-250 [5, 6]. Однако плавление

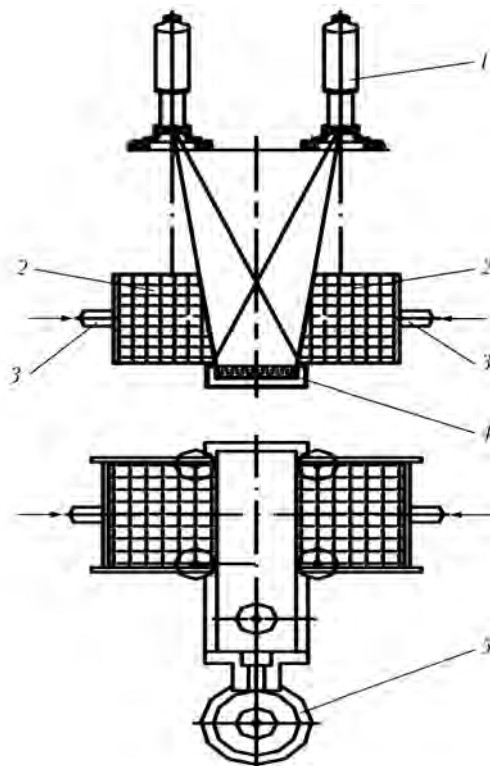


Рис. 1. Схема встречной подачи шихты с ее одновременным плавлением: 1 – электронная пушка; 2 – шихта; 3 – направление подачи; 4 – промежуточная емкость; 5 – кристаллизатор

шихты в кристаллизатор в этом случае осуществлялось последовательно.

В печи ВТ01 реализовано одновременное плавление шихты, подаваемой с двух сторон (рис. 1). Эта схема обеспечивает высокую производительность плавки, сокращение энергозатрат до 30 %, снижает до минимума разбрызгивание и безвозвратные потери, исключает возможность попадания брызг и шлаковых включений в кристаллизатор, уменьшает потери металла на испарение.

Использование электронных пушек ВТР обеспечивает высокую надежность и стабильность процесса плавки. Особенность пушек состоит в том, что для их работы не требуется высокий вакуум (0,133...1,33 кПа). Электронные пушки ВТР мощностью 400...600 кВт (рис. 2) созданы и запатентованы в 2001 г. МК «АНТАРЕС» совместно со специалистами Киевского национального технического университета Украины «КПИ» [7]. Электрическая схема питания электронных пушек организована по блочному типу: каждая пушка имеет отдельный источник высоковольтного питания, собранный на тиристорных преобразователях, что обеспечивает стабильную работу системы нагрева в целом. Управление движением электронных лучей по нагреваемой поверхности осуществляется от микропроцессоров с программным распределением мощности для создания требуемой формы зон нагрева. Установка ВТ01 оснащена системой контроля и записи основных параметров процесса плавки, которые регистрируются компьютером с выводом на печать в виде протокола плавки.

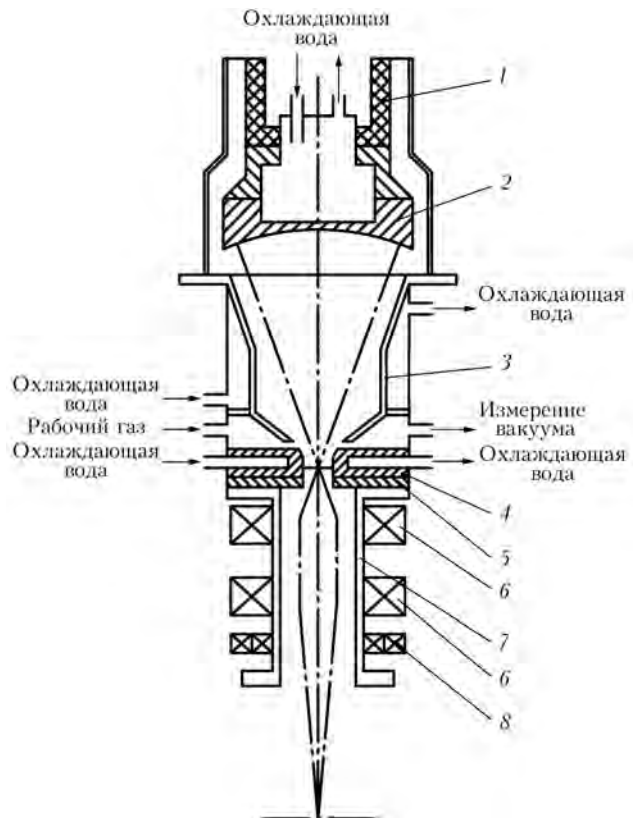


Рис. 2. Электронная пушка ВТР: 1 – изолятор; 2 – катод; 3 – анод; 4 – анодный фланец; 5 – экран; 6 – линза фокусирующая; 7 – лучепровод; 8 – катушка отклоняющая

Следует отметить, что работы по созданию производства, включая проектирование, изготовление, монтаж оборудования, запуск в эксплуатацию, были выполнены в течение 2,5 лет.

Химический состав слитков, полученных из губки марок ТГ-100–ТГ-130, соответствует маркам Grade 1, Grade 2 ASTM B348. Поставка слитков идет с обработкой поверхности. Толщина удаляемого слоя не превышает 5...6 мм. Большое внимание уделяется качеству слитков. В компании внедрена система менеджмента в соответствии с требованиями стандарта ISO 9001:2000. Контроль химического состава слитков с выдачей сертификата качества производится в заводской лаборатории. Лаборатория оснащена новейшими приборами для спектрального анализа «Spektromax» (Германия), аппаратурой контроля содержания газов (кислорода, азота, водорода и углерода) фирмы «Leco»



Рис. 3. Титановые слитки круглого и прямоугольного сечения (слябы)



(США). На двух печах ВТ01 в МК «АНТАРЕС» уже выплавлено более 5 тыс. т титановых слитков без рекламаций по качеству в соответствии с рыночными запросами заказчиков из многих стран мира. Внешний вид слитков приведен на рис. 3.

Коллективом МК «АНТАРЕС» разработана электронно-лучевая печь нового поколения ВТ02 установленной мощностью 3,2 МВт, годовой производительностью по титану до 3000 т. Схема печи ВТ02 представлена на рис. 4.

Конструктивные особенности вакуумных камер печи ВТ02. Входящие в состав электронно-лучевой печи вакуумные камеры плавки, слитка, загрузки и подачи шихты являются наиболее важными и трудоемкими узлами как в период разработки конструкторской документации, так и в процессе изготовления, испытаний, наладки и монтажа.

Конструкторские решения каждой из упомянутых вакуумных камер должны учитывать ряд специфических требований, от которых зависит обеспечение необходимых параметров печи и функционирование всех узлов, механизмов, энергетического комплекса, систем управления печи в процессе эксплуатации. При этом также необходимо обеспечить безопасную работу обслуживающего персонала в период изготовления, испытаний, наладки, монтажа и эксплуатации.

Применительно к разработке печи ВТ02 реализованы все упомянутые современные требования, предъявляемые к конструкциям вакуумных камер электронно-лучевых печей. Форма сечений вакуумных камер подачи шихты выбрана прямоугольной формы с размерами $H = 1000$ мм, $B = 1560$ мм. Это позволило вписать в это сечение фронты плавления с $H = 700$ мм и $B = 1020$ мм, которые превышают площади фронтов плавления предшествующих печей примерно в 1,5 раза.

Следует также отметить, что такая форма сечения и его размеры позволили максимально рационально скомпоновать механизм подачи шихты с ходом до 5700 мм и вместимостью шихты до 8,4 т в каждой вакуумной камере. Показатель вместимости шихты превышает показатели вакуумных камер подачи шихты существующих электронно-лучевых печей до 1,6 раза. Все вакуумные камеры электронно-лучевой печи характеризуются необходимой механической прочностью стенок с минимальными затратами металла для их изготовления. Это достигнуто в результате использования опыта проектирования вакуумных камер установок для электронно-лучевой сварки [8] с обоснованием выбора расчетных параметров сечений стенки и коробчатого сечения силового набора.

Повышенная жесткость стенок камер необходима в случае монтажа на них прецизионных механизмов (механизмов подачи шихты, вытягивания

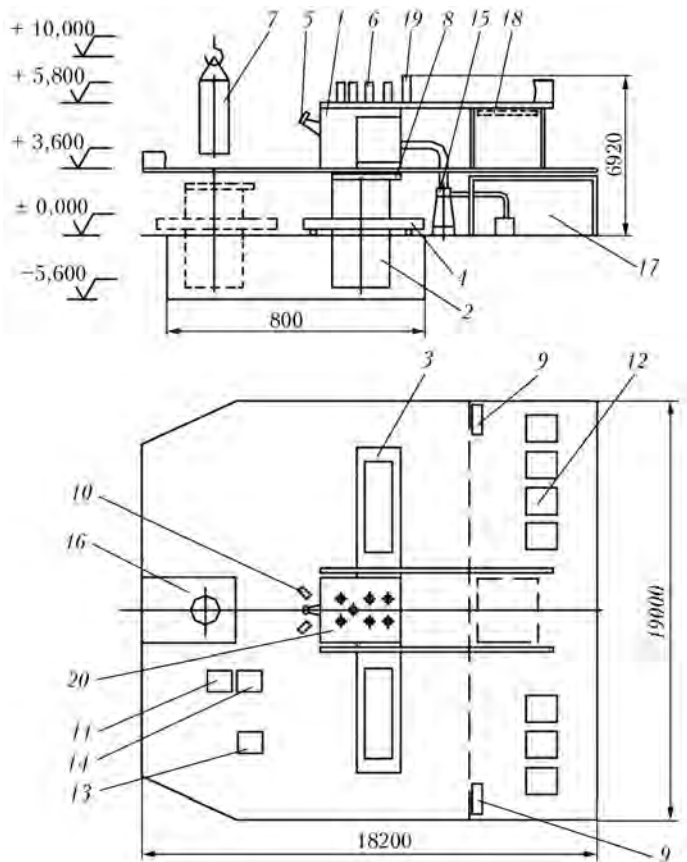


Рис. 4. Схема электронно-лучевой печи ВТ02: 1 – камера плавки; 2 – камера слитка; 3 – устройство подачи шихты (левое, правое); 4 – устройство передвижения камеры слитка; 5 – смотровая система; 6 – пушка электронная; 7 – выплавленный слиток; 8 – затвор; 9 – гидроблоки системы охлаждения; 10 – главный пульт управления; 11 – система управления вакуумом; 12 – высоковольтные источники питания; 13 – система управления приводами; 14 – система управления лучами и контроля параметров; 15 – система вакуумная; 16 – место выгрузки слитка; 17 – помещение механических вакуумных насосов; 18 – место отката плиты пушек для обслуживания; 19 – автономная система охлаждения пушек; 20 – плита пушек

слитка). Так, механизмы подачи и вытягивания слитков электронно-лучевой печи ВТ02 могут стабильно работать при максимальных деформациях до 0,8 мм на длине ходов толкателей шихты и траверсы поддона, равных 6550 мм.

Выбор толщины стенок вакуумных камер должен соответствовать требованиям биологической защиты персонала согласно нормам НРБ от воздействия рентгеновского излучения, возникающего при торможении ускоренных электронов на поверхности обогрева. В вакуумных камерах электронно-лучевой печи ВТ02 выбрана суммарная толщина стенок от 22 до 24 мм, что соответствует нормам НРБ при ускоряющем напряжении на катоде электронно-лучевых пушек до 50 кВ.

В случае отключения электропитания и выхода из строя системы охлаждения и остановки электронно-лучевой печи представляет опасность разгерметизация вакуумных разъемов вследствие последующего теплового разрушения резиновых и синтетических уплотнений. Для предотвращения развития таких нежелательных явлений все стенки



Рис. 5. Инверторные источники питания мощностью 500 кВт для питания электронных пушек установки ВТ02

вакуумных камер печи ВТ02 имеют большое расстояние между внутренней и внешней оболочками, что позволяет обеспечить большие объемы, заполненные водой. Объем воды печи ВТ02 составляет примерно 14 м^3 , масса камер — около 52 т.

Проведенная оценка изменения температуры охлаждающей воды в случае отказа системы охлаждения при массе слитка 10 т показала, что значения температуры воды не превышают $100 \text{ }^\circ\text{C}$, что не вызовет аварийной ситуации в работе печи [9].

Для повышения надежности эксплуатации все вакуумные камеры электронно-лучевой печи ВТ02 снабжены устройствами для быстрой и надежной герметизации всех вакуумных разъемов (крышки, плита пушек, двери), связанных с загрузкой ее или обслуживанием механизмов в процессе эксплуатации.

Разработка новых источников питания электронных пушек ВТР. Важной особенностью печи ВТ02 является использование новых высокочастотных инверторных высоковольтных источников питания электронных пушек мощностью 500 кВт (рис.5) [10].

Источник питания должен обеспечивать эффективную работу газоразрядных пушек в режимах от холостого хода до короткого замыкания и при этом отличаться хорошими динамическими характеристиками.

Указанным требованиям удовлетворяет специализированный высоковольтный источник питания «ДЖЕН 30-15» [11], разработанный в Институте электродинамики Национальной академии наук Украины по техническому заданию специалистов международной компании «АНТАРЕС».

Основными узлами высоковольтного источника питания являются модульный инвертор и трансформаторно-выпрямительный модуль (ТВМ). Структурная схема высоковольтного источника питания представляет собой последовательное соединение силового выпрямителя с емкостным фильтром модульного инвертора и ТВМ.

В высоковольтных источниках питания этого типа преобразование электроэнергии происходит на частоте 20 кГц. В качестве переключающих элементов использованы транзисторы IGBT [12]. Применение модульного принципа позволило равномерно



Рис. 6. Сварка камеры плавки печи ВТ02

распределять электрические и тепловые нагрузки между узлами конструкции и тем самым снижать плотность энергии тепловыделения, упростить конструкцию преобразователя. Благодаря синхронному несинфазному управлению токи отдельных модулей смещены во времени, что обеспечивает улучшение параметров электроэнергии как на входе, так и на выходе источника питания.

Другие особенности конструкции печи ВТ02. В конструкции печи ВТ02 реализованы также и другие технические решения:

разработана современная компьютеризированная система управления электронными лучами с контролем и регистрацией технологических параметров;

предложена новая конструкция плиты электронных пушек с увеличенными безопасными углами отклонения электронных пучков и повышенной надежностью за счет высокой аккумулирующей способности тепла из зоны плавки;

механизм перемещения плиты электронно-лучевого нагревателя выполнен с использованием линейных модулей;

гидросистема подъема, опускания и перемещения камеры слитка спроектирована с программным управлением по контролю давления;

разработана конструкция быстродействующих вакуумных затворов Ду500 для паромасляных насосов с пневмоприводом, обеспечивающим время закрывания 2...6 с;

внутренние поверхности технологических вакуумных камер для повышения коррозионной стойкости и сокращения времени вакууммирования выполнены из нержавеющей стали;

новые конструкции технологических вакуумных камер позволили снизить их массу и трудоемкость изготовления в результате широкого использования сварки (рис.6);

повышена надежность и безопасность технологических вакуумных камер за счет улучшения охлаждения их стенок и возможности выдерживать в 5-6 раз более высокие тепловые нагрузки;

механизм вытягивания слитка выполнен в бесштоковом варианте, что позволяет выплавлять слитки дли-



ной до 5,5 м при уменьшенном габарите печи по высоте до 12,5 м, по сравнению с существующим 17,5 м;

разработан шлюзовой затвор, позволяющий герметично отделять камеру слитка от камеры плавки и сократить время регламентных работ между плавками в режиме остывания слитка;

разработана конструкция автономной системы охлаждения электронных пушек с использованием воды более высокого качества, по сравнению с водой, используемой для стальной системы охлаждения;

печь снабжена более производительной откачной вакуумной системой, что позволяет уменьшить время откачки в два раза;

проведена модернизация существующих газоразрядных электронных пушек ВТР в части повышения надежности;

разработана новая, более надежная, конструкция механизма подачи расходомерной шихты с учетом накопленного многолетнего опыта и особенностей эксплуатации такого рода механизмов;

использована усовершенствованная технологическая схема [13] встречной подачи расходомерных заготовок с одновременной плавкой последних, которая уже дала положительные результаты в производственных условиях.

В настоящее время в МК «АНТАРЕС» проводятся технологические испытания установки ВТ02 (см. обложку журнала).

Выводы

1. Разработана и изготовлена новая печь ВТ02 для электронно-лучевой плавки титановых сплавов с производительностью до 3000 т/год.

2. Повышение технико-экономических показателей печи ВТ02, по сравнению с ВТ01, достигается за счет снижения металлоемкости вакуумных камер от 90 до 65 т; уменьшения откачиваемого объема вакуумных камер и времени достижения рабочего вакуума в 1,5 раза; уменьшения габаритов печи по высоте от 17,5 до 12,5 м; увеличения длины слитков от 4 до 5 м и их массы от 10 до 15 т.

1. Добаткин В. И., Аношкин Н. Ф., Андреев А. Л. Слитки титановых сплавов. — М.: Металлургия, 1966. — 286 с.
2. Тригуб Н. П., Ахонин С. В., Жук Г. В. Получение плоских слитков-слябов в электронно-лучевых установках с промежуточной емкостью // Пробл. спец.электрометаллургии. — 2001. — № 4. — С. 22–26.
3. Жук Г. В., Калинин А. Н., Тригуб Н. П. Производство титановых слитков-слябов способом электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью // Современ. электрометаллургия. — 2004. — № 3. — С. 22–24.
4. Патон Б. Е., Тригуб Н. П., Ахонин С. В. Электронно-лучевая плавка тугоплавких и высокорекрационных металлов. — Киев: Наук. думка, 2008. — 312 с.
5. Электронные плавильные печи / Смелянский М. Я., Елютин А. Б., Кручинин А. М. и др. — М.: Энергия, 1971. — 167 с.
6. Рафинирующие переплавы стали и сплавов в вакууме / В. А. Бояршинов, Ал. Г. Шалмов, А. И. Щербаков и др. — М.: Металлургия, 1979. — 304 с.
7. Пат. № 38451 Украина, МПК Н01J3 7/06. Газоразрядная электронная гармата / В. Г. Мельник, Б. А. Тугай, А. Г. Тагиль, Г. В. Мельник, Г. Е. Смітюх, М. В. Чайка, А. М. Иванов, О. Я. Дереча. — Оpubл. 15.11.2000; Бюл. № 6.
8. Назаренко О. К., Нестеренков В. М., Непорожний Ю. В. Конструирование и электронно-лучевая сварка вакуумных камер // Автомат. сварка. — 2001. — № 6. — С. 50–52.
9. Новые конструкции вакуумных камер печей для электронно-лучевой плавки / Ю. В. Непорожний, О. Е. Собко-Нестерук, Н. В. Чайка и др. // Современ. электрометаллургия. — 2011. — №1. — Р. 54–57.
10. Высоковольтный источник питания для электронно-лучевого нагрева / В. В. Мартынов, Ю. П. Монжеран, А. Г. Можаровский и др. // Там же. — 2010. — №2. — С.57–60.
11. Пат. № 29547 Украина, МПК В 23 К 15/00, Н 02М 7/515. Устройство электропитания электронно-лучевой установки / В. В. Мартынов, Н. С. Комаров. — Оpubл. 15.11.2000; Бюл. № 6.
12. Дослідження та розробка напівпровідниково-трансформаторних перетворювачів для живлення електротехнологічного обладнання / К. О. Ліпківський, В. В. Мартинюк, Ю. В. Руденко та інш. // Ін-т електродинаміки НАН України. — Київ: ІЕДНАУ. — 2009. — Вип. 23. — С. 72–82.
13. Пат. №58956 Украина, МПК С 22 В 9/22, С 21 С 5/56. Спосіб електронно-променевого плавлення металів та сплавів на їх основі. / О. Е. Собко-Нестерук, Г. Е. Смітюх, М. Г. Третяк, М. В. Чайка, Ю. В. Непорожній, В. М. Васора, І. Е. Горчинський, Т. І. Дубова. — Оpubл. 26.04.2011; Бюл. № 8.

Международная компания «АНТАРЕС», г. Киев, Украина

Поступила 06.07.2012

<http://metallua.ru>

«Донецксталь» остановила мартеновские печи

На «Донецксталь-металлургический завод» (ДМЗ) состоялось закрытие мартеновского производства. Теперь здесь вместо мартеновских печей будет работать дуговая электросталеплавильная печь (ДСП-150) конструкции фирмы «Siemens VAI» (Германия). С закрытием мартеновского производства потребление электроэнергии на предприятии уменьшится в десять раз, выбросы в атмосферу шесть раз. Это весомый показатель улучшения экологической обстановки региона.