



НОВОЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ

Н. И. ГРЕЧАНЮК, д-р техн. наук, П. П. КУЧЕРЕНКО, И. Н. ГРЕЧАНЮК, инженеры
(НПП «Геконт», г. Винница)

Представлены современные направления деятельности НПП «Геконт» в области практического применения новых технологий плавки, испарения в вакууме материалов для осаждения теплозащитных покрытий системы MeCrAlY и других на лопатки газовых турбин, получения конденсированных композиционных материалов для разнообразных электрических контактов, переплава отходов металлов и сплавов для получения товарных слитков. Более подробно освещаются разработки и особенности применения специализированного оборудования.

Ключевые слова: электронно-лучевые технологии, плавка и испарение в вакууме, осаждение теплозащитных покрытий, конденсирование композиционных материалов, переплав металлов и сплавов, лопатки газовых турбин, электрические контакты, специализированное оборудование

Электронно-лучевое воздействие на металлы, приводящее к их нагреву, плавлению и испарению, как новое технологическое направление в области обработки материалов интенсивно развивается с середины XX в. [1, 2].

Развитие электронно-лучевой технологии идет в трех основных направлениях:

– плавка и испарение в вакууме для получения материалов пленок покрытий; используют мощные (до 1 МВт и более) электронно-лучевые установки при ускоряющем напряжении 20...30 кВ; концентрация мощности относительно невелика (не более 105 Вт/см^2);

– сварка металлов; создано оборудование трех классов: низко-, средне- и высоковольтное, охватывающее диапазон ускоряющих напряжений от 20 до 150 кВ; мощность установок составляет 1...120 кВт и более при максимальной концентрации мощности $105...106 \text{ Вт/см}^2$;

– прецизионная обработка материалов (сверление, фрезирование, резка); используют высоковольтные установки (80...150 кВ) небольшой мощности (до 1 кВт), обеспечивающие удельную мощность $5 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$.

Одновременно ведется совершенствование оборудования [3, 4], источников нагрева [5], источников паров металлов [6] и разработка аппаратуры для наблюдения, контроля и регулирования процесса электронно-лучевого воздействия. Так, при разработке новых способов выращивания металлических (композиционных) пленок основное внимание уделяется управлению парометаллическими потоками: энергетическим состоянием

конденсирующихся частиц, их молекулярным составом, интенсивностью, пространственным распределением потока и т. п. Известно, что широко распространенные испарители открытого типа, включая квазизамкнутые, даже при постоянной температуре характеризуются нестабильностью диаграммы направленности паровой струи во времени. Радиационная нагрузка на поверхность роста пленок от этих источников иногда сравнима с энергией конденсации парового потока. Поэтому при их использовании достаточно сложно получить воспроизводимые пленочные структуры с контролируемыми параметрами. Особые трудности возникают при больших скоростях испарения, когда в паровом потоке обычно присутствуют микрокапли.

В НПП «Геконт» интенсивно развивается первое из перечисленных выше направлений. При этом особое внимание уделяется разработке и изготовлению лабораторного и промышленного электронно-лучевого оборудования для реализации ряда новых технологических процессов:

— осаждения теплозащитных покрытий на лопатки газовых турбин;

— получения конденсированных из паровой фазы композиционных материалов дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов;

— получения чистых тугоплавких металлов, специальных сплавов, ферросплавов, поликристаллического кремния для нужд космической техники, энергетики, авиастроения;

— получения сложнотермостойких порошков металлического и керамического типов для плазменного нанесения покрытий.

Защитные покрытия на лопатках газовых турбин и оборудование для их осаждения. В НПП «Геконт» защитные покрытия на газовых

Внешний керамический слой со столбчатой структурой	Внешний керамический слой типа зигзаг	Внешний керамический слой типа зигзаг с элементами "саморегулирования"
Промежуточный жаростойкий слой дисперсно-упрочненного или микрослойного типов	Промежуточный жаростойкий слой дисперсно-упрочненного или микрослойного типов	Промежуточный жаростойкий слой дисперсно-упрочненного или микрослойного типов
Внутренний металлический демпфирующий слой	Внутренний металлический демпфирующий слой	Внутренний металлический демпфирующий слой
Основа	Основа	Основа
<i>а</i>	<i>б</i>	<i>в</i>

Рис. 1. Схемы теплозащитных покрытий (см. обозначения в тексте)

лопатках получают путем электронно-лучевого испарения сплавов $MeCrAlY$ (где $Me-Ni, Co, Fe$) $MeCrAlYHfSiZr$ и керамики на основе ZrO_2 , стабилизированного Y_2O_3 . Наряду с традиционными однослойными металлическими типа $MeCrAlY$, $MeCrAlYHfSiZr$, двухслойными металл/керамика разработаны три варианта трехслойных теплозащитных покрытий, схемы которых приведены на рис. 1.

Наиболее простым покрытием является трехслойное покрытие с внутренним металлическим (демпфирующим) $MeCrAlY$, $MeCrAlYHfSiZr$ (где $Me-Ni, Co, Fe$ или сплавы на их основе), промежуточным композиционным $MeCrAlY$, $MeCrAlYHfSiZr-MeO$ (где $MeO-Al_2O_3, ZrO_2-Y_2O_3$), дисперсно-упрочненным или микрослойным типом и внешним керамическим $ZrO_2-Y_2O_3$ слоями (рис. 1, *а*) [7]. Второй вариант является аналогичным первому с тем лишь отличием, что внешний керамический слой выполнен в виде зигзага (рис. 1, *б*). Наиболее интересным является третий вариант покрытия, где во внешний керамический слой ($ZrO_2-Y_2O_3$), который также выполнен в виде зигзага, введены дисперсные частицы тугоплавких боридов. В процессе эксплуатации изделий с таким покрытием при возникновении микротрещин во внешнем керамическом слое частицы боридов, окисляясь, образуют соответствующие оксиды, которые залечивают возникшие микротрещины. Таким образом, подобное покрытие обладает эффектом «самозалечивания», или «самовосстановления».

Для реализации технологических процессов осаждения теплозащитных покрытий на лопатки турбин были созданы два типа промышленного электронно-лучевого оборудования [3, 4, 7–10]. На рис. 2 представлен общий вид промышленной электронно-лучевой установки L-1, которая успешно эксплуатируется в научно-техническом комплексе «Зоря-Машпроект» г. Николаев (Украина). При разработке конструкции установки была использована традиционная трехкамерная схема компоновки оборудования [7, 9]. Рабочая камера установки используется собственно для нанесения покрытия, а две вспомогательные — для загрузки-выгрузки кассет с лопатками. Установка

снабжена восьмью электронными пушками мощностью 60 кВт каждая конструкции НПП «Геконт» [7]. Четыре пушки предназначены для испарения исходных материалов диаметром 70 мм, расположенных в один ряд, остальные четыре пушки для нагрева покрываемых изделий снизу или сверху. Максимальные габариты покрываемых изделий: длина до 700 мм, диаметр до 350 мм.

Отличительной особенностью конструкции установки от разработанных ранее [1] является возможность проведения не только технологического процесса осаждения всех типов теплозащитных покрытий, но и получение композиционных материалов дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов в виде листовых заготовок диаметром до 800 мм и толщиной до 5 мм. Указанное оборудование может быть также использовано для осаждения осотвердых износостойких покрытий на штампы, пресс-формы, специальных оптических покрытий (например на зеркала из карбида кремния) и т. д.

В настоящее время в НПП «Геконт» разработана конструкторская документация на принципиально новое промышленное электронно-лучевое оборудование для осаждения защитных покрытий [3, 4]. Установка (рис. 3) представляет собой вакуумный агрегат, состоящий из четырех вакуумных камер (рис. 3, *а*), связанных между собой: собственно главной технологической камерой 1, переходной камеры 2 и двух шлюзовых

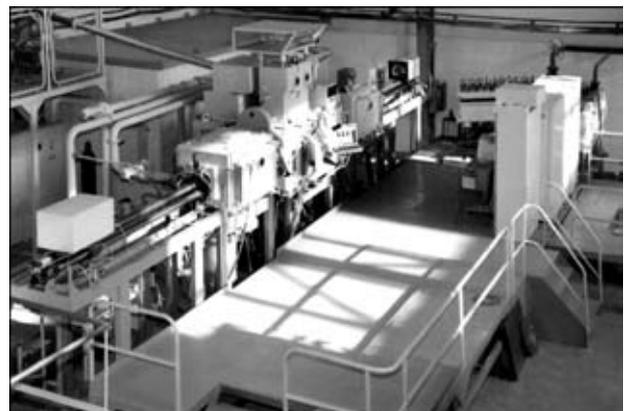


Рис. 2. Электронно-лучевая установка L-1

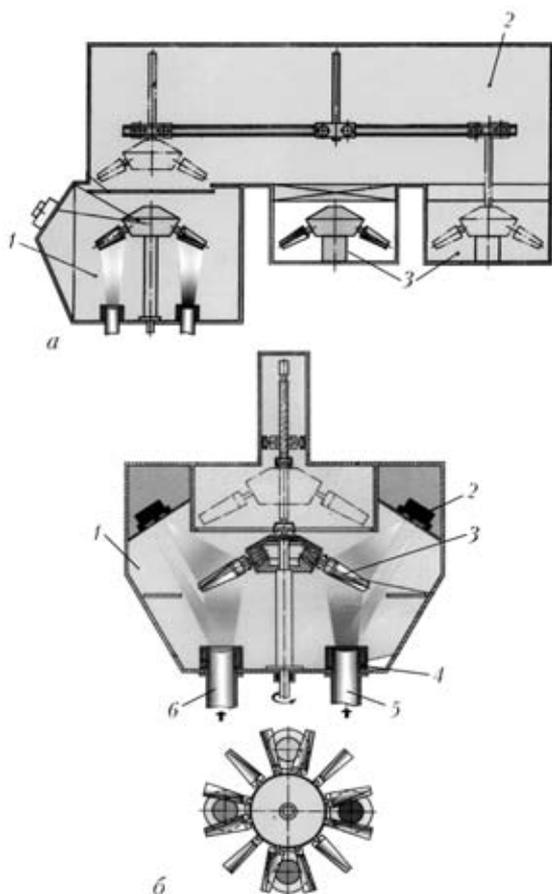


Рис. 3. Установка для осаждения защитных покрытий (см.

камер (форкамер) 3. Внутри технологической камеры 1 (рис. 3, б) установлены водоохлаждающие тигли 4, в которых размещают слитки 5, 6 испаряемых материалов. Лучи электронных пушек 2 испаряют материал слитков, который в виде пара конденсируется на изделиях 3. Количество используемых тиглей может изменяться в зависимости от необходимого химического состава и конструкции (двух-, трехслойное, микрослойное) покрытие. Конструкция установки является принципиально новой [3, 4]. На данной установке возможно осаждение всех типов защитных покрытий, в том числе и новых типов силицидных покрытий микрослойного типа.

Необходимо отметить, что на предприятии реализован замкнутый цикл осаждения покрытий на лопатке турбин, включающий выплавку всех типов слитков на никелевой, кобальтовой и железной основах в соответствии с ТУ У 27.4-20113410-002-2001, использование слитков керамики ТУ У 13.2-20113410-004-2003. Освоено также производство порошков Ni(Co)CrAlYSi фракцией 40...100 мкм для плазменного нанесения покрытий.

Композиционные материалы для электрических контактов и оборудование для их получения. Несмотря на широкое применение процессов испарения и конденсации для осаждения защитных покрытий оказались невостребован-

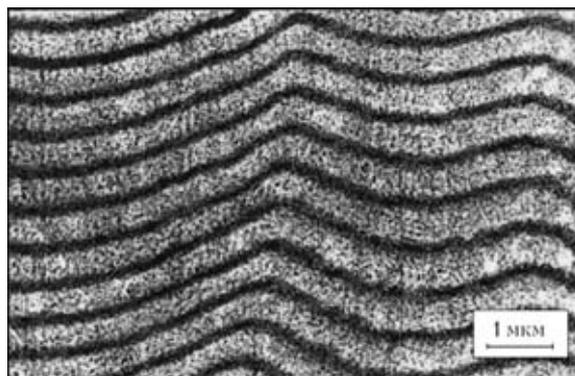


Рис. 4. Тонкая структура микрослойных материалов Cu-Zr-Y/Mo

ными уникальные возможности зонного метода для получения принципиально новых материалов дисперсно-упрочненного, микрослойного и микропористого типов, градиентных функциональных материалов и т. д. Серьезным научным достижением является разработка научных принципов формирования микрослойных материалов с толщиной чередующихся слоев меньше 0,5 мкм при температурах осаждения более 0,3 температуры плавления наиболее легкоплавкого из испаряемых материалов [11]. Как известно, до последнего времени подобные материалы получали методом электронно-лучевого испарения и последующей конденсации металлов и неметаллов в вакууме при температуре подложки не выше 300 °С [12]. На базе данных исследований впервые в мировой практике была разработана промышленная электронно-лучевая технология получения толстых (до 5 мм) микрослойных материалов (Cu-Zr-Y)/Mo (рис. 4) для электрических контактов [13]. Конденсированные материалы Cu — (0,08...0,2) % Zr — (0,08...0,2) % Y — (8...12) % Mo получают на промышленной электронно-лучевой установке L-5 (рис. 5). Технологическая схема получения данного материала представлена на рис. 6. Конденсированные материалы (Cu-Zr-Y)/Mo представляют собой листы диаметром 1000 мм и толщиной до 5 мм, которые рубятся на заготовки и



Рис. 5. Электронно-лучевая установка L-5

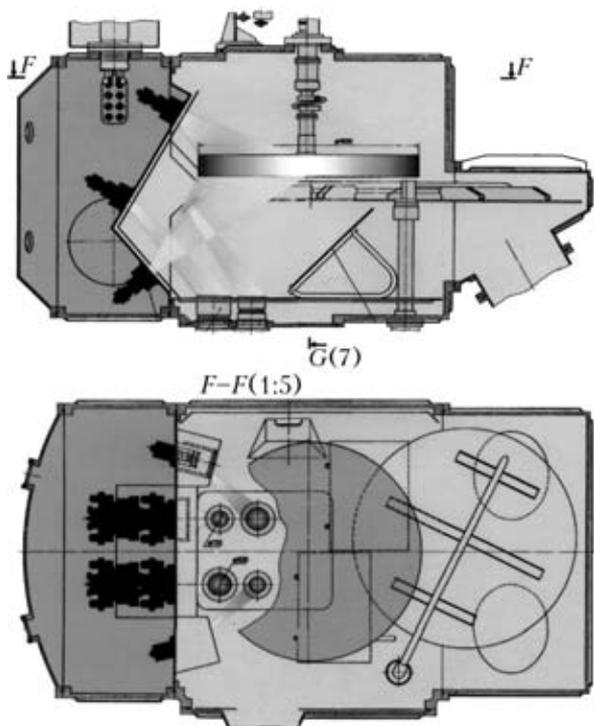


Рис. 6. Технологическая схема получения микрослойных материалов (Cu-Zr-Y)/Mo

напаиваются на контакте-держателе. Предел прочности и условный предел текучести в зависимости от технологических условий получения могут изменяться от 645 до 1200 МПа и от 596 до 1000 МПа соответственно, относительное удлинение от 2 до 8,7 % [14]. Новые композиты, получившие название «Материалы дисперсно-упрочненные для электрических контактов» (МДК), сертифицированы и выпускаются согласно техническим условиям [15].

Основные достоинства материалов МДК:

- отсутствие в составе серебра, поэтому они в 1,8–3 раза дешевле по сравнению с порошковыми электроконтактными и по эксплуатационной надежности превосходят существующие электротехнические материалы в 1,5–3 раза;
- не поддерживают горения дуги;
- полностью заменяют бериллиевую бронзу;
- выдерживают коммутационный ток до 1000 А.



Рис. 7. Внешний вид гаммы электрических контактов



Рис. 8. Внешний вид контактов для вакуумных дугогасительных камер

Наиболее эффективные области применения МДК:

- городской и междугородний электротранспорт (контакты, используемые в трамваях, троллейбусах, поездах, метро);
- лифтовое хозяйство (пассажирские и грузовые лифты);
- портовые, корабельные краны и другие подъемно-транспортные механизмы;
- электрокары всех типов;
- горно-шахтное оборудование;
- промышленные и бытовые электротехнические устройства, содержащие реле, пускатели, контакторы, рубильники и т. п.
- наконечники для плазменной резки металлов и сплавов;
- электроды контактных сварочных машин.

На сегодня согласно [16] произведено более 1,5 млн электрических контактов 370 наименований (рис. 7), которые успешно эксплуатируются в странах СНГ, Чехии, Румынии.

Одновременно с промышленным внедрением материалов для разрывных электрических контактов на предприятии совместно с ИПМ НАНУ, заводом «Генератор» (г. Киев), «Вроцлавским политехническим институтом» (Республика Польша) ведутся работы по созданию композиционных материалов на основе меди, хрома, вольфрама, углерода, применяемых в производстве скользящих контактов, контактов для вакуумных дугогасительных камер (рис. 8).

Промышленные технологии электронно-лучевого переплава металлов и сплавов и оборудование для их осуществления. На предприятии освоена промышленная технология электронно-лучевого переплава отходов быстрорежущих сталей и получение товарных слитков для последующего изготовления из них инструмента [17, 18]. Используемое оборудование позволяет переплавлять в вакууме отходы быстрорежущей



Рис. 9. Специализированная электронно-лучевая установка для плавки металлов и сплавов

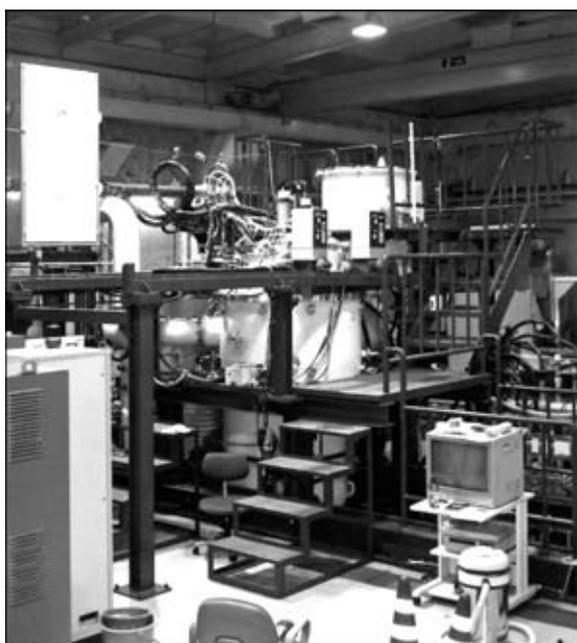


Рис. 10. Электронно-лучевая установка для переплава кремния мощностью 500 кВт

стали (отработанный инструмент, отходы инструментального производства) и получать цилиндрические слитки диаметром от 60 до 130 мм и слитки сечением до 140...160 мм длиной до 2000 мм.

Технологические и экономические преимущества:

- процесс переплава и формирования слитка происходит за один технологический цикл без последующей термомеханической обработки (ковки, отжима);
- возможность переплава кусковой шихты;
- быстрая смена оснастки для изготовления слитков необходимых размеров;
- высокое качество получаемых слитков после вакуумного переплава;
- получение небольших партий товарных слитков;
- стоимость товарных слитков примерно в 2-3 раза ниже стоимости слитков, полученных по традиционной технологии.

В последнее время создан ряд специализированных промышленных электронно-лучевых установок для плавки жаропрочных сплавов, тугоплавких металлов, титана и получения товарных слитков диаметром от 60 до 300 мм и длиной до 2500 мм. Внешний вид установки такого типа приведен на рис. 9. В данных установках впервые использованы новые высоковольтные источники питания конструкции НПП «Геконт» и электронно-лучевые газоразрядные пушки с холодным катодом, разработанные под руководством В. И. Мельника [19].

Особое внимание сегодня уделяется созданию новых технологий и оборудования для плавки кремния и ферросплавов. Предприятием поставлены в Японию три электронно-лучевые установки мощностью 10, 20, 500 кВт для электронно-лучевого переплава кремния (рис. 10).

Приведенные выше примеры практического применения процессов плавки и испарения металлов и неметаллов в вакууме убедительно свидетельствуют о все более широком применении специальной электротехнологии для создания новых материалов и покрытий.

1. Мовчан Б. А., Малащенко И. С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. — Киев: Наук. думка, 1983. — 230 с.
2. Зуев И. В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии. — М.: МЭИ, 1998. — 162 с.
3. Pat. US 6, 923, 868 BZ. Installation for electron-ray coaction of coatings / M. Grechanyuk, P. Kucherenko. — Publ. 02.08.2005.
4. Пат. 2265078 РФ. Установка для электронно-лучевого нанесения покрытий / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко. — Оpubл. 12.27.2005.
5. Пат. Украины 60377. Газоразрядная электронная пушка и способ управления ею / А. А. Новиков. — БИ. — 2003. — № 10.
6. Золкин А. С. Источники паров металлов для научных исследований и технологий. — Новосибирск: Институт теплофизики РАН, 1992. — 75 с.
7. Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П., Осокин В. А., Шпак П. А. Современное состояние и перспективы создания теплозащитных покрытий (ТЗП) для лопаток газотурбинных установок (ГТУ) и оборудования для их нанесения // Новини енергетики. — 2000. — № 9. — С. 32–37.
8. Пат. 40664 Украина. Электронная пушка с линейным термокатодом для электронно-лучевого нагрева / Н. И. Гречанюк, Е. К. Дятлова, П. П. Кучеренко, Е. Л. Пиюл. — БИ. — 2001. — № 7.
9. Пат. 42052 Украина. Защитное покрытие для лопаток газовых турбин / Н. И. Гречанюк, П. П. Кучеренко, В. А. Осокин, И. Б. Афанасьев, С. С. Белик, В. А. Акримов, И. Н. Гречанюк // БИ. — 2001. — № 9.
10. Влияние технологических параметров на структуру внешнего керамического слоя в двухслойных покрытиях металл–керамика, полученных электронно-лучевым осаждением за один технологический цикл / Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, П. А. Шпак, Е. Л. Пиюл // Порошк. металлургия. — 2005. — № 3/4. — С. 41–48.
11. Пат. 2271404 РФ. Способ получения микрослойных термостабильных материалов / Н. И. Гречанюк. — Оpubл. 03.10.2006.
12. Ильинский А. И. Структура и прочность слоистых и дисперсно-упрочненных пленок. — М.: Металлургия, 1986. — 140 с.

13. Пат. 34875 Украина. Композиционный материал для электрических контактов / Н. И. Гречанюк, В. А. Осокин, И. Б. Афанасьев, И. Н. Гречанюк // БИ. — 2001. — № 2.
14. Температурные зависимости статистических механических свойств микрослойного композиционного материала МДК-3 / В. А. Борисенко, В. В. Бухановский, Н. И. Гречанюк и др. // Пробл. прочности. — 2005. — № 4. — С. 113–120.
15. ТУ У 20113410.001-98. Материалы дисперсно-упрочненные для электрических контактов.
16. ТУ У 31.2-20113410-003-2002. Контакты электрические на основе дисперсно-упрочненных материалов (МДК).
17. Шпак П. А., Гречанюк В. Г., Осокин В. А. Влияние электронно-лучевого переплава на структуру и свойства быстрорежущей стали Р6М5 // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2002. — № 3. — С. 14–17.
18. Пат. 37658 Украина. Способ изготовления заготовок для инструмента из быстрорежущей стали / Н. И. Гречанюк, И. Ю. Афанасьев, П. А. Шпак и др. // БИ. — 2003. — № 7.
19. Technological equipment for electron beam refusing on the base of glow discharge electron guns / V. I. Melnik, I. V. Melnik, B. A. Tugay et al. // Electrotechnica and Electronica. — 2006. — № 5/6. — P. 119–121.

The paper describes the current achievements of SPC «Gekont» (Vinnitsa) in the field of practical application of the technologies of vacuum melting and evaporation of materials for deposition of thermal barrier coatings of MeCrAlY and other systems on gas turbine blades, producing condensed composite materials for diverse electrical contacts, remelting the wastes of metals and alloys to produce sound ingots. Information on development and application of specialized equipment is given.

Поступила в редакцию 27.03.2007

ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛС ЕМКостей И ДРУГИХ ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ТОЛЩИНОЙ СТЕНКИ ДО 150 мм ИЗ ЛЕГКИХ СПЛАВОВ

Разработана комплексная технология изготовления с применением электронно-лучевой сварки цилиндрических или конических оболочек и емкостей диаметром от 300 до 8000 мм, используемых в качестве корпусов ракетно-космических аппаратов, топливных систем, сосудов давления или криогенных емкостей, из алюминиевых и магниевых сплавов.

Кроме операций сварки, технология решает проблемы конструктивного исполнения свариваемых кромок различных типов соединений, подготовки поверхности изделий и кромок перед сваркой, выполнения требований к точности сборки и выбору пространственного положения соединений, а также выбора рациональных способов контроля качества и прочностных испытаний сварных соединений при криогенных температурах включительно.

Технология обеспечивает повышение на 15...25 % временного сопротивления соединений термически упрочняемых и усиленно нагартованных алюминиевых сплавов, уменьшение в 4...5 раз остаточных сварочных деформаций и в 5...7 раз ширины зоны термического влияния по сравнению с дуговыми способами сварки.

Предлагается разработка технической документации, передача «ноу-хау» по технологии, технические консультации и инженерные услуги при освоении технологии в производстве.



Контакты: 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 7
 Тел.: (38044) 287 44 06
 Факс: (38044) 287 12 83; 287 46 30