

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621. 793.724

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).2.35-40](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).2.35-40)

М.М. Студент, пров. наук. співр., проф., д-р техн. наук
Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна
e-mail: student.phmi@gmail.com

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: marko60@ukr.net

Х.Р. Задорожна, наук. співр., канд. техн. наук, **В.М. Гвоздецький**, ст. наук. співр., канд. техн. наук
Фізико-механічний інститут ім. Карпенка НАН України, м. Львів, Україна
e-mail: 880988@ukr.net, gvosdetcki@gmail.com

Залежність структури електродугових покриттів від параметрів напilenня деталей транспортної техніки

Досліджено умови плавлення та структуру покриттів, напilenних методом електродугового напilenня залежно від тиску повітряного струменю. Показано, що збільшення тиску металоповітряного потоку від 0,6 до 1,2 МПа підвищує швидкість струменю від 300 до 600 м/с, при цьому дисперговані краплини досягають швидкості від 120 до 220 м/с. Відповідно це викликає зменшення товщини ламелей електродугового покриття, а також сприяє формуванню підвищеної кількості оксидної фази на поверхні ламелей. Це збільшує мікротвердість покриття із У8 із 350-400 НВ за тиску 0,6 МПа. до 450...500 НВ за тиску 1,2 МПа. Мікротвердість покриттів із 90Х17РЗГС зростає від 600 до 740 НВ.

структура, напilenня, сопло Лавалля, швидкість струменю, мікротвердість, деталь, транспортна техніка

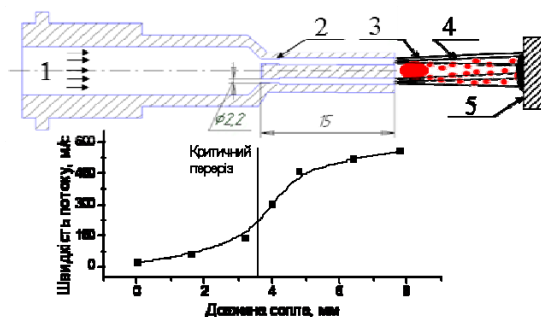
Постановка проблеми. Використання спеціальних порошкових дротів для електродугового напilenня дозволяє отримувати покриття із високою зносостійкістю [1,2]. Однак недостатня адгезія та когезія отриманих покриттів не дозволяє застосовувати ці покриття за підвищених робочих навантажень [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Літературні джерела засвідчують, що для підвищення механічних характеристик газотермічних покриттів використовують надзвуковий газовий струмінь, який транспортує розплавлені краплини до напилюваної поверхні, підвищуючи їх кінетичну енергію [4,5]. Використання паливних газів для отримання надзвукового струменю в процесі електродугового напilenня покриттів лише частково підвищує фізико-механічні характеристики покриттів, але ускладнює і суттєво здорожує обладнання та процес напilenня [6,7,8]. У даній статті для підвищення механічних характеристик електродугових покриттів запропоновано застосовувати надзвуковий повітряний струмінь за використання сопла Лавалля та підвищення тиску повітряного струменю з 0,6 до 1,0...1,2 МПа.

Постановка завдання. Мета дослідження: встановити вплив тиску повітряного струменю на структуру електродугових покриттів.

Виклад основного матеріалу. Електродугові покриття товщиною 1 мм наносили металізатором ФМІ-2 котрий спроектований та виготовлений на виробничих потужностях Фізико-механічного інституту НАН України. В роботі застосовувались електродні дроти суцільного перерізу – У8, та порошкові дроти 90Х17РЗГС. Покриття напиляли за наступних режимів: напруга $U = 32$ В, струм $I = 150$ А, тиск повітряного потоку 0,6, 1,2 МПа з витратою $1,3 \text{ м}^3/\text{хв}$, відстань від дуги до поверхні зразка складала 120 мм. Здійснювалась попередня обробка поверхні корундом. Мікротвердість покриття визначали за допомогою приладу ПМТ-3 при навантаженні 200 г.

Електродугове напилення здійснювали в режимі надзвукової швидкості металоповітряного струменю з числом Маха 2. При цьому використовували сопло Лавалю в котрому застосовувався метод вертикального розташування двох повітряних каналів у соплі, що мали критичний діаметр кожного отвору 2,2 мм. (рис. 1), довжиною надзвукової частини 15 мм.

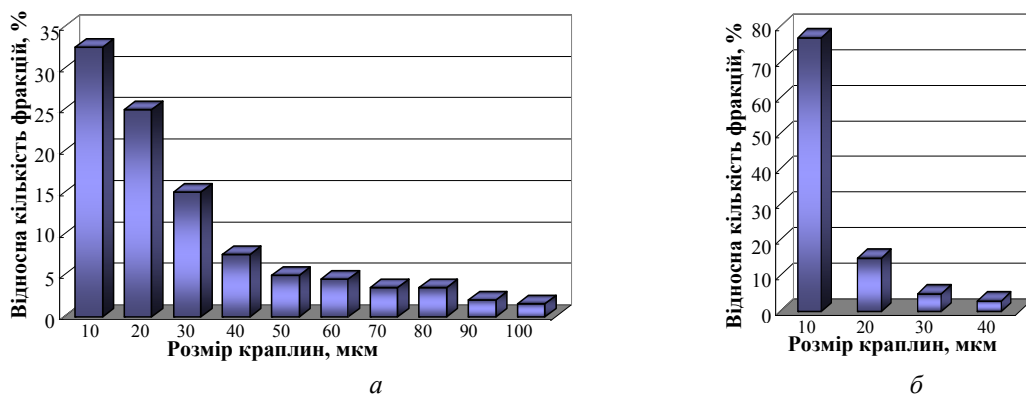


1 – струмінь повітря 2 – критичний переріз сопла, 3 – розплав з електродних дротів,
4 – метало повітряний потік, 5 – дослідний зразок

Рисунок 1 – Схема сопла електродугового розпилювача з ефектом надзвукового потоку
Джерело: розроблено авторами

Визначено, що зростання тиску струменю від 0,6 до 1,2 МПа викликає збільшення швидкості потоку у 2 рази в діапазоні від 300 до 600 м/с (рис. 2). Зростає також швидкість диспергованих часток електродних порошкових дротів від 60 – 90 м/с до 160 – 220 м/с, при цьому їх розмір зменшується.

Крім того забезпечується вища температура розплавлених часток при вдарянні об напилювану поверхню за рахунок зменшення часу польоту диспергованих краплин від дуги до напилюваної поверхні. При цьому зменшується кут розширення металоповітряного струменю (рис. 3) із 30° до 15° .



а – 0,6 МПа; б – 1,2 МПа

Рисунок 2 – Фракційний розподіл краплин із ПД 90Х17РЗГС

Джерело: розроблено авторами

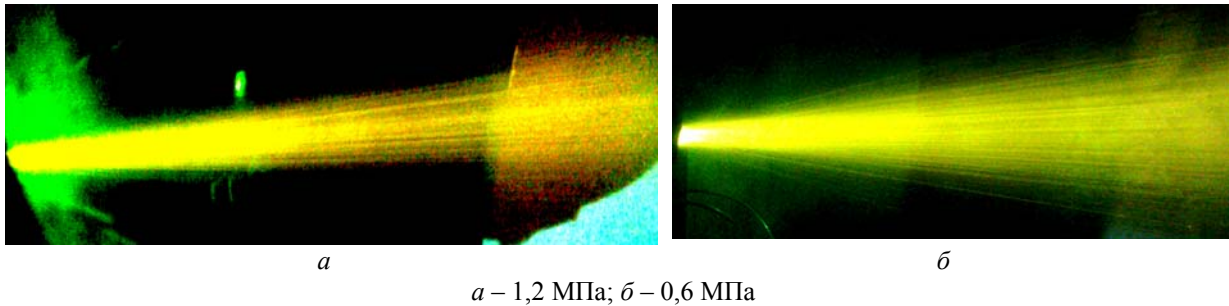


Рисунок 3 – Вплив тиску повітряного струменю на кут розширення металоповітряного потоку
Джерело: розроблено авторами

Збільшення тиску повітряного струменю змінює умови евакуації краплин із торців електродних дротів (рис. 4). Зона плавлення дроту суттєво зростає, зменшується густина струму на торцях дроту. Це зменшує температуру розплаву (температура розплаву за тиску 0,6 МПа становить 2000...2200°С) але збільшує час знаходження розплаву між торцями дроту. Це дозволяє повніше розчинити тугоплавкі шихтові матеріали у розплаві сталльної оболонки та підвищує рівень диспергування продуктів розплаву з електродних дротів і забезпечує зменшення розміру краплин при формуванні покриття.

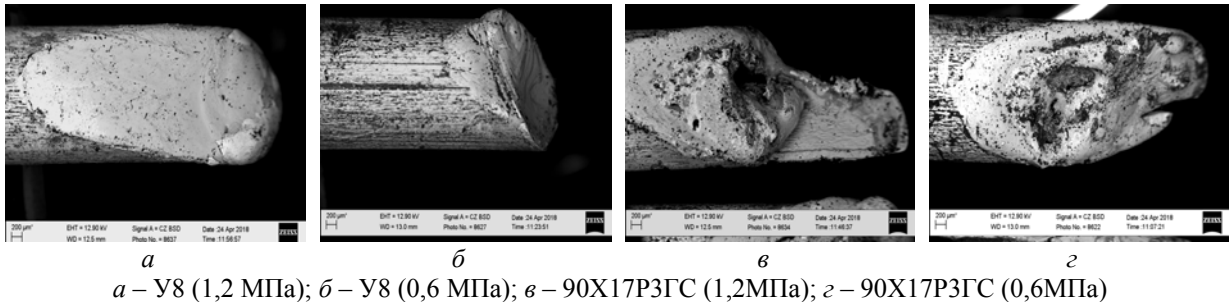


Рисунок 4 – Вид торців порошкового дроту У8 та ПД Х18Р3С2 після наплення за різних тисків повітряного струменю
Джерело: розроблено авторами

При застосуванні в процесі розпилення тиску повітря 0,6 МПа розмір диспергованих краплин складає від 30 до 100 мкм, (рис. 5 а), а при тиску повітря 1,2 МПа – 10...30 мкм і менше (рис. 5б). Проведені металографічні дослідження підтверджують результати фракційного розподілу краплин за тиску 1,2 МПа (рис. 2б).

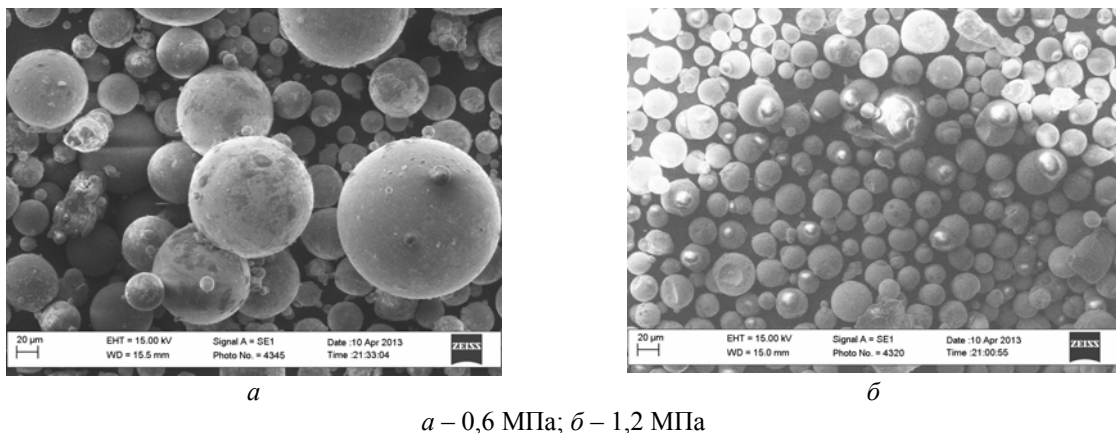


Рисунок 5 – Розмір та форма краплин отриманих із ПД 90X17P3ГC за різного тиску повітряного струменю
Джерело: розроблено авторами

В процесі формування покриття на поверхні диспергованих краплин розплаву формуються оксидні плівки різного складу. При цьому відбувається часткове або повне їх окиснення через зменшення розмірів краплин, котре забезпечує зростання площі їх контактної взаємодії з повітрям і як наслідок, збільшується кількість оксидів і формування композиційної структури покриття (рис.5).

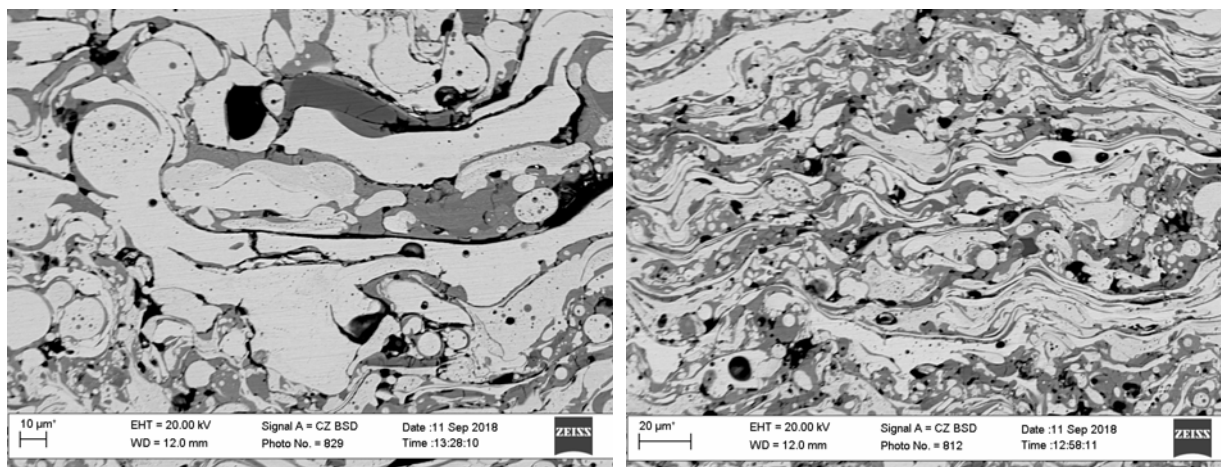
За тиску розпилення 0,6 МПа вміст оксидів у покритті зростає у 1,7 рази. Так вміст кисню у структурі покриття із дроту У8 за тиску 0,6 МПа становить 7 мас.%, а за тиску –1,2 МПа становить 12 мас % (табл. 1). Вміст кисню у покритті із ПД90Х17РЗГС із підвищенням тиску не зростає. Це зумовлено наявністю у покритті кремнію та бору які сильно сповільнюють окиснення розплавлених краплин як за тиску 0,6МПа так із тиску 1,2 МПа.

Таблиця 1 – Вплив тиску повітряного струменю на кількість кисню у покриттях

| Електродні дроти | Тиск повітряного струменю, МПа | |
|------------------|--------------------------------------|-----------|
| | 0,6 | 1,2 |
| | Вміст кисню у покритті, % мас / % ат | |
| У8 | 7,2/17,8 | 12,3/29,6 |
| ПД90Х17РЗГС | 4,5/11,5 | 4,3/10,6 |

Джерело: розроблено авторами

Як правило оксидна фаза (включення темного кольору) розташовується між ламелями покриття (рис. 6), але іноді покриття формується ламелями в котрих повністю окиснені краплин. У покриттях із 90Х17РЗГС утворюється суттєво менше оксидних фаз (рис. 7).



а

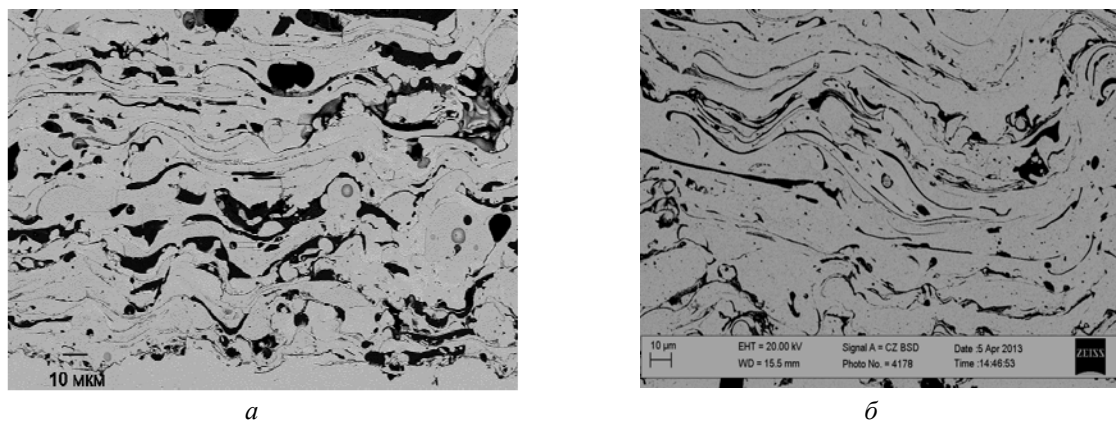
б

а – 0,6 МПа; б – 1,2 МПа

Рисунок. 6 – Структура покриття із У8 напиленого за різного тиску повітряного струменю

Джерело: розроблено авторами

Слід зазначити що при збільшенні тиску повітряного струменю кількість кисню у покриттях незначно зменшується. При цьому товщина оксидних плівок в ламелях покриття при тиску розпилення 1,2 МПа становить 1...3 мкм (рис. 7), при цьому товщина плівок за тиску 0,6 МПа може досягати 20 мкм.



а

б

а – 0,6 МПа; б – 1,2 МПа

Рисунок 7 – Структура покриття із 90X17P3ГС напиленого за різного тиску повітряного струменю
Джерело: розроблено авторами

Разом з тим мікротвердість оксидних включень заліза – вюститу, магнетиту, та гематиту в напиленому покритті з нелегованого сталюого дроту досягає меж 700-800 HV. Це забезпечує мікротвердість напиленого покриття із У8 на рівні 350-400 HV за тиску 0,6 МПа.

Разом з тим при напилення цього ж покриття за тиску 1,2 МПа розмір ламелей та оксидів зменшується, а об'ємний вміст їх зростає, забезпечуючи підвищення мікротвердості на рівні 450...500 HV. При цьому мікротвердість покриттів із 90X17P3ГС зростає від 800 до 910 HV.

Висновки

1. Дослідженням визначено, що збільшення тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа викликає підвищення швидкості повітряного струменю від 300 до 600 м/с, а швидкість диспергованих часток розплаву зростає від 120 до 220 м/с.

2. Зростання тиску повітряного струменю від 0,6 до 1,2 МПа викликає зменшення товщини ламелей покриття, при цьому спостерігається збільшення оксидної фази у напиленому покритті та зростання твердості покриття.

Список літератури

1. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures / Wielage B. et al. *Surface and coating technology*. 2013. № 220. P. 27–35.
2. Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings / Student, M.M. et al. *Materials Science*. 2022. 58(1). P. 96–104.
3. Багатофункціональні електродугові покриття : монографія / М. М. Студент та ін. - Львів : Простір-М, 2018. 335 с.
4. Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures / Pokhmurskyi V. I. et al. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2013. Vol. 22. P. 34-41.
5. Вплив діаметра електродних порошкових дротів на механічні характеристики електродугових покриттів / Студент М.М. та ін. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2020. Вип. 3(34). С. 32-44.
6. Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings / Stupnyts'kyi T.R. et al. *Materials Science*. 2016. Vol. 52, № 2. P. 165–172.
7. Mechanical Properties of Arc Coatings Sprayed with Cored Wires with Different Charge Compositions / Student M. et al. *Coatings*. 2022. №12(7). 925.
8. Абразивна зносостійкість та трибологічні характеристики електрометалізаційних композиційних покриттів / М.М. Студент та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2022. № 1. С. 90-97.

References

1. Wielage, B. et al. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures (2013). *Surface and coating technology*, No.220, 27–35 [in English].
2. Student, M.M. et al. (2022). Abrasive Wear Resistance and Tribological Characteristics of Electrometallized Composite Coatings. *Materials Science*, 58(1), 96–104 [in English].
3. Student, M. M., Pokhmurska, H. V., Hvozdet's'kyj, V. M. et al. (2018). *Bahatofunktsional'ni elektroduhovi pokryttia [Multifunctional electric arc coatings]*. Lviv : Prostir-M [in Ukrainian].
4. Pokhmurskyi, V.I. et al. (2013). Arc-sprayed iron-based coatings for erosion-corrosion protection of boiler tubes at elevated temperatures. *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol.22, P. 34-41[in English].
5. Student, M.M. et al. (2020). Vplyv diametra elektrodnykh poroshkovykh drotiv na mekhanichni kharakterystyky elektroduhovykh pokryttiv [The effect of the diameter of the electrode flux-cored wires on the mechanical characteristics of electric arc coatings]. *Tsentral'noukrains'kyj naukovyj visnyk. Tekhnichni nauky - Central Ukrainian scientific bulletin. Technical sciences*, 3(34), 32-44 [in Ukrainian].
6. Stupnyts'kyi, T.R. et al. (2016). Optimization of the Chromium Content of Powder Wires of the Fe–Cr–C and Fe–Cr–B Systems According to the Corrosion Resistance of Electric-Arc Coatings. *Materials Science*, Vol. 52, No. 2, P. 165–172 [in English].
7. Student, M. et al. (2022). Mechanical Properties of Arc Coatings Sprayed with Cored Wires with Different Charge Compositions. *Coatings*, 12(7), 925 [in English].
8. Student, M.M. et al. (2022). Abrazyvna znosostykist' ta trybolohichni kharakterystyky elektrometalizatsijnykh kompozytsijnykh pokryttiv [Abrasive wear resistance and tribological characteristics of electrometallization composite coatings]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv – Physicochemical Mechanics of Materials*, 1, 90-97 [in Ukrainian].

Mykhajlo Student, Prof, Leading Researcher

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Sergiy Markovych, Assos. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Khrystyna Zadopozna, PhD tech. sci., Research,

Volodymyr Hvozdet's'kii, PhD tech. sci., Senior Research

Karpenko Physico-Mechanical Institute of NAS of Ukraine, Lviv, Ukraine

Dependence of the structure of electric arc coatings on the parameters of sputtering of parts of transport equipment

The use of special flux-cored wires for electric arc spraying allows for coatings with high wear resistance. However, the insufficient adhesion and cohesion of the resulting coatings does not allow these coatings to be used under increased operating loads. To improve the mechanical characteristics of gas-thermal coatings, a supersonic gas jet is used to transport molten droplets to the sprayed surface, increasing their kinetic energy. It is proposed to apply a supersonic air jet using a Laval nozzle and increasing the air jet pressure from 0.6 to 1.0...1.2 MPa. The aim of the study is to determine the effect of air jet pressure on the structure of electric arc coatings.

It has been determined that an increase in the air jet pressure from 0.6 to 1.2 MPa causes a 2-fold increase in the air flow velocity from 300 to 600 m/s. At the same time, the velocity of droplets dispersed by the air jet during the spraying of electrode cored wires increases from 60-90 m/s to 160-220 m/s, and their size decreases.

Reducing the flight time of the dispersed droplets from the arc to the sprayed surface ensures their higher temperature when they hit the sprayed surface. Increasing the air jet pressure also reduces the expansion angle of the metal-air jet from 30° to 15°.

The microhardness of iron oxide inclusions - magnetite, wustite and hematite - in the coating of unalloyed steel wire sputtered is in the range of 700-800 HV. This ensures a microhardness of the U8 coating of 350-400 HV at a pressure of 0.6 MPa.

Sputtering the same coating at a pressure of 1.2 MPa reduces the size of the lamellae and oxides, and their volume content increases, which increases the microhardness to 450...500 HV. The microhardness of coatings made of 90X17R3GS increases from 800 to 910 HV.

It was found that an increase in air jet pressure from 0.6 to 1.2 MPa provides an increase in air jet velocity from 300 to 600 m/s, and the velocity of dispersed droplets from 120 to 220 m/s.

structure, sputtering, Laval nozzle, jet speed, microhardness, detail, transport equipment

Одержано (Received) 02.11.2023

Прорецензовано (Reviewed) 28.11.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023