

**Новые направления работ НПП “Элтехмаш”  
по получению перспективных материалов и покрытий  
методами электронно-лучевой плавки  
и высокоскоростного испарения-конденсации  
в вакууме**

И. Н. Гречанюк

Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН  
Украины, Киев, e-mail: eltechnic777@ukr.net

*Представлены последние достижения предприятия по разработке электронно-лучевого оборудования, созданию новых технологий плавки металлов и сплавов, получению конденсированных из паровой фазы композиционных материалов, осаждению покрытий, а также новые перспективные направления деятельности НПО “Элтехмаш” (г. Винница, Украина).*

**Ключевые слова:** разработка электронно-лучевого оборудования, конденсированные из паровой фазы композиционные материалы, покрытия, НПО “Элтехмаш” (г. Винница, Украина).

### **Введение**

В настоящее время трудно представить современные отрасли промышленности (авиастроение, судостроение, электронику и электротехнику, ракетную и космическую технику), где бы в той или иной мере не применялись электронно-лучевые процессы. Реализацией процессов плавки и испарения-конденсации в промышленности научно-производственное предприятие “Элтехмаш” занимается с 1995 года. Поступательное движение в этих направлениях обобщено в работах [1, 2]. Более чем 20-летний опыт производственной работы предприятия на рынках Украины, дальнего и ближнего зарубежья показал, что достижение реальных успехов возможно только при непрерывном совершенствовании электронно-лучевого оборудования, создании прецизионных технологий плавки и испарения-конденсации, отвечающих все ужесточающимся требованиям рынка.

В работе представлены последние достижения предприятия по разработке электронно-лучевого оборудования, созданию новых технологий плавки металлов и сплавов, получению конденсированных из паровой фазы композиционных материалов, осаждению покрытий, а также новые перспективные направления деятельности.

### **Оборудование**

За последнее десятилетие предприятием разработано целый ряд лабораторного, опытно-промышленного и промышленного оборудования для плавки и испарения металлов и сплавов [3, 5]. Отличительной особенностью лабораторной установки L2 [3] является возможность

осуществления на одном типе оборудования большинства типовых технологических процессов (плавки металлов и сплавов, осаждения покрытий, получения конденсированных из паровой фазы листовых заготовок диаметром 500 мм и толщиной до 5 мм композиционных материалов), которые в настоящее время реализуются с помощью специализированных электронно-лучевых установок. Указанные установки успешно эксплуатируются в КНР и Украине [2].

В НПП “Элтехмаш” разработана и введена в производственную эксплуатацию усовершенствованная промышленная электронно-лучевая установка L4 [5] нового поколения для рафинирования и выплавки металлов и сплавов. В качестве источника нагрева в ней используются пушки с холодным катодом (газоразрядные). Оборудование позволяет получать высококачественные слитки диаметром 60—300 мм и слитки размерами от 60 x 60 до 300 x 200 мм длиной до 2500 мм с необходимым химическим и фазовым составом из высокореакционных и тугоплавких металлов, таких как вольфрам, титан, молибден, ниобий, гафний, цирконий, никель, медь, кобальт, железо, жаростойких и жаропрочных сплавов, а также интерметаллидов  $Ti_3Al$ ,  $TiAl$ ,  $Ti_3Al$ ,  $NiAl$  и др.

В настоящее время особое внимание уделяется созданию специализированного электронно-лучевого оборудования для нанесения теплозащитных покрытий (ТЗП). Среди ведущих мировых производителей фирмы “ALD Vacuum Technologies”, “Von Ardenne”, “Pratt and Whitney”, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины и др. [4]. Определённые успехи в создании подобного оборудования достигнуты в научно-производственном предприятии “Элтехмаш”.

Отличительной особенностью промышленной электронно-лучевой установки L8 разработки предприятия “Элтехмаш” является применение газоразрядных пушек и возможность нанесения всех типов и конструкций защитных покрытий: металлических, керамических, композиционных, одно- и многослойных, градиентных и т. п. [2, 4]. Сложные по своему химическому составу и конструкции ТЗП на лопатках газовых турбин на данной установке могут быть сформированы за один технологический цикл. Пилотный образец установки с 2014 года успешно эксплуатируется в НПО “Сатурн” (РФ). Опыт работы оборудования в РФ позволил внести некоторые изменения в конструкцию установки L8, которые обеспечили повышение её эксплуатационных характеристик. В настоящее время модернизированный вариант установки L8 изготавливается под индексом L8.2. По заказу одного из китайских научно-исследовательских центров на предприятии разработана техническая документация на опытно-промышленную электронно-лучевую установку L8.3. По аналогии с установкой L2 новое оборудование позволит в промышленных масштабах после некоторой переналадки осуществлять три вида технологических процессов: нанесение покрытий, получение конденсированных из паровой фазы массивных конденсированных материалов.

### Продукция

На предприятии в промышленном масштабе освоен выпуск четырех типов продукции: слитки, порошки и трубчатые катоды для осаждения защитных покрытий. Слитки сплавов  $MeCrAlY$  (где  $Me$  — Ni, Co или их

смесь) для защитных покрытий уже около 20 лет поставляются на крупные украинские предприятия “Зоря-Машпроект” (г. Николаев), “Мотор-Сич” и ЗМКБ “Прогресс” (г. Запорожье), а последних три года — в Китайскую Народную Республику. В последнее время освоено производство порошков системы Co—Cr—Al—Y—Si для плазменного нанесения покрытий [6—8].

С 2016 года начат промышленный выпуск трубчатых катодов из сплавов NiCrAlY для ионно-плазменного нанесения жаростойких покрытий на установках МАП-1, МАП-2, МАП-3. Электронно-лучевая технология литья трубчатых заготовок катодов позволяет существенно улучшить качество катодов и, в конечном итоге, наносимых на них покрытий, а также отказаться от их закупки в РФ [2—9].

#### ***Кондиционные слитки из отходов жаропрочных сплавов***

Предприятием разработана оригинальная промышленная технология переработки отходов жаропрочного сплава Ж26ВИ. По своему качеству слитки после электронно-лучевой плавки превосходят исходный материал (заготовки сплава Ж26ВИ) производства ОАО “СМ Компания” (г. Ступино, РФ) [10]. Изготовлена также первая партия слитков в количестве 300 кг сплава Ж32, полученных электронно-лучевой плавкой соответствующих отходов.

#### ***Производство титановых сплавов***

В настоящее время в мире ведутся работы по созданию новых титановых сплавов для использования в медицине взамен существующих. Например, Ti6Al4V, где легирующие компоненты алюминий и ванадий являются вредными для человеческого организма. На предприятии разработана технология получения сложнлегированных сплавов системы Ti—Nb—Zr—Si электронно-лучевой плавкой [11]. Две промышленные партии слитков в количестве 300 кг каждая поставлены американской компании “Пульс Технолоджи”.

#### ***Производство лигатур***

В соответствии с ТУ 48-0531-464-93 налажен промышленный выпуск лигатуры Ni—Y. Освоен опытно-промышленный выпуск лигатур Mo—Al, Hf—Ni, Zr—Ti с различным содержанием титана.

#### ***Производство керамических штабиков для осаждения внешнего керамического слоя теплозащитных покрытий***

С 2003 года предприятием осуществляется промышленный выпуск керамических штабиков для осаждения теплозащитных покрытий [12]. Осваивается производство новых типов керамики из цирконата-гадолия с улучшенными теплофизическими характеристиками для перспективных композиционных покрытий.

#### ***Нанесение покрытий на лопатки газовых турбин***

По техническому заданию заказчиков на предприятии реализуется замкнутый цикл осаждения покрытий на лопатки турбин, включающий выплавку всех типов слитков сплавов на никелевой и кобальтовой основах [2], изготовление штабиков керамики ZrO<sub>2</sub>—Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [12] и, соответственно,

нанесение защитных и теплозащитных покрытий из указанных (испаряемых) материалов.

### **Изготовление электрических контактов и электродов**

Электрические контакты и электроды, изготавливаемые из конденсированных материалов на основе меди и молибдена, широко применяются в промышленности с 1998 года [13—14]. Основные достижения предприятия в этом направлении изложены в работах [15—17]. За последнее десятилетие номенклатура изготавливаемых контактов увеличилась более чем в 2,5 раза. Композиционные материалы на основе меди и молибдена также нашли применение в качестве электродов для контактной сварки, скользящих контактов, электродов для сварки живых тканей.

### **Поисковые работы**

Проводятся исследования по разработке электронно-лучевой технологии получения сложнолегированных порошков методом взрывного испарения [18] и расширению номенклатуры выпускаемых лигатур и т. д.

1. *Гречанюк Н. И.* Новое электронно-лучевое оборудование и технологии получения современных материалов и покрытий / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, И. Н. Гречанюк // Автоматическая сварка. — 2007. — № 5 (649). — С. 36—41.
2. *Grechanyuk N. I.* New electron beam equipment and technogits for producing materials using vacuum melting and evaporation metohods developed at SPE “Eltecmagsh” / [N. I. Grechanyuk, P. P. Kucherenko, A. G. Melnik et al.] // Paton Welding J. — 2016. — No. 5—6. — P. 48—55.
3. *Grechanyuk N. I.* Laboratory electron-beam multipurpose installation L2 for producing alloys, composites, coatings and powders / [N. I. Grechanyuk, G. A. Baglyuk, P. P. Kucherenko et al.] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2017. — **56**, No. 1—2. — P. 113—121.
4. *Гречанюк Н. И.* Промышленная электронно-лучевая установка L8 для осаждения теплозащитных покрытий на лопатки турбин / [Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, А. Г. Мельник и др.] // Автоматическая сварка. — 2014. — № 10 (736). — С. 48—53.
5. *Grechanyuk N. I.* Industrial electron-beam installation L4 for melting and vacuum refining of metals and alloys / [N. I. Grechanyuk, P. P. Kucherenko, A. G. Melnik et al.] // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2016. — **55**, No. 7—8. — P. 489—495.
6. *Пат. 99557 України.* Спосіб одержання складнолегованих порошків на основі кобальту / [К. Щ. Гогаев, И. И. Гречанюк, В. К. Грибков, В. Г. Затовський и др.]. — Оpubл. 27.08.2012. Бюл. № 16.
7. *Гречанюк Н. И.* Особенности получения порошкового сплава Co—Cr—Al—Y—S / Н. И. Гречанюк, К. А. Гогаев, В. Г. Затовский // Порошковая металлургия. — 2012. — № 11/12. — С. 18—25.
8. *Изменение № 3 к ТУ У27 4-201134.10.002-2001 от 03.09.2015.* Материалы в слитках и порошках для защиты покрытий.
9. *Hrechaniuk M.* Electron-beam remelting of Ni—CrAl—V alloys for manufacturing of cathodes for ion — plasma coating / [M. Hrechaniuk, O. Khomenko, G. Bagliuk et al.] // Mater. Sci. Non Equilibrium Phase Transformations. — 2018. — No. 3. — P. 99—101.
10. *Клочихин В. В.* Структура и свойства слитков, полученных электронно-лучевым переплавом кондиционных возвратных отходов жаропрочного сплава ЖС26-ВИ / [В. В. Клочихин, Н. И. Гречанюк, Ю. А. Смашнюк и др.] // Современная электрометаллургия. — 2017. — № 4. — С. 1—11.
11. *Гречанюк Н. И.* Выплавка слитков титанов сплавов системы Ti—Nb—Zr—Si способом электронно-лучевой плавки / [Н. И. Гречанюк, Л. Д. Кулак, Н. Н. Кузьменко и др.] // Там же. — 2017. — № 2. — С. 17—19.
12. *ТУ У-13.2-20113У 10-004-2003.* Матеріали керамічні для теплозахисних покриттів (МКТП).

13. ТУ У 20113410.001-98. Материалы дисперсно-упрочненные для электрических контактов.
14. ТУ У 31.2-20113410-003-2002. Контакты электрические на основе дисперсно-упрочненных материалов (МДК).
15. Гречанюк Н. И. Современное состояние и перспективы применения технологии высокопрочного электронно-лучевого испарения и последующей конденсации в вакууме металлов и неметаллов для получения материалов электрических контактов и электродов / Н. И. Гречанюк, Р. В. Минакова, Г. Е. Копылова // Порошковая металлургия. — 2013. — № 3/4. — С. 139—150.
16. Grechanyuk N. I. Modern composite materials for switching and welding equipment. Information 2. Application of high-rate vacuum evaporation methods for manufacturing electric contacts and electrodes / [N. I. Grechanyuk, V. G. Grechanyuk, E. V. Khomenko et al.] // Paton Welding J. — 2016. — No. 2. — P. 34—39.
17. Grechanyuk N. I. Precipitation-strengthened and micro layered bulk copper and molybdenum-based nanocrystalline materials produced by high-speed electron-beam evaporation-condensation in vacuum: structure and phase composition / N. I. Grechanyuk, V. G. Grechanyuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. — 2018. — 56, No. 11—12. — P. 633—645.
18. Khomenko E. V. Application of the explosive electron-beam vacuum evaporation method for manufacturing of WC—W<sub>2</sub>C granular powders // Machines Technologies Mater. / [E. V. Khomenko, M. Grechanyuk, G. Baglyuk et al.] // 2018. — is. 8. — P. 338—340.

**Нові напрямки робіт нпп “Елтехмаш” по отриманню перспективних матеріалів і покриттів методами електронно-променевої плавки і високошвидкісного випаровування-конденсації у вакуумі**

І. Н. Гречанюк

*У статті представлені останні досягнення підприємства з розробки електронно-променевого обладнання, створення нових технологій плавки металів і сплавів, отримання конденсованих з парової фази композиційних матеріалів, осадження покриттів, а також нові перспективні напрямки діяльності НВО “Елтехмаш” (м. Вінниця, Україна).*

**Ключові слова:** розробка електронно-променевого обладнання, конденсовані з парової фази композиційні матеріали, покриття, НВО “Елтехмаш” (м. Вінниця, Україна).

**New directions of work spe "eltechmash" for recovery of perspective materials and coatings by electron-beam melting methods and high speed evaporation- condensation in vacuum**

I. N. Hrechanyuk

*The article presents the latest achievements of the enterprise in the development of electron-beam equipment, the creation of new technologies for melting metals and alloys, the production of composite materials condensed from the vapor phase, the deposition of coatings, as well as new promising areas of activity of NPO Eltechmash (Vinnitsa, Ukraine).*

**Keywords:** development of electron-beam equipment, composite materials condensed from the vapor phase, coatings, SBA “Eltechmash” (Vinnitza, Ukraine).