

УДК 621.793.71

<sup>1</sup>Ф. И. Пантелеенко, чл.-корр. НАН Б, д-р техн. наук, проф., <sup>1</sup>В. А. Оковитый, к.т.н.,<sup>1</sup>О. Г. Девойно, д.т.н., проф., <sup>1</sup>А. С. Володько<sup>2</sup>В. М. Асташинский, чл.-корр. НАН Б, д-р физ.-мат. наук, проф.<sup>1</sup>Белорусский Национальный Технический Университет, г. Минск, Беларусь<sup>2</sup>Института тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 220072, Минск, Беларусь

Тел./Факс: +375 17 293-95-99; +375 17 284-24-91

E-mail: [niil\\_svarka@bntu.by](mailto:niil_svarka@bntu.by); [ast@hmti.ac.by](mailto:ast@hmti.ac.by)

## ПОЛУЧЕНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ САМОФЛЮСУЮЩЕГОСЯ ПОРОШКА НА ОСНОВЕ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА С ДОБАВЛЕНИЕМ МОЛИБДЕНА

В статье приведены исследование влияния добавления Mo и MoS<sub>2</sub> на микроструктуру и свойства покрытия из порошков на базе аустенитных сталей. Покрытия были исследованы с помощью рентгеновской дифракции (XRD), оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (SEM), использовали твердомер по Виккерсу и абразивная износостойкость определяли по методике Pin on disk. Результаты показывают, что покрытие, не содержащее Mo и MoS<sub>2</sub>, состоит из фаз  $\gamma$  (Fe), M<sub>7</sub>(C, B)<sub>3</sub> и (Fe, Cr)<sub>2</sub>B. Добавление Mo и MoS<sub>2</sub> приводит к образованию фаз M<sub>23</sub>(C, B)<sub>6</sub>, Mo<sub>2</sub>(B, C) и Fe<sub>3</sub>Mo<sub>3</sub>(C, B), где (M = Fe, Cr, Mo). Основная цель данных исследований заключалась в изучении характеристик распределения Mo и MoS<sub>2</sub> и влияния их добавления на микроструктуру, твердость (HV), абразивную износостойкость покрытия из сплава на основе аустенитных сталей. Для напыления использовали композиционные материалы на основе аустенитных сталей, полученных методом диффузионного легирования (называемый Aus0Mo), который имеет, близкую к сферической форму с диаметром 50–100 мкм. В порошок композиционного материала на основе аустенитных сталей (называемый Aus3Mo, Aus5Mo и Aus7Mo, соответственно) добавляли 3–7 мас.% порошка Mo 1–1.5 мас.% порошка MoS диаметр менее 50 мкм. Методы наплавки, включая газовую дуговую сварку вольфрамовым электродом, дуговую сварку в защитном газе, плазменную наплавку (РТА) и лазерную наплавку широко применяются в промышленности для повышения износостойкости поверхностей. Наиболее важные различия между этими методами заключаются в скорости осаждения, применимости материалов, разбавлении субстрата, микроструктуре и стабильности твердости после воздействия высоких температур, а также стоимости изготовления. Среди этих методов, описанных выше, плазменное напыление с последующим оплавлением представляет собой очень хорошую альтернативу другим процессам наплавки поверхности. Перегревать покрытие до полного расплавления не следует, так как в этом случае первичные кристаллы карбидов и боридов хрома переходят в жидкий раствор и при последующей кристаллизации образуют более грубую структуру, ухудшая качество покрытия. Именно это не происходит при плазменное напыление с последующим оплавлением, кроме этого способ дешевле, покрытия обладают высоким качеством, конкурентоспособной износостойкостью и высокой стабильностью свойств при высокой температуре.

**Ключевые слова:** плазменное напыление с последующим оплавлением, материалы на основе порошков на базе аустенитных сталей и молибдена, морфология, структура покрытия, фазовые характеристики, абразивная износостойкость

F. I. Panteleenko, V. A. Okovity, O. G. Devojno, A. S. Volodko, V. M. Astashinsky

### FORMING COATINGS FROM SELF-FLUXING POWDER BASED ON STEELS OF AUSTENITE CLASS CADDING MOLYBDENUM

The article presents a study of the effect of the addition of Mo and MoS<sub>2</sub> on the microstructure and properties of coatings of powders based on austenitic steels. The coatings were studied using X-ray diffraction (XRD), optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), a Vickers hardness tester was used, and abrasion resistance was determined by the method Pin on disk. The results show that a coating that does not contain Mo and MoS<sub>2</sub> consists of the phases  $\gamma$  (Fe), M<sub>7</sub>(C, B)<sub>3</sub>, and (Fe, Cr)<sub>2</sub>B. The addition of Mo and MoS<sub>2</sub> leads to the formation of the phases M<sub>23</sub>(C, B)<sub>6</sub>, Mo<sub>2</sub>(B, C) and Fe<sub>3</sub>Mo<sub>3</sub>(C, B), where (M = Fe, Cr, Mo). The main goal of these studies

© Пантелеенко Ф.И., Оковитый В.А., Девойно О.Г., Сидоров В.А., Асташинский В.М.; 2021

was to study the distribution characteristics of Mo and MoS<sub>2</sub> and the effect of their addition on the microstructure, hardness (HB), and abrasion resistance of an alloy coating based on austenitic steels. For deposition, composite materials based on austenitic steels obtained by diffusion alloying (called Aus0Mo), which has a spherical shape with a diameter of 50–100 μm, were used. In powder of a composite material based on austenitic steels (called Aus3Mo, Aus5Mo and Aus7Mo, respectively), 3–7 wt.% of Mo powder 1–1.5 wt.% of MoS powder with a diameter of less than 50 μm were added. Surfacing methods, including gas arc welding with a tungsten electrode, arc welding in shielding gas, plasma surfacing (PTA) and laser surfacing are widely used in industry to increase the wear resistance of surfaces. The most important differences between these methods are deposition rate, applicability of materials, substrate dilution, microstructure and hardness stability after exposure to high temperatures, as well as manufacturing cost. Among these methods described above, plasma spraying followed by fusion is a very good alternative to other surface surfacing processes. The coating should not be overheated until complete melting, since in this case the primary crystals of chromium carbides and borides pass into the liquid solution and, upon subsequent crystallization, form a coarser structure, worsening the quality of the coating. This is precisely what does not occur during plasma spraying followed by reflow; in addition, the method is cheap, coatings are of high quality, competitive wear resistance and high stability of properties at high temperature.

**Keywords:** plasma spraying with subsequent reflow, materials based on powders based on austenitic steel and molybdenum, morphology, coating structure, phase characteristics, abrasive wear resistance

## 1 Введение

В технологиях напыления существует два вида молибденовых покрытий: покрытия из чистого молибдена и покрытия из смеси порошков молибдена и самофлюсующегося сплава. Напыление молибденовой проволокой при помощи газопламенной струи более дешевый и распространенный в напылении процесс, но более высокое качество имеют комбинированные плазменно - напыленные покрытия с использованием молибдена и самофлюсующегося сплава [1-3]. Более подробно рассмотрим механизм формирования этого комбинированного плазменного покрытия. Известно, что температура плавления самофлюсующихся сплавов лежит около 1050°C, тогда как порошок молибдена плавится при 2620°C. При нагревании в плазме такой порошковой смеси до температуры плавления частиц молибдена, образуются сильно перегретые капли расплава самофлюсующегося сплава. Когда такие капли попадают на поверхность получаемого субстрата, у них должно хватать энергии на восстановление получаемых оксидных пленок и образование достаточной металлургической связи с материалом субстрата, а так же на растекание по получаемой поверхности до того, как они закристаллизуются. Из-за довольно высокой температуры плавления, частицы порошка молибдена кристаллизуются практически сразу же, приходя на субстрат, при этом функция этих получившихся застывших частиц не менее важна: остывающие твердые частицы порошка молибдена сохраняют частицы самофлюсующегося сплава длительное время в расплавленном состоянии и соответственно создают собой особые механические препятствия для образования сплошной пленки получившегося расплава, что необходимо для значительного уменьшения усадочных напряжений растяжения в получившемся покрытии. В результате создается принципиальное преимущество получаемого двухфазного покрытия из смеси порошков молибдена и самофлюсующегося сплава: При плазменном напылении на холодный субстрат порошков молибдена или самофлюсующегося сплава по отдельности, нельзя получить плотные покрытия, тогда как из смеси этих материалов это возможно. Для плазменного напыления самофлюсующийся сплав на базе аустенитных сталей ПР-Х18Н9 обычно используется из-за его высокого соотношения производительности и цены по сравнению с другими сплавами, покрытие из сплава на основе аустенитных сталей обладает высокой износостойкостью, на которую влияют главным образом его микроструктура и фазовый состав [4-6]. Легирование с использованием Mo и MoS<sub>2</sub> в качестве технологии для повышения износостойкости самофлюсующихся покрытий приводит к созданию однородной микроструктуры мат-

рицы и, следовательно, повышение износостойкости покрытий. К сожалению, мало опубликованных работ по влиянию добавления Mo и MoS<sub>2</sub> на термостойкость покрытия на основе аустенитных сталей, нанесенного методом плазменного напыления. Поэтому мы в нашем исследовании основное внимание уделяли влиянию этих добавок на микроструктуру, фазовые характеристики, абразивную износостойкость покрытия из сплава на основе аустенитных сталей, нанесенного методом плазменного напыления с последующим оплавлением. Основная цель данных исследований заключалась в изучении характеристик распределения Mo и MoS<sub>2</sub> и влияния их добавления на микроструктуру, твердость (HV), абразивную износостойкость покрытия из сплава на основе аустенитных сталей.

## 2. Формирование плазменных покрытий из композиционные материалы на основе аустенитных сталей, полученных методом диффузионного легирования и молибдена

Для напыления использовали композиционные материалы на основе аустенитных сталей, полученных методом диффузионного легирования (называемый Aus0Mo), которые имеют близкую к сферической форму с диаметром 50–100 мкм. В порошок композиционного материала на основе аустенитных сталей (называемый Aus3Mo, Aus5Mo и Aus7Mo, соответственно) добавляли 3–7 мас.% порошка Mo 1–1.5 мас.% порошка MoS<sub>2</sub> диаметром менее 50 мкм. Покрытия наносились с использованием плазменной установки УПУ-3Д и разработанного нами плазмотрона [7-10]. Параметры плазменного напыления – ток 350 А, дистанция напыления -100 мм, расхода плазмообразующего газа азота для ПР–Х18Н9 - 55 л/мин, фракция - 50-100 мкм, толщина 350 мкм. На рис. 1 приведены микрофотографии поперечного шлифа покрытия Aus5Mo на стальной подложке, полученного атмосферным плазменным напылением.

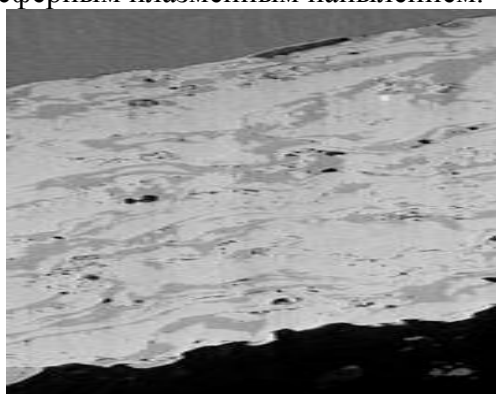


Рисунок 1. Покрытие Aus5Mo (мехсмесь порошков самофлюса на базе аустенитных сталей ПР-Х18Н9 с 5 мас.% добавлением Mo и 1% MoS<sub>2</sub>). Светлая фаза – молибден, более темная – самофлюсующийся сплав x 500

Оплавление проводили на этой же установке приследующих режимах: ток - 450 А, дистанция оплавления - 65-80 мм, расхода плазмообразующего газа азота - 65 л/мин, скорость перемещения 108 мм /мин, количество проходов - 3. Параметры были оптимизированы с точки зрения получения максимальной напыляемости, твердости и толщины осажденных образцов. Наблюдение указывает, что каждый образец может быть в целом разделен на покрытие и подложку. Тонкий белый слой (линия или зона плавления) плоской кристаллизации наблюдается между двумя частями, показывая хорошую металлургическую связь.

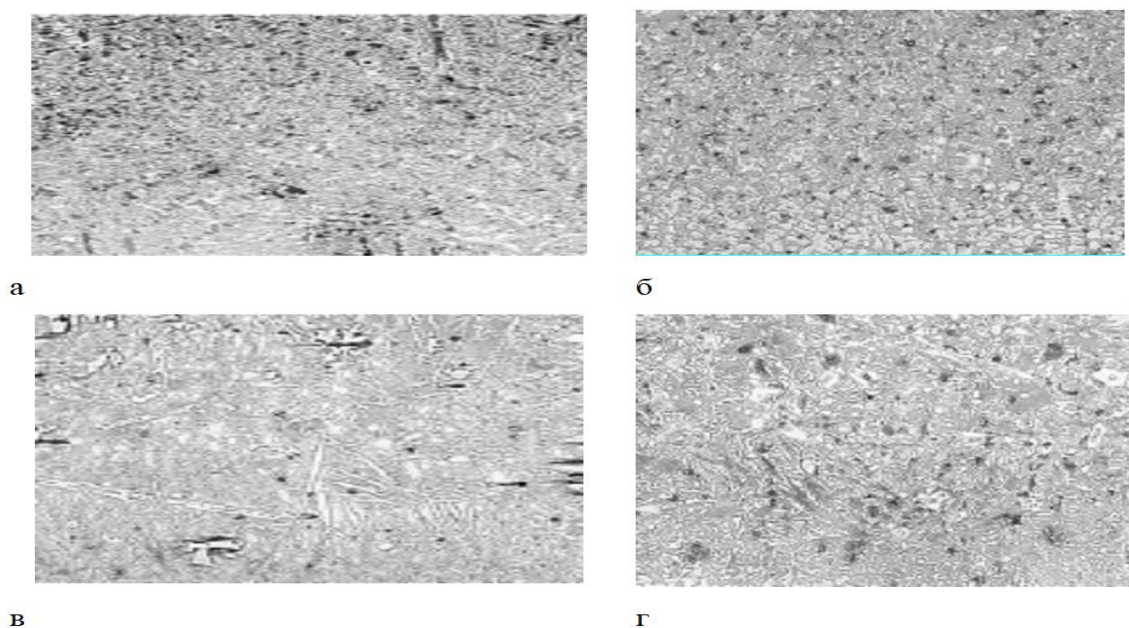


Рисунок 2. Микроструктуры в наплавочных покрытиях: (а) без Мо, (б) 3 мас.% Мо - добавленного, (в) 5 мас.% Мо и (г) 7 мас.% покрытий с добавлением Мо, нанесенных наплавкой (в-з покрытиях 1-1.5мас.% порошка  $\text{MoS}_2$ )

Из рисунков 2 а, б также видно, что типичная гипозвтектическая (доэвтектоидная) микроструктура, характеризующаяся темными дендритами, может быть обнаружена в покрытиях без Мо и с 3 мас.% Мо. Однако очевидная гиперэвтектическая (заэвтектоидная) микроструктура, характеризующаяся яркими игольчатыми соединениями, видна в покрытиях с добавлением Мо 5 мас.% и 7 мас.% (рис. г, д). Это связано с тем, что добавление Мо в покрытие аустенитных сплавов уменьшает точку эвтектики, помогая увеличить относительное содержание соединений в напыленных покрытиях. Можно предположить, что тип микроструктуры покрытия, не содержащего Мо, будет изменен, когда добавление Мо достигает определенного значения. В нашем исследовании гипозвтектическая микроструктура превращается в гиперэвтектическую микроструктуру, когда добавка Мо достигает 5 мас.% и 7 мас.%.

Сравнивая микроструктуру покрытия, не содержащего Мо и  $\text{MoS}_2$ , показанного на рис. а, с микроструктурой покрытия с добавлением Мо и  $\text{MoS}_2$ , показанного на рис. в – г видно, что добавление Мо и  $\text{MoS}_2$  в покрытие из сплава на основе аустенитных сталей улучшает его микроструктуру. И самая тонкая микроструктура может быть получена в 5 мас.% покрытия с добавлением Мо и  $\text{MoS}_2$ . Хотя влияние добавления компонентов на микроструктуру покрытия, не содержащего Мо, неясно, оно может быть результатом изменения характера зародышеобразования и / или изменения химического состава реакции затвердевания. Можно предположить, что фазовое превращение и осаждение были причиной изменения микроструктуры после добавления Мо и  $\text{MoS}$  в покрытие [10-13]. Твердость (HV) для покрытий без и с добавлением Мо и  $\text{MoS}_2$  показаны на рис. 3. Из рисунка 3 а видно, что покрытия с добавлением имеют более высокие значения твердости, чем без Мо и  $\text{MoS}_2$  -покрытий, а самое высокое значение твердости можно получить в 5 мас.% добавлением Мо.

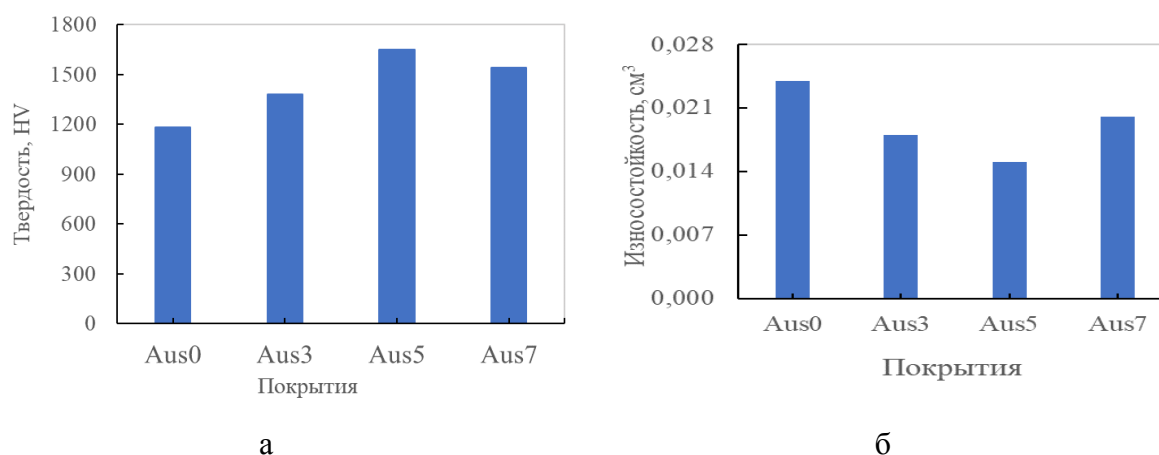


Рисунок 3. Твердость по Виккерсу (а) и (б) абразивная износостойкость покрытий из сплавов FeCrBSi без Mo и с добавлением Mo

На рис. 3 показана абразивная износостойкость покрытий. Можно видеть, что объем износа покрытий уменьшается с увеличением добавления Mo с 0 мас.% до 5 мас.%, что указывает на увеличение стойкости к абразивному износу вследствие добавления Mo и MoS<sub>2</sub> в покрытие из сплава на основе аустенитных сплавов. Однако, когда добавка Mo достигает 7 мас.%, объем износа снова увеличивается, и в результате он ниже, чем у покрытия, не содержащего Mo, но выше, чем у 3 мас.% покрытия с добавлением Mo и MoS<sub>2</sub>. Как было проанализировано выше, добавление 0–5 мас.% Mo и 1–1,5 мас.% MoS<sub>2</sub> в покрытие из сплава на основе аустенитных сплавов не только улучшает его микроструктуру, но и способствует фазовому превращению и осаждению, помогая повысить абразивную износостойкость напыленных покрытий. Когда добавка Mo достигает 7 мас.%, микроструктура снова становится грубой (рис. ж - з), снижая износостойкость. Помимо деформации, происходило хрупкое разрушение из-за ударов дискретных твердых частиц по нанесенным покрытиям. Очевидно, что увеличение вязкости разрушения полезно для повышения эрозионной износостойкости. В настоящем исследовании уточнение микроструктуры и фазовое превращение из твердого M<sub>7</sub>(C, B)<sub>3</sub> в относительно мягкий M<sub>23</sub>(C, B)<sub>6</sub> после добавления Mo и MoS<sub>2</sub> в покрытие из сплава на основе аустенитных сплавов помогают повысить износостойкость. Кроме того, упрочнение твердого раствора, вызванное затвердеванием Mo, ухудшает вязкость разрушения из-за увеличения искажения кристаллической решетки. Следовательно, абразивная износостойкость увеличивается с увеличением добавления Mo с 0 до 5 мас. %, что объясняется увеличением размера зерна, упрочнения и размягчения / размягчения второй фазы выше, чем упрочнение твердого раствора. Однако, когда добавка Mo достигает 7 мас. %, увеличивающееся упрочнение твердого раствора и уменьшающееся упрочнение размера зерна уменьшают абразивную износостойкость, и результат даже ниже, чем у 3 мас.% покрытия с добавлением Mo.

### 3. Заключение

Четыре вида покрытий из сплава на основе аустенитных сталей без или с 3–7 мас.% Mo и 1–1,5 мас.% MoS<sub>2</sub> были нанесены на низкоуглеродистую сталь методом плазменного напыления с последующим оплавлением плазмой. Изучено влияние добавления Mo на микроструктуру, механические свойства покрытия из сплава на основе аустенитных сплавов. Результаты могут быть обобщены следующим образом:

1. Покрытия на основе аустенитных сплавов с 0 мас.% и 3 мас.% Mo и 1–1,5 мас.% MoS<sub>2</sub> имеют гипoeвтектическую структуру. При увеличении добавления Mo до 5

мас.% и 7 мас.% может быть получена гиперэвтектическая структура. Элемент Мо распределяется в основном в (Fe, Cr) -обогатенных соединениях и карбидах молибдена.

2. Не содержащее Мо покрытие на основе аустенитных сплавов состоит из фаз  $\gamma$  (Fe),  $M_7(C, V)_3$  и  $(Fe, Cr)_2V$ . Добавление 3–7 мас.% Мо и 1-1.5 мас.%  $MoS_2$  способствует образованию фаз  $M_{23}(C, V)_6$  и  $Mo_2(V, C)$  и  $Fe_3Mo_3(C, V)$ , за исключением тех, которые существуют в покрытии, не содержащем Мо, и улучшает его микроструктуру. Тончайшая микроструктура может быть получена в 5 мас.% покрытия с добавлением Мо.

3. При увеличении добавления Мо с 0 мас.% до 5 мас.% можно получить очевидное увеличение твердости, когда добавка Мо достигает 7 мас.%, твердость снова уменьшается.

4. Добавление Мо и  $MoS_2$  может повысить абразивную износостойкость покрытия из сплава на основе аустенитных сплавов. Наивысшая стойкость к абразивному износу может быть достигнута в покрытии с добавлением Мо 5мас.%

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Газотермические покрытия / В. Н. Анциферов [и др.]. – Екатеринбург: Наука: Урал. издат. фирма, 1994. – 324 с.
2. Нанесение покрытий плазмой / В. В. Кудинов [и др.]. – М.: Наука, 1990. – 244 с.
3. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. – М., 1985. – 261 с.
4. Оковитый, В. А. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А.Оковитый, А. И.Шевцов, В. В.Оковитый // Порошковая металлургия. – Минск: Белорусская наука, 2008. – Вып. 31.– С.156-162.
5. Sulit, R. A. Thermal spray applications in the U.S. / R. A. Sulit // Thin Thin Solid Films.– 1991. – № 3. – P. 373–374.
6. Лузан, С. А. Повышение долговечности деталей тракторов плазменным напылением / С. А. Лузан // Автоматическая сварка. – 1992. – № 7. – С. 74-75.
7. Ханзаров, Г. М. Повышение износостойкости деталей машин плазменным напылением / Г. М. Ханзаров // Защита металлов. – 1992. – № 3. – С. 453-454.
8. Хасуй, А. Наплавка и напыление / А. Хасуй. – М. Машиностроение, 1985. – 240 с.
9. Valarezo, A. An integrated assessment of process-microstructure- property relationships for thermal-sprayed NiCr coatings / A. Valarezo, S. Sampath // Thermal spraying technology. – 2011. – № 20 – P. 1244-1258.
10. Теория и практика плазменного напыления // Труды Московского высшего технического училища им. Н.Э.Баумана. – М., 1997. – Вып. 1. – 128 с.
11. Okovity, V. Plasma wear-resistant coatings with inclusions of a solid lubricant/ V. Okovity // J. Welding International. – 2003. – Vol. 16, № 11. – P. 918-920.
12. Panteleenko, F. I. Investigation of the structure of wear-resistant coatings / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. // Welding and related technologies: Collected papers of the international symposium. Minsk, 12 April 2012. – С.150-152.
13. Panteleenko, F. I. Development of the technological process of plasma spraying of coatings on parts of transmissions of energy-saturated tractors / Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. // Transactions of GOSNITI, Volume 110, part 2. Moscow, 2012. – P.19-22.

Поступила в редколлегию 27.01.2021 г.