

---

---

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ  
MECHANICAL ENGINEERING  
AND ENGINEERING SCIENCE

---

---

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-95-100>

УДК 621.793.71

## Формирование покрытий из самофлюсующегося порошка на основе сталей аустенитного класса с добавлением молибдена

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко<sup>1)</sup>,  
канд. техн. наук В. А. Оковитый<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно<sup>1)</sup>,  
инженеры В. В. Оковитый<sup>1)</sup>, А. С. Володько<sup>1)</sup>,  
чл.-кор. НАН Беларуси, докт. физ.-мат. наук, проф. В. М. Асташинский<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** Определено влияние добавления Mo и MoS<sub>2</sub> на микроструктуру и свойства покрытия из порошков на базе аустенитных сталей. Покрытия исследовали с помощью рентгеновской дифракции (XRD), оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии (SEM) с использованием твердомера по Виккерсу. Абразивную износостойкость определяли по методике Pin on disk. Результаты показывают, что покрытие, не содержащее Mo и MoS<sub>2</sub>, состоит из фаз  $\gamma(\text{Fe})$ , 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. Цель исследований заключалась в изучении характеристик распределения Mo и MoS<sub>2</sub> и влияния их добавления на микроструктуру, твердость, абразивную износостойкость покрытия из сплава на основе аустенитных сталей. Для напыления использовали композиционные материалы на основе аустенитных сталей, полученных методом диффузионного легирования (Aus0Mo), которые имеют близкую к сферической форму частиц диаметром 50–100 мкм. В порошок композиционного материала на основе аустенитных сталей (Aus3Mo, Aus5Mo и Aus7Mo) добавляли 3–7 мас. % порошка Mo и 1,0–1,5 мас. % порошка MoS<sub>2</sub> с частицами диаметром 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 в стоимости изготовления. Среди методов, описанных выше, плазменное напыление с последующим оплавлением представляет собой хорошую альтернативу другим процессам наплавки поверхности. Перегревать покрытие до полного расплавления не следует, поскольку 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 плазменном напылении с последующим оплавлением. Кроме того, способ дешев, покрытия обладают достойным качеством, конкурентоспособной износостойкостью и стабильностью свойств при высокой температуре.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, оплавление, материалы, порошки, аустенитные стали, молибден, морфология, структура покрытия, фазовые характеристики, абразивная износостойкость

**Для цитирования:** Формирование покрытий из самофлюсующегося порошка на основе сталей аустенитного класса с добавлением молибдена / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 2. С. 95–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-95-100>

---

### Адрес для переписки

Оковитый Вячеслав Александрович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 22,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-93-71  
niil\_svarka@bntu.by

### Address for correspondence

Okovity Vjacheslav A.  
Belarusian National Technical University  
22, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-93-71  
niil\_svarka@bntu.by

## Forming Coatings from Self-Fluxing Powder Based on Steels of Austenite Class Adding Molybdenum

F. I. Panteleenko<sup>1</sup>, V. A. Okovity<sup>1</sup>, O. G. Devoino<sup>1</sup>, V. V. Okovity<sup>1</sup>,  
A. S. Volodko<sup>1</sup>, V. M. Astashinsky<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2</sup>A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents a study of the effect of adding Mo and MoS<sub>2</sub> on the microstructure and properties of a powder coating based on austenitic steels. The coatings have been studied using X-ray diffraction (XRD), optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), a Vickers hardness tester, and abrasion wear resistance has been determined by the Pin on disk method. The results show that a coating that does not contain Mo and MoS<sub>2</sub> consists of the phases  $\gamma(\text{Fe})$ ,  $\text{M}_7(\text{C}, \text{B})_3$  and  $(\text{Fe}, \text{Cr})_2\text{B}$ . The addition of Mo and MoS<sub>2</sub> leads to the formation of phases  $\text{M}_{23}(\text{C}, \text{B})_6$ ,  $\text{Mo}_2(\text{B}, \text{C})$  and  $\text{Fe}_3\text{Mo}_3(\text{C}, \text{B})$ , where  $\text{M} = \text{Fe}, \text{Cr}, \text{Mo}$ . The main goal of these studies was to study characteristics of Mo and MoS<sub>2</sub> distribution and the effect of their addition on the microstructure, hardness, and abrasion wear resistance of an alloy coating based on austenitic steels. Composite materials based on austenitic steels obtained by diffusion alloying (Aus0Mo), which has a nearly spherical shape with a diameter of 50–100  $\mu\text{m}$ , have been used for deposition. 3–7 wt. % of Mo powder and 1.0–1.5 wt. % of MoS<sub>2</sub> powder with a diameter less than 50  $\mu\text{m}$  have been added in the powder of the composite material based on austenitic steels (Aus3Mo, Aus5Mo, Aus7Mo). 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 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 the methods described above, plasma spraying followed by fusion is a good alternative to other surfacing processes. The coating should not be overheated until it is completely melted, since in this case the primary crystals of chromium carbides and borides pass into a 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, reflow, materials, powders, austenitic steels, molybdenum, morphology, coating structure, phase characteristics, abrasive wear resistance

**For citation:** Panteleenko F. I., Okovity V. A., Devoino O. G., Okovity V. V., Volodko A. S., Astashinsky V. M. (2021) Forming Coatings from Self-Fluxing Powder Based on Steels of Austenite Class Adding Molybdenum. *Science and Technique*. 20 (2), 95–100. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-2-95-100> (in Russian)

### Введение

В технологиях напыления существуют два вида молибденовых покрытий – из чистого молибдена и из смеси порошков молибдена и самофлюсующегося сплава. Напыление молибденовой проволокой при помощи газопламенной струи – более дешевый и распространенный процесс, но лучшее качество имеют комбинированные плазменно-напыленные покрытия с использованием молибдена и самофлюсующегося сплава [1–3]. Рассмотрим механизм формирования этого комбинированного плазменного покрытия.

Известно, что температура плавления самофлюсующихся сплавов около 1050 °С, тогда как порошок молибдена плавится при 2620 °С. При нагревании в плазме такой порошковой смеси до температуры плавления частиц молибдена образуются сильно перегретые капли

расплава самофлюсующегося сплава. Когда эти 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 также 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 дольше в расплавленном состоянии и соответственно создают особые механические препятствия для образования сплошной пленки получившегося сплава, что необходимо для значительного уменьшения усадочных напряжений растяжения в получив-

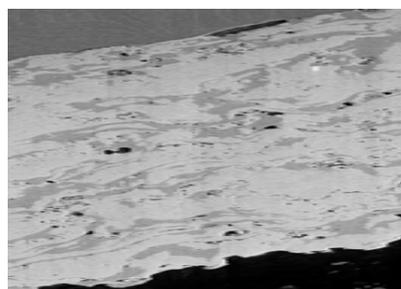
шемся покрытии. В результате создается принципиальное преимущество двухфазного покрытия из смеси порошков молибдена и самофлюсующегося сплава. При плазменном напылении на холодный субстрат порошков молибдена или самофлюсующегося сплава по отдельности нельзя получить плотные покрытия, тогда как из смеси данных 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 главным образом влияют его микроструктура и фазовый состав [4–6].

Легирование с использованием Мо и  $\text{MoS}_2$  в качестве технологии для повышения износостойкости самофлюсующихся покрытий приводит к созданию однородной микроструктуры матрицы и, следовательно, повышению износостойкости покрытий. К сожалению, мало опубликовано работ по влиянию добавления Мо и  $\text{MoS}_2$  на термостойкость покрытия на основе аустенитных сталей, нанесенного методом плазменного напыления. Поэтому в своем исследовании авторы статьи 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. Цель исследований заключалась в изучении характеристик распределения Мо и  $\text{MoS}_2$  и влияния их добавления на микроструктуру, твердость и абразивную износостойкость покрытия из сплава на основе аустенитных сталей.

#### **Формирование плазменных покрытий из композиционных материалов на основе аустенитных сталей, полученных методом диффузионного легирования и молибдена**

Для напыления использовали композиционные материалы на основе аустенитных сталей, полученных методом диффузионного легирования ( $\text{Aus0Mo}$ ), которые имеют близкую к сферической форму частиц диаметром 50–100 мкм.

В порошок композиционного материала на основе аустенитных сталей ( $\text{Aus3Mo}$ ,  $\text{Aus5Mo}$ ,  $\text{Aus7Mo}$ ) добавляли 3–7 мас. % порошка Мо, 1,0–1,5 мас. % порошка  $\text{MoS}_2$  диаметром частиц менее 50 мкм. Покрытия наносились с использованием плазменной установки УПУ-3Д и разработанного авторами статьи плазмотрона [7–10]. Параметры плазменного напыления: ток 350 А, дистанция напыления 100 мм, расход плазмообразующего газа азота для ПР-Х18Н9 составляет 55 л/мин, фракция порошка 50–100 мкм, толщина покрытия 350 мкм. На рис. 1 приведена микрофотография поперечного шлифа покрытия  $\text{Aus5Mo}$  на стальной подложке, полученного атмосферным плазменным напылением.



*Рис. 1.* Покрытие  $\text{Aus5Mo}$  (мехсмесь порошков самофлюса на базе аустенитных сталей ПР-Х18Н9 с добавлением 5 мас. % Мо и 1 мас. %  $\text{MoS}_2$ ): светлая фаза – молибден; темная – самофлюсующийся сплав ( $\times 500$ )

*Fig. 1.*  $\text{Aus5Mo}$  coating (mechanical mixture of self-flux powders based on ПР-Х18Н9 [PR-Kh18N9] austenitic steels with addition of 5 wt. % Мо and 1 wt. %  $\text{MoS}_2$ ): light phase – molybdenum; darker – self-fluxing alloy ( $\times 500$ )

Оплавление проводили на этой же установке при следующих режимах: ток 450 А, дистанция оплавления 65–80 мм, расход 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 осаждения после оптимизации. На рис. 2 представлены типичные сечения морфологии осажденных образцов. Наблюдение показывает, что каждый образец может быть в целом разделен на покрытие и подложку. Тонкий белый слой (линия или зона плавления) плоской кристаллизации наблюдался между двумя частями, показывая хорошую метал-

лургическую связь. Из рис. 2а, в также видно, что типичная гипозвтектическая (дозвтектоидная) 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 5 и 7 мас. % Мо (рис. 2с, d). 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, когда добавка Мо достигает 5 и 7 мас. %. Сравнивая микроструктуру покрытия, не содержащего Мо и MoS<sub>2</sub> (рис. 2а), с микроструктурой с их добавлением (рис. 2с, d), видно, что добавление Мо и MoS<sub>2</sub> в покрытие из сплава на основе аустенитных сталей улучшает его микроструктуру. И самая тонкая микроструктура может быть получена в 5 мас. % покрытия при добавлении Мо и MoS<sub>2</sub>. Хотя

влияние добавления компонентов на микроструктуру покрытия, не содержащего Мо, неясно, оно может быть результатом изменения характера зародышеобразования и/или химического состава реакции затвердевания. Можно предположить, что фазовое превращение и осаждение были причиной изменения микроструктуры после добавления Мо и MoS<sub>2</sub> в покрытие [10–13]. Твердость (HV) для покрытий без и с добавлением Мо и MoS<sub>2</sub> показана на рис. 3. Из рис. 3а видно, что покрытия с добавлением имеют более высокие значения твердости, чем без Мо и MoS<sub>2</sub>, а самое высокое значение твердости можно получить при добавлении 5 мас. % Мо.

На рис. 3 показана абразивная износостойкость покрытий. Можно видеть, что объем износа покрытий уменьшается с добавлением Мо от 0 до 5 мас. %. Это указывает на повышение стойкости к абразивному износу вследствие добавления Мо и MoS<sub>2</sub> в покрытие из сплава на основе аустенитных сталей. Однако когда добавка Мо достигает 7 мас. %, объем износа снова увеличивается, и в результате он меньше, чем у покрытия, не содержащего Мо, но больше, чем покрытия с добавлением 3 мас. % Мо и MoS<sub>2</sub>.

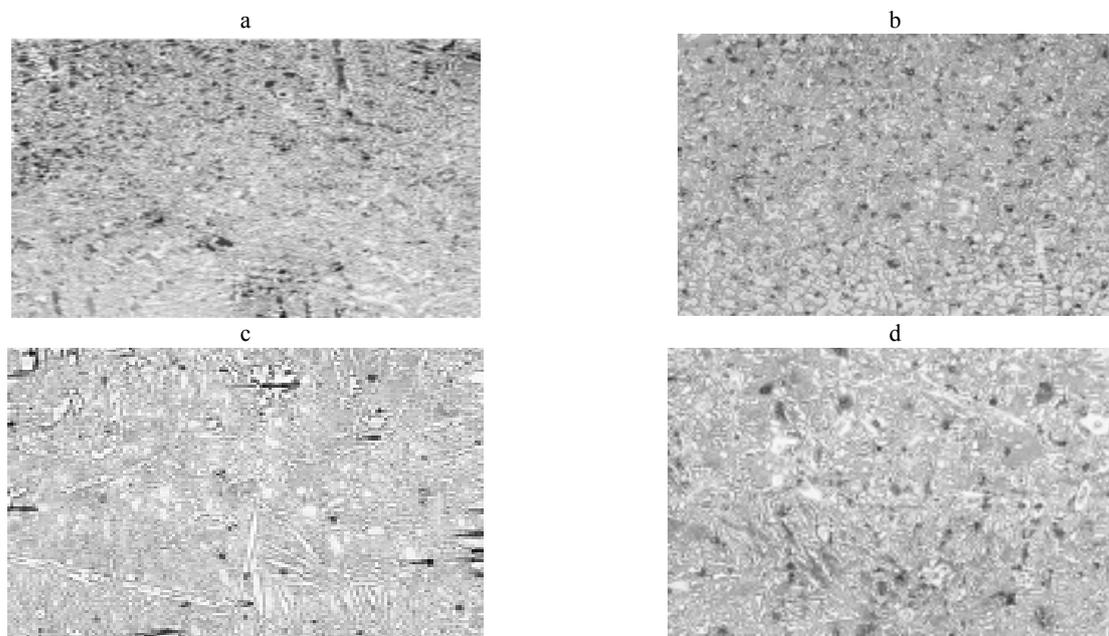


Рис. 2. Микроструктуры в наплавочных покрытиях: а – без Мо; б – с добавлением наплавкой 3 мас. % Мо; с – 5; d – 7 мас. % Мо (в покрытиях 1,0–1,5 мас. % порошка MoS<sub>2</sub>)

Fig. 2. Microstructures in surfacing coatings: а – without Mo; б – with added surfacing of 3 wt. % Mo, с – 5; d – 7 wt. % Mo (in coatings 1.0–1.5 wt. % powder MoS<sub>2</sub>)

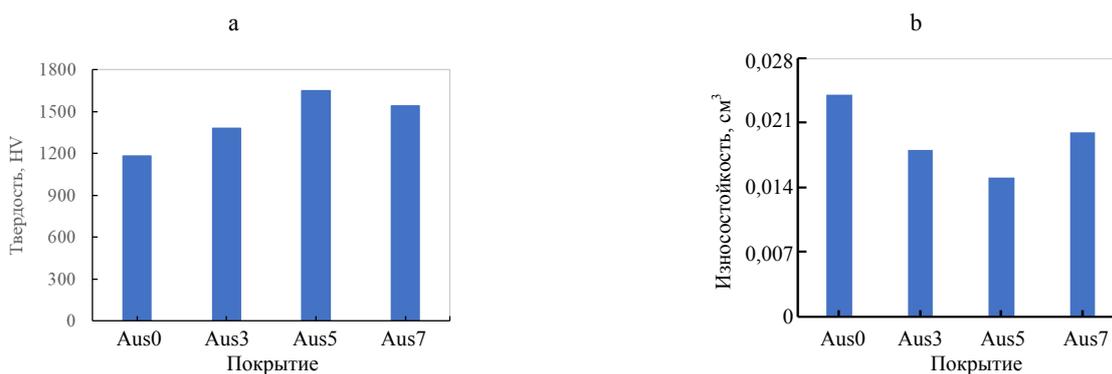


Рис. 3. Твердость по Виккерсу (а) и абразивная износостойкость покрытий из сплавов FeCrBSi без Mo и с добавлением Mo (b)

Fig. 3. Vickers hardness (a) and abrasive wear resistance of coatings from FeCrBSi alloys without Mo and with the addition of Mo (b)

Как было проанализировано выше, добавление 0–5 мас. % Mo и 1,0–1,5 мас. % MoS<sub>2</sub> в покрытие из сплава на основе аустенитных сталей 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, 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, V)<sub>3</sub> в относительно мягкий M<sub>23</sub>(C, V)<sub>6</sub> после добавления Mo и MoS<sub>2</sub> в покрытие из сплава на основе аустенитных сталей помогают повысить износостойкость. Кроме того, упрочнение твердого раствора, вызванное затвердеванием Mo, ухудшает вязкость разрушения из-за увеличения искажения кристаллической решетки. Следовательно, абразивная износостойкость повышается с увеличением добавления Mo от 0 до 5 мас. %, что объясняется увеличением размера зерна, упрочнения и размягчения второй фазы выше, чем упрочнение твердого раствора. Однако, когда добавка Mo достигает 7 мас. %, увеличивающееся упрочнение твердого раствора и уменьшающееся упрочнение размера зерна снижают абразивную износостойкость, и резуль-

тат даже меньше, чем у покрытия с добавлением 3 мас. % Mo.

## ВЫВОДЫ

1. На низкоуглеродистую сталь методом плазменного напыления с последующим оплавлением плазмой наносили четыре вида покрытий из сплава на основе аустенитных сталей без или с 3–7 мас. % Mo и 1,0–1,5 мас. % MoS<sub>2</sub>. Изучено влияние добавления Mo на микроструктуру, механические свойства покрытия из сплава на основе аустенитных сталей.

2. Покрытия на основе аустенитных сталей с 0–3 мас. % Mo и 1,0–1,5 мас. % MoS<sub>2</sub> имеют гипозвтектическую структуру. При увеличении добавления Mo до 5 и 7 мас. % может быть получена гиперэвтектическая структура. Элемент Mo распределяется в основном в (Fe, Cr)-обогащенных соединениях и карбидах молибдена.

3. Не содержащее Mo покрытие на основе аустенитных сталей состоит из фаз  $\gamma$ (Fe), M<sub>7</sub>(C, V)<sub>3</sub> и (Fe, Cr)<sub>2</sub>V. Добавление 3–7 мас. % Mo и 1,0–1,5 мас. % MoS<sub>2</sub> способствует образованию фаз M<sub>23</sub>(C, V)<sub>6</sub> и Mo<sub>2</sub>(V, C) и Fe<sub>3</sub>Mo<sub>3</sub>(C, V), за исключением тех, которые существуют в покрытии, не содержащем Mo, и улучшает его микроструктуру. Тончайшая микроструктура может быть получена с добавлением 5 мас. % Mo.

4. При добавлении Mo от 0 до 5 мас. % можно получить очевидное увеличение твердости. Когда добавка Mo достигает 7 мас. %, твердость уменьшается.

5. Добавление Mo и MoS<sub>2</sub> может повысить абразивную износостойкость покрытия из сплава на основе аустенитных сталей. Наивысшая стойкость к абразивному износу может быть достигнута в покрытии с добавлением 5 мас. % Mo.

#### 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. 407 с.
3. Газотермическое напыление композиционных порошков / А. Я. Кулик [и др.]. Л.: Машиностроение, 1985. 199 с.
4. Оковитый, В. А. Получение композиционного керамического материала для нанесения износостойких покрытий / В. А. Оковитый, А. И. Шевцов, В. В. Оковитый // Порошковая металлургия: респ. межвед. сб. науч. тр. Минск: Белорус. наука, 2008. Вып. 31. С. 156–162.
5. Sulit, R. A. Thermal Spray Applications in the U.S. Navy / R. A. Sulit, V. D. Schaper, H. J. Vanderveldt // *Thin Solid Films*. 1981. Vol. 83, No 3. P. 373–374. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(81\)90642-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90642-8).
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. Vol. 20, No 6. P. 1244–1258. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9665-6>.
10. Труды Московского высшего технического училища имени Н. Э. Баумана. М., 1997. Вып. 1: Теория и практика плазменного напыления. 128 с.
11. Okovity, V. Plasma Wear-Resistant Coatings with Inclusions of a Solid Lubricant / V. Okovity // *Welding International*. 2002. Vol. 16, No 11. P. 918–920. <https://doi.org/10.1080/09507110209549638>.
12. Пантелеенко, Ф. И. Исследование структуры износостойких покрытий / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Сварка и родственные технологии: сб. докл. Междунар. симпоз. Минск, 2012. С. 150–152.
13. Пантелеенко, Ф. И. Разработка технологического процесса плазменного напыления покрытий на детали коробок передач энергонасыщенных тракторов / Ф. И. Пантелеенко, В. А. Оковитый, А. Ф. Пантелеенко // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 110, ч. 2. С. 19–22.

Поступила 17.01.2020  
Подписана в печать 31.03.2020  
Опубликована онлайн 30.03.2021

#### REFERENCES

1. Antsiferov V. N., Shmakov A. M., Ageev S. S., Bulanov V. Ya. (1994) *Gas-Thermal Coatings*. Ekaterinburg, Nauka Publ. 324 (in Russian).
2. Kudinov V. V., Pekshev P. Yu., Belashchenko V. E., Solonenko O. P., Safiullin, V. A. (1990) *Application of Plasma Coating*. Moscow, Nauka Publ. 407 (in Russian).
3. Kulik A. Ya., Borisov Yu. S., Mnukhin A. S., Nikitin M. D. (1985) *Gas-Thermal Evaporation of Composite Powders*. Leningrad, Mashinostroenie Publ. 199 (in Russian).
4. Okovity V. A., Shevtsov A. I., Okovity V. V. (2008) Obtaining Composite Ceramic Material for Applying Wear-resistant Coatings. *Poroshkovaya Metallurgiya. Respublikanskii Mezhdovomstvennyi Sbornik Nauchnykh Trudov* [Powder Metallurgy. Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusskaya Nauka Publ., (31), 156–162 (in Russian).
5. Sulit R. A., Schaper V. D., Vanderveldt H. J. (1981) Thermal Spray Applications in the U.S. Navy. *Thin Solid Films*, 83 (3), 373–374. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(81\)90642-8](https://doi.org/10.1016/0040-6090(81)90642-8).
6. Luzan S. A. (1992) Increasing the Durability of Tractor Parts by Plasma Spraying. *Avtomaticheskaya Svarka = Automatic Welding*, (7), 74–75 (in Russian).
7. Khanzarov G. M. (1992) Increasing the Wear Resistance of Machine Parts by Plasma Spraying. *Zashchita Metallov* [Protection of Metals], (3), 453–454 (in Russian).
8. Khasui A. (1985) *Surfacing and Spraying*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).
9. Valarezo A., Sampath S. (2011) An Integrated Assessment of Process-Microstructure – Property Relationships for Thermal-Sprayed NiCr Coatings. *Thermal Spraying Technology*, 20 (6), 1244–1258. <https://doi.org/10.1007/s11666-011-9665-6>.
10. *Proceedings of Bauman Moscow Higher Technical School. Issue 1: Theory and Practice of Plasma Spraying*. Moscow, 1997. 128 (in Russian).
11. Okovity V. (2003) Plasma Wear-Resistant Coatings with Inclusions of a Solid Lubricant. *Welding International*, 16 (11), 918–920. <https://doi.org/10.1080/09507110209549638>.
12. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. (2012) Investigation of the Structure of Wear-Resistant Coatings. *Svarka i Rodstvennyye Tekhnologii: Sb. Dokl. Mezhdunar. Simpoz.* [Welding and Related Technologies: Collected Papers of the International Symposium]. Minsk, 2012, 150–152 (in Russian).
13. Panteleenko F. I., Okovity V. A., Panteleenko A. F. (2012) Development of the Technological Process of Plasma Spraying of Coatings on Parts of Transmissions of Energy-Saturated Tractors. *Trudy GOSNITI* [Transactions of GOSNITI], 110 (2), 19–22 (in Russian).

Received: 17.01.2020

Accepted: 31.03.2020

Published online: 30.03.2021