

ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ ВЫПЛАВКА ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ СПЛАВОВ NiCrAlY, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ КАТОДОВ ДЛЯ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Н. И. Гречанюк¹, Ю. А. Смашнюк², Е. В. Хоменко¹,
В. В. Клочихин³, И. Н. Гречанюк²

¹Институт проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины,
03142, г. Киев, ул. Кржижановского, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²НПП «ЭЛТЕХМАШ».

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

³АО «Мотор-Сич».

69068, г. Запорожье, просп. Машиностроителей, 15. E-mail: tb.ugmet@motorcich.com

Разработана экспериментальная электронно-лучевая технология получения трубных заготовок из сплавов NiCrAlY, используемых в качестве катодов при нанесении жаростойких покрытий ионно-плазменным методом. Установлено, что покрытия, нанесенные на лопатки газовых турбин авиационных двигателей с использованием катодов электронно-лучевой выплавки, соответствуют требованиям ТУ АО «Мотор-Сич» на данный вид изделий. Библиогр. 12, табл. 1, ил. 5.

Ключевые слова: электронно-лучевая плавка; жаростойкие сплавы; покрытия; лопатки газовых турбин; ионно-плазменное нанесение

Материалы NiCrAlY используются для защиты жаропрочных сплавов на основе никеля от высокотемпературного окисления и широко применяются в качестве внутреннего связующего металлического слоя в составе термобарьерных покрытий на лопатках газотурбинных двигателей (ГТД), выполняя не только защитные функции, но и снижая разницу в коэффициенте термического линейного расширения между основой и керамическим внешним слоем. Температура газа перед входом в проточную часть в современных ГТД достигает 1700 К. В настоящее время интенсивно ведутся работы по созданию газотурбинных двигателей с рабочей температурой до 2000 К. Жесткие условия эксплуатации лопаток ГТД, связанные с многократной сменой теплового режима при воздействии газовых потоков, насыщенных продуктами сгорания топлива, обуславливают особые требования, предъявляемые к качеству нанесения покрытий на основной материал. Поиски оптимальных технологий для формирования качественного слоя, наносимого на материал лопаток, начатые еще в конце 80-х годов прошлого столетия, показали высокую эффективность ионно-плазменного метода с применением в качестве катодов трубчатых литых заготовок, изготовленных из высокочистых сплавов NiCrAlY [1].

В большинстве случаев литые заготовки подвергаются прокатке, волочению, механической и другим видам обработок для последующего изготовления из них изделий трубчатой формы. Применение многократных технологических переделов приводит к существенному увеличению стоимости изделий и поэтому разработка технологий, позволяющих получить заготовки с последующими минимальными механической, термической и другими видами обработок, остается основной проблемой их производства. Системные исследования по разработке технологий получения трубчатых заготовок из медных, циркониевых, титановых и других сплавов проводятся в Институте электросварки им. Е. О. Патона и Физико-технологическом институте металлов и сплавов НАН Украины, в Международной кампании «АНТАРЕС» и др. [2–4].

Перспективным направлением в развитии этой технологии является применение электронно-лучевой плавки (ЭЛП), широко используемой для получения слитков (слябов) металлов и сплавов высокой чистоты [5]. Однако получение качественных трубчатых заготовок из жаростойких сплавов на никелевой основе способом ЭЛП представляет достаточно сложную техническую задачу, что обусловлено существенным различием

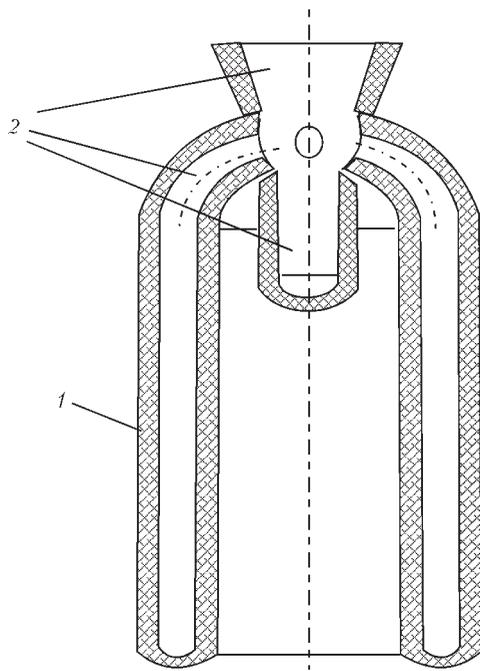


Рис. 1. Схема керамической оболочковой формы для отливки трубных заготовок: 1 — цилиндрическая оболочковая часть; 2 — литниково-питающая система с заливочной чашей

физико-химических характеристик компонентов сплава и технологическими трудностями получения полых изделий из этих сплавов [6, 7]. Поэтому на начальном этапе внедрения ионно-плазменного оборудования в 1981 г. (установка МАП-1 с вакуумно-дуговым способом испарения, разработанная ВИАМ, РФ) для изготовления катодов использовали слитки соответствующих сплавов, которые подвергали сверлению и последующей механической обработке внутренней и внешней частей полых заготовки до требуемых геометрических размеров. Указанная технология является чрезвычайно трудоемкой и затратной особенно при изготовлении катодов из сплавов МЗП6 и СДП2 (Ni-18...24 мас. %, Cr-10...14 мас. %, Al-0,4...1,0 мас. %, Y), обладающих повышенными твердостью и хрупкостью [8, 9]. Около 50 % металла идет в отходы, подвергаемые повторному переплаву. С целью оптимизации технологического процесса во Всероссийском институте авиационных материалов (РФ) предложен способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта, включающий плавку шихтовых материалов и заливку расплава в вакууме в предварительно нагретую литейную форму в виде керамической оболочки с литниково-питающей системой или форму из литейного графита с заливочной чашей, и последующую механическую обработку заготовки (рис. 1) [10].

В технологическом процессе используют двухкамерную индукционную печь с плавильно-за-

ливочной и загрузочной камерами, которые разделены вакуумным затвором, обеспечивающим вакуум на уровне 0,6 Па в плавильной камере. Форму перед заливкой разогревают до температуры 950...1000 °С. Заливку в литейную форму проводят при температуре расплава 1420...1600 °С со скоростью 20...50 кг/мин. Охлаждение отливки до температуры равной температуре плавления сплава осуществляют в вакууме, последующее — в воздушной среде. Необходимо отметить, что использование вакуумно-индукционной плавки при изготовлении заготовок имеет ряд существенных недостатков. Среди них: более низкая по сравнению с ЭЛП степень рафинирования жидкого металла; необходимость изготовления разовых оболочковых форм, а также литниково-питающих систем и заливочных чаш; необходимость подогрева и поддержания требуемой температуры керамической или графитовой оболочковой формы; взаимодействие расплавленного металла с материалом керамической или графитовой формы, приводящее к загрязнению отливки; сложность обеспечения и поддержания высокого перегрева расплава; сложность обеспечения высокой скорости заливки жидкого металла. Снижение скорости заливки приводит к образованию литейных дефектов типа «непропай», обусловленных высокой скоростью кристаллизации на стенках формы струи металла, окислением ее поверхности, что не позволяет получить надежную металлургическую связь между основной отливкой и закристаллизованной сосулькой первичного металла на внутренней поверхности литейной формы.

Эти недостатки не присущи процессу ЭЛП, который, как известно, является наиболее перспективным способом рафинирования и дегазации металла в вакууме [2, 5]. В связи с этим, в НПП «Элтехмаш» совместно с Институтом проблем материаловедения им. И. Н. Францевича НАН Украины освоено опытное производство трубчатых катодов для ионно-плазменного напыления покрытий из сплавов NiAlCrY. Немаловажную роль при разработке технологии изготовления таких катодов сыграла острая необходимость импортозамещения в Украине аналогичных изделий из РФ. Следует отметить, что стоимость единицы изделия, импортируемого в настоящее время из РФ, достигает 6000 дол. США, тогда как цена катода, изготовленного по разработанной технологии, не превышает 4500.

Выплавка трубчатых заготовок из сплавов МЗП6 и МЗП7 осуществляли в два этапа на элек-

тронно-лучевой установке L-4, разработанной и изготовленной в НПП «Элтехмаш» [11]. Установка оснащена четырьмя газоразрядными электронными пушками с холодным катодом мощностью 100 кВ каждая. На первом этапе согласно [9] готовили слитки сплавов МЗП6 и МЗП7 (таблица) в виде цилиндрических заготовок диаметром 100 мм и длиной 250...300 мм.

В рабочей камере установки L-4 монтировали тигельное устройство для выплавки трубчатых заготовок (рис. 2). Необходимое количество слитков заданного химического состава помещали в камеру горизонтального механизма подачи шихты в зону плавки. Перед началом процесса (2-й этап) водоохлаждаемый шток с заправкой перемещали в медный водоохлаждаемый цилиндрический кристаллизатор на высоту 10...15 мм от его верхней кромки. При этом шток фиксировали таким образом, чтобы между ним и кристаллизатором, а также медным водоохлаждаемым цилиндрическим дорном, расположенным соосно с кристаллизатором и закрепленным с помощью специальной траверсы, через которую осуществляется циркуляция воды, не было зазора. В противном случае возможен пролив жидкого металла, что делает невозможным дальнейшее проведение технологического процесса. Диаметр дорна в нижней части несколько меньше, чем в верхней, что исключает заклинивание и деформацию стенок дорна при изъятии его из литой заготовки. Это обеспечивает

Химический состав слитков МЗП6 и МЗП7 после ЭЛП				
Сплавы	Содержание элементов, мас. %			
	Cr	Al	Y	Ni
МЗП6	18...24	11...14	0,4...1,0	основа
МЗП7	→→	4...6	→→	→→

получение цилиндрических металлических трубчатых отливок различного химического состава, так как при кристаллизации сплава, последующем охлаждении отливки и ее термической усадке исключается ее заклинивание и деформация стенок дорна. Заготовки никелевого сплава сплавляли в промежуточную емкость, а жидкий металл постепенно сливался через носик проемности в кристаллизатор. Высота заливки составляла 9...11 мм. В связи с наличием траверсы, которая служит для крепления медного дорна и подвода к нему охлаждающей воды с целью исключения ее разрушения под действием электронного пучка, нагрев поверхности металла в кристаллизаторе осуществляли с помощью двух электронных пушек 1, 2 (рис. 1, б). Лучи пушек сканировали по заданной программе (частота сканирования 50 Гц, ток каждой пушки 0,8...1,0 А), формируя две зоны нагрева в форме соприкасающихся полуколец (рис. 2, б). При раздельном управлении мощностью электронно-лучевых нагревателей может возникать существенный градиент температур в зонах нагрева, что при определенных

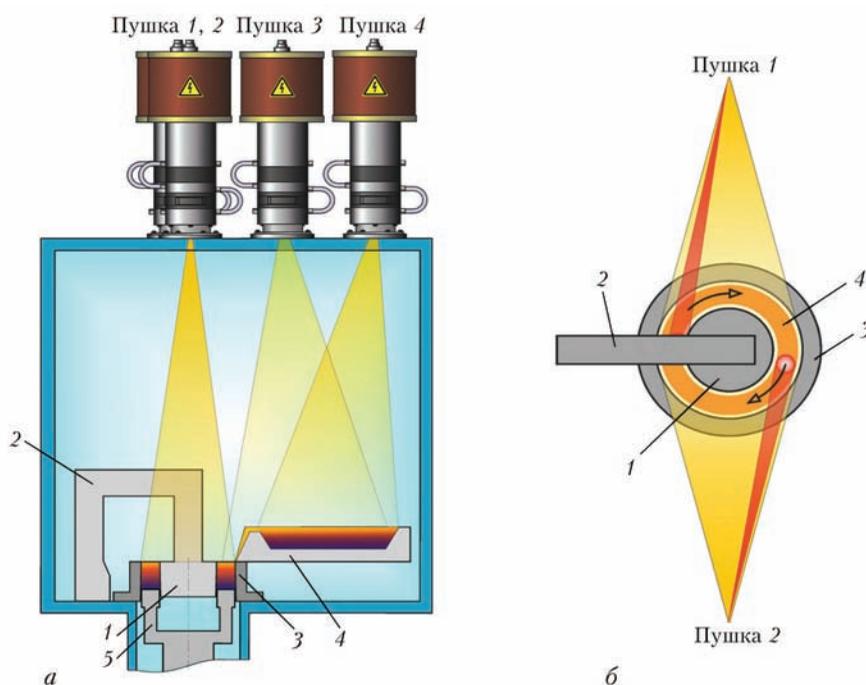


Рис. 2. Схемы конструкции кристаллизатора для получения трубчатой заготовки способом ЭЛП (а) и нагрева ванны расплава двумя электронными пушками с развертками лучей в форме полуколец (б, вид сверху): 1 — водоохлаждаемый дорн; 2 — траверса; 3 — водоохлаждаемый тигель; 4 — промежуточная емкость; 5 — водоохлаждаемый шток с заправкой



Рис. 3. Внешний вид трубчатой заготовки, полученной способом ЭЛП, после выплавки (а) и механической обработки (б)

условиях приводит к растрескиванию и заклиниванию отливки в кристаллизаторе. Поэтому в процессе формирования заготовки осуществлялось синхронное регулирование мощности пушек для поддержания в жидком состоянии поверхности материала в кристаллизаторе при примерно одинаковой температуре. После выдержки первой порции залитого металла в кристаллизаторе в течение 6...8 с заготовку вытягивали со скоростью 1 мм/с, одновременно с этим осуществляя заливку очередной порции металла и контролируя с помощью датчика ее высоту на уровне 9...11 мм. При этом недопустимым является полный выход закристаллизованной части отливки из кристаллизатора.

Таким образом, трубчатая заготовка с внешним и внутренним диаметрами ($D_{\text{внеш}} = 198$, $D_{\text{внутр}} = 114$) и длиной (L) 358...360 мм формировалась в течение 240...250 мин. Ее полностью вытягивали из кристаллизатора и охлаждали в вакууме до температуры 300 °С, после чего извлекали из рабочей камеры установки и охлаждали на открытом воздухе до температуры окружающей среды. Затем заготовку подвергали механической обработке до получения размеров, мм: $D_{\text{внеш}} = 180$, $D_{\text{внутр}} = 140$ и $L = 348$...352. Стружку после химической очист-

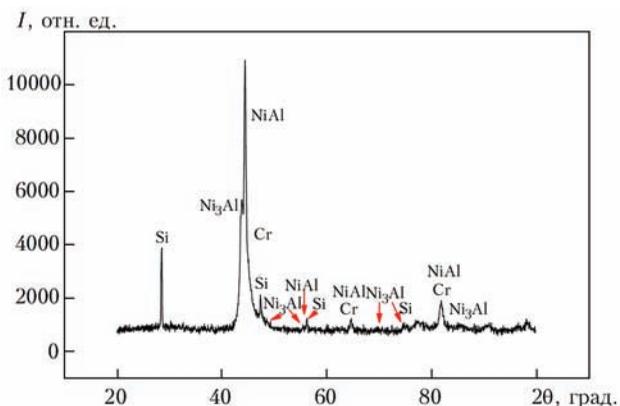


Рис. 4. Фазовый состав трубной заготовки из сплава МЗП6
ки, сушки и компактирования повторно использовали в качестве исходного материала для выплавки заготовок. Внешний вид заготовки после выплавки и механической обработки представлен на рис. 3.

Химический состав полученных заготовок полностью соответствует техническим условиям на катоды согласно ТУ У 27.4-200113410.002–2001 [9] и ТУ У 1-92-113–87 [12]. Визуальный осмотр и контроль геометрических размеров подтверждает соответствие катодов требованиям ТУ 6823-21-38 (АО «Мотор-Сич»).

Фазовый состав материала заготовок определяли на дифрактометре ДРОН-4 съемкой в $\text{Cu-}\alpha$ -фильтрованном излучении в диапазоне углов $2\theta = 20$... 100° с использованием кремния в качестве эталона. Запись дифрактограмм осуществляли при сканировании с шагом $0,05^\circ$. Согласно результатам анализа для литого материала сплава МЗП7 характерно образование твердого раствора на основе никеля. Более сложным является фазовый состав сплава МЗП6. Основными составляющими материала являются жаростойкие фазы β -(NiAl) и γ' -(Ni_3Al), а также α -твердый раствор на основе хрома (рис. 4).

Типичная микроструктура литых заготовок из сплавов МЗП7 и МЗП6 представлены на рис. 5.

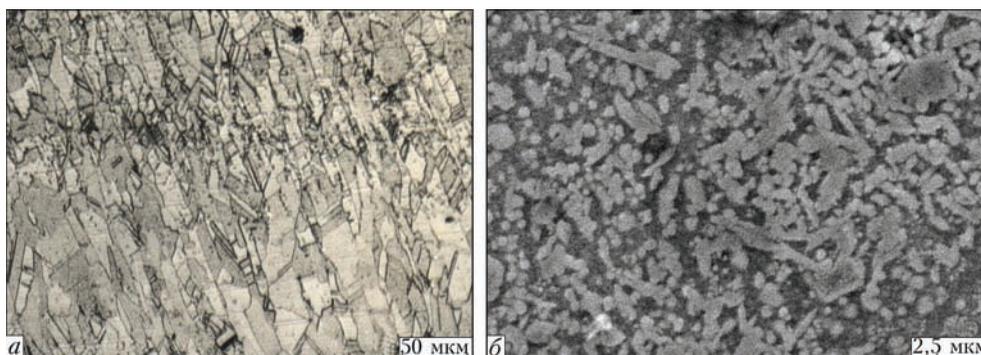


Рис. 5. Микроструктура литых заготовок из сплавов МЗП7 (а) и МЗП6 (б)

Порционная заливка и быстрая кристаллизация расплава приводят к образованию дисперсной структуры. При примерно одинаковом содержании Ni, Cr и Y в сплавах дисперсность элементов структуры возрастает при увеличении содержания алюминия с 4...6 (МЗП7) до 10...14 мас. % (МЗП6), что способствует образованию новых фаз. Следует отметить, что для сплава МЗП7 характерен плавный переход от мелкозернистой структуры в зонах, прилегающих к охлаждаемым поверхностям дорна и кристаллизатора, к крупнозернистой, формирующейся в центральных областях отливки. Для отливок сплава МЗП6 это явление менее выражено.

Проведены экспериментальные работы по оценке возможности применения опытных катодов в АО «Мотор-Сич». В сравнительных исследованиях по нанесению покрытий на поверхность лопаток использовали две отливки производства НПП «ЭЛТЕХМАШ» из сплава МЗП6 и один серийный образец аналогичного состава из сплава марки СДП2 (серийное производство, РФ). Нанесение покрытий проводили на установке АПН-250. Установка с опытным катодом работала стабильно, все параметры соответствовали серийной технологии. На лопатках с покрытием был выполнен контроль шероховатости, который показал, что она составляет $R_a = 1,63 \dots 2,88$ на пере лопатки, и $R_a = 0,67 \dots 3,2$ на проточных поверхностях полок.

Контроль лопаток с покрытием показал, что они соответствуют требованиям ТУ-222-ТУ-20 АО «Мотор-Сич». Проведенные исследования подтвердили, что структура и толщина опытных покрытий соответствует таковым, полученным с использованием серийных катодов.

Выводы

Разработана экспериментальная электронно-лучевая технология выплавки трубчатых катодов для ионно-плазменного нанесения покрытий.

Эксплуатационные характеристики покрытий на лопатках, полученных распылением опытных катодов, соответствуют характеристикам серийных.

Список литературы

1. ВИАМ РФ. <https://viam.ru/review/2725>
2. (2007) *Электронно-лучевая плавка в литейном производстве*. Ладохин С. В. (ред.). Киев, Сталь.
3. Собко-Нестерук О. Е., Третьяк Н. Г., Чайка Н. В. и др. (2013) Производство горячепрессованных и холоднодеформированных труб из литой полой заготовки титанового сплава VT1-0, изготовленной способом электронно-лучевой плавки. *Современная электрометаллургия*, **1**, 15–20.
4. Ахонин С. В., Березос В. А., Крыжановский В. А. и др. (2014) Получение трубных заготовок из титанового сплава VT14 способом ЭЛП. *Там же*, **3**, 21–25.
5. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. (1980) *Электронно-лучевая технология*. Москва, Энергия.
6. Симс Ч., Хагель В. (1976) *Жаропрочные сплавы*. Москва, Металлургия.
7. Елисеев Ю. С., Абраимов Н. В., Крымов В. В. (1999) *Химико-термическая обработка и защитные покрытия в авиадвигателестроении*. Москва, Высшая школа.
8. (1985) *Прутки литые из сплавов СДП1 и СДП2 для жаростойких покрытий: ТУ 1-92-93–84*.
9. (2015) *Материалы в слитках и порошках для защитных покрытий*. Изменение 3 к ТУ У 27.4-20113410.002-001.
10. Фоломейкин Ю. И., Мобуяджан С. А., Каблов Е. Н. и др. (2009) *Способ получения литых трубных изделий из сплавов на основе никеля и/или кобальта*. РФ, Пат. 2344019.
11. Гречанюк Н. И., Кучеренко П. П., Мельник А. Г. и др. (2016) Промышленная электронно-лучевая установка L-4 для переплава и рафинирования в вакууме металлов и сплавов. *Порошковая металлургия*, **7–8**, 138–147.
12. (1987) *Катоды литые трубные: ТУ 1-92-113–87*.

References

1. VIAM RF. <https://viam.ru/review/2725>
2. (2007) *Electron beam melting in foundry*. Ed. by S.V. Ladokhin. Kiev, Stal [in Russian].
3. Sobko-Nesteruk, O.E., Tretyak, N.G., Chaika, N.V. et al. (2013) Manufacture of hot-pressed and cold-deformed pipes of VT1-0 titanium alloy cast hollow billet, produced by electron beam melting method. *Sovrem. Elektrometall.*, **1**, 15–20 [in Russian].
4. Akhonin, S.V., Berezos, V.A., Kryzhanovskii, V.A. et al. (2014) Production of tubular billets from VT14 titanium alloy by EBM process. *Ibid.*, **3**, 21–25 [in Russian].
5. Shiller, Z., Gajzig, U., Pantser, Z. (1980) *Electron beam technology*. Moscow, Energiya [in Russian].
6. Sims, Ch., Hagel, V. (1976) *High-temperature alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
7. Eliseev, Yu.S., Abraimov, N.V., Krymov, V.V. (1999) *Chemical heat treatment and protective coatings in aircraft engine building*. Moscow, Vysshaya Shkola [in Russian].
8. (1985) *Cast rods from SDP1 and SDP2 alloys for heat-resistant coatings: TU 1-92-93–84* [in Russian].
9. (2015) *Materials in ingots and powders for protective coatings*. Version 3 to TU U 27.4-20113410.002-001 [in Russian].
10. Folomejkin, Yu.I., Mobuyadjan, S.A., Kablov, E.N. et al. (2009) *Method of manufacture of cast tubular products of nickel- and/or cobalt-based alloys*. RF, Pat. 2344019 [in Russian].
11. Grechanyuk, N.I., Kucherenko, P.P., Melnik, A.G. et al. (2016) Commercial electron beam installation L-4 for vacuum remelting and refining of metals and alloys. *Poroshk. Metallurgiya*, **7–8**, 138–147 [in Russian].
12. (1987) *Cast tube cathodes: TU 1-92-113–87* [in Russian].

ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВА ВИПЛАВКА ТРУБЧАТИХ ЗАГОТОВОК ЗІ СПЛАВІВ NiCrAlY ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ В ЯКОСТІ КАТОДІВ ДЛЯ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ

М. І. Гречанюк¹, Ю. А. Смашнюк², О. В. Хоменко¹, В. В. Клочихин³, І. М. Гречанюк²

¹Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України.

03142, м. Київ, вул. Кржижанівського, 3. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²НВП «ЭЛТЕХМАШ».

21011, м. Вінниця, вул. Ватутіна, 25. E-mail: vin25ebt@ukr.net

³АТ «Мотор-Січ».

69068, м. Запоріжжя, просп. Машинобудівників, 15. E-mail: tb.ugmet@motorcich.com

Розроблено експериментальну електронно-променеву технологію отримання трубчатих заготовок зі сплавів NiCrAlY, що використовуються в якості катодів при нанесенні жаростійких покриттів іонно-плазмовим методом. Встановлено, що покриття, які нанесено на лопатки газових турбін авіаційних двигунів з використанням катодів електронно-променевої виплавки, відповідають вимогам ТУ АТ «Мотор-Січ» на даний вид виробів. Бібліогр. 12, табл. 1, іл. 5.

Ключові слова: електронно-променева плавка; жаростійкі сплави; покриття; лопатки газових турбін; іонно-плазмове нанесення

ELECTRON BEAM MELTING OF TUBULAR BILLETS FROM NiCrAlY ALLOYS USED AS CATHODES FOR ION-PLASMA COATINGS

N.I. Grechanyuk¹, Yu.A. Smashnyuk², E.V. Khomenko¹, V.V. Klochikhin³, I.N. Grechanyuk²

¹I.M. Frantsevich Institute for Problems of Materials Sciences of the NAS of Ukraine.

3 Krzhizhanovskoho Str., 03142, Kyiv, Ukraine. E-mail: dir@ipms.kiev.ua

²NPP «Eltekhmash».

25 Vatutina Str., 21011, Vinnitsa, Ukraine. E-mail: vin25ebt@ukr.net

³Motor Sich JSC.

15 Motorostroiteley Ave., 69068, Zaporozhye, Ukraine. E-mail: tb.ugmet@motorsich.com

An experimental electron beam technology was developed to produce tubular billets from NiCrAlY alloys used as cathodes when applying heat-resistant coatings using the ion-plasma method. It was established that the coatings applied to the blades of gas turbines of aircraft engines using cathodes of electron beam melting meet the requirements of TS of «Motor-Sich» JSC for this type of products. Ref. 12, Tabl. 1, Fig. 5.

Key words: electron beam melting; heat resistant alloys; coatings; gas turbine blades; ion plasma deposition

Поступила 21.12.2017

ИНТЕРПАЙП ВОЗОБНОВИЛ ПОСТАВКИ СВАРНЫХ ТРУБ В США



<https://www.azovpromstal.com>

Украинская промышленная компания ИНТЕРПАЙП — производитель бесшовных труб и ж/д колес в 2018 г. возобновила поставки сварных труб на американский рынок после длительного перерыва.

Портфель заказов на данный сортament трубной продукции на 2018–2019 гг. составляет около 10 тыс. т.

Специалистам дочерней компании «North American Interpipe» удалось восстановить отношения с крупными дистрибьюторами по поставкам сварных труб. Ранее они приобретали только линейные бесшовные трубы. Возвращение сварных труб ИНТЕРПАЙП на американский рынок позволит компании иметь более диверсифицированный продуктовый портфель и удовлетворять более широкий спектр запросов покупателей.