

НОВОЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДАМИ ПЛАВКИ И ИСПАРЕНИЯ В ВАКУУМЕ, РАЗРАБОТАННЫЕ В НПП «ЭЛТЕХМАШ»

**Н. И. ГРЕЧАНЮК, П. П. КУЧЕРЕНКО, А. Г. МЕЛЬНИК, И. Н. ГРЕЧАНЮК,
Ю. А. СМАШНЮК, В. Г. ГРЕЧАНЮК**

НПП «Элтехмаш». 21011, г. Винница, ул. Ватутина, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

Приведены конструкции лабораторного и промышленного электронно-лучевого оборудования, разработанного НПП «Элтехмаш». Кратко рассмотрены последние достижения предприятия в области создания промышленных технологий получения жаростойких сплавов и изделий из них для нанесения покрытий электронно-лучевым и ионно-плазменным методами; порошков для плазменного нанесения покрытий; специальных титановых сплавов для медицинских целей. Библиогр. 11, табл. 6, рис. 10.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка, испарение металлов и сплавов, электронно-лучевое оборудование для плавки и испарения, сплавы и порошки для газотурбостроения и медицины

Сегодня трудно представить развитие многих отраслей промышленности без современных электронно-лучевых технологий. Оборудование и процессы электронно-лучевой технологии служат объектом многочисленных и разносторонних исследований и разработок. В ее достижениях существенный вклад внесли ученые США, ФРГ, Франции, Англии, Японии, Украины.

В работе [1] изложены результаты разработок электронно-лучевого оборудования и технологий получения материалов и покрытий, выполненные в научно-производственном предприятии «Элтехмаш» (Украина) за период с 2005 по 2015 гг.

Настоящий обзор посвящен анализу результатов по созданию нового электронно-лучевого оборудования и технологий на данном предприятии за последние 10 лет. На предприятии интенсивно развиваются несколько направлений электронно-лучевой технологии. Среди них:

создание лабораторного и промышленного электронно-лучевого оборудования для плавки металлов и сплавов; нанесения защитных покрытий; получения конденсированных из паровой фазы композиционных материалов;

получение высокочистых сплавов Ni–W, используемых в качестве затравок при выращивании монокристаллических лопаток;

производство специальных титановых сплавов для биомедицинских целей;

производство лигатур;

производство кондиционных слитков из отходов жаропрочных сплавов ЖС 26 ВИ и ЖС 32;

изготовление методом электронно-лучевого литья из жаростойких сплавов Ni–Cr–Al–Y, Ni–Co–Cr–Al–Y трубчатых заготовок-катодов для ионно-плазменного нанесения покрытий;

получение специальных металлических порошков для плазменного нанесения покрытий; производство электрических контактов; нанесение защитных покрытий на лопатки газовых турбин.

Создание универсального лабораторного и опытно-промышленного электронно-лучевого оборудования с различными функциональными возможностями, которые в настоящее время реализуются на специализированных установках, позволяет экономить время и средства на разработку новых технологических процессов. К такому типу оборудования относится установка L-2. Общий вид установки приведен на рис. 1.

Технические характеристики установки L-2:

Размеры испаряемых заготовок (слитков), мм:	
- диаметр	70
- длина, не более	400
Размеры заготовок, сплавляемых из верхнего механизма, мм:	
- диаметр	80
- длина, не более	390
Размеры поверхностей конденсации, мм, не более	
- прямоугольной	350x350
- круглой	Ø 400
- цилиндрической:	
- диаметр	220
- длина	350
Расстояние от поверхности испарения до поверхности конденсации, мм	
200...325	
Количество тиглей, шт.	
3	



Рис. 1. Общий вид установки L-2

Скорость перемещения испаряемых слитков, мм/мин	1...350
Скорость перемещения заготовок, сплавляемых сверху, мм/мин.....	5...350
Скорость вращения изделия на горизонтальном штоке, об/мин	3...25
Скорость вращения изделия на вертикальном штоке, об/мин	5...70
Количество и мощность электронных пушек, $n \times$ кВт: (пушки термокатодные с ленточным катодом)	
- для испарения материалов из тиглей	3×60
- для нагрева сверху	2×60
- для нагрева снизу	1×60
Потребляемая мощность, кВт, не более	
- высоковольтным источником питания	250
- источником питания устройства ионной очистки	30
Номинальное ускоряющее напряжение, кВ	20
Рабочий вакуум в камерах, Па (мм. рт. ст.).....	$6 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ $(5 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-4})$
Габаритные размеры установки, мм, не более:	
- длина	4300
- ширина	6200
- высота	3300
Масса установки, т	16,5

Установка позволяет реализовать четыре типа различных технологических процессов. Первый из них — нанесение покрытий на различные изделия, в частности, на лопатки турбин (рис. 2).

Наличие трех независимых медных водоохлаждаемых тиглей диаметром 70 мм позволяет одновременно или независимо, по заданной программе, осуществлять испарение трех различных материалов и формировать жаростойкие, метал-

лические, керамические, металлокерамические, однослойные, многослойные градиентные покрытия. Современные требования к вакуумной гигиене при осаждении покрытий обеспечиваются конструктивными особенностями установки (двухкамерный вариант). Загрузка и выгрузка соответственно исходных (непокрытых) и покрытых лопаток (изделий) осуществляется в перегрузочной камере без разгерметизации основной рабочей камеры, где, собственно, и проводится технологический процесс осаждения.

Вторая технологическая задача, решаемая на данной установке, — получение конденсированных из паровой фазы композиционных материалов (КМ) дисперсноупрочненного, микрослойного или микропористого типов.

При испарении из трех независимых тиглей паровой поток осаждается на стационарную или вращающуюся подложку из стали марки Ст.3 диаметром 500 мм и толщиной до 20 мм (рис. 3).

Для легкого отделения сконденсированного материала от подложки на осаждаемую поверхность наносится тонкий разделительный слой.

Листовые заготовки КМ диаметром 500 мм получают толщиной от 0,1 до 7 мм.

Новым технологическим направлением использования установки L-2 является получение дисперсных металлических, керамических и композиционных порошков (рис. 4).

Особенностью получения порошков является конденсация парового потока на охлаждаемую

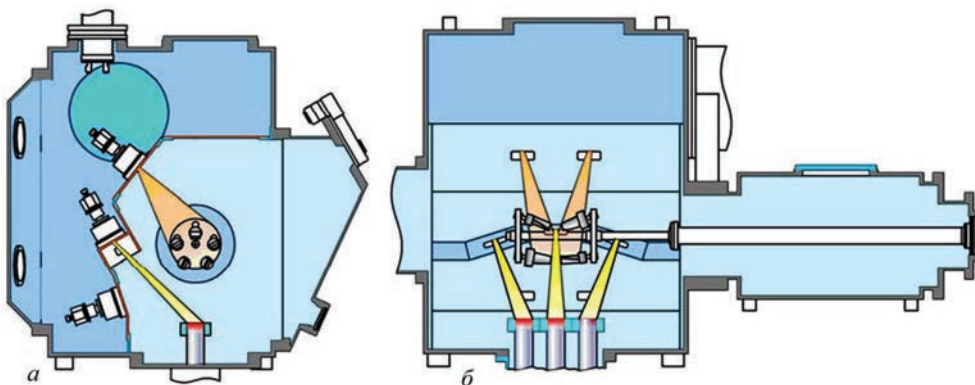


Рис. 2. Схема нанесения покрытий на лопатки газовых турбин: а — вид сбоку; б — вид спереди

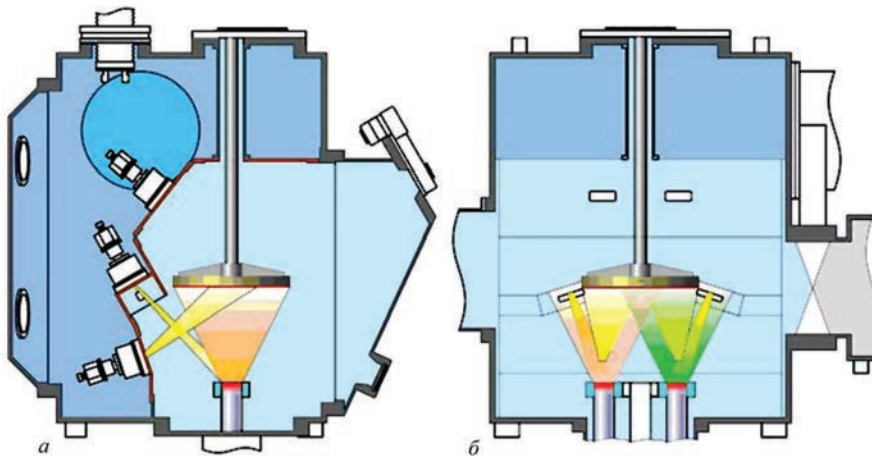


Рис. 3. Схема получения конденсированных из паровой фазы композиционных материалов: *а* — вид сверху; *б* — вид спереди

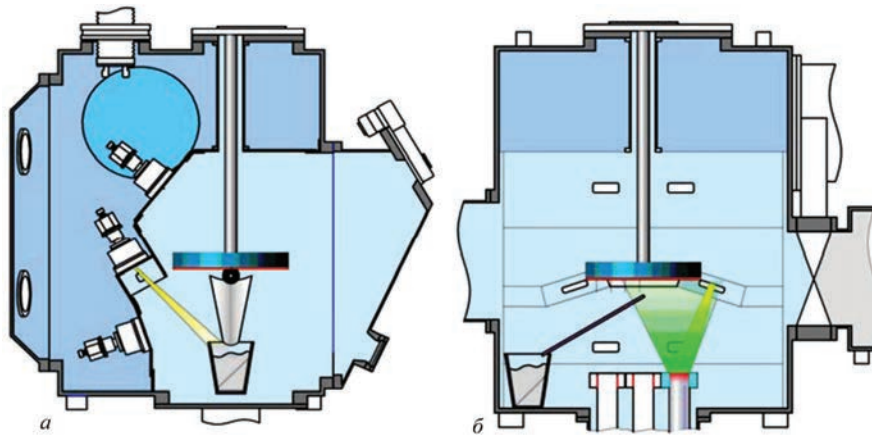


Рис. 4. Схема получения порошков из паровой фазы: *а* — вид сбоку; *б* — вид спереди

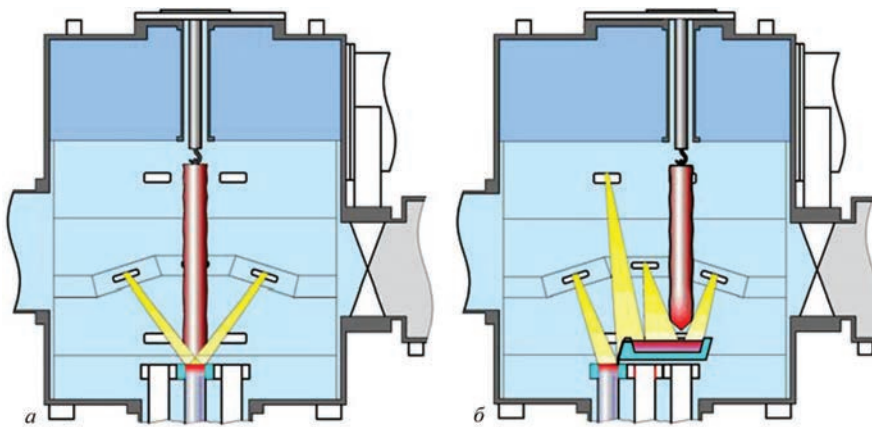


Рис. 5. Технологическая схема получения слитков (сплавов) на установке L-2: *а* — переплав непосредственно в кристаллизатор; *б* — переплав через промежуточную емкость в кристаллизатор

до комнатной температуры вращающуюся подложку. На поверхность подложки предварительно наносится покрытие из эмали. Указанный технологический прием практически исключает взаимодействие осажденного материала с подложкой. Рыхлый осадок с помощью скребка снимается с поверхности подложки и по вибропитателю поступает в емкость для сбора порошка. Полученные порошки имеют округлую форму, их диаметр колеблется от 0,4 до 5 мкм. Четвертый технологический процесс, который реализуется на установ-

ке — получение слитков чистых металлов и сплавов (рис. 5).

Вариант, приведенный на рис. 5, *а* используется в основном для получения слитков тугоплавких металлов и сплавов. При этом расходоуемая (переплавляемая) заготовка подвешивается к верхнему механизму вращения. Задается определенная скорость вращения заготовки и с помощью первой электронной пушки осуществляется плавление ее торца. Жидкий металл попадает непосредственно в медный водоохлаждаемый кристаллизатор, где



Рис. 6. Внешний вид электронно-лучевой установки L-8
электронным пучком второй пушки формируется слиток.

Наиболее широко применяется плавка через промежуточную емкость (рис. 5, б). Такой технологический передел обеспечивает максимальное рафинирование переплавляемого материала от примесей внедрения и неметаллических примесей.

В настоящее время особое внимание уделяется созданию специализированного электронно-лучевого оборудования для нанесения теплозащитных покрытий (ТЗП) на лопатки. Среди ведущих мировых производителей фирмы «ALD Vacuum Technologies», «Von Ardenne», «Pratt and Whitney», Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины.

В НПП «Элтехмаш» (г. Винница, Украина) создана промышленная электронно-лучевая установка нового поколения L-8 для осаждения теплозащитных покрытий на лопатки турбин [2]. Внешний вид установки показан на рис. 6. Схема технологического процесса нанесения покрытий в рабочей камере установки приведена на рис. 7.

Технические характеристики промышленной электронно-лучевой установки L-8

Размеры цилиндрической кассеты с изделиями, мм не более:

- диаметр 250
- длина 500

Скорость вращения изделия на горизонтальном штоке, об/мин 0,5...50

Количество испарителей, шт. 4

Внутренний диаметр тиглей, мм 70

Длина испаряемых слитков, мм, не более 500

Скорость подачи слитков, мм/мин 0,5...350

Расстояние от верхнего среза до оси вращения кассеты или плоскости напыления, мм 350

Количество и номинальная мощность (кВт) электронных пушек:

- для испарения материалов из тиглей 4×100
- для нагрева изделий 2×60

Тип электронных пушек – аксиальные с холодным катодом (на основе высоковольтного тлеющего разряда)

Потребляемая мощность, кВт, не более:

- высоковольтными источниками питания 520
- вспомогательным оборудованием 80

Номинальное ускоряющее напряжение, кВ 30

Рабочий вакуум в камерах, Па (мм рт.ст.) $6 \cdot 10^{-3} \dots 6 \cdot 10^{-2}$
 $(5 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-4})$

Габаритные размеры установки, мм, не более:

- длина 10500
- ширина 9500
- высота 4300

Масса установки (с источниками питания), т, не более 25

Отличительной особенностью установки L-8 является применение газоразрядных пушек с ресурсом работы до 1000 ч и нанесение всех типов и конструкций защитных покрытий: металлических, керамических, композиционных, однослойных, многослойных, градиентных и т.п. Сложные по своему химическому составу и конструкции ТЗП на лопатках турбин могут быть сформированы за один технический цикл.

В двух перегрузочных (шлюзовых) камерах установки размещены устройства, обеспечивающие ион-

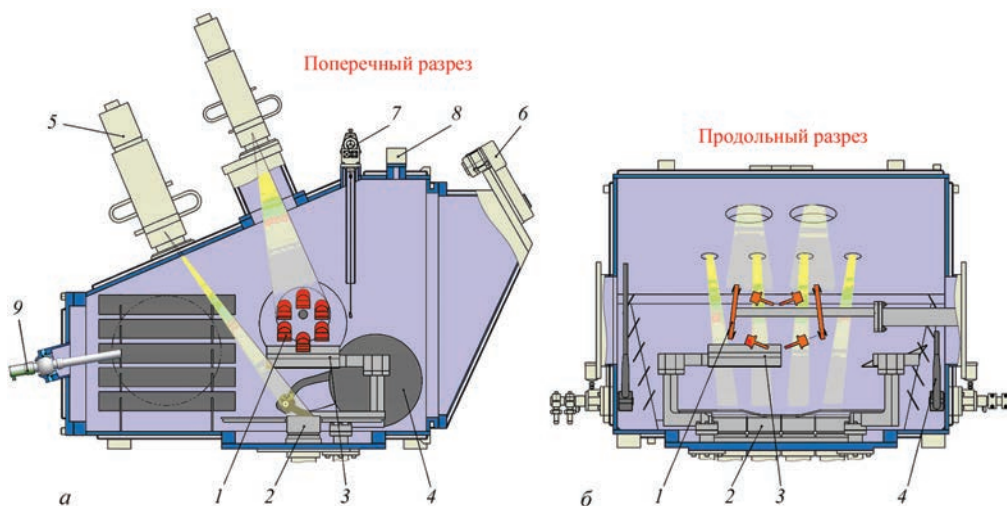


Рис. 7. Схема технологического процесса нанесения покрытий в рабочей камере установки: а — поперечный разрез; б — продольный (1 — кассета с лопатками; 2 — тигли; 3 — заслонки испарителей; 4 — заслонки затворов; 5 — электронная пушка; 6 — смотровая система; 7 — весовой датчик; 8 — натекатель технологического газа; 9 — шаровый ввод для установки пирометра



Рис. 8. Общий вид установки L-4

изводственной чистоты. Возможность управлять процессом позволяет точно воспроизводить параметры для обеспечения требуемого состава сплава.

В НИИ «Элтехмаш» разработана и введена в производственную эксплуатацию промышленная электронно-лучевая установка L-4 для рафинирования и выплавки металлов и сплавов с использованием в качестве источника нагрева пушек с холодным катодом (газоразрядных) [3]. Общий вид установки показан на рис. 8. Схема технологической камеры, в которой осуществляется плавка и рафинирование металлов и сплавов, приведена на рис. 9.

ную очистку лопаток перед нанесением покрытий, предварительный нагрев лопаток, формирование с помощью магнетронного распыления барьерных микрослоев на границах: лопатка — внутренний жаростойкий слой; внутренний жаростойкий слой — внешний керамический слой для замедления диффузионных процессов на межфазных границах.

На верхней стенке рабочей камеры (рис. 7) установлен датчик контроля толщины осаждаемых покрытий, на задней стенке – шаровый ввод с визирной трубкой и смотровым окном для бесконтактного измерения температуры изделия с помощью высокотехнологичного инфракрасного пирометра и специального программного обеспечения.

В установке также предусмотрена возможность осуществлять частичную ионизацию технологического газа и металлического пара путем подачи на изделие отрицательного потенциала (до 2 кВ). Ионизация способствует улучшению качества покрытий и их адгезии к защищаемому изделию.

Преимуществами электронно-лучевого переплава по сравнению с другими методами (вакуумно-дуговым и вакуумно-индукционным) является наивысшее качество рафинирования материалов в условиях вакуума, а также высокая степень про-

Технические характеристики электронно-лучевой установки L-4

Максимальный размер переплавляемых заготовок, мм	200×200×150
Максимальный размер выплавляемого слитка, мм	Ø300×1900
Максимальный размер выплавляемого сляба, мм	200×300×1900
Диаметры кристаллизаторов, входящих в комплект установки, мм	Ø70, Ø100, Ø130,
Габаритные размеры, мм	200×300
Размеры поверхности жидкой ванны металла в промежуточной емкости, мм	300×300
Количество и максимальная мощность электронных нагревателей, <i>n</i> х кВт	4×100
Максимальный ток пушки, А	3,3
Номинальное ускоряющее напряжение, кВ	30
Потребляемая мощность, кВт, не более	
- источниками питания электронных пушек	400
- вспомогательным оборудованием	60
Вакуум в рабочей камере, Па (мм рт.ст.)	$1,3 \cdot 10^{-2} \dots 1,3 \cdot 10^{-1}$
.....	$(1,3 \cdot 10^{-4} \dots 1,3 \cdot 10^{-3})$
Давление охлаждающей воды, Па (кг/см ²)	$3 \cdot 10^5 \dots 4 \cdot 10^5$ (3...4)
Габаритные размеры установки, мм:	
- длина	7000
- ширина	6000
- высота	5000

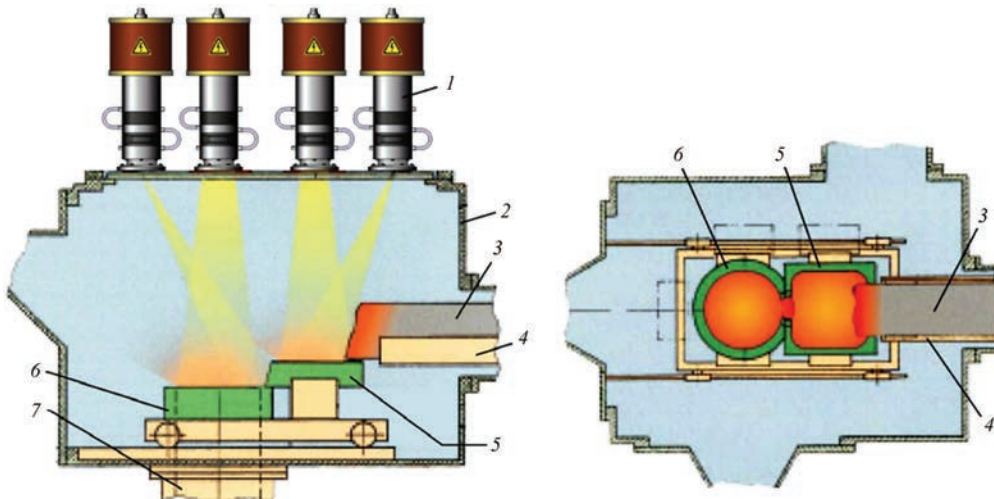


Рис. 9. Технологическая камера установки: 1 — электронные пушки; 2 — рабочая камера; 3 — переплавляемый материал; 4 — выдвигной лоток; 5 — промежуточная емкость; 6 — кристаллизатор; 7 — механизм вытягивания слитка



Рис. 10. Внешний вид трубчатых катодов: а — в исходном состоянии; б — после механической обработки

Оборудование позволяет получать высококачественные слитки и слябы с необходимым химическим составом из традиционных металлов, таких, как железо, никель, кобальт, медь, высокорепактивных тугоплавких металлов: титан, ниобий, цирконий, вольфрам, гафний, жаропрочных и жаростойких сплавов, интерметаллидов Ti_3Al , $TiAl$, Ni_3Al , $NiAl$ и др.

Получение слитков и трубчатых заготовок из сплавов Me–Cr–Al–Y для электронно-лучевого и ионно-плазменного нанесения покрытий. На предприятии в промышленном масштабе в соответствии с ТУ У 27.4–20113410.002–2001 (изменение 3 от 03.11.2015) освоен выпуск целой гаммы слитков для электронно-лучевого нанесения покрытий. Химический состав слитков приведен в табл. 1 [4].

Изготовлено более 10 т слитков различного химического состава. В настоящее время слитки МЗП-6 поставляются на предприятие «Зоря-Машпроект» (г. Николаев), а также в Китайскую Народную Республику.

Начат промышленный выпуск трубчатых заготовок-катодов из сплава МЗП-1 для ионно-плазменного нанесения жаростойких покрытий на

установках МАП-1, МАП-2, МАП-3. Внешний вид катодов показан на рис. 10.

Электронно-лучевая технология литья трубчатых заготовок позволяет существенно улучшить качество катодов и, в конечном итоге, наносимых из них покрытий, а также отказаться от их закупки в РФ.

Производство кондиционных слитков для литья лопаток из отходов жаропрочных сплавов. Отходы жаропрочных сплавов в литейном производстве представляют собой технологически неизбежный остаток исходного сплава, не вошедший в массу годных отливок. Важность проблемы рафинирования отходов жаропрочных сплавов состоит в том, что в процессе получения лопаток из исходных материалов на предприятиях-производителях ГТД накапливается значительное количество отходов, вызванных браком литья, браком форм, наличием прибылей и т.д. Высокая стоимость первичных жаропрочных сплавов обусловила появление тенденции использования при шихтовке плавов для литья лопаток отходов литейного производства, что позволяет снизить себестоимость продукции [5].

Научно-производственным предприятием «Элтехмаш» разработана оригинальная промышленная электронно-лучевая технология переработки жаропрочного сплава ЖС-26ВИ. Химический анализ полученных слитков после механической обработки диаметром 95...97 мм и длиной 300...320 мм приведен в табл. 2.

Приведенные в таблице данные подтверждают полное соответствие химического состава слитков требованиям ТУ 1-92-177-91. Электронно-лучевой переплав (ЭЛП) приводит к существенно снижению таких вредных примесей, как сера, фосфор, кислород и азот. По своему качеству слитки после ЭЛП превосходят исходный материал (заготовки сплава Ø80 ЖС26-ВИ) производства ОАО «СМ Компания», (г. Ступино, РФ), по-

Таблица 1. Химический состав слитков

Обозначение	Компоненты, мас. %					Примеси, мас. %					
	Co	Ni	Cr	Al	Y	Hf	Zr	Si	Fe	Cu	C
МЗП-1	Основа	0...2	20...24	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-2	Основа	8...12	18...24	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-3	Основа	0...2	21...25	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-4	Основа	8...12	18...24	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-5	18...22	Основа	18...24	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-6	–	Основа	18...24	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-7	–	Основа	18...24	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-8	8...10	Основа	18...24	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-9	–	–	18...24	10...13	0,4...1	до 0,2	до 0,4	до 0,5	Основа	до 0,06	до 0,06

Таблица 2. Химический состав заготовки-отливки диаметром 97 мм, полученной из возврата сплава ЖС26-ВИ ЭЛП

Место отбора пробы	Содержание элементов, мас. %									
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Nb	V
Верх	0,137	4,70	8,96	11,50	6,10	1,02	1,00	0,06	1,43	0,90
Середина	0,129	4,94	9,03	11,53	5,74	0,90	1,00	0,06	1,64	0,91
Низ	0,132	4,94	9,03	11,53	5,74	0,90	1,00	0,06	1,64	0,91
Нормы ТУ1-92-177-91	0,12...0,17	4,3...5,3	8,7...9,3	11,2...12,0	5,6...6,1	0,8...1,2	0,8...1,2	≤0,5	1,4...1,8	0,8...1,2

(продолжение таблицы)

Место отбора пробы	Содержание элементов, мас. %						
	Ni	Si	Mn	S	P	O ₂	N ₂
Верх	Основа	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00068	0,00109
Середина	"-"	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00070	0,00106
Низ	"-"	<0,2	<0,3	0,003	0,003	0,00074	0,00105
Нормы ТУ1-92-177-91	"-"	≤0,2	≤0,3	≤0,005	≤0,010	≤0,002	≤0,002

лученный в вакуумной печи методом равноосной кристаллизации.

Слитки сплава ЖС26-ВИ после ЭЛП, полученные из возвратных отходов, прошли полный цикл испытаний на ОАО «Мотор-Сич» (г. Запорожье) и в настоящее время используются в качестве исходных материалов при литье лопаток газовых турбин. Изготовлена также первая партия слитков в количестве 300 кг сплава ЖС32, полученных путем электронно-лучевого переплава соответствующих отходов.

Таблица 3. Химический состав сплавов системы Ti-Nb-Zr-Si (Ti-основа)

Номер сплава	Nb	Si	Zr
1	11...13	0,9...1,1	1,9...2,2
2	11...13	0,9...1,1	3,9...4,2
3	11...13	0,9...1,1	5,9...6,2
4	11...13	0,9...1,1	9,9...10,2
5	11...13	0,9...1,1	14,8...15,2
6	18...20	0,9...1,1	1,9...2,2
7	18...20	0,9...1,1	3,9...4,2
8	18...20	0,9...1,1	5,9...6,2
9	18...20	0,9...1,1	9,9...10,2
10	18...20	0,9...1,1	14,8...15,2

Производство лигатур. В соответствии с ТУ 48-0531-464-93 осуществляется промышленный выпуск лигатуры Ni-Y. Выпускаются экспериментальные партии лигатур: Al-Mo, Al-Ni, Al-Zr.

Производство титановых сплавов. Для украинских и американских потребителей изготавливаются экспериментальные партии сплавов системы Ti-Nb-Zr-Si. Химический состав сплавов приведен в табл. 3.

Как видно из табл. 3, сплавы на основе титана производятся в достаточно узком интервале концентраций легирующих компонентов. При этом повторяемость при плавках достигает 95...98 %. Сплавы системы Ti-Nb-Zr-Si предназначены для медицинских целей.

Производство металлических порошков системы Co-Cr-Al-Y-Si для плазменного нанесения покрытий. В последнее время освоено производство порошков системы Co-Cr-Al-Y-Si для плазменного нанесения покрытий [4, 6, 7]. Химический состав слитков и порошков, изготавливаемых из них, приведен соответственно в табл. 4, 5.

Слитки для производства порошков получают путем электронно-лучевого переплава чи-

Таблица 4. Химический состав сплавов для изготовления порошков (Co — основа)

Обозначение	Компоненты, мас. %					Примеси, мас. %				
	Ni	Cr	Al	Y	Si	Hf	Zr	Fe	Cu	C
МЗП-10	0...2	26...0	6...9	0,8...1,2	1,5...4,0	до 0,2	до 0,4	до 0,3	до 0,06	до 0,06
МЗП-11	0...2	20...25	10...13	0,4...0,1	1,5...4,0	до 0,2	до 0,4	до 0,3	до 0,06	до 0,06

Примечание. В сплавах МЗП-10, МЗП-11 допускается суммарное содержание Nb+Mo+W+Ti в количестве не более 1 %.

Таблица 5. Химический состав порошков для плазменного нанесения покрытий (Co — основа)

Обозначение порошка	Компоненты, мас. %					Примеси, мас. %				
	Ni	Cr	Al	Y	Si	Hf	Zr	Fe	Cu	C
Порошок поликристаллический МЗП-10	0...2	26...30	6...9	0,8...1,2	1,5...4,0	до 0,2	до 0,4	до 0,6	до 0,06	до 0,1
Порошок поликристаллический МЗП-11	0...2	20...25	10...13	0,4...0,1	1,5...4,0	до 0,2	до 0,4	до 0,6	до 0,06	до 0,1

Примечание. В порошках поликристаллических из сплавов МЗП-10, МЗП-11 допускается суммарное содержание Nb+Mo+W+Ti в количестве не более 1 %.

Таблица 6. Электронно-лучевое оборудование, поставленное предприятиям в 2005–2014 гг.

Номер п/п	Наименование	Назначение	Год	Заказчик
1	Электронно-лучевая установка L-1	Осаждение защитных покрытий из паровой фазы в вакууме	2005	Украина
2	Электронно-лучевая установка L-4	Рафинирование и переплав металлов и сплавов в вакууме	2006	Армения
3	Два энергокомплекса с пушками ВТР мощностью по 220 кВт	Промышленное производство «солнечного кремния» из металлургического кремния	2007	Япония
4	Энергокомплекс с пушкой ВТР мощностью 30 кВт	Нанесение покрытий	2008	Тайвань
5	Два энергокомплекса с пушками ВТР мощностью 30 и 100 кВт	Модернизация установок для рафинирования металлургического кремния	2008	Россия
6	Энергокомплекс с пушкой ВТР мощностью 100 кВт	Модернизация установки для рафинирования и переплава благородных металлов	2010	Россия
7	Электронно-лучевая установка L-2	Осаждение защитных покрытий из паровой фазы в вакууме	2012	Украина
8	Электронно-лучевая установка L-2	Осаждение защитных покрытий из паровой фазы в вакууме	2013	Китай
9	Электронно-лучевая установка L-8	Осаждение защитных покрытий на детали ГТД	2014	Россия

стых исходных компонентов. Порошки фракции 40...100 мкм изготавливают методом химического дробления соответствующих слитков. Промышленные партии порошка системы Co–Cr–Al–Y поставляются на ГП ГНТК газотурбостроения «Зоря-Машпроект» (г. Николаев) и КНР.

Производство электрических контактов. Последние достижения в области изготовления материалов для электрических контактов и изделий из них приведены в работе [8–10]. Освоено промышленное производство новых материалов для электрических контактов $\text{Cu}(0,05...0,1)(\text{ZrY})\text{-W}$; $\text{Cu}\text{-}(0,05...0,1)(\text{ZrY})\text{-Cr}$. Произведено более 15 т композиционных материалов, из которых изготовлено более 1,6 млн шт. электрических контактов и электродов различного народно-хозяйственного назначения.

Нанесение покрытий на лопатки газовых турбин. На предприятии реализуется замкнутый цикл осаждения покрытий на лопатки турбин, включающий выплавку всех типов слитков на никелевой и кобальтовой основах [4], изготовление штабиков керамики $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ [11] и соответственно нанесение теплозащитных покрытий из указанных исходных материалов на оборудовании исполнителя требуемых заказчиком конструкций и химического состава [1, 4].

Производство промышленного электронно-лучевого оборудования. В табл. 6 приведены данные по поставке предприятием лабораторного и промышленного электронно-лучевого оборудования для плавки и испарения материалов в 2005–2014 гг. Предприятие поставляет как отдельные части оборудования, так и лабораторные и промышленные электронно-лучевые установки с полной комплектацией для реализации техно-

логических процессов: плавки металлов и сплавов; нанесения защитных покрытий; получения из паровой фазы композиционных материалов.

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. – С. 36–41.
2. Промышленная электронно-лучевая установка L-8 для осаждения теплозащитных покрытий на лопатки турбин / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, А. Г. Мельник [и др.] // Автоматическая сварка. – 2014. – № 10. – С. 48–53.
3. Промышленная электронно-лучевая установка L-4 для переплава и рафинирования в вакууме металлов и сплавов / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, А. Г. Мельник [и др.] // Порошковая металлургия. – 2016. – № 7–8. – С. 140–149.
4. Изменение № 3 к КТУ; У 27.4-201134.10.002–2001 от 03.09.2015 г. Материалы в слитках и порошках для защитных покрытий.
5. Электронно-лучевая плавка в литейном производстве: под ред. С. В. Ладохина. – Киев: Сталь, 2007. – 626 с.
6. Гречанюк Н. И. Особенности получения порошкового сплава Co–Cr–Al–Y–Si / Н. И. Гречанюк, К. А. Гогаев, В. Г. Затовский // Порошковая металлургия. – 2012. – № 11/12. – С. 18–25.
7. Пат. № 99557 Украина. Спосіб одержання складнолегованих порошків на основі кобальту / К. О. Гогаєв, М. І. Гречанюк, В. К. Грибков, В. Г. Затовський [и др.]. – Опубл. 27.08.2012. Бюл. № 16.
8. Современные композиционные материалы для коммутационной и сварочной техники. Сообщение 2. Применение методов высокоскоростного испарения в вакууме для изготовления электрических контактов и электродов / Н. И. Гречанюк, В. Г. Гречанюк, Е. В. Хоменко [и др.]. // Автоматическая сварка. – № 2 (750). – 2016. – с. 41–47.
9. Пат. 104673 Украина. Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання / М. І. Гречанюк, В. Г. Гречанюк, В. В. Бухановський [и др.]. – Опубл. 25.02.2014.
10. Пат. 86434 Украина. Композиційний матеріал для електричних контактів та спосіб його отримання / М. І. Гречанюк, І. М. Гречанюк, В. Г. Гречанюк [и др.]. – Опубл. 27.04.2009 р.
11. Матеріали керамічні для теплозахисних покриттів (МКТП): ТУ.У-13.2-201134 10-004–2003.

Поступила в редакцию 27.04.2016