

УДК 621. 793.7

- Ершов А. В.** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры физики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: <ershov@zntu.edu.ua>
- Зеленина Е. А.** лаборант кафедры технологии машиностроения Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: hellen\_shi@mail.ru
- Мацюк С. Н.** инженер АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: sergeant1738@list.ru

## ВЛИЯНИЕ МОЩНОСТИ ПЛАЗМОТРОНА НА КАЧЕСТВО БЕСКАМЕРНЫХ ТИТАНОВЫХ ПОКРЫТИЙ

*Цель работы* состоит в поиске параметров режима бескамерного напыления, при котором взаимодействие титана с воздухом не приводит к хрупкости и растрескиванию покрытия.

*Методы исследования.* Для исследования микрошлифов покрытий использовался метод оптической микроскопии. Обнаруженные закономерности согласовывались с теоретической моделью нестационарного температурного поля движущегося теплового источника.

*Полученные результаты.* Рассмотрена возможность реализации условий бескамерного нанесения титановых плазменных покрытий при изменении тока дуги плазматрона. Главным препятствием на пути реализации плазменного напыления титана в воздушной среде является его интенсивное взаимодействие с газами при температуре выше 350 °С, поскольку титан – активный химический элемент. Поэтому основное условие при сварке – полная изоляция от окружающей среды, содержащей кислород, азот, водород и другие газы. Установлено, что аргоноплазменное напыление покрытия титана толщиной 0,7–0,8 мм в воздушной среде при мощности аргоновой дуги плазматрона 30 кВт и токе дуги 600 А сопровождается появлением трещин и возникновением значительной пористости покрытия. В данном случае причиной растрескивания покрытия является перегрев и окисление слоя, которые обусловлены действием теплового потока от плазменной струи и осаждающегося металла.

Показано, что в отличие от сварки титановых деталей, плазменное напыление титана возможно и в открытой среде, поскольку процессы нагрева и охлаждения частиц покрытия протекают значительно быстрее, чем при сварке. Установлено, что главным условием предотвращения взаимодействия титана с газами является снижение температуры внешней поверхности покрытия, что достигается путем снижения мощности плазматрона и тока дуги. При этом удается исключить растрескивание и уменьшить пористость покрытия.

*Научная новизна.* Определены параметры нанесения бездефектного аргоноплазменного покрытия в воздушной среде. Экспериментально обнаружено, что при уменьшении мощности плазматрона до 7–8 кВт и тока дуги до 150–180 А исключается растрескивание и уменьшается пористость покрытия.

*Практическая ценность.* Показана возможность плазменного напыления титановых покрытий без применения защитной камеры с контролируемой атмосферой, что обеспечивает снижение затрат на изготовление и эксплуатацию технологического оборудования. Указанные преимущества становятся наиболее существенными для крупногабаритных деталей. Показано, что условия бескамерного нанесения титановых плазменных покрытий реализуются при уменьшении тока дуги плазматрона и не требуют значительной перенастройки оборудования.

*Ключевые слова:* плазменное покрытие; подложка; микрошлиф; плазматрон; коэффициент температуропроводности; нестационарный теплообмен; импланты.

### ВВЕДЕНИЕ

Основным материалом для изготовления костных имплантатов в мировой практике является титан и его сплавы. Титан имеет наиболее благоприятное сочетание биомеханических показателей и биологической инертности. Антикоррозионная устойчивость титана связана с образованием в кислородсодержащей среде плотной оксидной пленки, которая при обычной температуре устойчива к действию агрессивных веществ. При имплантации применяется техничес-

ки чистый титан марок ВТ 1-0, ВТ1-00, в соответствии с ГОСТом 19807-91 (РФ) и согласно стандарту ASTM (Американское общество тестирования материалов) (США). Содержание Ti в марке ВТ1-0 составляет приблизительно 99,24–99,7 %. Наиболее чистым является технический титан марки ВТ1-00 (99,58–99,9 % Ti). ВТ1-0, ВТ1-00 поставляется в виде листов, плит, прутков и труб. Проволока используется для различных сварочных целей и производится из марки ВТ1-00св. ВТ1-00св содержит 99,39–99,9 % Ti.

Критерием выбора марки титана является отсутствие токсических примесей. Механическая прочность титана не уступает прочности нержавеющей стали.

Применение титановых суставов — имплантов требует решения важной проблемы соединения металла с костной тканью. Одним из способов ее решения является создание шероховатой поверхности для повышения прочности зоны срастания с костной и мышечной тканью. По предварительным оценкам высота шероховатости на поверхности импланта должна составлять около 100 мкм. Создание такой шероховатости возможно с помощью плазменного напыления при обеспечении достаточной прочности слоя покрытия.

### 1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Опыт проведения работ по сварке титана показывает, что главным препятствием на пути реализации плазменного напыления титана в воздушной среде является его интенсивное взаимодействие с газами при температуре выше 350 °С, поскольку титан активный химический элемент [1]. Поэтому основное условие при сварке — полная изоляция от окружающей среды, содержащей кислород, азот, водород и другие газы. Кроме того, сварочные работы должны производиться на относительно больших скоростях. При длительном нагревании зерна в кристаллической решетке расширяются, что значительно повышает хрупкость. Поэтому использование обычной сварки недопустимо, поскольку в металл попадают загрязнения в виде оксидов и нитридов, которые понижают эксплуатационные свойства материала.

При сварке титановых сплавов следует исходить из необходимости обеспечения надежной защиты зоны сварки и остывающих участков соединения от контактов с воздухом [2]–[5]. Сварку и плазменное напыление титана проводят в закрытых камерах в среде аргона.

Однако при плазменном напылении нагрев подложки не всегда превосходит 300 °С [6]–[7]. Время пребывания расплавленных частиц покрытия в плазменной струе и охлаждение на подложке составляет тысячные доли секунды, и поэтому не исключается возможность реализации условий бескамерного нанесения покрытий при получении удовлетворительных прочностных характеристик.

### 2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы состоит в поиске параметров режима бескамерного напыления, при котором взаимодействие титана с воздухом не приводит к хрупкости и растрескиванию покрытия.

### 3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для напыления титана использовался плазмотрон с подачей титановой проволоки диаметром 1,5 мм для распыления в аргоновой плазменной струе. Выбор режимов напыления состоял в определении условий оптимального теплового состояния подложки, при котором окисление титана и термические напряжения не нарушают целостности покрытия. Для нанесения покрытия при распылении проволоки плазменной струей использовался плазмотрон Метко-9МВ с диаметром сопла 9 мм, при токе дуги 600 А, расходе аргона 42 л/мин., скорости перемещения плазмотрона относительно подложки 0,1 м/с. За 2 прохода наносились слои разной толщины от 300 до 900 мкм. Микрошлифы покрытий показаны на рис. 1а, б.

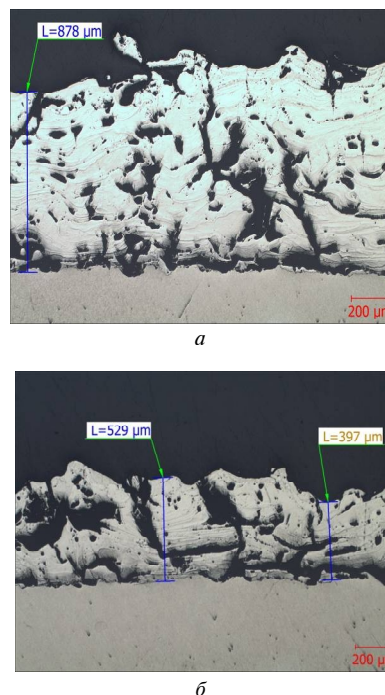


Рисунок 1. Микрошлифы покрытия титана при токе плазмотрона 600 А: а — толщина покрытия более 878 мкм; б — толщина покрытия более 529 мкм

Как видно из рис. 1а, б, при толщинах покрытия 375–878 мкм получена достаточно шероховатая поверхность покрытия. Однако в покрытии присутствуют трещины, которые можно разделить на наклонные и контактные (расположенные на границе покрытия с подложкой). Наклонные трещины приводят к разрыву покрытия, а контактные — к отслоению его от подложки. Наличие трещин и пор с размерами до 60–80 мкм делает невозможным применение покрытия из-за его недостаточной прочности. Причиной растрескивания являются не только термические

напряжения, но и охрупчивание титана при насыщении его кислородом свыше нормативной концентрации 0,015%. Окисление титана сопровождается увеличением его хрупкости. Так, при содержании кислорода 0,3% он полностью теряет упругие свойства. Активное взаимодействие титана с кислородом и другими газами происходит при температуре свыше 350 °С [1]–[2]. Насыщение титана водородом концентрацией выше нормативного содержания 0,01–0,015% приводит к таким негативным последствиям, как хрупкость сплава, появление на его поверхности трещин и пор, что и наблюдается на рис. 1а, б.

Таким образом, основной причиной возникновения трещин является перегрев покрытия в газе с примесью воздуха. Такие условия наблюдаются при выходе покрытия из зоны аргоновой защиты. Перегреву покрытия способствует относительно большой ток дуги плазматрона 600 А. Изменение температуры в зоне плазменного нагрева находится из решения уравнения нестационарной теплопроводности, которое при постоянной плотности поверхностного теплового потока имеет вид [9], [10]:

$$t = \frac{q}{2\lambda\gamma} (\delta - x)^2, \quad (1)$$

где  $t$  – температура среды,  $q$  – плотность поверхностного теплового потока,  $\lambda$  – теплопроводность,  $\delta$  – глубина зоны нагрева металла,  $\alpha = \lambda / \rho c$  – коэффициент температуропроводности,  $\rho$  – плотность,  $c$  – теплоемкость среды,  $\tau$  – время нагрева.

Глубина зоны нагрева металла находится из решения уравнения нестационарной теплопроводности в виде:

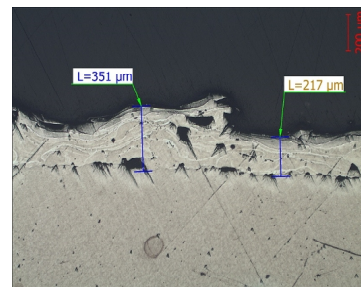
$$\delta = \sqrt{6\alpha\tau}. \quad (2)$$

При напылении на поверхность вращения время нагревания отдельной точки покрытия определится отношением диаметра пятна нагрева –  $D$  к скорости перемещения плазматрона относительно подложки –  $v$ , или  $\tau = D/v$ . Максимальную температуру в зоне осаждения покрытия, согласно [9], можно представить как сумму изменения температуры в зоне плазменного нагрева и температуру поверхности покрытия перед нанесением слоя  $t_2 = 120$  °С :

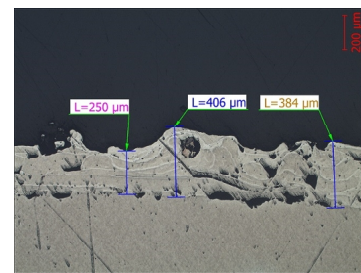
$$t = \frac{q}{2\lambda} \sqrt{6\alpha D/v} + t_2, \text{град}. \quad (3)$$

Регулируемым технологическим параметром является плотность теплового потока и диаметра пятна нагрева. Указанные величины возрастают при повышении тока и мощности плазматрона.

Поэтому, для уменьшения перегрева покрытия использовался плазматрон меньшей мощности Метко-3МВ, с током дуги 150–180А и диаметром сопла 3 мм. Подача и распыление титановой проволоки также выполнялось в аргоновой плазменной струе. Микрошлифы покрытий при токе плазматрона  $I = 180$  А показаны на рис. 2а, б. Снижение тока дуги плазматрона позволило уменьшить окисление и растрескивание слоя покрытия, получить достаточную высоту шероховатости и плотности при толщине покрытия 227–406 мкм.



а



б

Рисунок 2. Микрошлифы покрытий при токе дуги плазматрона  $I = 180$  А

Внешний вид напыленной поверхности показано на рис. 3, где видно отсутствие окисления и наличие достаточной шероховатости покрытия.



Рисунок 3. Внешний вид напыленной поверхности импланта

Наметившаяся тенденция снижения пористости покрытия наблюдалась при уменьшении мощности до 7–8 кВт и тока плазматрона до 150 А, рис. 4. Наибольшая плотность пор наблюдается по границе покрытие-подложка, что связано с остаточным влиянием слоя поверхностных оксидов подложки.

Условие растрескивания покрытия определяется соотношением термических напряжений и когезионной прочности [11]-[15]. Термические напряжения возрастают по толщине слоя покрытия. Как видно на рис. 1, термические микротрещины проникают к поверхности подложки, что свидетельствует о недостаточной когезионной прочности покрытия. Причиной снижения когезионной прочности является насыщение титана газами при повышении мощности и тока дуги плазматрона.

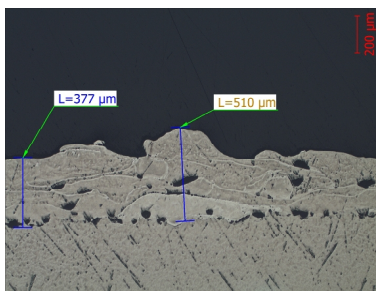


Рисунок 4. Микрорельеф покрытия при токе дуги плазматрона  $I = 150$  А

Снижение мощности плазматрона до 7–8 кВт, при токе дуги 150–180 А, уменьшается охрупчивание титана вследствие насыщения газами, что делает возможным применение бескамерного плазменного напыления титана, поскольку исключает образование трещин в покрытии.

### ВЫВОДЫ

1. Плазменное напыление титана в воздушной среде при мощности плазматрона 30 кВт и токе дуги 600 А сопровождается появлением трещин и возникновением значительной пористости плазменного покрытия.

2. Причиной растрескивания покрытия является перегрев и окисление слоя титана при температуре выше 350 °С, которая обусловлена действием теплового потока от осаждающегося покрытия и плазменной струи. Снижение мощности плазматрона до 7–8 кВт и тока дуги до 150–180 А исключает растрескивание и уменьшает пористость покрытия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Сварка титана и его сплавов неплавящимся электродом (Обзор)/ В. Е. Блащук // Автомат. сварка. – № 4. – 2007. – С. 46–52.  
 [2]. Изготовление и эксплуатация оборудования из титана / Г. М. Шеленков, В. Е. Блащук, Р. К. Мелехов и др. – К. : Техника, 1984. – 120 с.  
 [3]. Машиностроение. Энциклопедия. Т. II: Цветные металлы и сплавы / Под общ. ред. И. Н. Фридляндера. – М. : Машиностроение, 2001. – 880 с.

[4]. Melechow R. Titan i jero stopy / Melechow R., Tubielewicz K., Blaszk W. – Czestochowa: WPC, 2004. – 397 p.  
 [5]. Блащук В. Е. Титан: сплавы, сварка, применение / Блащук В. Е. // Автомат. сварка. – 2004. – № 3. – С. 39–46.  
 [6]. Блащук В. Е. Титан: сплавы, сварка, применение / Блащук В. Е. // Автомат. сварка. – 2004. – № 3. – С. 39–46.  
 [7]. Кудинов В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий./ В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – М. : Машиностроение. – 1981. – 192 с.  
 [8]. Нанесення покриття./ В.М Корж, В.Д. Кузнецов, Ю.С. Борисов, К.А. Ющенко // К. : Аристей, 2005. – 204 с.  
 [9]. Влияние скорости перемещения плазматрона на термоупругие напряжения в плазменных покрытиях / Е. А. Зеленина, С. В. Лоскутов., А. В. Ершов, С. Н. Мацюк // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – №1. – С. 56–59.  
 [10]. Урюков Б.А. Теория эрозии электродов в нестационарных пятнах электрической дуги / Б.А. Урюков // Экспериментальное исследование плазматронов – Новосибирск : Наука, - 1977. -С. 371-383.  
 [11]. Студент М. М. Залежність рівня залишкових напружень від складу покриття і режимів електродугової металізації / М. М. Студент, В. С. Піх // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 1993. – № 5. – С. 46–52.  
 [12]. Похмурський В. І. Виникнення та перерозподіл внутрішніх напружень в покриттях в процесі їх нанесення / В. І. Похмурський, М.М.Студент // Математичні методи та фізико-механічні поля. – 1998. – № 2. – С. 105–108.  
 [13]. Хасуй А. Наплавка и напыление / А. Хасуй, О. Моригаки. – М. : Машиностроение, 1985. – 239 с.  
 [14]. Метод расчета физико - механических характеристик плазменного покрытия на подложке при испытании образцов на изгиб / Е. А. Зеленина, С. В. Лоскутов, А. В. Ершов, С. Н. Мацюк // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – № 2. – С. 107–110.  
 [15]. Напряжение и деформация плазменного покрытия при изгибе подложки / Е. А. Зеленина, С. В. Лоскутов., А. В. Ершов, С. Н. Мацюк // Вісник двигунобудування. – 2017. – № 1. – С. 39–42.

Статья поступила в редакцию 25.05.2018

- Ершов А. В.** д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: <ershov@zntu.edu.ua>
- Зеленіна О. А.** лаборант кафедри технології машинобудування Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: [hellen\\_shi@mail.ru](mailto:hellen_shi@mail.ru)
- Мацюк С. Н.** інженер АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: [sergeant1738@list.ru](mailto:sergeant1738@list.ru)

## ВПЛИВ ПОТУЖНОСТІ ПЛАЗМОТРОНА НА ЯКІСТЬ БЕЗКАМЕРНИХ ТИТАНОВИХ ПОКРИТТІВ

**Мета роботи** полягає в пошуку параметрів режиму безкамерного напилення, при якому взаємодія титану з повітрям не приводить до крихкості і розтріскування покриття.

**Методи дослідження.** Для дослідження мікрошліфів покриттів використовувався метод оптичної мікроскопії. Виявлені закономірності узгоджувалися з теоретичною моделлю нестационарного температурного поля рухомого теплового джерела.

**Отримані результати.** Розглянуто можливість реалізації умов безкамерного нанесення титанових плазмових покриттів при зміні струму дуги плазмоторна. Головною перешкодою на шляху реалізації плазмового напилення титану в повітряному середовищі є його інтенсивна взаємодія з газами при температурі вище 350 °С, оскільки титан - активний хімічний елемент. Тому основна умова при зварюванні - повна ізоляція від навколишнього середовища, що містить кисень, азот, водень та інші гази. Встановлено, що аргоноплазмове напилення покриття титану товщиною 0,7–0,8 мм в повітряному середовищі при потужності аргонової дуги плазмоторна 30 кВт і струмі дуги 600 А супроводжується появою тріщин і виникненням значної пористості покриття. В даному випадку причиною розтріскування покриття є перегрів і окислення шару, які обумовлені дією теплового потоку від плазмового струменя і металу, який осаджується.

Показано, що на відміну від зварювання титанових деталей плазмове напилення титану можливо і у відкритому середовищі, оскільки процеси нагрівання та охолодження частинок покриття протікають значно швидше, ніж при зварюванні. Встановлено, що головною умовою запобігання взаємодії титану з газами є зниження температури зовнішньої поверхні покриття, що досягається шляхом зниження потужності плазмоторна і струму дуги. При цьому вдається виключити розтріскування і зменшити пористість покриття.

**Наукова новизна.** Визначено параметри нанесення бездефектного аргоноплазмового покриття в повітряному середовищі. Експериментально виявлено, що при зменшенні потужності плазмоторна до 7–8 кВт і струму дуги до 150–180 А виключається розтріскування і зменшується пористість покриття.

**Практична цінність.** Показана можливість плазмового напилення титанових покриттів без застосування захисної камери з контрольованою атмосферою, що забезпечує зниження витрат на виготовлення і експлуатацію технологічного обладнання. Зазначені переваги стають найбільш істотними для великогабаритних деталей. Показано, що умови безкамерного нанесення титанових плазмових покриттів реалізуються при зменшенні струму дуги плазмоторна і не вимагають значного переналагодження обладнання.

**Ключові слова:** плазмове покриття; підкладка; мікрошліф; плазмоторн; коефіцієнт температуропровідності; нестационарний теплообмін; імпланти.

- Ershov A. V.** Dr. Tech. Sci., Professor of the Physics Department, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [ershov@zntu.edu.ua](mailto:ershov@zntu.edu.ua)
- Zelenina E. A.** Laboratory assistant of the Mechanical Engineering Department of Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [hellen\\_shi@mail.ru](mailto:hellen_shi@mail.ru)
- Matsyuk S. N.** Engineer, «Motor Sich» JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: [sergeant1738@list.ru](mailto:sergeant1738@list.ru)

## INFLUENCE OF PLASMA TORCH POWER ON QUALITY OF OUT-OF-CHAMBER TITANIUM COATINGS

**Purpose** of the paper is to find such out-of-chamber spraying parameters, when the interaction of titanium with air does not lead to brittleness and cracking of the coating.

**Research methods.** The method of optical microscopy was used for the study of microsections of coatings. The observed regularities were consistent with the theoretical model of unsteady temperature field of the moving heat source.

**Results.** The possibility of out-of-chamber application of the plasma-sprayed titanium coatings with the changed arc current of plasma torch is considered. The main obstacle to the plasma spraying of titanium in the air is its intensive interaction with gases at temperatures above 350 °C, since titanium is an active chemical element. Therefore, the main condition for welding is a complete isolation from the environment containing oxygen, nitrogen, hydrogen and other gases. It is established that argon-plasma spraying of titanium coating with a thickness of 0.7 to 0.8 mm in air with a power of argon arc of the plasma torch of 30 kW and an arc current of 600 A is accompanied with the appearance of cracks and considerable porosity of the coating. In this case, the cause of cracking of the coating is an overheating and oxidation of the layer which is caused by the heat flow from the plasma jet and the depositing metal.

It is shown that, in contrast to welding of titanium parts, plasma spraying of titanium is possible in open medium, since the processes of heating and cooling of the coating particles proceed much faster than in welding. It is established that the main condition for preventing titanium from interacting with gases is a decrease in temperature of the coating outer surface, which is achieved by reducing the plasma torch power and the arc current. In this case, it is possible to eliminate cracking and reduce the coating porosity.

**Scientific novelty.** The parameters of applying a defect-free argon-plasma coating in air are determined. It was experimentally found that when the thickness of plasma torch is reduced to 7 to 8 kW and the arc current is reduced to 150 to 180 A, cracking is eliminated and the coating porosity is reduced.

**Practical value.** The possibility of plasma spraying of titanium coatings without the use of protective chamber with controlled atmosphere is shown, which reduces the manufacturing and operation costs of the process equipment. These advantages become most significant for large parts. It is shown that out-of-chamber application of the plasma-sprayed titanium coatings is realized with the decreased arc current of the plasma torch, and does not require any significant readjustment of the equipment.

**Keywords:** plasma coating; substrate; microsection; plasma torch; coefficient of thermal diffusivity; non-stationary heat exchange; implants.

## REFERENCES

- [1]. Blashhuk V. E. (2007). Svarka titana i ego splavov neplavjashhimsja elektrodom (Obzor). *Avtomatičeskaja svarka*. 4, 46–52. (in Russian.)
- [2]. Shelencov G. M., Blashhuk V. E., Melehov R. K. i dr (1984). Izgotovlenie i ekspluatacija oborudovanija iz titana. Kiev: Tehnika, 120. (in Russian).
- [3]. Fridljander I. N. (2001). Mashinostroenie. Enciklopedija. T. II: Cvetnye metally i splavy M. Mashinostroenie, 880. (in Russian).
- [4]. Melechov R., Tubielewicz K., Blaszk W. (2004). Titan i jero stopy. Czestochowa: WPC, 397.
- [5]. Blashhuk V. E. (2004). Titan: splavy, svarka, primenienie *Avtomatičeskaja svarka*. 3, 39–46. (in Russian).
- [6]. Ljasnikov B. H., Vereshhagina L. A. (1996). Biologičeski aktivnye plazmonapylennye pokrytija dlja implantatov. *Perspektivnye materialy*. 6, 50–55. (in Russian).
- [7]. Kudinov V. V., Ivanov V. M. (1981). Nanesenie plazmoj tugoplavkih pokrytij. Moscow: Mashinostroenie. 192. (in Russian).
- [8]. Korzh V. M., Kuznecov V. D., Borisov Ju. S., Jushhenko K. A. (2005). Nanesennja pokrittja. Kiev. Aristej, 204.
- [9]. Zelenina E.A., Loskutov S.V., Ershov A.V., Macjuk S.N. (2017). Vlijanie skorosti peremeshhenija plaz-motrona na termouprugie naprjazhenija v plazmennih pokrytijah. *Novi materialy i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvani*, 1, 56–59. (in Russian).
- [10]. Urjukov B. A. (1977). Teorija jerozii elektrodov v nestacionarnih pjatnah elektricheskoj dugi. V kn. *Jeksperimental'noe issledovanie plazmotronov*. Novosibirsk: Nauka, 371–383. (in Russian).
- [11]. Student M. M., Pih V. S. (1993). Zalezhnist' rivnja zalishkovih napruzhen' vid skladu pokrit' i rezhimiv elektrodugovoi metalizacii. *Fiz.-him. mehanika materialiv*. 5, 46–52.
- [12]. Pohmurs'kij V. Ī., Student M.M. (1998). Viniknennja ta pererozpodil vnutrishnih napruzhen' v pokrittjah v procesi ih nanesennja. *Matematični metodi ta fiziko-mehanični polja*, 2, 105–108.
- [13]. Hasuj A., Morigaki O. (1985). Naplavka i napylenie. Moscow: Mashinostroenie, 239. (in Russian).
- [14]. Zelenina E. A., Loskutov S.V., Ershov A.V., Macjuk, S.N. (2016). Metod rasčeta fiziko-mehaničeskikh harakteristik plazmennogo pokrytija na podložhke pri ispytanii obrazcov na izgib. *Novi materialy i tehnologii v metalurgii ta mashinobuduvanni*, 2, 107–110. (in Russian).
- [15]. Zelenina E. A., Loskutov S. V., Ershov A. V., Macjuk S. N. (2017). Naprjazhenie i deformacija plazmennogo pokrytija pri izgibe podložhki. *Visnik dvigunobuduvannija*, 1, 39–42. (in Russian).