

РОЗВИТОК ТЕХНОЛОГІЇ ДЕТОНАЦІЙНОГО ГАЗОВОГО НАПИЛЕННЯ ПОКРИТТІВ В ІЕЗ ім. Є.О. ПАТОНА НАНУ (Огляд)

О.В. Колісніченко¹, В.М. Коржик¹, П.Д. Стухляк³, А.І. Кільдій¹, Р. Товбин², М. Шинлов²,
В. Мудріченко³

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

²Sputtek Inc. 110 Share Road, Vaughan, Ontario, Canada, L4L 8P4. E-mail: mshynlov@gmail.com

³Науково-дослідний інститут зварювальних технологій імені Патона в провінції Чжецзян, КНР, провінція Чжецзян, м. Ханчжоу, район Сяошань, вул. Шісін Бейлу 857, оф. 426. E-mail: vladyslav.mudrichenko@ukr.net

Незважаючи на те, що метод детонаційно-газового напилення є високотехнологічним процесом, що дозволяє наносити на вироби покриття високої якості, він має деякі недоліки, які можуть обмежувати його широке застосування в промисловості в порівнянні з іншими методами газотермічного нанесення покриттів. До таких недоліків можна віднести підвищені вимоги до техніки безпеки, невисоку продуктивність і надійність конструкції. Проте використання новітньої елементної бази, накопичений технологічний досвід, сучасні дослідження в області детонаційних процесів, нові підходи до конструювання детонаційних установок дозволяють сподіватися, що детонаційно-газовий метод отримає значне поширення на рівні з такими методами, як плазмове або високошвидкісне газополуменеве напилення. У статті показано провідну роль вчених та інженерів України в розробці та впровадженні детонаційно-газового напилення покриттів. Особливу увагу приділено роботам, що проводяться в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Показано концепції та етапи розвитку конструкції від класичних детонаційних гармат до безклапанних багатокамерних гармат, що працюють на підвищеній частоті. На їх основі з використанням сучасної елементної бази та обладнання створено автоматизовані промислові комплекси, що дозволяють ефективно використовувати переваги детонаційно-газового напилення. Бібліогр. 23, табл. 2, рис. 10.

Ключові слова: детонація, покриття, детонаційно-газова установка, безклапанна конструкція, камера згоряння, промислова ділянка

Вступ. Швидкість згоряння палива, надзвукова швидкість процесу, висока температура та підвищений тиск продуктів згоряння визначають області технічного використання газової детонації. Одним з перших найважливіших і добре розвинених у даний час супутніх процесів до газової детонації є нанесення зносостійких, теплозахисних, корозійностійких та інших видів порошкових покриттів на поверхні деталей різного призначення. Суть методу полягає в нагріванні та транспортуванні порошкових частинок на поверхню, яка напилюється, за допомогою газової детонації.

Розвиток детонаційного методу напилення є перспективним у контексті наявності особливостей, характерних тільки для цієї технології в порівнянні з іншими численними методами газотермічного нанесення покриттів. Циклічність процесу, ефективність використання енергії згоряння горючої суміші, відносна простота конструкції детонаційних установок та ін. дозволяють реалізувати певні переваги методу детонаційного напилення, а саме:

– при однаковій кількості порошку, що напилюється, витрата компонентів горючої газової суміші буде меншою при використанні детонаційного режиму горіння в порівнянні з дефлаграційним режимом;

– установки детонаційного напилення не потребують коштовних систем охолодження;

– низька кількість споживаної електроенергії. Детонаційна гармата споживає 100 Вт, що достатньо для створення іскри замість, наприклад, тисяч Вт для установок плазмового напилення;

– детонаційні комплекси можуть використовувати звичайну недорогу систему подачі газу зі стандартними шлангами, де тиск у магістралях не перевищує 0,3 МПа. У системах надзвукового газополуменевого напилення (HVOF) він може становити 1 МПа і вище;

– можливість виконувати складніші завдання, наприклад напилення покриттів без перегріву виробів. Напилюваний об'єкт нагрівається до температури не вище 250 °С, що дозволяє уникнути термічних деформацій різних деталей або наносити покриття на тонкостінні вироби.

Колісніченко О.В. – <https://orcid.org/0000-0003-4507-9050>, Коржик В.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,

Стухляк П.Д. – <https://orcid.org/0000-0001-9067-5543>, Кільдій А.І. – <https://orcid.org/0000-0001-8133-8705>,

Шинлов М. – <https://orcid.org/0009-0003-2679-9850>, В. Мудріченко – <https://orcid.org/0009-0005-8311-2685>

© О.В. Колісніченко, В.М. Коржик, П.Д. Стухляк, А.І. Кільдій, Р. Товбин, М. Шинлов, В. Мудріченко, 2024

Але, найголовніше, при виборі детонаційного методу напилення керуються якістю одержуваних покриттів, а саме:

- високою щільністю (пористість <1 %) через більшу швидкість частинок;
- підвищеною зносостійкістю завдяки твердішим і міцнішим покриттям;
- вищою твердістю за рахунок меншого розкладання карбідних фаз при напиленні металокерамічних покриттів;
- покращеним захистом від корозії завдяки зменшенню наскрізної пористості;
- вищою міцністю зчеплення з основою та підвищеною когезійною міцністю покриття;
- нижчим вмістом оксидів завдяки меншому часу польоту та нагріванню продуктами згоряння напилюваного порошку;
- збереженням хімічного складу порошку за рахунок скорочення часу перебування при високій температурі;
- низьким рівнем залишкових напружень;
- меншою шорсткістю поверхні після напилення завдяки вищій швидкості удару та меншій фракції порошку.

Високе значення кінетичної енергії струменя по відношенню до теплової складової роблять цей метод кращим для таких застосувань, як напилення зносостійких покриттів з металокераміки, де нижчі температури процесу запобігають зневуглицюванню, а високі – швидкості, створюють відносно практично безпористі покриття в стані з мінімальними залишковими напруженнями, що робить їх менш схильними до розтріскування.

Розвиток технологічних установок детонаційно-газового напилення. Вперше питання про використання детонації для отримання корисної роботи в енергетичних установках було поставлене Я.Б. Зельдовичем у 1940 р. Згідно з його статтею «До питання про енергетичне використання детонаційного горіння» [1] термодинамічна ефективність детонаційних установок значно перевищує ККД установок з дефлаграційним спалюванням палива. Це обумовлено тим, що продукти детонації мають меншу ентропію в порівнянні з продуктами звичайного горіння, а при ізоентропічному розширенні велика частина хімічної енергії переходить у корисну роботу. Як наслідок, використання детонаційної гармати буде дещо економішним в порівнянні з HVOF.

Детонаційно-газову установку для напилення вперше було розроблено та запатентовано в США фірмою «Union Carbide Corp» у 1955 р. [2]. Початковий етап вивчення методу та розробки уста-

новок для його реалізації детально викладено у [3, 4]. Створення цього винаходу було пов'язано з дослідженнями детонації ацетилену для пошуку безпечних методів його зберігання і транспортування, проведеними в кінці 1940-х рр. фірмою «Linde Company». Результати досліджень вперше показали, що руйнівна сила газової детонації може бути використана для виконання корисної роботи. Зусилля дослідників були спрямовані на розробку процесу нанесення шару твердих покриттів з поліпшеними властивостями в порівнянні з покриттями, одержуваними іншими методами напилення. Ця технологія, відома як Detonation Gun process, стала основою торгово-промислової діяльності «Linde Division». Розробка способу та першої установки детонаційно-газового напилення забезпечувала створення найкращих покриттів. Фірма створила широку мережу спеціалізованих заводів з нанесення та обробки покриттів, розташованих в Японії, Німеччині, Канаді, Великобританії, Швейцарії, і протягом тривалого часу підтримувала монополію на унікальну технологію.

Багато переваг детонаційного напилення були очевидні для фахівців відразу ж після появи першої інформації про нову технологію. Проте нікому не вдалося досягти цього рівня властивостей іншими методами, хоча такі спроби робилися численними дослідниками в багатьох країнах світу. Багато в чому така ситуація пояснювалася монополією компанії «Prahaair» (колишня назва – «Union Carbide Corp») і відсутністю можливості придбати її обладнання.

У 1960-х рр. у Києві під керівництвом академіка Г.В. Самсонова розпочалися роботи з освоєння технології детонаційного газового напилення в Інституті проблем матеріалознавства АН УРСР [5, 6]. На той момент часу практично були відсутні відомості про фізичні основи процесу, а численні публікації в західній пресі носили в основному рекламний характер. Дослідження також почали проводитися в Дніпропетровських хіміко-технологічному (О.Д. Корнєв, В.І. Шинкаренко та ін.) і металургійному (Т.П. Шмирьова, Г.М. Воробйов) інститутах, Ворошиловградському машинобудівному інституті (Ю.О. Харламов, Б.Л. Рябошапко та ін.), ВО «Київарматура» (О.І. Зверєв, В.І. Шестерненко), ЦКБ «Ленінська кузня» (м. Київ), Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона АН УРСР (м. Київ), ВАТ «Мотор-Січ» (м. Запоріжжя) та в інших організаціях. Пізніше до досліджень приєдналися Харківський авіаційний інститут, Науково-дослідний інститут технології машинобудування (м. Харків), Фізико-механічний ін-

ститут ім. Г.В. Карпенка (м. Львів). Дослідження були зосереджені на вивченні стаціонарних процесів газової детонації. Вивчалися газодинамічні параметри процесу наплення, здійснювалася оцінка енергетичного стану частинок напилюваного матеріалу та з'ясування механізму формування шару покриття.

Для здійснення процесу нанесення покриттів використовувалися детонаційні установки, побудовані за загальним принципом, до складу яких входили: камера згоряння у вигляді циліндричного ствола, газорозподільний пристрій, система запалювання, дозатор порошку та система управління установками за заданою циклограмою. Для роботи установки в якості окисника використовували кисень, а в якості горючого газу – ацетилен. Так з'явилися перші вітчизняні детонаційно-газові установки (ДГУ): спочатку – дослідні зразки «Союз» і «Блискавка», а потім і перші промислові ДГУ – «Дніпро» (ІПМ АН УРСР) та ін. У 1990-х рр. за участю фахівців ІПМ НАН України було створено детонаційно-газові установки – АДМ-2 і АДМ-4.

Незважаючи на те, що всі традиційні конструкції детонаційних установок побудовані за загальним принципом, вони відрізняються за способом введення напилюваного матеріалу – осьова подача або радіальна; за способом подачі горючої суміші – камери прямого або попереднього змішування; за способом ініціювання детонації – прямий або форкамерний підпал.

Розвиток технології детонаційного наплення в ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. З 1980-х рр. в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України під керівництвом Є.А. Астахова було розпочато роботи з дослідження процесу детонаційно-газового наплення [7–10]. З урахуванням основних положень теорії газової детонації проведено комплекс теоретичних та експериментальних досліджень щодо вибору та розробки оптимальних конструкцій вузлів ДГУ. Сформульовано вимоги до основних вузлів установки та систем газорозподілу та управління, основні принципи розробки детонаційного обладнання. З урахуванням характеристик і властивостей порошків (густини, дисперсності, питомої поверхні, насипної маси, газопроникності та ін.) розроблено живильники для ДГУ, що працюють зі скорострільністю 1...8 Гц. Вивчено вплив способу введення порошку (поперечний, осьовий, імпульсний, безперервний) на забезпечення стабільної щільності газопорошкової суміші по довжині ствола. Проведено комплексні дослідження покриттів з різних поро-

шків. За основу було взято конструкції ДГУ, розроблені в Інституті проблем матеріалознавства АН УРСР. Тоді ж проведено роботи, пов'язані з промисловим освоєнням детонаційного наплення покриттів. Інститутом електрозварювання ім. Є.О. Патона та Інститутом надтвердих матеріалів НАН України розроблено установки серії «Перун», а в НВО «Оргтехавтоматизація» (м. Сімферополь, Україна) освоєно їх дослідно-промисловий випуск. Установки є істотно різними за конструкцією та умовами експлуатації, але більшість вузлів установок було уніфіковано. Це дозволило виробляти комплектацію обладнання в різних блокових з'єднаннях. Автоматизований детонаційний комплекс (АДК) «Перун-С» [11] є одним з характерних представників даного класу установок. Він має наступні принципові технологічні можливості:

- експлуатація розробленого обладнання можлива при використанні різних робочих газів (в якості пального, крім ацетилену, може застосовуватися пропан–бутан або водень), а для транспортування порошку, продувки змійовика та ствола, розведення вибухової суміші допустимо використання як азоту, так і стисненого повітря;

- управління властивостями напилюваних покриттів за рахунок зміни в широких межах температури та швидкості напилюваних частинок у момент формування шару покриття і впливу на ступінь їх окислення та зміни хімічного і фазового складу;

- наплення на великих поверхнях покриття з мінімальним припуском на обробку, що забезпечується стабільною роботою дозатора (зміна величини дози порошку, що вдувається, в процесі роботи не більше 8 %) і використанням комп'ютерної програми для переміщення установки;

- оснащення установки двома незалежно керованими порошковими дозаторами, що забезпечують перехід з режиму детонаційно-абразивної обробки на режим нанесення покриттів без викликання установки; здійснення процесу абразивної обробки і наплення в одному циклі; наплення двокомпонентного покриття без попереднього приготування порошкових сумішей і регулювання їх процентного вмісту.

Як і у всіх класичних детонаційних установках, в комплексі «Перун-С» використовується циліндричний ствол постійного діаметра для реалізації режиму стаціонарної детонації і подальшого нагріву та прискорення порошку. Як і в більшості відомих ДГУ, для періодичної подачі горючої суміші та порошкового матеріалу в установці використовуються електромеханічні клапани. На рис. 1

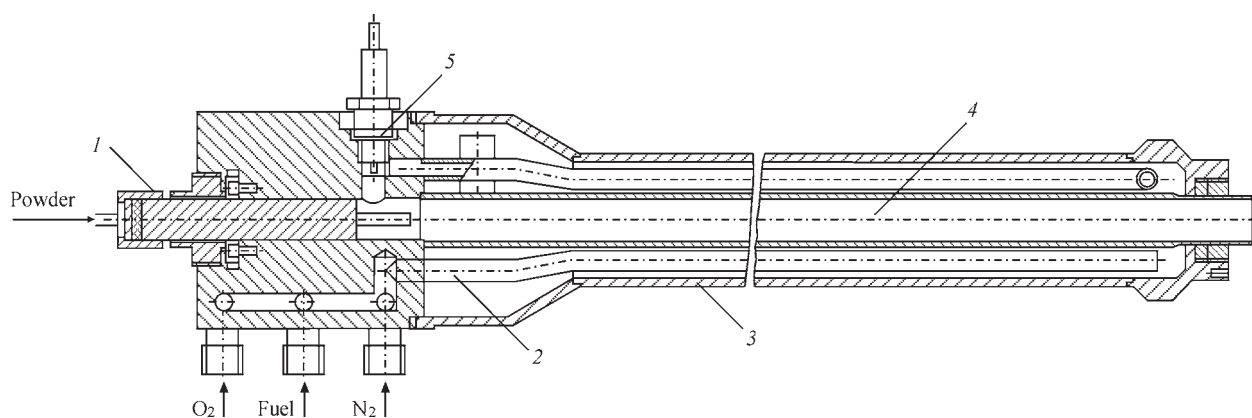


Рис. 1. Детонаційна гармата «Перун-С»

показано конструкцію детонаційної гармати «Перун-С». В установці реалізовано імпульсно-осьову подачу порошку через вузол 1 за заздалегідь заданою циклограмою під кожен імпульс. Горючий вуглеводневий газ і кисень подаються під тиском 1,2 атм магістраллю 2, розміщеною всередині сорочки охолодження 3. Після заповнення до заданого рівня горючою сумішшю циліндричного ствола 4 здійснюється підпал суміші свічкою 5. У результаті відбувається нагрів і прискорення попередньо поданої в ствол порції порошку. Далі детонаційна установка продувається за заздалегідь заданою циклограмою азотом або повітрям, що подається під тиском 3 атм. Підвищений тиск дозволяє замикати магістралі пального газу і кисню під час продувки установки та використовувати електромеханічний клапан тільки в газовій магістралі продувки.

Детонаційна установка «Перун-С» – високоефективний стаціонарний комплекс, ефективне промислове використання якого особливо було виявлено при масовому і великосерійному виробництві виробів з покриттями. Технічні характеристики комплексу «Перун-С» наведено в табл. 1.

Як показала практика, електромагнітні клапани успішно працюють в установках з частотою генерації детонаційних хвиль у газових сумішах до десяти Гц. Проте при роботі на вищих частотах клапанна система створює великі труднощі. Підвищення ж частоти роботи ДГУ дозволяє підвищити продуктивність і коефіцієнт використання порошку. Як наслідок, паралельно з вивченням детонаційного напilenня на класичних конструкціях ДГУ для вирішення завдання підвищення ефективності процесу в ІЕЗ ім. Є.О. Патона під керівництвом Ю.М. Тюріна почалися проводитися роботи з конструювання безклапанних детонаційних установок, а також вивчення можливості використання нестационарної перестисненої детонації для нанесення покриттів [12–17].

На рис. 2 показано ескіз одного з перших безклапанних детонаційних пристроїв. Використання

Таблиця 1. Технічні характеристики комплексу «Перун-С»

Параметр	Величина
Частота проходження робочих циклів, Гц	3,3...6,6
Площа покриття за цикл, мм²	320
Товщина покриття за цикл, мкм	3...10
Продуктивність напилування порошку, кг/год	1...3
Коефіцієнт використання порошку, %	30...60
Витрати робочого газу, м³/год:	
ацетилену	0,65...1,2
пропан-бутану	0,6...1,1
водню	2...3,6
кисню	1,3...4,0
азоту	4,6...5,2
стисненого повітря	4,6...5,2
Потужність, кВт	2
Напруга живлення, В	220, 380
Частота, Гц	50
Межі переміщення трикоординатного маніпулятора, м:	
праворуч – ліворуч	1,6
вперед – назад	0,85
вверх – вниз	0,20

форкамери 4 дозволяє ініціювати детонацію газової суміші автомобільною свічкою 7. При виході з отворів 5, рівномірно розподілених по колу, детонація розвивається в основному об’ємі 6 детонаційної установки. Діаметр ствола 1 менше діаметра камери згоряння, що примикає. Це дозволяє реалізувати перестиснутий режим детонації. Порошок подавався радіально в ствол імпульсним порошковим живильником 2. Пристрій мав водяне охолодження 3.

Незважаючи на численний ряд спроектованих в ІЕЗ ім. Є.О. Патона експериментальних конструкцій безклапанних ДГУ, їх робота заснована на одному й тому ж принципі. Робота без-

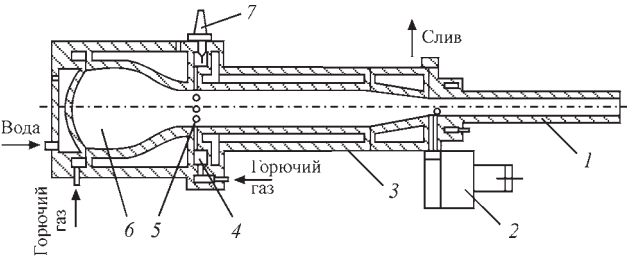


Рис. 2. Безклапанний детонаційний пристрій

клапанних установок в імпульсному режимі реалізується за рахунок газодинамічних процесів у магістралях подачі пального та окисника, в результаті яких відбувається переривання з необхідною частотою подачі пального та окисника в детонаційну камеру згоряння (ДКЗ) і запобігання неконтрольованому підпалу нової порції горючої суміші продуктами згоряння попереднього циклу. Сам процес полягає в наступному. У камері формується горюча суміш. Підпал суміші призводить до виникнення детонаційної хвилі (ДХ) і, отже, до підвищення тиску в ДКЗ. У той момент, коли тиск у ДКЗ починає перевищувати тиск у підвідних магістралях, який зазвичай не перевищує 300 кПа, відбувається затікання продуктів згоряння у відповідні магістралі. Тим самим переривається надходження свіжого пального і окисника в ДКЗ. Іншими словами, «газодинамічний клапан» закритий. При русі в газових магістралях продукти детонації охолоджуються. Для стабільної роботи та виключення самозаймання довжина і діаметр магістралей підбирається дослідним шляхом. Після виходу ДХ з камери згоряння всередині останньої назустріч потоку продуктів детонації починає поширюватися хвиля розрідження. Досягнувши магістралей подачі пального та окисника, вона поширюється по каналах, і через деякий час тиск у продуктах згоряння зменшується, що викликає зворотний рух газів у магістралях. Таким чином, «газодинамічні клапани» відкриваються. Починається зворотний витік вже охолоджених продуктів згоряння в камеру. Це аналогічно процесу продувки камери згоряння інертним газом, що має місце в роботі клапанних детонаційних систем. Далі відбувається заповнення ДКЗ новою сумішшю газів. При цьому між горючою сумішшю та гарячими продуктами згоряння, температура яких перевищує температуру самозаймання горючої суміші, розташовуються охолоджені продукти згоряння, що запобігає запаленню свіжої суміші газів, що надходить. Після заповнення ДКЗ проводиться чергова ініціація детонації і цикл повторюється. Період часу, протягом якого після підпалу горючої суміші ДКЗ знову заповнюється свіжою сумішшю, включає в себе сумарний час: переходу дефлаграції в детонацію; поширення ДХ в ДКЗ; витік продуктів згоряння з ДКЗ у навколишній простір; витік охолоджених продуктів згоряння з магістралей пального і окисника в ДКЗ; заповнення ДКЗ горючою сумішшю.

У загальному випадку максимальна частота роботи установки залежить від довжини камери

згоряння, її діаметра, довжини магістралей подачі пального та окисника, їх діаметра, тиску в них, виду пального та окисника, їх співвідношення. Знаючи всі ці параметри, можна оцінити граничну частоту роботи ДКЗ. Сучасні безклапанні ДУ для напилення покриттів дозволяють працювати з частотою до 100 Гц і вище. Наприклад, слід зазначити конструкцію пристроїв, що використовують високочастотний імпульсний процес детонації (HFPD) [18, 19]. На їх основі створено низку детонаційних установок, які дозволяють наносити якісні покриття з високою ефективністю. Зокрема, добре зарекомендувала себе модифікація HFPD-РК 200 «Aerostar Coatings» (Іспанія) для напилення металевих порошків, оксидів і металокераміки [20]. Наразі на ринку обладнання для газотермічного напилення центр прикладних досліджень і технологічних розробок «Тесналіа» (Іспанія) пропонує систему HFPDneo, яка забезпечує підвищену продуктивність і можливість працювати з використанням різних горючих газових сумішей у широкому діапазоні частот (до 100 Гц і вище). Поштовхом до розвитку безклапанних детонаційних гармат нового покоління, що працюють на високій частоті, послужили дослідження та практичні результати в області створення імпульсних детонаційних двигунів. Як приклад слід зазначити розробки «Hiroshima University» [21]. Створена ними високочастотна детонаційна гармата дозволяє наносити покриття з частотою 150 Гц [22]. Стабільна робота детонаційної гармати в такому разі забезпечується за рахунок подання горючої суміші в режимі продувки детонаційних камер інертним газом або в режимі продувки парами рідини, що інjektується [23]. Роботи зі збільшення частоти, оптимізації подання горючої суміші та конструкцій детонаційних камер даного класу пристроїв продовжуються.

До основних проблем, пов'язаних з розробкою установок, що використовують явище детонації, слід віднести кероване надійне ініціювання детонації в камері згоряння. З технічної точки зору найбільший інтерес при проєктуванні детонаційних установок, використовуваних для напилення покриттів, становить початковий підпал горючої суміші слабкішим джерелом енергії з можливістю подальшої реалізації переходу горіння в детонацію (ПГД). З цієї метою часто використовуваним способом ініціювання прискореного ПГД є формування детонації в результаті прискорення полум'я в окремому каналі (форкамері) і перепуск в основний об'єм камери згоряння.

Під час проєктування цьому вузлу слід приділяти особливу увагу. Авторами розроблено кіль-

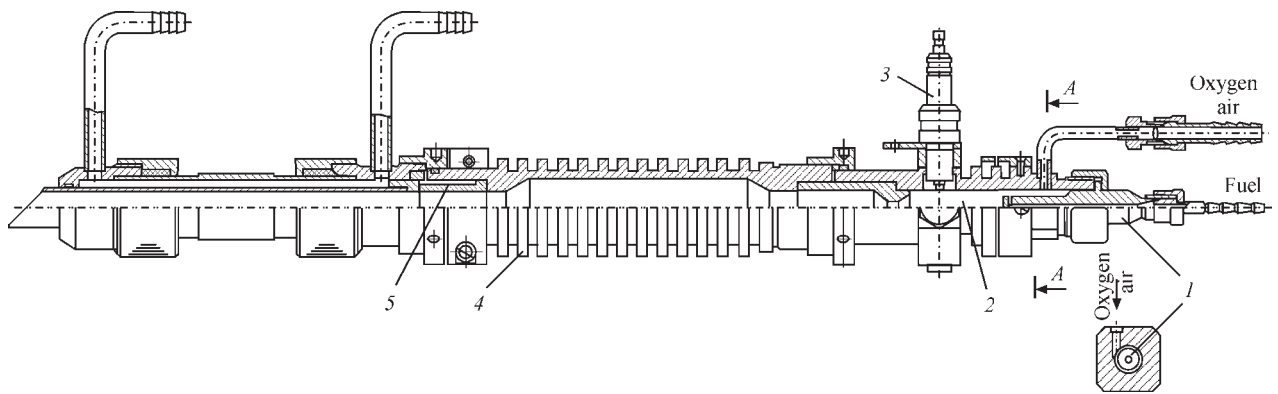


Рис. 3. Безклапанний детонаційний пристрій з циліндричною форкамерою

ка конструкцій форкамер, що дозволяє реалізовувати детонаційний режим згоряння в приєднаних ДКЗ, які мають різну геометрію. Як приклад на рис. 3 показано ескіз робочого лабораторного пристрою з повітряним охолодженням ДКЗ. Щоб уникнути перегріву, максимальна частота детонації в розглянутій ДГУ не перевищує 12 Гц. Горючий газ (у даному випадку пропан) подається через жиклер 1 у форкамеру 2. У жиклері для подачі пального газу в радіальному напрямку просвердлено отвори малого діаметра. Окисник (кисень або суміш кисню з повітрям) подається радіально по дотичній до внутрішньої циліндричної поверхні форкамери, тим самим надаючи цьому потоку кутову швидкість. Така подача компонентів горючої суміші дозволяє здійснити їх рівномірне перемішування. Ближче до виходу з форкамери розташовано свічку запалювання 3. Для створення умов детонації в кінці форкамери є звуження. Після підпалу та детонації фронт ударної хвилі виходить з форкамери і детонація розвивається в прилеглій ДКЗ 4. У даній конструкції на виході з ДКЗ за рахунок звуження площі поперечного перерізу камери (діаметром 30 мм) до площі перетину циліндричного ствола (діаметром 16 мм) під кутом нахилу утворюваного конуса 35° реалізується режим перестискання. Оскільки перестиснута хвиля на відстані в кілька калібрів у циліндричному стволі переходить у стаціонарну ДХ Чепмена-Жуге (ЧЖ), для ефективного прискорення та нагрівання порошку його бажано подавати на початку циліндричної частини ствола, що й було реалізовано в розглянутій конструкції. Безпосередньо на початку ствола через спеціальний вузол 5 радіально подається порошок, що нагрівається і прискорюється областю газу з підвищеним швидкісним напором.

У ДКЗ змінного поперечного перерізу ступінь перестискання ДХ α визначається наступним співвідношенням: $\alpha = D_*/D_{CJ}$, де D_* і D_{CJ} – швидкості перестисненої ДХ і детонації ЧЖ відповідно.

Як показують розрахунки [24], вже невелике збільшення швидкості ДХ призводить до різкого зростання таких характеристик продуктів детонації, як тиск p_* , щільність ρ_* , масова швидкість u_* . Хоча зростання температури продуктів детонації і компенсується частково процесами дисоціації, проте він також помітний. Тому перестиснені ДХ можуть слугувати джерелом імпульсних потоків продуктів детонації з параметрами, що помітно перевищують ті, які можна отримати при детонації ЧЖ, чим і визначається область їх можливих застосувань при нанесенні порошкових покриттів газодетонаційним методом.

Оцінку тиску, щільності на фронті перестисненої ДХ і швидкості продуктів детонації у залежності від ступеня перестиснення можна визначити зі співвідношень, наведених у [25]. Для ДКЗ детонаційної гармати, наведеної на рис. 3, ступінь перестиснення $\alpha = 1,043$. При використанні горючої суміші з молярним співвідношенням компонентів (кисню до пропану), що дорівнює 4,2, і яка містить 5 % азоту, параметри детонації ЧЖ будуть приблизно наступними: $D_{CJ} = 2400$ м/с, $p_{CJ} = 34$ атм, $\rho_{CJ} = 2,59$ кг/м³, $u_{CJ} = 1100$ м/с. Тоді в даній установці згідно з залежностями [25] за рахунок перестиснення можна отримати наступні максимальні параметри: $p_* = 47$ атм, $\rho_* = 3,62$ кг/м³, $u_* = 1470$ м/с. При цьому динамічний напір продуктів перестисненої детонації $\rho_* u_*^2/2$ буде в 2,5 разів вищим, ніж детонації ЧЖ.

Оціночні розрахунки узгоджуються з чисельним моделюванням процесу детонації у розглянутій ДКЗ, проведеним з використанням програмного пакету ANSYS.

На рис. 4 показано розподіл тиску в часі на стінки ДКЗ і в стволі. У ДКЗ параметри детонації відповідають параметрам ЧЖ. У зоні звуження та на відстані приблизно двох калібрів безпосередньо в стволі знаходиться область перестисненої детонації, після якої детонація знову переходить у стаціонарну ЧЖ.

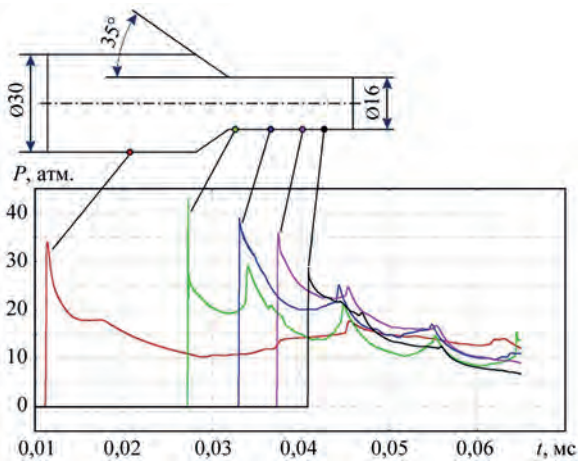


Рис. 4. Чисельне моделювання розподілу тиску в часі на стінки детонаційної камери згоряння та ствол на різній відстані від звуження

З метою забезпечення ефективного енергообміну та необхідних перетворень у вихідному порошковому матеріалі в детонаційних установках можна також використовувати багатосекційні камери. Тому на сьогоднішній день розвиток безклапанних ДГУ в ІЕЗ ім. Є.О. Патона акцентовано на проектуванні та дослідженні багатоканальних конструкцій. На даний час створено серію лабораторних багатоканальних установок для детонаційного наплення. У даному типі установок ДХ розвивається в циліндричних і кільцевих камерах згоряння, які охоплюють їх, що забезпечує багаторазове відбиття хвилі від стінок, зштовхування та об'єднання їх в єдиний струмінь продуктів згоряння. Як наслідок, істотною відмінністю даного типу установки є те, що в них здійснюється об'єднання енергії процесу детонації горючої суміші з декількох, спеціально профільованих детонаційних камер. Це забезпечує утворення струменя продуктів згоряння, який має високу швидкість і температуру, що дозволяє ефективно напилувати різні

порошкові матеріали, застосовуючи горючу суміш на основі вуглеводневого горючого газу.

На рис. 5 показано ескіз одного з дослідних зразків багатоканального детонаційного пристрою (БКДП). У БКДП для ініціації детонації конструкцію форкамери 1 залишили без зміни, як і в ДГУ, наведеному на рис. 3. У якості горючого газу можна використовувати пропан-бутан, пропілен, метан, етилен, пропілен і суміш пропілен-пропан-метилацетиленален (МАФ). Як окисник використовується кисень або суміш кисню з повітрям. Ступінь розведення горючої суміші повітрям залежить від властивостей порошку, що напилюється, і підбирається експериментально на основі багатфакторного планування експерименту.

Горючий газ подається через жиклер в форкамеру 1 аналогічної конструкції, як і у ДГУ, наведеному на рис. 3. На виході з форкамери розташовано свічку запалювання. Основна циліндрична детонаційна камера 2 заповнюється горючою сумішшю після заповнення форкамери. Навколо циліндричної ДКЗ розміщено кільцеву ДКЗ 3. Заповнення об'єму кільцевої камери здійснюється через змішувач 4. Подача компонентів горючої суміші в змішувач і їх перемішування організовано аналогічно, як і у форкамері. Порошок, що напилюється, подається в ствол ДУ радіально через циліндричну вставку 5 з рівномірно просвердленими по колу отворами. Як у газових, так і в порошковій магістралі відсутні електроклапани. Установка працює «квазінеперервно» з частотою 20 Гц і вище, що забезпечує можливість використання стандартних пристроїв і комплектуючих для подачі порошків і газів. Безперервна подача порошку та горючої суміші спрощує конструкцію і знижує вартість обладнання, підвищує надійність його роботи, а використання вуглеводневого палива (за

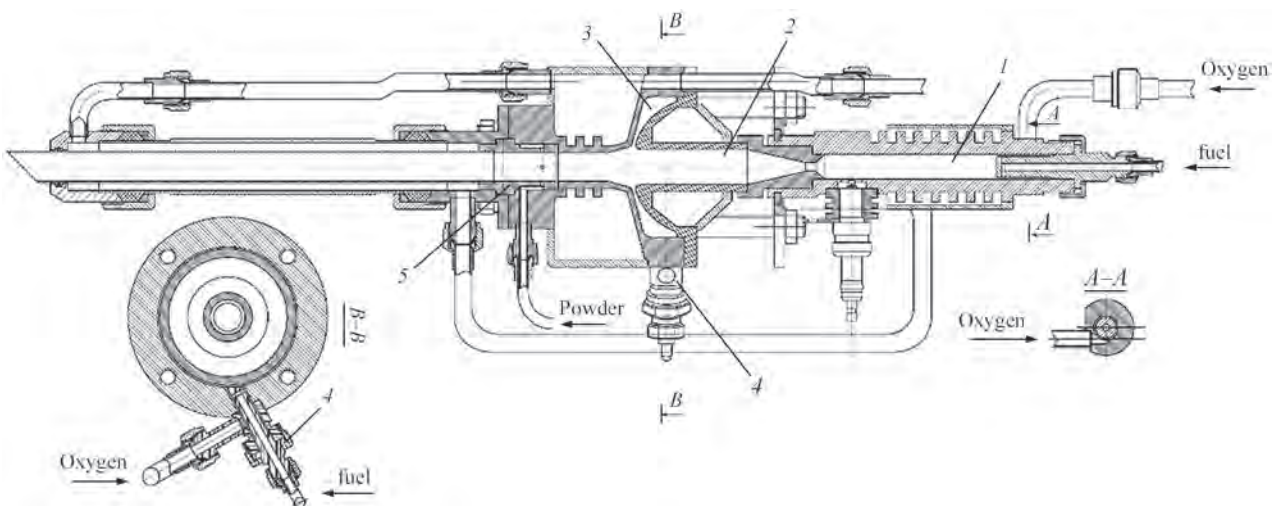


Рис. 5. Багатоканальний детонаційний пристрій

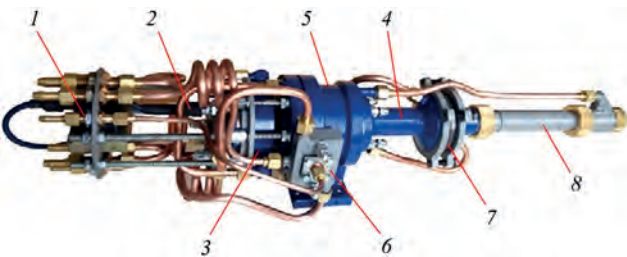


Рис. 6. Багатокамерний детонаційний пристрій для напилення покриттів: 1 – вузол подачі компонентів горючої суміші; 2 – свічка запалювання; 3 – форкамера; 4 – основна ДКЗ; 5 – кільцева ДКЗ суміші; 6 – газовий змішувач; 7 – вузол подачі порошку; 8 – ствол

винятком ацетилену) забезпечує безпеку та ефективність технології.

Витрата компонентів горючої суміші може варіюватися в межах, м³/год: 0,8...2,0 пропану, 5...10 кисню і 0...5 повітря. В основній циліндричній камері 2 відбувається розвиток детонаційного режиму згоряння. Кільцева камера 3 зі щільним виходом у циліндричний ствол використовується для стиснення продуктів згоряння та створення додаткового струменя, який «підпирає» в циліндричному стволі продукти детонації від основної камери. Для прискорення та нагрівання в ствол подається доза порошку. Ствол може мати внутрішній діаметр 16...20 мм, довжину 300...520 мм і вибирається в залежності від властивостей матеріалу порошку, що напилюється. Звуження робочого об'єму циліндричної камери діаметром 26 мм до діаметра ствола 16 мм забезпечує перестискання режиму детонаційного горіння. Подальше підтиснення продуктів згоряння відбувається за рахунок кільцевої камери. Газодинамічний процес ініціювання детонації в кільцевій камері забезпечує схлопування продуктів згоряння по осі ствола, що істотно підвищує їх швидкість, тиск і щільність. БКДП дозволяє розтягнути по довжині ствола продукти детонації і тим самим збільшити зону нагріву та прискорення, а отже, і час перебування в цій зоні порції порошку. Це позитивно позначається на коефіцієнті використання матеріалу.

Досвід створення промислових ділянок детонаційного газового напилення. Співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона розроблено кілька конструкцій БКДП

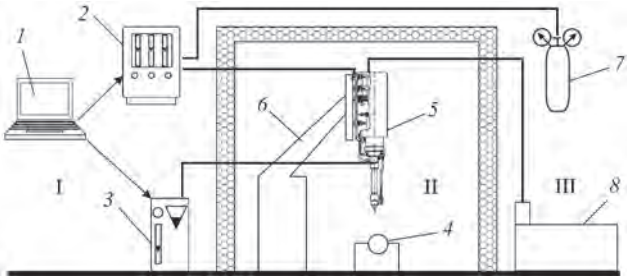


Рис. 7. Схема ділянки детонаційного напилення: 1 – система контролю і управління технологічним процесом; 2 – газовий пульт низького тиску для подачі кисню, пропану/бутану та повітря; 3 – порошковий живильник; 4 – напилюваний виріб; 5 – багатокамерна детонаційна установка; 6 – маніпулятор; 7 – газова рампа; 8 – дилер

Таблиця 2. Основні параметри БКДП

Параметр	Величина
Габарити (довжина ствола 300 мм), м	0,8×0,2×0,15
Вага, кг	15
Споживана потужність (система запалювання), Вт	<100
Загальний об'єм камер згоряння, см³	150
Діаметр ствола, мм	16...18
Частота генерації імпульсів, Гц	10...30
Система подачі порошку та горючої суміші	безклапанна
Тиск в газових магістралях, атм	1,2...3
Використовуване пальне	LPG, пропилен, МАФ, метан
Витрата LPG, м³/год	1...1,6
Витрата кисню, м³/год	5...8,5
Витрата повітря, м³/год	0,3...3,5
Витрата охолоджуючої рідини (вода), л/хв	7
Продуктивність, кг/год	
кераміка	0,5...1,0
металокераміка	1,0...2,0
метал	1,0...3,0
Коефіцієнт використання порошку, %	
кераміка	40...60
металокераміка	70...80
метал	70...90

для нанесення покриттів, найбільш вдалі з яких, крім науково-дослідних лабораторних експериментів, пройшли апробацію в промислових умовах. На рис. 6. представлено одну з модифікацій таких гармат.

Основні параметри БКДП наведено в табл. 2.

При організації промислових ділянок для БКДП застосовувалося в основному стандартне обладнання, яке широко використовується іншими методами газотермічного напилення. Що стосується безпосередньо собівартості самої детонаційної установки напилення, то, як правило, вона невисока через відносно низькі витрати на виготовлення та малу матеріаломісткість. Як наслідок, у загальних капітальних витратах на ділянку та її інфраструктуру собівартість детонаційної гармати становить мізерну частину. Тим самим, у техніко-економічному обґрунтуванні створення промислової ділянки основна увага приділялася рівню автоматизації обладнання та якості складових її комплектуючих.

Невеликі розміри напильовальної установки, низький тиск (до 0,3 МПа) у підвідних газових магістралях і безперервна подача компонентів горючої газової суміші та порошків забезпечують умову для технологічного маніпулювання при використанні



Рис. 8. Ділянка детонаційного напильнення покриттів

стандартних автоматизованих установок і роботів. При цьому можливо використовувати стандартні бокси та системи для нейтралізації шуму, а також апробовані в газотермічних технологіях напильнення порошкові живильники, газобалонні системи подачі газів, пульти управління та системи контролю за технологією напильнення та якістю покриття.

Ділянка детонаційного напильнення (рис. 7) складається з трьох частин:

I: Операторська для управління та контролю технологічним процесом.

II: Звукоізоляційний бокс, в якому знаходиться гармата на маніпуляторі та здійснюється безпосередньо нанесення покриттів.

III: Газовий відсік з розміщеними в ньому кисневою рампою, балонами азоту і пропан-бутану, а також компресором і блоком охолодження.

На базі компанії «Sputtek Advanced Coating Technologies» (GTA, Онтаріо, Канада) у 2016 р. було створено технологічну ділянку для детона-

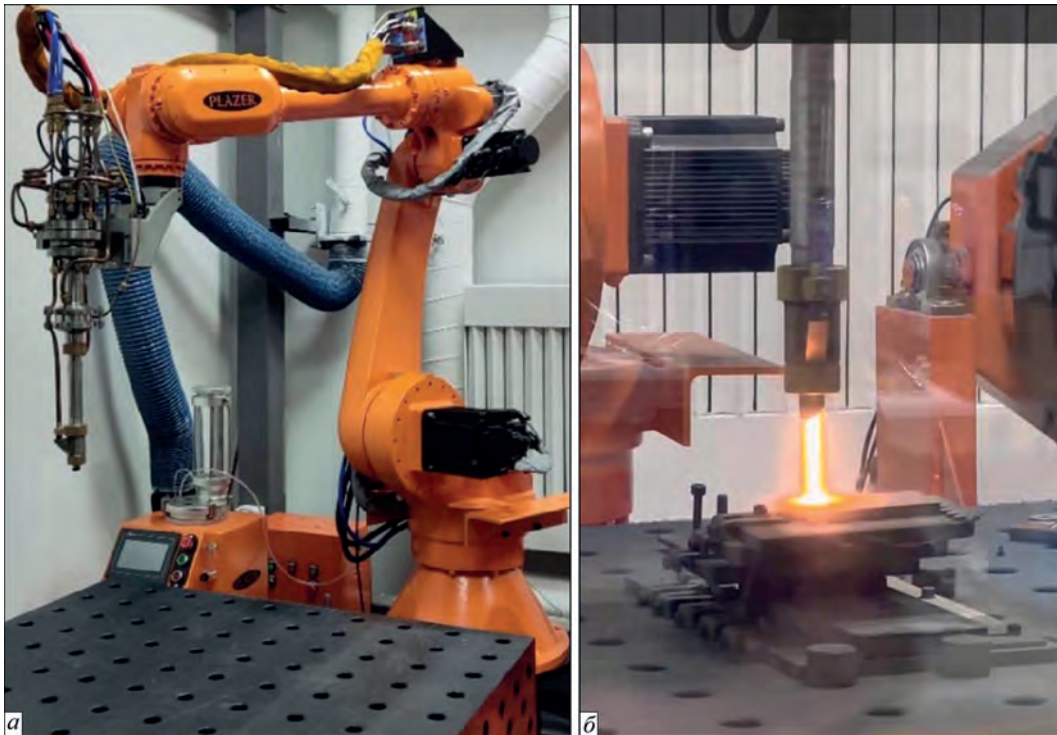


Рис. 9. Роботизоване обладнання (а) і процес (б) детонаційно-газового напильнення з реалізацією ефекту кумулювання енергії в БКДП, виготовлення якого організовано в ТОВ «Науково-виробничий центр ПЛАЗЕР» (м. Київ)



Рис. 10. Роботизована ділянка детонаційного газового напильнення з реалізацією ефекту акумулювання енергії в БКДП, з 6-осьовим роботом з максимальною довжиною переміщення руки 2238 мм і двоосьовим маніпулятором для обертання напильованих деталей

ційного напilenня металевих зносостійких покриттів на основі карбиду вольфраму на поверхні виробів. Його основу становить розміщене горизонтально на нерухомій станині БКДП і роботизований маніпулятор для переміщення виробів, що напilenюються, щодо сопла детонаційної установки. Програмований контролер дозволяє виконувати нанесення покриттів заданої товщини на деталях як плоскої, так і циліндричної форми. Невід'ємною частиною технологічного обладнання є звукоізолююче приміщення об'ємом 36 м³, що дозволяє знизити рівень шуму до 90 дБ і менше. З метою зниження запиленості в робочій зоні передбачено систему витяжної вентиляції з високою продуктивністю (до 200 і більше м³/хв.). На рис. 8 наведено звукоізоляційний бокс з пультом управління та консоллю оператора. Спостереження за процесом здійснюється дистанційно за допомогою телекамер. Система газопостачання газами такими як азот, пропан-бутанова суміш і кисень, містить необхідні регулятори тиску, запірну арматуру та набір вогнеперегороджувачів. Технологічна ділянка оснащена обладнанням для підготовки виробів до процесу напilenня, а також контролю якості (шорсткість поверхні, товщина покриття та його адгезія).

Важливим фактором розвитку технології у даний час є ступінь її автоматизації. Прикладом повної автоматизації процесу може служити роботизований комплекс з інтелектуальною системою управління (рис. 9) для детонаційно-газового напilenня з реалізацією ефекту кумулювання енергії в багатокамерній установці, виготовленій на виробничій базі ТОВ «Науково-виробничий центр ПЛАЗЕР» (м. Київ). Звукоізолюваний бокс (габарити 6540×6280×5200 мм) розроблено виходячи з вимог санітарних норм. Приміщення є вибухобезпечним, а його шумоізоляція дозволяє знизити рівень шуму в зоні роботи оператора до рівня ≤90 дБ. Для очищення повітря від продуктів згоряння, аерозолів і мікропорошків витяжна установка комплектується циклонним апаратом з продуктивністю не менше 9000 м³/год і механічним фільтром. Саму гармату розміщено на програмованому антропоморфному 6-осьовому роботі для переміщення установки за задалегідь заданою траєкторією або в ручному режимі за командами оператора з пульта дистанційного керування системи управління. За межами звукоізолюваного боксу знаходяться: модулі програмованої системи автоматизованого управління обладнанням і технологією (у тому числі: шафа газопідготовки і управління витратами газів; мобільний пульт системи управління з PLC контролером і монітором модуля

відеоспостереження; дисплей модуля дистанційного вимірювання температури деталі; контролер робота для напilenня); блок примусового автономного охолодження БКДП, інтегрований з системою автоматичного управління; балонна рампа. Щоб уникнути виникнення позаштатних ситуацій, особливу увагу приділено розробці системи безпеки. Приклад такої роботизованої ділянки, побудованої в Науково-дослідному Інституті зварювальних технологій імені Патона в провінції Чжецзян (КНР), наведено на рис. 10.

Застосування таких автоматизованих комплексів дозволяє в короткі терміни навчати операторів і впроваджувати технологію та обладнання на виробництві.

Висновки

У статті наведено інформацію щодо проведених в ІЕЗ ім. Є.О. Патона робіт з розвитку технології детонаційно-газового напilenня. Традиційні ДГУ класу «Перун» та одержувані ними покриття детально вивчалися співробітниками інституту починаючи з 1980-х рр. Незважаючи на те, що ацетилен є найбільш вивченим паливом, зручним для детонаційного горіння, і ацетилено-кисневі вибухові суміші відрізняються найбільшою температурою та високим динамічним напором продуктів детонації, використання ацетилену вимагає дотримання підвищених заходів безпеки. Використання ж безпечнішої горючої суміші на основі метану, пропан-бутану або МАФу дозволило розробникам значно розширити можливості при конструюванні детонаційних гармат і розглянути можливість використання безклапанних систем, що працюють на підвищених частотах. Тим самим стало можливим підвищити надійність систем, ефективність і продуктивність процесу. Робота в імпульсному режимі розроблених співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона безклапанних ДГУ досягається за рахунок газодинамічних процесів у магістралях подачі пального і окисника. Цей принцип все частіше застосовується при конструюванні детонаційних гармат і в інших науково-дослідних організаціях.

У даний час активно вивчається питання можливості використання нестационарної перестисненої детонації для нанесення покриттів. Вирішення всіх цих питань проводилося співробітниками ІЕЗ ім. Є.О. Патона і при конструюванні БКДП. На відміну від традиційних детонаційних установок напilenня покриттів в БКДП використано перестиснений режим детонаційного згоряння горючих газових сумішей і безклапанна подача горючої суміші та порошку. Крім того, використання енергії кумуляції у спеціально профільованих камерах робить можливим створення багатофронтального потоку продуктів детонаційного згоряння, що забезпечує поси-

лений вплив на дисперсні частинки напилуваного матеріалу. Це істотно збільшує ефективність передачі енергії та забезпечує її економію. Згоряння горючих сумішей у спеціалізованих камерах надає широкі можливості управління швидкістю, температурою та складом продуктів згоряння, що дозволяє створити технологічні умови напilenня, які реалізовані, наприклад, такими технологіями як Cold Spray, HVOF або HVOF. Висока частота ініціювання згоряння (20 Гц і вище) забезпечить квазінеперервний потік продуктів згоряння, що дозволяє використовувати дану технологію для нанесення покриттів на поверхні виробів нарівні з відомими HVOF, HVOF і Cold Spray процесами напilenня. Технологія на основі БКДП має ряд переваг у порівнянні з високошвидкісними газотермічними методами, що широко використовуються. Високоякісні покриття отримуються при набагато менших матеріальних і енергетичних витратах, а легкий вибір параметрів напilenня забезпечує широкий діапазон властивостей покриттів. Конструкція установки дозволяє працювати з високою ефективністю і надійністю на різних вуглеводневих сумішах в широкому діапазоні регулювання температури продуктів згоряння. Установка безпечно працює на різноманітному паливі, наприклад, пропан, пропан-бутан, пропілен, МАФ, природний газ. Для постачання газів використовується інфраструктура низького тиску. Автоматизована система управління (контролю) процесом і модульна концепція дозволяють легко інтегрувати технологію з уже наявною матеріально-технічною базою газотермічного напilenня на підприємствах.

Концепція розвитку безклапанних, багатокамерних детонаційних гармат, що працюють на частотах 20 Гц і вище, має великі перспективи з точки зору підвищення ефективності самого методу нанесення покриттів. На даний момент в ІЕЗ ім. Є.О. Патона ведуться активні роботи з дослідження процесу та впровадження вже наявних конструкцій установок для практичного застосування в різних галузях промисловості.

Список літератури

1. Зельдович Я.Б. (1940) К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения. *ЖТФ*, **10**(17), 1453–1461.
2. Poorman, R.M., Sargent, H.B., Lamprey, H. (1955) *Method and apparatus utilizing detonation waves for spraying and other purposes*. Pat. No. US 2714563A. No. 275,332 declared: 07.03.1952; published: 08.02.1955.
3. Зверев А.И., Шаривкер С.Ю., Астахов Е.А. (1979) *Детонационное напыление покрытий*. Ленинград, Судостроение.
4. Бартеньев С.С., Федько Ю.П., Григорьев А.И. (1982) *Детонационные покрытия в машиностроении*. Ленинград, Машиностроение.
5. Шестерненко В.И. (1968) Детонационное нанесение покрытий. *Порошковая металлургия*, **1**, 37–46.
6. Самсонов Г.В., Шаривкер С.Ю. (1977) *Детонационные покрытия*. Энциклопедия неорганических материалов. Т. 1. Киев, Главная редакция УСЭ, 327–329.

7. Ющенко К.А., Астахов Е.А., Клименко В.С., Борисов Ю.С. (1990) Детонационное напыление упрочняющих покрытий и пути его развития. *Сб. трудов «Новые процессы и оборудование для газотермического и вакуумного покрытия»*, Киев, ИЭС им. Е.О. Патона, сс. 26–32.
8. Астахов Е.А. (2005) *Научно-технологические основы управления свойствами детонационных покрытий*. Дис. д-ра техн. наук, 05.03.06, ИЭС им. Е.О. Патона НАНУ, Киев, Украина.
9. Борисов Ю.С., Астахов Е.А., Коржик В.Н. и др. (1993) Влияние состава детонирующей среды на формирование аморфно-кристаллических покрытий. *Автоматическая сварка*, **6**, 83–93.
10. Борисов Ю.С., Астахов Е.А., Мурашов А.П. и др. (2015) Исследование структуры и свойств газотермических покрытий системы WC–Co–Cr, полученных высокоскоростными методами напыления. *Автомат. сварка*, **10**, 26–29. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.04>
11. Астахов Е.А. (2003) Детонационный комплекс «Перун-С» для нанесения защитных покрытий. *Автомат. сварка*, **2**, 38–43.
12. Тюрин Ю.М., Колісниченко О.В. (2008) *Способ детонационного напыления покрытия и прилад для його здійснення*. Україна Пат. 83831.
13. Тюрин Ю.Н., Погребняк А.Д., Колісниченко О.В. (2009) Сравнительный анализ эффективности кумулятивно-детонационного и HVOF устройств для газотермического напыления покрытий. *Физическая инженерия поверхности*, **1-2**(7), 39–45. DOI: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/7948>
14. Колісниченко О.В., Тюрин Ю.Н., Товбин Р. (2017) Эффективность процесса напыления покрытий с использованием многокамерного детонационного устройства. *Автомат. сварка*, **10**, 28–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.10.03>
15. Vasilik, N.J., Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. et al. (2013) Properties, peculiarities and applications of powder coatings formed by multi-chamber detonation sprayer. *Applied Mechanics and Materials*, **467**, 179–184. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.467.179>
16. Маркашова Л.И., Тюрин Ю.Н., Колісниченко О.В. и др. (2017) Влияние структуры на свойства покрытий из механических смесей порошков Al_2O_3 и Al (или Ti), полученных методом многокамерного детонационного напыления. *Автомат. сварка*, **9**, 33–39. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2017.09.05>
17. Колісниченко О.В., Тюрин Ю.М. (2023) Властивості покриттів, напilenних багатокамерним детонаційним пристроєм та їх застосування. *Автомат. зварювання*, **9**, 39–44. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2023.09.07>
18. Fagoaga, I., Barykin, G., De Juan, J. et al. (1999) The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process. *Thermal Spray 1999: Proceedings from the United Thermal Spray Conference, Dusseldorf, Germany*, 282–287. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc1999p0282>
19. Parco, M., Barykin, G., Fagoaga, I., Vaquero, C. (2008) Development of wear resistant ceramic coatings by HFPD. *ITSC 2008: proceedings from the 2008 International Thermal Spray Conference, June 2–4, 2008, Maastricht, The Netherlands*, 130–134. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2008p0130>
20. Higuera, V., Belzunce, F. J., Riba, J. (2006) Influence of the thermal-spray procedure on the properties of a CoNiCrAlY coating. *Surface and Coatings Technology*, **200**(18-19), 5550–5556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.070>
21. Matsuoka, K., Muto, K., Kasahara, J. et al. (2016) Development of high-frequency pulse detonation combustor without purging material. *J. of propulsion and power*, **33**(1), 1–8. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.B36068>
22. Endo, T. (2020) Pulse-detonation thermal spray. *J. of the combustion society of Japan*, **62**(200), 103–115. DOI: https://doi.org/10.20619/jcombsj.62.200_103
23. Endo, T., Obayashi, R., Tajiri, T. et al. (2016). Thermal spray using a high-frequency pulse detonation combustor operated in the liquid-purge mode. *J. of Thermal Spray Technology*, **25**, 494–508. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0354-8>
24. Николаев, Ю.А., Топчий, М.Е. (1977). Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах. *Физика горения и взрыва*, **13**(3), 393–404.

25. Прохоров, Е.С. (2011). Приближенный расчет пересжатой газовой детонации в сужающихся каналах. *Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика*, **6**(2), 5–9. DOI: <https://doi.org/10.54362/1818-7919-2011-6-2-5-9>

References

- Zeldovich, Ya.B. (1940) On the issue of energy use of detonation combustion. *Technical Physics*, **10**(17), 1453–1461 [in Russian].
- Poorman, R.M., Sargent, H.B., Lamprey, H. (1955) Pat. No. US 2714563A. *Method and apparatus utilizing detonation waves for spraying and other purposes*. No. 275,332 declared: 07.03.1952; published: 08.02.1955.
- Zverev, A.I., Sharivker, S.Yu., Astakhov, E.A. (1979) *Detonation spraying of coatings*. Leningrad, Shipbuilding [in Russian].
- Bartenev, S.S., Fedko, Yu.P., Grigoriev, A.I. (1982) *Detonation coatings in mechanical engineering*. Leningrad, Mechanical Engineering [in Russian].
- Shesternikov, V.I. (1968) Detonation coating. *Powder metallurgy*, **1**, 37–46 [in Russian].
- Samsonov, G.V., Sharivker, S.Yu. (1977) *Detonation coatings*. *Encyclopedia of Inorganic Materials*. Vol. 1. Kyiv, Main Edition of the Ukrainian Soviet Encyclopedia, 327–329 [in Russian].
- Yushchenko, K.A., Astakhov, E.A., Klimenko, V.S., Borisov, Yu.S. (1990) *Detonation spraying of hardening coatings and ways of its development*. Collected papers «New processes and equipment for gas-thermal and vacuum coating», Kyiv, Paton Electric Welding Institute, 26–32 [in Russian].
- Astakhov, E.A. (2005) *Scientific and technological basis for controlling the properties of detonation coatings*. Thesis. Dr. Tech. sciences, 05.03.06, E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine [in Russian].
- Borisov, Yu.S., Astakhov, E.A., Korzhyk, V.N. et. al. (1993) Influence of the composition of the detonating medium on the formation of amorphous-crystalline coatings. *Automat. Svarka*, **6**, 83–93 [in Russian].
- Borisov, Yu.S., Astakhov, E.A., Murashov, A.P. et. al. (2015) Investigation of structure and properties of thermal coatings of WC-Co-Cr system produced by high-velocity methods of spraying. *The Paton Welding J.*, **10**, 25–28. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2015.10.04>
- Astakhov, E.A. (2003) Detonation system «Perun-S» for deposition of protective coatings. *The Paton Welding J.*, **2**, 36–40.
- Tyurin, Yu.M., Kolisnichenko, O.V. (2008) *Method of detonation spraying of coatings and device for its realization*. pat. 8383, Ukraine.
- Tyurin, Yu. N., Pogrebnyak, O.D., Kolisnichenko, O.V. (2009) Comparative analysis of an efficiency of cumulative-detonation and HVOF devices, which are applied for gas-thermal deposition of coatings. *Physical surface engineering*, 1-2(7), 39–45 [in Russian]. DOI: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/7948>
- Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.N., Tovbin R. (2017) Efficiency of process of coating spraying using multichamber detonation unit. *The Paton Welding J.*, **10**, 18–23 DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.10.03>
- Vasilik, N. J., Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. et. al. (2013) Properties, peculiarities and applications of powder coatings formed by multi-chamber detonation sprayer. *Applied Mechanics and Materials*, **467**, 179–184. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.467.179>
- Markashova, L.I., Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. et al. (2017) Effect of structure on properties of Al₂O₃ and Al (or Ti) mechanical mixture coatings produced by multichamber detonation spraying method. *The Paton Welding J.*, **9**, 27–32. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2017.09.05>
- Kolisnichenko, O.V., Tyurin, Yu.M. (2023) Properties of WC-Co-Cr coatings, deposited by multichamber detonation device and their application. *The Paton Welding J.*, **9**, 47–52. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.09.08>
- Fagoaga, I., Barykin, G., De Juan, J., Soroa, T., Vaquero, C. (1999) The high frequency pulse detonation (HFPD) spray process. Thermal Spray 1999. In: *Proc. of the United Thermal Spray Conf., Dusseldorf, Germany*, 282–287. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc1999p0282>
- Parco, M., Barykin, G., Fagoaga, I., Vaquero, C. (2008). Development of wear resistant ceramic coatings by HFPD. ITSC 2008. In: *Proc. of the 2008 Int. Thermal Spray Conf. (June 2–4, 2008, Maastricht, The Netherlands)*, 130–134. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2008p0130>
- Higuera, V., Belzunce, F. J., & Riba, J. (2006). Influence of the thermal-spray procedure on the properties of a CoNiCrAlY coating. *Surf. and Coat. Technol.*, **200**(18-19), 5550–5556. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.07.070>
- Matsuoka, K., Muto, K., Kasahara, J., Watanabe, H., Matsuo, A., Endo, T. (2016) Development of high-frequency pulse detonation combustor without purging material. *J. of Propulsion and Power*, **33**(1), 1–8. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.B36068>
- Endo, T. (2020) Pulse-detonation thermal spray. *J. of the Combustion Society of Japan*, **62**(200), 103–115. DOI: https://doi.org/10.20619/jcombsj.62.200_103
- Endo, T., Obayashi, R., Tajiri, T. et. al. (2016) Thermal spray using a high-frequency pulse detonation combustor operated in the liquid-purge mode. *J. of Thermal Spray Technology*, **25**, 494–508. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-015-0354-8>
- Nikolaev, Yu.A., Topchiyan, M.E. (1977) Calculation of equilibrium flows in detonation waves in gases. *Fizika Goreniya i Vzryva*, **13**(3), 393–404 [in Russian].
- Prokhorov, E.S. (2011) Approximate calculation of overdriven gaseous detonation in convergent channels. *Vestnik NSU. Series: Physics*, **6**(2), 5–9 [in Russian]. DOI: <https://doi.org/10.54362/1818-7919-2011-6-2-5-9>

DEVELOPMENT OF DETONATION GAS SPRAYING TECHNOLOGY OF COATINGS IN THE E.O. PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE OF THE NASU (Overview)

O.V. Kolisnichenko¹, V.M. Korzyk¹, P.D. Stukhlyak³, A.I. Kildiy¹, R. Tovbin², M. Shinlov², V. Mudrichenko³

¹E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: vnkorzyk@gmail.com

²Sputtek Inc. 110 Share Road, Vaughan, Ontario, Canada, L4L 8P4. E-mail: mshynlov@gmail.com

³Paton Research Institute of Welding Technologies in Zhejiang Province: PRC, Zhejiang Province, Hangzhou City, Xiaoshan District, St. Shixing Beilu 857, office. 426. E-mail: vladyslav.mudrichenko@ukr.net

Despite the fact that the detonation-gas spraying method is a high-tech process that allows high-quality coatings deposition on products, it has some disadvantages that may limit its widespread use in industry, compared to other thermal coating methods. Such disadvantages include increased safety requirements, low productivity and reliability of structures. However, the use of the latest component base, accumulated technological experience, modern research in the field of detonation processes, and new approaches to the design of detonation units allow us to hope that the detonation-gas method will become widespread along with such methods as Plasma or High Velocity Oxygen Fuel spraying. The paper shows the leading role of Ukrainian scientists and engineers in the development and implementation of detonation-gas spraying of coatings. Particular attention is paid to the work carried out at the E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. The concepts and development stages of designs from classic detonation guns to valveless multi-chamber guns operating at high frequencies, are shown. Automated industrial complexes have been created on their base with application of modern components and equipment that allow effective use of the advantages of detonation-gas spraying. 23 Ref., 2 Tabl., 10 Fig.

Keywords: detonation, coatings, detonation-gas unit, valveless design, combustion chamber, industrial plot

Отримано 08.04.2024

Отримано у переглянутому вигляді 10.05.2024

Прийнято 10.07.2024