



<https://doi.org/10.15407/scin16.04.053>

**В.М. КОЛОМІЄЦЬ, О.І. ШКУРАТ, С.М. КРАВЧЕНКО,
Р.Ю. ЛОПАТКІН, І.Г. ЧИЖОВ, П.Є. САМОЙЛОВ,
Ю.А. ПАВЛЕНКО, М.О. МЕЛЬНИК, О.І. ГОНЧАРЕНКО**
Інститут прикладної фізики НАН України,
вул. Петропавлівська, 58, Суми, 40030, Україна,
+380 54 222 2794, +380 54 222 3760, ipfmail@ipfcentr.sumy.ua

ВАКУУМНИЙ ПОСТ ДЛЯ НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ НА ВНУТРІШНЮ ПОВЕРХНЮ ТРУБ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РОЗПИЛЕННЯ

Вступ. Внаслідок механічного та хімічного зносу внутрішніх поверхонь трубоподібних виробів існує необхідність створення захисних покриттів останніх, що збільшить ресурс їх використання в різних галузях промисловості.

Проблематика. При створенні обладнання для отримання якісних захисних покриттів внутрішньої поверхні труб виникають деякі труднощі, пов'язані з обмеженістю простору. В світовій практиці широко застосовують методи плазмового напилення з циліндричними магнетронами. Однак, актуальними залишаються питання удосконалення розпилювального обладнання для збільшення його ефективності та покращення фізико-механічних властивостей покриттів. Також нагальною потребою є виготовлення універсального обладнання для обробки трубних виробів різного діаметру.

Мета. Розробка й створення стенду з дослідним зразком магнетронної розпилювальної системи для напилення покриттів на внутрішні поверхні трубних виробів діаметром від 30 мм з використанням методики магнетронного розпилення імпульсами високої потужності.

Матеріали й методи. Елементи конструкції магнетронного розпилювача виготовлено з нержавіючої сталі з параметром шорсткості $Ra \leq 2,5$. В експериментах використано метод магнетронного розпилення імпульсами високої потужності (HIPIMS — High-power impulse magnetron sputtering).

Результати. Розроблено конструкторську документацію на магнетронну розпилювальну систему та виготовлено стенд для напилення захисних покриттів на внутрішні поверхні трубних виробів діаметром від 30 мм. Використовуючи створену циліндричну магнетронну розпилювальну систему, можна здійснювати в одному технологічному циклі як іонне очищення внутрішньої поверхні труб, так і напилення нових покриттів.

Висновки. Позитивні результати з випробування дослідного зразка магнетронної розпилювальної системи показали перспективність створення промислового обладнання для вирішення актуальної проблеми отримання якісних покриттів внутрішньої поверхні труб.

Ключові слова: магнетронна розпилювальна система, метод HIPIMS, внутрішня поверхня труб, циліндричний магнетрон, магнетронний розпилювач.

Цитування: Коломієць В.М., Шкурят О.І., Кравченко С.М., Лопаткін Р.Ю., Чижов І.Г., Самойлов П.Є., Павленко Ю.А., Мельник М.О., Гончаренко О.І. Вакуумний пост для нанесення покриттів на внутрішню поверхню труб методом магнетронного розпилення. *Nauka innov.* 2020. Т. 16, № 4. С. 53–59. <https://doi.org/10.15407/scin16.04.053>

Внутрішні поверхні деталей та елементів промислового обладнання трубоподібних форм можуть піддаватися суттєвому механічному й хімічному зносу, особливо при роботі в хімічно агресивних середовищах. Очевидно, що такі фактори призводять до зниження ресурсу, руйнування і корозії трубних виробів. Тому підвищення механічної, термічної та хімічної стійкості поверхонь таких деталей на сьогодні, є досить актуальним [1].

На сучасному етапі розвитку технологій найбільш перспективними й поширеними методами модифікації внутрішніх поверхонь трубних виробів є методи плазмового наплення покриттів [2–4]. Серед цих методів чільне місце посідає метод магнетронного розпилення завдяки якому можна з високою відтворюваністю технологічного процесу отримувати високоякісні покриття з покращеними фізико-механічними й хімічними властивостями [5–7]. Удосконалення зазначеного методу призвело до появи його різновиду, так званої, методики *HIPIMS*, в якій застосовано імпульси високої потужності, завдяки чому в плазмі збільшується щільність іонів розпиленої речовини. Як наслідок, це приводить до кращої адгезії та, відповідно, покращення морфології поверхні отримуваних покриттів [8–10].

Через особливості форми трубоподібних деталей є певна складність доступу до їхніх внутрішніх поверхонь, що створює техніко-технологічні труднощі реалізації ефективних магнетронних розпилювальних систем для нанесення високоякісних покриттів на внутрішні поверхні труб. Провідні наукові лабораторії пішли шляхом створення магнетронних розпилювачів циліндричної форми [11]. Проте залишаються проблеми створення розпилювального обладнання з високою ефективністю і потужністю, а також питання покращення фізико-механічних та хімічних властивостей отримуваних плівок й відпрацювання стабільно повторювальних технологій.

Для вирішення завдання нанесення якісних захисних покриттів на внутрішню поверхню

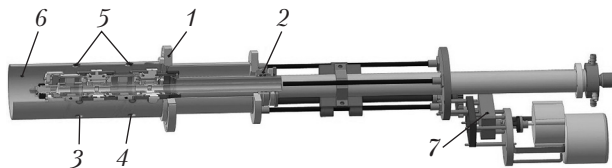


Рис. 1. Магнетронна розпилювальна система з циліндричним магнетроном: 1 – з'єднувальний фланець; 2 – ущільнювач; 3, 4 – магнетрони; 5 – підкладки; 6 – фрагмент труби; 7 – механізм для переміщення магнетронів

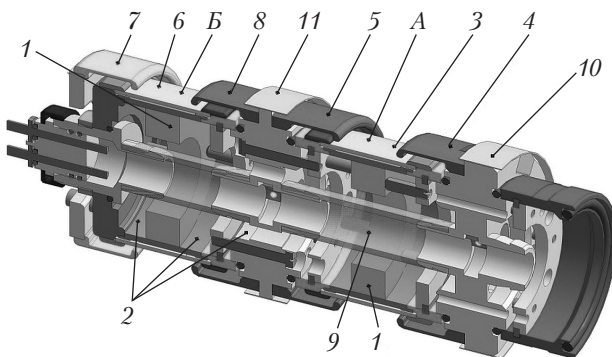


Рис. 2. Дослідний зразок циліндричного магнетрону в перетині: А – перший магнетрон; Б – другий магнетрон; 1 – магніти з SmCo; 2, 9 – герметичні канали; 3, 6 – катода-мішені; 4, 5, 7, 8 – аноди; 10, 11 – захисні екрани

виробів трубоподібної форми в Інституті прикладної фізики НАН України (Суми, Україна) було створено магнетронну розпилювальну систему (рис. 1), яка складається з 2-х циліндричних магнетронів (рис. 2) (ЦМ) [12].

Використовуючи створену циліндричну магнетронну розпилювальну систему, можна здійснювати в одному технологічному циклі як іонне очищення внутрішньої поверхні труб, так і наплення нових покриттів. До того ж, є можливість працювати в одному з режимів: робота на постійному або імпульсному струмі. Ще однією перевагою створеної магнетронної розпилювальної системи є можливість отримувати багат шарові покриття за рахунок збільшення кількості ЦМ.

В результаті проведених випробувань дослідного зразка магнетронного розпилювача було отримано покриття з тугоплавких і хімічно стійких матеріалів з покращеними фізико-механічними властивостями (детально описано

в роботі [12]). Успішні випробування та наявна конструкторська документація дають можливість створити промислову установку для напилення захисних покриттів трубоподібних виробів для різних сфер використання.

Розроблену магнетронну систему з ЦМ може бути використано тільки для трубних виробів з внутрішнім діаметром не менше 60 мм. Продовжуючи розробки, авторським колективом створено конструкторську документацію і дослідний зразок магнетронної розпилювальної системи з використанням методики *HIPIMS* для напилення покриттів на внутрішні поверхні трубоподібних виробів діаметром від 30 мм.

ОПИС КОНСТРУКЦІЇ ДОСЛІДНОГО ЗРАЗКА МАГНЕТРОННОЇ РОЗПИЛЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДИКИ *HIPIMS*

3D-модель розробленого магнетронного розпилювача для напилення захисних покриттів на внутрішні поверхні труб діаметром від 30 мм наведено на рис. 3.

Магнетронний розпилювач складається з основних елементів:

1. Вакуумна камера, що забезпечує екологічність виконання технологічного процесу при тиску залишкових газів 10^{-4} Па. Зовнішніми нагрівальними елементами камера може розігріватися до температури близько $180\text{ }^{\circ}\text{C}$;

2. Імітатор труби $\text{Ø}30$ мм, конструкція якого дозволяє без додаткових витрат проводити зміну зразків-свідків;

3. Катод, охолоджуваний проточною дистильованою водою;

4. Фланці, які забезпечують щільність з'єднання катода та вакуумної камери, а також їхню взаємну електричну ізоляцію;

5. Гумові кільця, які забезпечують вакуумну щільність з'єднань;

6. Канали для охолодження фланців-ізоляторів проточною водою;

7. Клапан фірми *Leybold* (Німеччина), що забезпечує дозований напуск Ar в камеру під час створення первинної плазми;

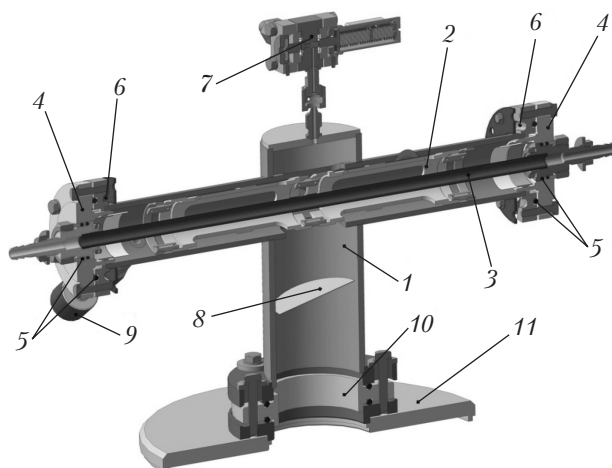


Рис. 3. 3D-модель магнетронного розпилювача для нанесення захисних покриттів: 1 – вакуумна камера; 2 – імітатор труби $\text{Ø}30$ мм; 3 – катод; 4 – фланці-ізолятори «катод-вакуумна камера»; 5 – гумові ущільнюючі кільця; 6 – канали для охолодження водою; 7 – клапан напускання робочого газу аргону; 8 – заслінка; 9 – датчик вакууму; 10 – ізолятор; 11 – фланець «вакуумна камера-стенд»



Рис. 4. Вакуумна камера із магнетронною розпилювальною системою

8. Заслінка, яка регулює швидкість відкачки системи в процесі напилення;

9. Датчик для вимірювання величини розрідження в вакуумній камері;

10. Електричний ізолятор між камерою та вакуумною системою.

11. Фланець для з'єднання камери стенду з вакуумною системою.



Рис. 5. Стенд для відпрацювання технологічного процесу напилення

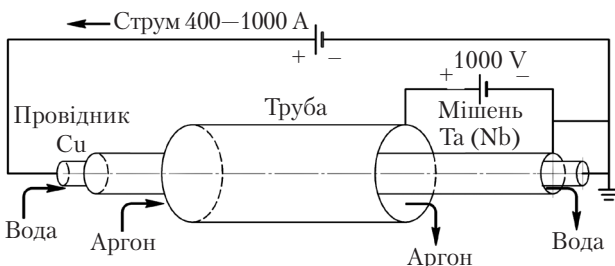


Рис. 6. Електрична схема підключення магнетронного розпилювача

На рис. 4 показано розроблену вакуумну камеру з магнетронною розпилювальною системою. Всі елементи конструкції виготовлено з нержавіючої сталі. Враховуючи вимоги до внутрішніх поверхонь вакуумних деталей, останні мають параметр шорсткості $Ra \leq 2,5$. Зварні шви вакуумно щільні, їхня якість перевірялася за допомогою гелієвого течешукача *Varian 925-40*.

Для випробування й функціонування магнетронного розпилювача було розроблено схему його живлення та вакуумну принципову схему, на основі яких спроектовано та виготовлено стенд для відпрацювання технологічного процесу напилення (рис. 5).

Всі елементи стенду для відпрацювання технологічного процесу напилення магнетронним методом відповідають вимогам вакуумної гігієни та герметичності й працюють в автоматичному режимі за заданою оператором про-

грамою. Стенд обладнано необхідними системами водяного охолодження елементів конструкції, він має ввід для підключення робочого газу та вакуумно герметичні електричні роз'єми, які дозволяють виконати нагрівання зразків до необхідної температури та контролювати цей процес. Спроектований та виготовлений дослідний зразок розпилювача повністю адаптовано для роботи з цією системою. Перед включенням стенду та періодично в процесі його роботи проводили вимірювання опору ізоляції конструктивних елементів за допомогою вимірювача опору ізоляції типу *DT-6605* при напрузі випробувального сигналу 2500 В. В діючій установці напруга живлення магнетрону може бути до 1200 В.

Електричне живлення магнетронного розпилювача металів відбувається відповідно до схеми, наведеної на рис. 6. Електрична схема базується на забезпеченні двох, необхідних для роботи магнетрону, стабільних фізичних явищ: створення взаємоперпендикулярних магнітного та електричного полів в проміжку між об'єктом напилення (труба) та катодом — джерелом розпилення тугоплавких металів.

Для формування магнітного поля в циліндричному магнетроні як джерело живлення обрано, блок випрямляча *FlexKraft 12V/1200A* (*KraftPowercon Sweden AB*, Швеція) з повітряним охолодженням (рис. 7). Зазначений блок живлення має режим стабілізації струму або напруги і створює величину струму через провідник—катод (мідна трубка) до 1200 А при напрузі на його кінцях до 12 В. Під час проходження струму, перпендикулярно осі катоду виникає магнітне поле магнітною індукцією до 26 мТл (при силі струму 1200 А), величин якої достатньо для створення стабільної «пастки» електронів.

Принциповою відмінністю технології *HIPIMS* від класичного магнетронного розпилення є висока щільність потужності розряду, яка може досягати рівня декількох кВт/см². Це в 100 разів більше, ніж при традиційному магнетронному розпиленні на постійному струмі (*DC*)

або в середньочастотному режимі (*MF*). Концентрація плазми поблизу мішені може на кілька порядків перевищувати значення, характерні для магнетронного розпилення на постійному струмі, що, в свою чергу, призводить до збільшення частки іонів в потоці розпиленого матеріалу. Ступінь іонізації матеріалу з мішені може досягати понад 50 % із зарядами металевих іонів як +1, так і +2, водночас при магнетронному розпиленні на постійному струмі вона не перевищує 15 %.

Для дослідного зразка магнетронної розпилювальної системи для формування електричного поля використовували блок живлення *hip-V-6 kW* типу *4A-PLASMA*, зовнішній вигляд якого показано на рис. 8. За допомогою цього блоку можлива реалізація напилення покриттів як в режимі постійного струму, так і в режимі *HIPIMS*. Параметри блоку живлення магнетрона наведено нижче.

Блок *4A-PLASMA* укомплектовано програмним забезпеченням з можливістю підключення до персонального комп'ютера та повністю керується ним.

Технічні характеристики блока живлення *hip-V-6 kW* типу *4A-PLASMA*

Вихідна потужність, кВт	6
Вихідна імпульсна потужність, кВт	500
Вихідна напруга, В	0–1200
Вихідний струм, А	0–500
Частота вихідних імпульсів, кГц	1
Тривалість імпульсу, мкс	5–1000
Час реакції на виникнення дугових розрядів, не більше мкс	<3
Рівень захисту від струму дугового розряду, А	50–1000
Пульсація напруги, %	<5
Напруга живлення, В	3 фази 380
Вхідний струм, А	<13
Охолодження	Повітряне

Основні функції програмного забезпечення:

- 1) контроль продуктивності приладу в режимі реального часу;
- 2) зміна параметрів приладу в режимі реального часу;
- 3) запис роботи приладу та автономне відтворення записаного сеансу.



Рис. 7. Джерело живлення блок випрямляча типу *Flex-Kraft 12V/1200A*



Рис. 8. Блок живлення *hip-V-6 kW* типу *4A-PLASMA*

Персональний комп'ютер також використовується для контролю та керування роботою вакуумної установки, він є центром, що проводить збір даних від усіх контрольних приладів установки та організовує зворотній зв'язок між ними.

Таким чином, для вирішення проблеми нанесення якісних захисних покриттів на внутрішню поверхню виробів трубоподібної форми, авторським колективом розроблено конструкторську документацію на дослідний зразок магнетронної розпилювальної системи, яка може застосовуватися для нанесення за-

хисних покриттів на внутрішні поверхні труб діаметром від 30 мм.

Керуючись розробленою документацією, створено дослідний зразок магнетронної розпилювальної системи та успішно проведено його випробування, які здійснювали на спеціально спроектованому й виготовленому стенді. Тестові напилення виконували як в режимі постійного струму, так і в режимі *HIPIMS*. Ке-

рування технологічним процесом напилення покриттів проводили за допомогою персонального комп'ютера.

Позитивні результати випробування дослідного зразка магнетронної розпилювальної системи вказують на перспективність створення промислового обладнання для напилення якісних покриттів на внутрішні поверхні трубних виробів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крутиков А.В., Девятъяров М.С. Увеличение ресурса работоспособности, ремонт и восстановление с применением технологий газотермического напыления. *Сварка и диагностика: сборник докладов международного форума (25–27 ноября 2014 г., Екатеринбург)*. Екатеринбург, 2015. С.75–80.
2. Надтока В.Н., Панков Р.В., Дейнеко Л.Н., Масляный Н.В. Экологически безопасный метод нанесения покрытий на внутренние поверхности. *Артиллерийское и стрелковое вооружение*. 2009. № 1. С. 54–57.
3. Перекрестов В.И., Кравченко С.Н., Косминская Ю.А., Кононенко И.Н. Структура конденсатов системы Ni-Cu, полученных при ионном распылении составных стержней. *Металлофизика и новейшие технологии*. 2011. № 2. С. 203–210.
4. Ананьева Е.А. *Разработка технологии нанесения плазменных теплозащитных покрытий на малоразмерные внутренние сложнопровфильные поверхности деталей горячего тракта ГТД*: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2007. 16 с.
5. Гасій О.Б. Розвиток технології вакуумного йонно-плазмового напилення та напрямів її вдосконалення. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2018. Т. 28, № 10. С. 85–91.
6. Бебенин А.Н., Рудый В.И., Литовченко В.Н., Воробьев Р.А., Янкитова И.А., Карнавская Т.Г. Исследование механических свойств защитных тугоплавких покрытий, нанесенных методом ионно-плазменного вакуумного магнетронного напыления. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева*. 2014. Т. 107, № 5. С. 43–146.
7. Москвитин Г.В., Биргер Е.М., Поляков А.Н., Полякова Г.Н. Научные технологии нанесения упрочняющих покрытий. *Металлообработка*. 2015. Т. 85, № 1. С. 44–49.
8. Kouznetsov V., Macak K., Schneider J. M., Helmersson U., Petrov I. A novel pulsed magnetron sputter technique utilizing very high target power densities. *Surface and Coatings Technology*. 1999. V. 122, no. 2–3. P. 290–293.
9. Лепеш Г.В., Иванова Е.С. Имитационное моделирование термодинамического воздействия при испытании стойкости защитных покрытий. *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2016. Т. 36, № 2. С. 7–17.
10. Alami J., Eklund P., Andersson J.M., Lattemann M., Wallin E., Bohlmark J., Helmersson U. Phase tailoring of Ta thin films by highly ionized pulsed magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 2010. V. 515. P. 3134–3438.
11. Yee F., Wotzak M., Cipollo M.L., Traszowska K. Cylindrical magnetron sputtering in a ferromagnetic cylinder. *Fall News Bulletin SVC*. 2004. P. 28–34.
12. Шкурат О.І., Батурін В.А., Бугайов С.І., Карпенко О.Ю., Кравченко С.М., Коломієць В.М., Даниленко М.І. Розробка технології процесу обробки каналу ствола гармати для підвищення його ресурсу. *Озброєння та військова техніка*. 2019. №1 (21). С. 35–40.

Стаття надійшла до редакції / Received 10.01.20

Статтю прорецензовано / Revised 28.02.20

Статтю підписано до друку / Accepted 18.03.20

Kolomiets, V.M., Shkurat, O.I., Kravchenko, S.M., Lopatkin, R.Yu., Chyzhov, I.G.,
Samoilov, P.E., Pavlenko, Yu.A., Melnyk, M.O., and Honcharenko, O.I.

Institute of Applied Physics, the NAS of Ukraine,
58, Petropavlivska St., Sumy, 40030, Ukraine,
+380 54 222 2794, +380 54 222 3760, ipfmail@ipfcentr.sumy.ua

VACUUM DEVICE FOR APPLYING COATINGS TO THE INNER SURFACE OF THE PIPES BY MAGNETRON SPUTTERING

Introduction. Due to the mechanical and chemical wear of the inner surfaces of the tubular products, there is a need to create protective coatings for these surfaces, which will increase the life of such products in various industries.

Problem Statement. When designing equipment to obtain high-quality protective coatings on the inner surface of pipes, there are some difficulties associated with space limitations. Plasma sputtering with cylindrical magnetrons is widely used in the world. However, the questions about improving the sputter equipment to increase its efficiency and to improve the physical and mechanical properties of the coatings are current interest. The need of manufacturing universal equipment for processing of different diameter pipe products of is also urgent.

Purpose. Development and creation of the test bench magnetron sputtering system for deposition coatings on the inner surfaces of pipe products with a diameter of 30 mm using the method of high-power impulse magnetron sputtering.

Materials and Methods. The design elements of the magnetron sputter are made of stainless steel with a roughness not greater than Ra 2.5. The method of high-power impulse magnetron sputtering (*HIPIMS*) was used in the experiments.

Results. The design documentation for the magnetron sputtering system has been developed. The stand for deposition of the protective coatings on the inner surface of pipe products with a diameter of 30 mm has been manufactured. Using created cylindrical magnetron sputtering system may be realized in one technological cycle as to ionic cleaning internal surface of tubes and as to deposition new coatings.

Conclusion. The prospects for creating the industrial equipment to solve the urgent problem of obtaining the quality coatings inside the pipes have been confirmed by positive results during the magnetron sputtering system prototype tests.

Keywords: magnetron sputtering system, *HIPIMS* method, an inner surface of the pipes, cylindrical magnetron, and magnetron sputter.