

УСТАНОВКА НОВОГО ПОКОЛІННЯ ДЛЯ ПЛАЗМОВО-ДУГОВОГО НАНЕСЕННЯ ПОКРИТТІВ І РОЗПИЛЕННЯ СТРУМОПРОВІДНИХ ДРОТОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.М. Бурлаченко, О.В. Ганущак, О.М. Войтенко

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

Представлено плазмово-дугову установку промислового типу загальною потужністю до 50 кВт для нанесення функціональних покриттів на деталі відповідального призначення та сферодизації дротових матеріалів. Особливістю установки є використання системи водяного охолодження внутрішніх деталей плазмотрона, зміненої конструкції соплової і катодної частин та зменшення загальних габаритів плазмотрона, що забезпечує більш високу продуктивність процесу, розширення галузей його застосування, підвищення механічних та технологічних характеристик отримуваних гранул і покриттів та ін. Представлена мікроструктура та результати досліджень гранулометричного складу дисперсної фази, які свідчать про формування щільних покриттів з пористістю менше 1 %, що утворюються з гранул сферичної форми переважно у вузькому гранулометричному діапазоні 20...100 мкм. Бібліогр. 17, табл. 1, рис. 9.

Ключові слова: плазмово-дугове розпилення, струмопровідний дріт, нанесення покриттів, сферодизація, гранулометричний склад, міцність зчеплення, щільність, сферичність

Вступ. Перші роботи з дослідження процесу плазмово-дугового напилення були виконані в 60-х роках минулого століття. Поштовхом до цього став бурхливий розвиток авіаційно-ракетної техніки, що вимагало створення нових ефективних способів нанесення тугоплавких покриттів на важконавантажені деталі авіаційних і ракетних ГТД (газотурбінні двигуни) та РРД (рідинні ракетні двигуни). У 1961 р. у США був запатентований спосіб плазмового-дугового напилення з використанням струмопровідного дроту-аноду [1]. Розвиток цього способу був обумовлений в першу чергу рядом проблем, що виникають при напиленні порошковими матеріалами плазмотронами непрямої дії, зокрема низькою ерозійною стійкістю мідних сопел в зоні анодної плями, невисокими значеннями ККД (коефіцієнт корисної дії) нагрівання порошку в плазмовому струмені, КВМ (коефіцієнт використання матеріалу) на рівні 20...60 % та ін. [2, 3]. У СРСР цей спосіб також знайшов широке розповсюдження. Наприклад, у роботах [4–7] автори за допомогою даної технології на установці ІМЕТ-108 (ІМЕТ РАН ім. Байкова) наносили покриття (рис. 1, а) та отримували сферичні порошки із тугоплавких дротових матеріалів на основі вольфраму, молібдену, ніобію та ін. Слід зауважити, що даний спосіб забезпечував високу продуктивність, яка при потужності 20...25 кВт складала 10...12 кг/год за вольфрамовим дротом, проте значними недоліками зазначеного процесу були

широкий гранулометричний склад розпилюваних частинок в інтервалі значень 40...1000 мкм та значна ступінь їх окиснення внаслідок малої протяжності аргонового струменя, що обумовлювало низьку щільність нанесених покриттів (пористість 4...10 %), міцність зчеплення 25...35 МПа та ін.

Подальшим розвитком даного способу була розробка та виготовлення серійних установок УН-126 і КТ-088 (ІЕЗ ім. Є.О. Патона, Україна) [8, 9] та PLAZER 30-PL-W (ТОВ «Науково-виробничий Центр «ПЛАЗЕР», Україна) [10], де усування зазначених недоліків здійснювалось за рахунок використання супутнього газового струменя (рис. 1, б). Супутній потік газу коаксіально направлений до плазмового формує конфігурацію останнього, сприяє його обтисканню і тим самим зменшує кут розкриття факелу з розпилюваних частинок, збільшує швидкість витікання та динамічний напір плазмового струменя, що у свою чергу створює умови для отримання оптимального гранулометричного і хімічного складів дисперсної фази [11]. Це призводить до зменшення пористості покриттів до 1...4 %, підвищення міцності зчеплення покриттів до 40...60 МПа та ін. За кордоном дана технологія набула свого найбільшого розвитку на початку 2000-х рр. та стала відома як процес РТВА (Plasma Transferred Wire Arc). Технологія РТВА була запатентована в 2009 р. і використовується переважно при відновленні та підвищенні зносостійкості внутрішніх

В.М. Коржик — <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>, Д.В. Строгонов — <http://orcid.org/0000-0003-4194-764X>,
О.М. Бурлаченко — <https://orcid.org/0000-0003-2277-4202>, О.В. Ганущак — <https://orcid.org/0000-0003-4392-6682>,
О.М. Войтенко — <https://orcid.org/0000-0003-4946-6517>

© В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.М. Бурлаченко, О.В. Ганущак, О.М. Войтенко, 2023

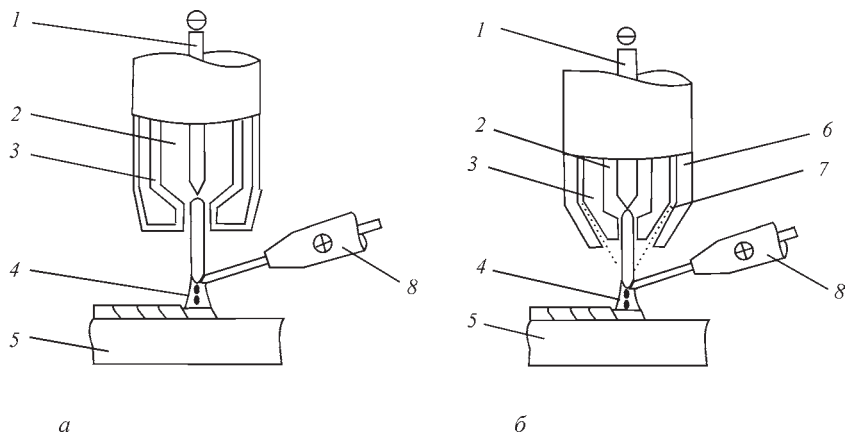


Рис. 1. Основні різновиди процесу плазмово-дугового напилення струмопровідних дрових матеріалів з (а) і без (б) використання супутнього потоку газу відповідно: 1 — неплавкий вольфрамовий катод; 2 — ввід плазموутворюючого газу; 3 — плазموутворююче сопло; 4 — факел з розпилюваних частинок; 5 — виріб; 6 — обтискаюче сопло; 7 — струмінь супутнього газу; 8 — плавкий дріт-анод

поверхонь (> 50 мм) таких елементів двигунів як блоки циліндрів для концернів «Ford», «Nissan», «Volkswagen» та ін. Основна маса робіт з розробки такого обладнання виконана в США (Flame Spray Industries), Німеччині (GTV) та Швейцарії (Oerlikon). Цей спосіб відрізняється високими властивостями міцності напиленого покриття (до 80 МПа), низькою пористістю (1...2 %), продуктивністю (на рівні 10 кг/год) та ін. [12].

Окрім сфери нанесення покриттів ця технологія отримала значний поштовх з розвитком адитивних технологій друку тривимірних виробів і починає широко застосовуватися для отримання високоякісних сферичних гранул, які отримують в процесі розпилення дрових матеріалів PAT (Plasma Atomization Technology) [13]. На сьогодні відоме обладнання [14, 15], яке дозволяє отримувати гранули з коефіцієнтом сферичності більше 0,8 та виходом фракції 20...100 мкм більше 50 мас. %.

Проте слід зауважити, що наразі спосіб плазмово-дугового напилення й розпилення має ряд суттєвих обмежень по продуктивності, яка в загальному випадку складає не більше 12 кг/год і не дає змогу застосувати компактні дроти діаметром більше 2,0 мм, а у випадку розпилювання порошкових дрових діаметром більше 1,6 мм з тугоплавкими неелектропровідними компонентами (WC, V₄C та ін.) — забезпечити процеси металургійної взаємодії оболонки та серцевини порошкового дроту, внаслідок чого утворюються гранули з високим ступенем гетерогенності за хімічним і фазовим складом. Це обумовлено обмеженою потужністю плазмово-дугового обладнання, яка для всіх моделей обладнання не перевищує 30 кВт (300 А і 100 В) внаслідок використання системи газового охолодження.

Тому подальший розвиток даної технології плазмово-дугового напилення та розпилення

може полягати у проектуванні нових конструкцій плазмотронів з водяним охолодженням і оптимізованою геометрією соплової частини та зменшеними габаритами, що дасть змогу підвищити струмове навантаження з 300 до 500 А, збільшити продуктивність процесу, підвищити швидкісні характеристики плазмового струменя, інтенсифікувати процеси диспергування дроту і процеси металургійної взаємодії при плавленні компонентів порошкових дрових та ін.

Розробка плазмотрона підвищеної потужності для плазмово-дугового розпилення і нанесення покриттів із струмопровідних дрових. Опираючись на результати попередніх розробок і накопичений досвід експлуатації серійних варіантів плазмотронів для плазмово-дугового напилення, була поставлена мета створення плазмотрона марки PLAZER 50-W підвищеної потужності (до 50 кВт) та розширеними технологічними можливостями (як для отримання сферичних гранул, так і для нанесення покриттів на зовнішні і внутрішні поверхні діаметром ≥ 70 мм).

Оптимізація конструкції плазмотрона полягала у наступному: збільшенні струмового навантаження за рахунок проектування системи водяного охолодження соплової частини, катодного й анодного вузлів. Це дозволило використовувати значення струму на рівні 400...500 А у порівнянні з серійним плазмотроном PLAZER 30-W установки PLAZER 30-PL-W [10], де за рахунок використання повітряного охолодження цей показник не може перевищувати 300 А. Також конструкція з водяним охолодженням дозволяє використовувати у якості плазموутворюючого газу гелій або суміші на його основі, що у свою чергу інтенсифікує процеси нагріву, плавлення, диспергування і сферодизації струмопровідних компактних і порошкових дрових;

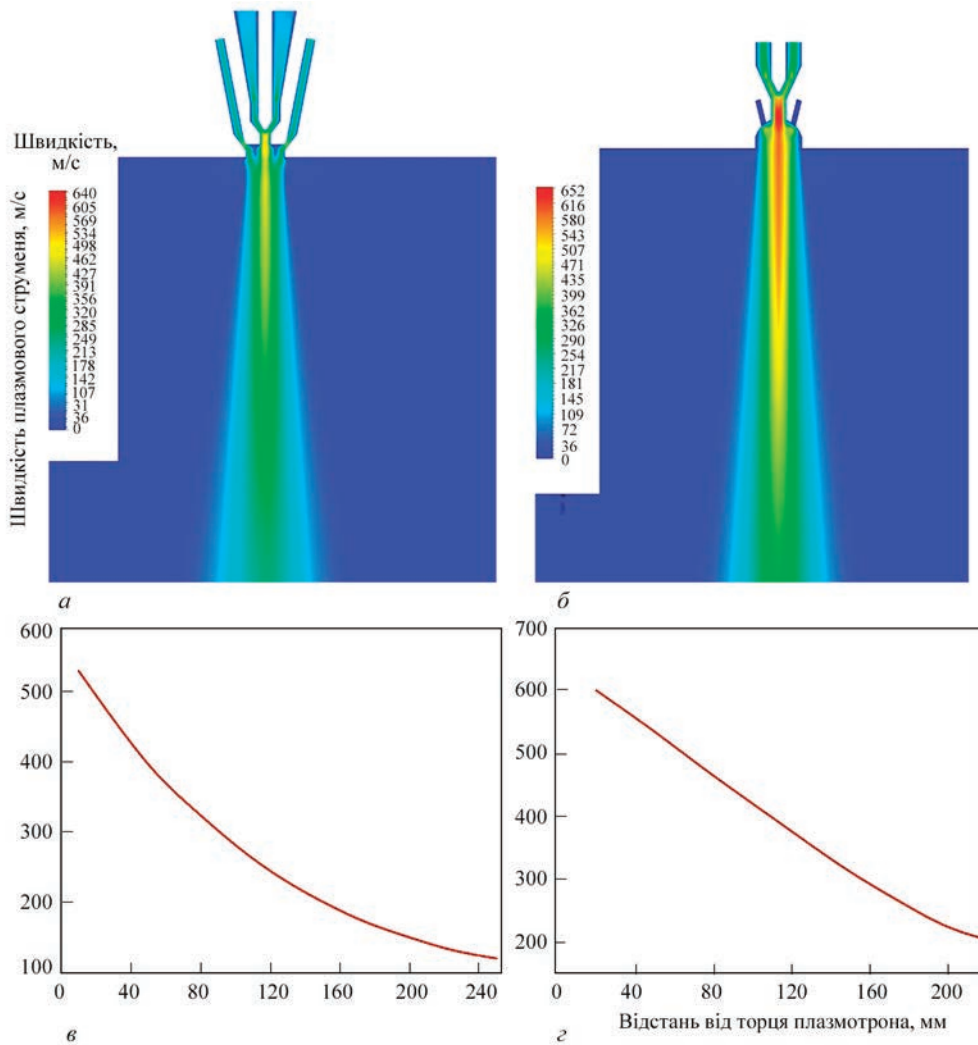


Рис. 2. Візуалізація процесу моделювання швидкісних характеристик плазмового струменя (а, б) і його характеристик (в, г): а, в — серийний плазмотрон PLAZER 30-W; б, г — розроблений плазмотрон PLAZER 50-W

оптимізації геометрії газорозрядної камери за рахунок зміни співвідношень довжини соплового каналу (l) до його діаметра (d) з 1,0 до 1,4, на 15 % збільшується максимальна швидкість витікання плазмового струменя з 520 до 600 м/с згідно розрахункам у CFD (Computational Fluid Dynamics) програмному продукті (рис. 2) та побудови сферичної ділянки, що розширюється на виході з сопла (по типу сопла Лаваля [16]), і забезпечує отримання більш рівномірної температури і електричної щільності плазми та протяжність плазмового струменя, що у свою чергу інтенсифікує процеси сферодизації та забезпечує більше прискорення частинок. Також була розроблена вдосконалена система обдуву плазмового струменя супутнім потоком газу у зоні формування конусу розпилення, яка забезпечує ламінарне витікання потоку супутнього газу (у порівнянні з прототипом, де потік супутнього газу витікає через кільцевий зазор з переважно турбулентним характером руху). Це забезпечує збільшення протяжності ви-

сокошвидкісної, високотемпературної зони плазмового струменя, зменшення кута розкриття конусу розпилення та отримання оптимального складу дисперсної фази.

Зовнішній вигляд, конструкція нового плазмотрона PLAZER 50-W (рис. 3) та його характеристики наведено нижче.

Технічні характеристики серийного PLAZER 30-W та розробленого PLAZER 50-W плазмотронів

	PLAZER 30-W	PLAZER 50-W
Максимальний струм, А	300	500
Максимальна напруга, В	80	120
Витрата супутнього газу, м ³ /год	30–60	15–30
Витрата плазموутворюючого газу, м ³ /год	13	13
Тип плазмоутворюючого газу	аргон	аргон, гелій та їх суміші
Діаметр сопла, мм	3	3
Габарити Д×Ш×В, мм	90×70×175	250×60×50
Вага, кг	1,5	1,5
Тип охолодження	повітряне	водяне

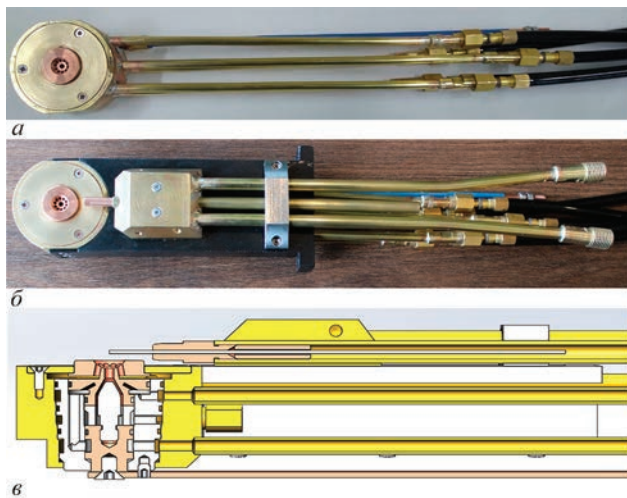


Рис. 3. Зовнішній вигляд і комп'ютерна 3D модель розробленого плазмоторна PLAZER 50-W для плазмово-дугового напilenня: а — зовнішній вигляд; б — зовнішній вигляд у зборі з анодним вузлом та кріпленням до маніпулятора; в — 3D модель газорозрядної камери

Як видно із технічних характеристик, розроблений плазмоторн PLAZER 50-W має відмінності від плазмоторну попередньої модифікації PLAZER 30-W і вони наступні: збільшено струмове навантаження з 300 до 500 А на внутрішні деталі плазмоторна за рахунок заміни системи повітряного охолодження водяним; більш ефективне охолодження катодного і соплового вузлів плазмоторна, що дозволяє використовувати у якості плазмоутворюючого газу гелій та суміші на його основі, які значно підвищують потужність плазмової дуги (за рахунок збільшення напруги з 80 до 120 В) та збільшують ефективність нагріву плавкого дроту-анода; збільшено швидкість витікання плазмового струменя та довжину зони аргонової плазми при обтисканні плазмового струменя супутнім газом, оптимальний ефект від цього проявляється при менших його витратах (до 30 м³/год).

Необхідно відмітити, що завдяки невеликим габаритам (висотному розміру) плазмоторна є можливість застосовувати його для напilenня внутрішніх поверхонь діаметром більше 70 мм і для сферодизації струмопровідних дротів у камерах розпилення (у т. ч. малогабаритних).

Дослідження гранулометричного складу і мікроструктури покриттів, отриманих на розробленому плазмоторні. Було виконано порівняльні дослідження гранулометричного складу продуктів розпилення (сферичних гранул) при на-

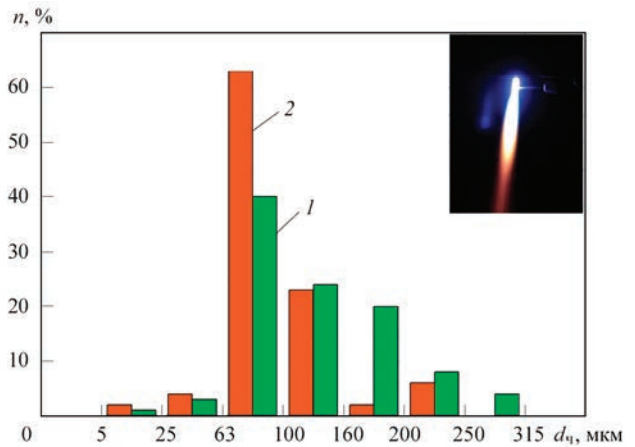


Рис. 4. Розподіл гранулометричного складу гранул, отриманих за допомогою розробленого плазмоторна PLAZER 50-W (1) та плазмоторна попередньої модифікації PLAZER 30-W (2)

ступних технологічних параметрах плазмоторна попередньої модифікації і розробленого (таблиця).

Аналіз гранулометричного складу продуктів розпилення (рис. 4) показав, що при розпиленні на серійному плазмоторні PLAZER 30-W основною фракцією порошку (90 % від загальної маси) є фракція 63...250 мкм, а для плазмоторна PLAZER 50-W — 63...160 мкм при відсутності фракції 250...315 мкм, а доля фракції 160...200 мкм не перевищує 2 мас. % (для серійного плазмоторна цей показник складає 20 %).

Відповідно до отриманих даних розподілу гранулометричного складу гранул, отриманих при використанні серійного PLAZER 30-W та розробленого плазмоторна PLAZER 50-W (рис. 4), було розраховано середній діаметр розпилюваних частинок. Ці розрахунки показали, що розроблена конструкція газорозрядної камери плазмоторна сприяє зменшенню цього показника з 134 до 99 мкм, що у свою чергу повинно сприяти отриманню більш однорідної, дрібнодисперсної ламелярної структури покриття.

На цих параметрах режиму було напилено покриття з струмопровідного компактного дроту з нержавіючої сталі марки AISI 304 ($d = 1,6$ мм). На рис. 5 наведено порівняння мікроструктури покриттів, напилених на серійному і розробленому плазмоторнах при однакових режимах розпилення.

Аналіз мікроструктури покриття, напilenого на розробленому плазмоторні, показав, що у цьому випадку покриття є більш однорідним, з пористістю близькою до 1 %. У структурі покриття майже від-

Параметри режиму плазмово-дугового напilenня струмопровідного дроту AISI 304 діаметром 1,6 мм

Марка плазмоторна	Струм, А	Напруга дуги, В	Витрата аргону, л/хв	Витрата повітря, м ³ /год	Відстань катод-анод, мм	Швидкість подачі дроту, м/хв
PLAZER 30-W	235	80	50	48	10	10,0
PLAZER 50-W	→—	85	→—	30	→—	10,5

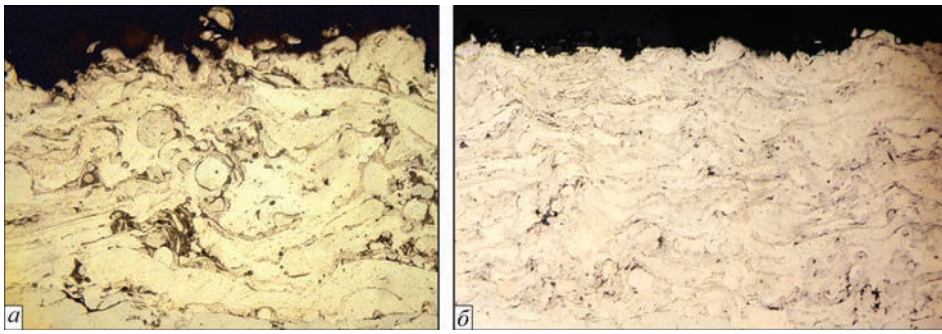


Рис. 5. Мікроструктура покриття із нержавіючого дроту AISI 30, напilenого на серийному плазмотроні PLAZER 30-W (a) і на розробленому PLAZER 50-W (б)

сутні округлі сферичні нерозплавлені частинки, товщина ламелей зменшилась з 25 до 15 мкм.

Дослідження форми частинок дисперсної фази показало, що загалом гранули мають правильну сферичну форму (рис. 6), коефіцієнт сферичності ($S_{\text{сф}}$) складає 0,75...0,85. При цьому доля гранул неправильної форми не перевищує ~ 2 мас. %. Проте, слід відмітити, що розпилення дроту і формування струменя з перегрітих частинок та їх подальше твердіння здійснювалось на повітрі та воді, де мають місце процеси інтенсивної хімічної взаємодії матеріалу дроту з киснем, азотом і воднем, що може спричинити погіршення параметрів сферичності порошку. В роботі [17] відмічається, що плазово-дугове розпилення дроту у камерах з інертною атмосферою дозволяє отримувати порошок, коефіцієнт сферичності якого може досягати майже 0,90. Тому підвищення параметрів сферичності частинок можна досягти за рахунок створення інертної атмосфери у середовищі, де відбуваються процеси розпилення, диспергування та твердіння порошків.

Аналізуючи перелічене вище, процес плазово-дугового розпилення дрових матеріалів з використанням плазмотрона PLAZER 50-W можна розглядати як промисловий процес для отримання сферичних гранул з виходом фракції 20...100 мкм до 90 мас. %, що задовольняє вимогам до гранулометричного складу і коефіцієнта сферичності для таких процесів 3D друку як SLM (Selective Laser Melting), SLS (Selective Laser Sintering), DMLS (Direct Metal Laser Sintering) та ін. В цілому, в даному інтервалі гранулометричного складу практично всі отримані фракції можуть бути використані як матеріали для найбільш розповсюджених технологій 3D друку, так і для гранульної металургії. Фракція 20...80 мкм складає 48 % від загальної маси порошку (SLM); 45...106 мкм — 64 % (SLS); 45...160 мкм — 85 % (DMLS); 106...160 мкм — 22 % (гаряче ізостатичне пресування (ГІП) або HIP (Hot Isostatic Pressing)).

Отримані результати були апробовані при напilenні внутрішньої циліндричної поверхні ($d_{\text{вн}} = 95$ мм) струмопровідним компактним дротом марки AISI 304 діаметром 1,6 мм (рис. 7).

Розробка установки нового покоління для плазово-дугового розпилення струмопровідних дротів. Використання розробленого плазмотрона підвищеної потужності, який забезпечує більш широкі технологічні можливості процесу плазово-дугового розпилення струмопровідних дротів (сферодизація дротів отримання сферичних дрібнодисперсних гранул, нанесення покриттів не тільки на зовнішні, а і на внутрішні поверхні діаметром ≥ 70 мм тощо), потребує інтелектуалізації процесів керування і контролю великою кількістю параметрів у режимі реального часу, в тому числі підвищення ступеня автоматизації технологічного процесу плазово-дугового розпилення. Для цього було створено спеціалізовану систему керування установкою, яка включає у себе вимірювальну, пускорегулюючу і сигнальну апаратуру, використання сенсорної панелі, програмованого логічного контролера (ПЛК) і розробки відповідного програмного забезпечення.

Програмне забезпечення містить у собі всі функції керування, настроювання, індикації й аварійної сигналізації режимів роботи установки. ПЛК виконує роль виконавчого обчислювального

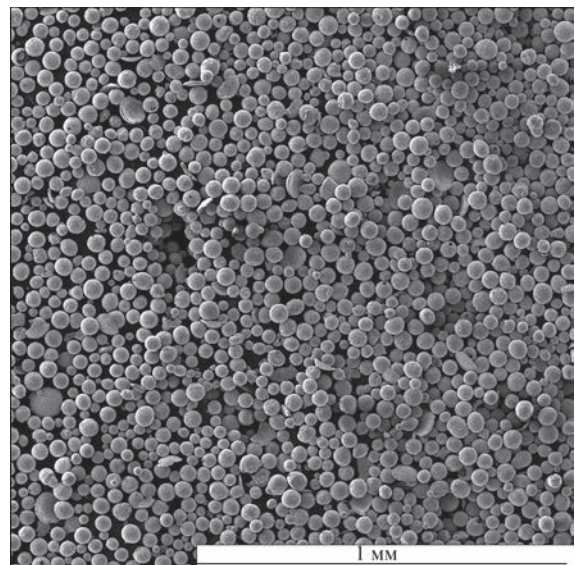


Рис. 6. Морфологія гранул із нержавіючої сталі AISI 304 фракції 20...100 мкм, отриманих при плазово-дуговому розпиленні дроту діаметром 1,6 мм

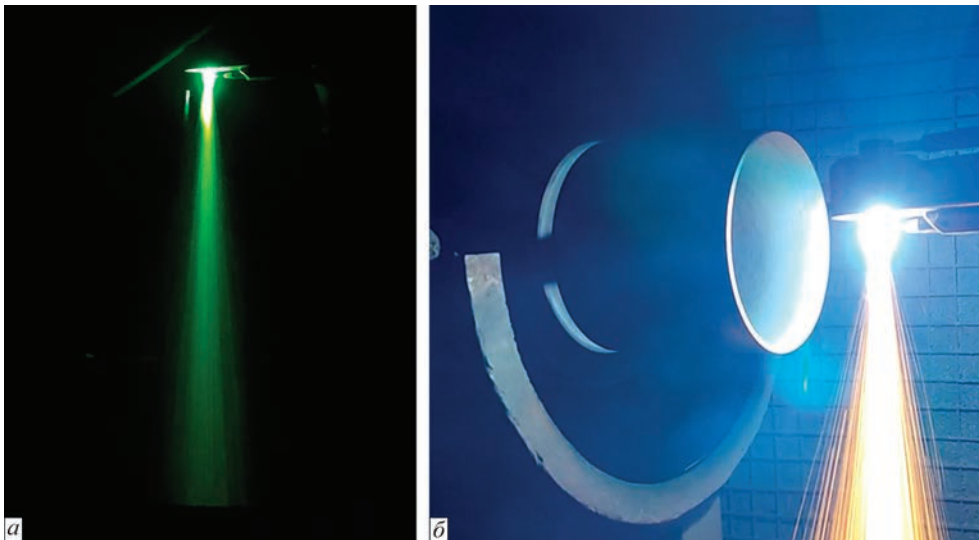


Рис. 7. Зовнішній вигляд двофазного запиленого струменя (а) і процесу напилення (б) внутрішньої циліндричної поверхні ($d_{\text{вн}} = 95 \text{ мм}$) струмопровідним компактним дротом AISI 304

пристрою, який на основі отриманих даних від системи моніторингу відпрацьовує коригування параметрів процесу розпилення та коригує алгоритм роботи обладнання, змінюючи струм, витрати газів, швидкість подачі дроту тощо.

Вікна інтерфейсу головної системи управління (мобільного пульта управління) наведено на рис. 8, в. Вони поділяються на 5 основних вікон.

Вікно автоматичного керування (Auto mode). Тут оператор задає мінімум основних технологічних параметрів, режим управління (зовнішній пуск/стоп або локальний) і може запускати роботу обладнання. За управління циклом технологічного процесу повністю відповідає автоматизоване програмне забезпечення, яке відпрацьовує процес відповідно до заздалегідь прописаних алгоритмів циклограми. Зліва також наведено індикацію та виведення основних показників системи вимірювання сигналів (струму, напруги, витрати та тиску газів, температури контурів, цифрового стану датчиків, клапанів тощо).

Вікно ручного керування (Hand mode). Тут є можливість гнучкого керування за допомогою прямого впливу оператора на кожен вузол обладнання під контролем самого оператора. Ручне керування рекомендується проводити лише кваліфікованим фахівцям.

Вікно завдання налаштувань обладнання (Options). Тут є можливість задавати гнучкі налаштування обладнання, такі як межі сигналів, за якими спрацьовує система стеження за аварійними ситуаціями, також стартові, кінцеві та перехідні значення технологічних параметрів, тимчасові затримки, час реагування та спрацьовування при аварійних відключеннях та інші тонкі технологічні налаштування.

Вікно аварійних повідомлень (Alarms). Це вікно служить для виведення повідомлень у разі виникнення аварійних ситуацій, які на основі останньої вимірюваної інформації дають зрозуміти оператору причину виникнення аварійної зупинки (це може бути недостатня витрата газів, тиску газів, занадто більший або маленький струм/напруга, перегрів

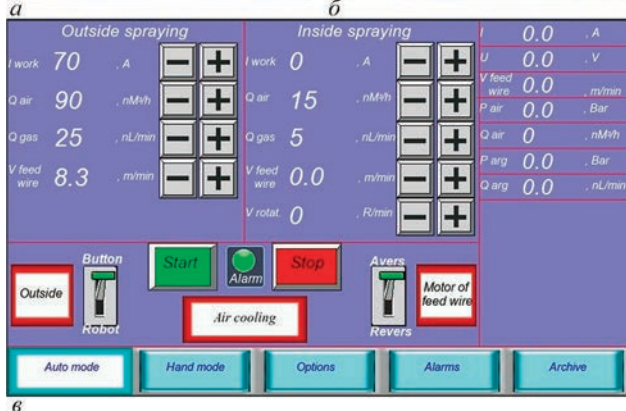
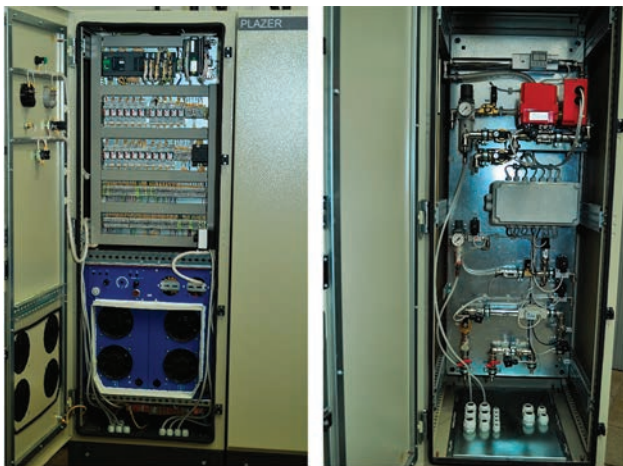


Рис. 8. Зовнішній вигляд розробленої шафи керування процесом плазмово-дугового напилення струмопровідних дротів: а, б — електрична частина та блок газової підготовки відповідно; в — інтерфейс панелі введення технологічних параметрів процесу

обладнання тощо). У разі усунення причини аварії можна заново запустити технологічний процес.

Вікно архіву даних (Archive). У цьому вікні відбуватиметься автоматичний запис та зберігання показань датчиків обладнання. Всі параметри пишуться на флеш-карту і мають можливість бути експортованими на персональний комп'ютер для зберігання та аналізу даних.

Також відмінною особливістю зазначеного обладнання є покращений ергономічний дизайн і інтерфейс керування установкою, адаптований під процеси плазово-дугового напилення зовнішніх і внутрішніх поверхонь та сферодизації дротів (рис. 8, в). Розроблена пневмо-гидравлічна схема (рис. 8, б) у поєднанні з модернізованою конструкцією плазмотрона дозволяє використовувати гелій та суміші на його основі у якості плазмотворюючого газу. Передбачена можливість подачі горючих газів в супутній газовий струмінь з метою зменшення ступеня окиснення частинок для певного ряду матеріалів (за рахунок створення відновлюваної атмосфери). Для підвищення продуктивності процесу з метою збільшення його енергоефективності (при використанні більших (2...3 мм) діаметрів дротів) були проведені роботи по збільшенню струмового навантаження на зазначеному обладнанні. З цією метою було модернізовано вузол охолодження тиристорів (підібрані та встановлені більш потужні вентилятори), що дозволяє підвищити діапазон регулювання струмом з 380 до 500 А.

Виробництво описаної установки нового покоління (рис. 9) організовано в ТОВ «Науково-технічний Центр «ПЛАЗЕР» (Україна) під маркою «PLAZER 50-PL-W». Вказане обладнання поставлено на експорт, в тому числі в Китай на підприємство «Zibo KNC Petroleum Equipment Co., Ltd», і використовується для нанесення захисних покриттів на відповідальні деталі нафтовидобувного обладнання та на труби поверхонь нагріву сміттєспалювальних заводів із застосуванням в якості матеріалів для напилення компактних і порошкових дротів діаметрами 1,6...2,4 мм (у т. ч. із сердечником з тугоплавких неелектропровідних матеріалів).

**Технічні характеристики
установки PLAZER 50-PL-W**

Споживана потужність, кВт	не більше 50
Напруга живильної мережі трифазного змінного струму частотою 50 Гц, В	380 ⁺¹⁹ ₋₃₈
Напруга холостого ходу, В	160
Діапазон регулювання робочого струму, А	100...500
Діапазон регулювання робочої напруги, В	30...100
Найбільша тривалість включення, %	100
Витрати повітря при тиску 0,6 МПа, нм ³ /год	15...60
Витрати аргону або гелію при тиску 0,1 МПа, нм ³ /год	1...3
Швидкість подачі дроту, м/хв	2...15
Охолодження плазмотрона	водяне
Ресурс сопла й катоду плазмотрона, год	

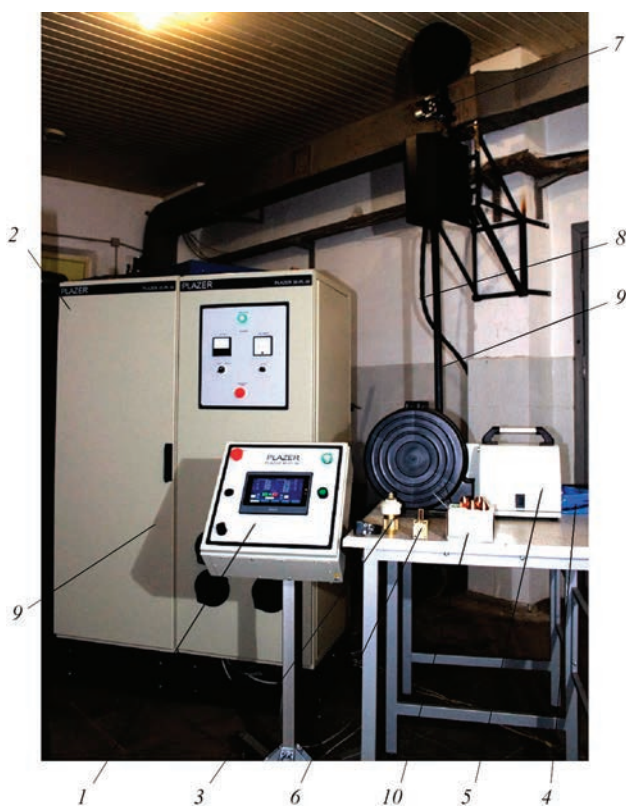


Рис. 9. Основні вузли установки для нанесення покриттів плазово-дуговим напиленням струмопровідних дротів: 1 — система керування з програмованим контролером та сенсорною панеллю; 2 — спеціалізоване інверторне джерело електроживлення; 3 — блок плазмотрона для напилення на зовнішні поверхні з повітряним охолодженням; 4 — кабель-шланговий пакет плазмотрона для напилення на зовнішні поверхні; 5 — система подачі дроту для напилення на зовнішні поверхні; 6 — головка для напилення на зовнішні і внутрішні поверхні з водяним охолодженням; 7 — система подачі дроту для напилення на внутрішні поверхні; 8 — кабель-шланговий пакет плазмотрона для напилення на внутрішні поверхні; 9 — комплект запасних частин

(машинного часу)	не менше 100
Тиск води для охолодження, МПа	0,3...0,5
Витрата води на охолодження, нм ³ /год	0,4...0,6
Діаметр застосовуваних дровових матеріалів, мм	1,0...2,4
Тип керування	автоматизоване
Тип контролеру	ПЛК

Висновки

1. Розроблено установку нового покоління для плазово-дугового нанесення покриттів і розпилення струмопровідних дровових матеріалів, особливістю якої є використання плазмотрона із підвищеними струмовим навантаженням та ефективністю нагріву плавкого дроту, покращеними масо-габаритними характеристиками та інтелектуальною системою автоматичного управління і контролю розширеною кількістю технологічних параметрів у режимі реального часу. На підприємстві ТОВ «Науково-технічний Центр «ПЛАЗЕР»

(Україна) організовано її серійне виробництво під маркою PLAZER 50-PL-W.

2. Розроблена установка в порівнянні із попередніми аналогами дозволяє: підвищити продуктивність процесу розпилення з 12 до 16...18 кг/год; використовувати для напилення як компактні, так і порошкові дроти діаметром до 2,4 мм (у т. ч. із сердечником з тугоплавких неелектропровідних матеріалів; отримувати високоякісні покриття з пористістю менше 1 %; отримувати сферодизовані гранули з основною дрібнодисперсною фракцією 20...160 мкм.

3. До основного переліку деталей, на які наносяться захисні покриття за допомогою розробленої установки, відносяться плунжера, штоки, поршні різних насосів, ротори, вали турбін, штанги бурових свердловин, деталі гідравлічного та енергетичного обладнання, вали і інші деталі суднових дизелів та іншого суднового обладнання, деталі хімічного обладнання, великогабаритні складу залізничної техніки (осі, колінчасті вали, шатуни і гільзи дизелів локомотивів) та багато іншого.

4. Зменшення габаритів плазмотрона із одночасним підвищенням ефективності нагріву розпилюваного дроту в розробленій установці сприяє розширенню галузей його застосування, а саме дозволяє його використовувати як для напилення зовнішніх і внутрішніх поверхонь діаметром більше 70 мм (блоків циліндрів, внутрішніх поверхонь труб та ін.), так і для плазмово-дугової сферодизації дротів у камерах розпилення (у т.ч. малогабаритних) для отримання сферичних гранул дрібнодисперсних фракцій з коефіцієнтом сферичності 0,75...0,85, що відповідають вимогам до матеріалів для таких методів 3D друку як SLM, SLS, EBM, DMLS та гранульної металургії (HIP).

Список літератури

1. Yenni D., McGill W., Lyle J. (1961) *Electric arc spraying*. United States, Pat. 2982845.
2. Кудинов В.В. (1962) Нанесение тугоплавких покрытий дуговой плазмой. *Технология машиностроения*, **21**, 41–45.
3. Кудинов В.В. (1966) Нагрев токоведущей проволоки сжатой дугой. *Сварочное производство*, **4**, 11–13.
4. Краснов А.Н. (1965) Плазменное распыление вольфрама. *Порошковая металлургия*, **3**, 1–5.
5. Краснов А.Н. (1965) Плазменное распыление молибдена. *Порошковая металлургия*, **1**, 1–5.
6. Бобров Г.В., Привезенцев В.И., Умнова Л.В. (1965) Образование частиц при плавлении проволоки в плазменном потоке. *Порошковая металлургия*, **1**, 79–86.
7. Петруничев В.А., Титков В.В. (1977) К механизму плазменного распыления проволоки. *Физика и химия обработки материалов*, **1**, 14–16.
8. Зеленин В.И., Кавуненко П.М., Тисенков В.В. и др. (2009) Применение плазменно-дуговой металлизации для восстановления колесных пар грузовых вагонов. *Автоматическая сварка*, **12**, 36–40.
9. Зеленин В.И., Кавуненко П.М., Теплюк В.М. и др. (2009) Усовершенствованная технология восстановления шек

- осей колесных пар тележек грузовых вагонов. *Сварщик*, **12**, 8–9.
10. Коржик В.Н., Короб М.Ф. (2012) Механизированная линия PLAZER 30PL-W для плазменно-дугового проволочного напиления покрытий на крупногабаритные детали типа «вал». *Сварщик*, **4**, 13–15.
11. Коржик В.М., Хаскін В.Ю., Харламов М.Ю. та ін. (2022) Вплив супутнього обтискаючого потоку на структуру і властивості покриття при плазмово-дуговому напилюванні плавким струмопровідним дротом-анодом. *Автоматичне зварювання*, **2**, 1–8.
12. Bobzin K., Cook D., Kowalsky K. et al. (2007) Thermal spraying of cylinder bores with the PTWA internal coating system. *Proc. of the ASME Inter. Engine Combustion Engine Division Fall 2007 Technical Conf. ICEF07*, 1–8.
13. Sun P., Fang Z., Zhang Y. et al. (2017) Review of the methods for the production of spherical Ti and Ti alloy powder. *JOM*, **69**, 1853–1860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
14. Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М. та ін. (2023) Ефективність процесу плазмово-дугової сферодизації струмопровідного титанового дроту. *Сучасна електрометалургія*, **1**, 1–9.
15. Kaplan M.A., Gorbenko A.D., Ivannikov A.Y. et al. (2022) Preparation and investigation of spherical powder made from corrosion-resistant 316L steel with the addition of 0.2 % and 0.5 % Ag. *Materials*, **7887(15)**, 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15227887>
16. Cao M., Gitzhofer F., Gravelle D.V. et al. (1997) A torch nozzle design to improve plasma spraying techniques. *plasma sources science and technology. IOP Publ.*, **8**. DOI: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/6/1/006>
17. Kalayda T.A., Kirsankin A.A., Ivannikov A.Y. et al. (2021) The plasma atomization process for the TiAlV powder production. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1942**, 012046. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012046>

References

1. Yenni, D., McGill, W., Lyle, J. (1961) *Electric arc spraying*. United States, Pat. 2982845.
2. Kudinov, V.V. (1962) Deposition of refractory coatings by arc plasma. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*, **21**, 41–45 [in Russian].
3. Kudinov, V.V. (1966) Heating of current-conducting wire by constricted arc. *Svarochn. Proizvodstvo*, **4**, 11–13 [in Russian].
4. Krasnov, A.N. (1965) Plasma spraying of tungsten. *Poroshk. Metallurgiya*, **3**, 1–5 [in Russian].
5. Krasnov, A.N. (1965) Plasma spraying of molybdenum. *Poroshk. Metallurgiya*, **1**, 1–5 [in Russian].
6. Bobrov, G.V., Privezentsev, V.I., Umnova, L.V. (1965) Formation of particles in wire melting in plasma flow. *Poroshk. Metallurgiya*, **1**, 79–86 [in Russian].
7. Petrunichev, V.A., Titkov, V.V. (1977) To mechanism of plasma spraying of wire. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, **1**, 14–16 [in Russian].
8. Zelenin, V.I., Kavunenko, P.M., Tisenkov, V.V. et al. (2009) Application of plasma-arc metallisation for restoration of wheel pairs. *The Paton Welding J.*, **12**, 28–31.
9. Zelenin, V.I., Kavunenko, P.M., Teplyuk, V.M. et al. (2009) Improved technology for restoration of axle necks of wheel pairs of freight-car trucks. *Svarshchik*, **12**, 8–9 [in Russian].
10. Korzhik, V.N., Korob, M.F. (2012) Mechanized line PLAZER 30PL-W for plasma-arc wire spraying of coatings on large-sized parts of «shaft» type. *Svarshchik*, **4**, 13–15 [in Russian].
11. Korzhyk, V.M., Khaskin, V.Yu., Yao Yuhui, Demianov, O.I. et al. (2022) Influence of accompanying compressing air flow on

- the coating structure and properties in plasma-arc spraying by consumable current-conducting wire. *The Paton Welding J.*, 2, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.02.01>
12. Bobzin, K., Cook, D., Kowalsky, K. et al. (2007) Thermal spraying of cylinder bores with the PTWA internal coating system. In: *Proc. of the ASME Inter. Engine Combustion Engine Division Fall 2007 Technical Conf. ICEF07*, 1–8.
13. Sun, P., Fang, Z., Zhang, Y. et al. (2017) Review of the methods for the production of spherical Ti and Ti alloy powder. *JOM*, 69, 1853–1860. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11837-017-2513-5>
14. Korzhyk, V.M., Strogonov, D.V., Burlachenko, O.M. et al. (2023) Effectiveness of the process of plasma-arc spheroidization of current-conducting titanium wire. *Suchasna Elektrometal.*, 1, 33–42.
15. Kaplan, M.A., Gorbenko, A.D., Ivannikov, A.Y. et al. (2022) Preparation and investigation of spherical powder made from corrosion-resistant 316L steel with the addition of 0.2 % and 0.5 % Ag. *Materials*, 7887(15), 13. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15227887>
16. Cao, M., Gitzhofer, F., Gravelle, D.V. et al. (1997) A torch nozzle design to improve plasma spraying techniques. In: *Plasma Sources Science and Technology. IOP Publ.*, 8. DOI: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/6/1/006>
17. Kalayda, T.A., Kirsankin, A.A., Ivannikov, A.Y. et al. (2021) The plasma atomization process for the TiAlV powder production. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1942, 012046. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1942/1/012046>

NEW GENERATION UNIT FOR PLASMA-ARC DEPOSITION OF COATINGS AND SPRAYING OF CURRENT-CONDUCTING WIRE MATERIALS

V.M. Korzhyk, D.V. Strogonov, O.M. Burlachenko, O.V. Ganushchak, O.M. Voitenko
E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

A plasma-arc unit of industrial type of up to 50 kW total power for deposition of functional coatings on critical parts and spheroidization of wire materials is presented. A feature of the unit is application of a system of water cooling of plasmatron inner components, modified design of the nozzle and cathode parts and reduction of plasmatron overall dimensions, ensuring a higher productivity of the process, widening of its application areas, improvement of mechanical and technological characteristics of the produced granules and coatings, etc. Presented is the microstructure and results of studying the granulometric composition of the dispersed phase, which are indicative of producing dense coatings with less than 1 % porosity, which form from granules of a spherical shape predominantly in a narrow particle size range of 20...100 μm . 17 Ref., 1 Tabl., 9 Fig.

Keywords: plasma-arc spraying, current-conducting wire, coating deposition, spheroidization, particle size distribution, bond strength, density, sphericity

Надійшла до редакції 20.06.2023

ПЕРЕДПЛАТА 2024

Журнали	Вартість передплати на друковані версії журналів*, грн.			
	місяць	квартал	півроку	рік
«Автоматичне зварювання», видається з 1948 р., 6 випусків на рік. ISSN 0005-111X. Передплатний індекс 70031	–	–	900	1800
«Сучасна електрометалургія», видається з 1985 р., 4 випуски на рік. ISSN 2415-8445. Передплатний індекс 70693	–	300	600	1200
«Технічна діагностика та неруйнівний контроль», видається з 1989 р., 4 випуски на рік. ISSN 0235-3474. Передплатний індекс 74475	–	300	600	1200
«The Paton Welding Journal»**, видається з 2000 р., 12 випусків на рік. ISSN 0957-798X. Передплатний індекс 21971.	600	1800	3600	7200

*Вартість з урахуванням доставки рекомендованою банделроллю.

** Журнал «The Paton Welding Journal» містить статті, отримані від авторів з усього світу і вибірково переклади на англійську мову статей з журналів «Автоматичне зварювання», «Сучасна електрометалургія», «Технічна діагностика та неруйнівний контроль».

Передплату на журнали можна оформити по каталогам передплатних агенцій «УКРПОШТА», «Прес Центр» та у видавництві. Передплата через видавництво з любого місяця на любой термін, в т.ч. на попередні періоди та окремі статті, починаючи з першого року видання.

Передплата на електронну версію журналів.

Вартість передплати на електронну версію журналів дорівнює вартості передплати на друковану версію. Випуски журналу надсилаються електронною поштою у форматі pdf або для IP-адреси комп'ютера передплатника надається доступ до відповідних архівів журналу.

Передплата через сайт видавництва:

<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/as/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/sem/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/ukr/journals/tdnk/subscription>
<https://patonpublishinghouse.com/eng/journals/tpwj/subscription>

На сайті видавництва у 2023 р. доступні для вільного копіювання випуски журналів з 2007 по 2021 рр.