

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2022-273-3-39-46>

УДК 621.793.7

АНАЛІЗ КОМПОНУВАНЬ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ДЕТОНАЦІЙНО-ГАЗОВОГО ТА ІНШИХ МЕТОДІВ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

Харламов Ю.О., Міщик А.В., Романченко О.В.

ANALYSIS OF LAYOUTS OF EQUIPMENT FOR D-GUN AND OTHER METHODS OF THERMAL SPRAYING

Kharlamov Y.O., Mitsyk A.V., Romanchenko O.V.

З вибухових методів обробки зростає увага до використання безпечнішого та зручнішого джерела енергії у вигляді газової детонації. Рівень тисків, температур і швидкостей, що розвиваються за детонаційними або близькими до них за інтенсивністю ударними хвилями в газах, а також імпульсний характер впливу зазначених факторів, визначають великі потенційні можливості їх технічного та технологічного використання. Найбільш докладно розробленою та широко застосовуваною областю практичного використання газової детонації є детонаційно-газове напilenня порошкових захисних та функціональних покриттів. Підвищені вимоги до цієї технології та особливо необхідності застосування спеціально обладнаних виробничих приміщень стримують широке впровадження методів детонаційно-газового напilenня. Для мінімізації впливу на робочих небезпечних та шкідливих виробничих факторів загальноприйнятим підходом є низка обов'язкових вимог: розміщення детонаційно-газових установок у герметичних, звукоізованих боксах; використання місцевих відсмоктувачів у технологічній зоні напilenня та загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції робочого боксу в цілому; виконання вимог щодо безпеки подачі горючих газів та ін. Стаття присвячена аналізу основних схем компоновки обладнання для газотермічного напilenня покриттів у виробничих умовах, їх недоліків та переваг. Основними схемами компоновки є: повне розміщення всіх вузлів та систем обладнання у виробничих цехах (приміщеннях); розміщення розпилювача у напівзакрытих камерах для виконання ручних чи механізованих операцій газотермічного напilenня; повне розміщення обладнання в ізованих приміщеннях з дистанційним керуванням; повне розміщення обладнання та операторів у герметичних камерах (боксах) з контрольованим середовищем; камери напilenня, що встановлюються у виробничих лініях для ізоляції робочих місць ГТНП; компактні камери для повної ізоляції деталі (або часткової - зони напilenня); герметичні компактні камери для повної ізоляції деталі із введенням у неї вихідного сопла напильовального пристрою).

Ключові слова: газова детонація; газотермічне напilenня; захист зони напilenня; камери напilenня; виробничі фактори; структура детонаційно-газових установок; схеми компоновки.

Вступ. Газотермічне напilenня покриттів знаходить все ширше застосування для отримання захисних та функціональних покриттів та в адитивному виробництві. Серед цих методів унікальні можливості має детонаційно-газове напilenня, яке як джерело енергії використовує явище детонації в газах. Детонаційно-газові технології є одним із напрямків вибухових методів обробки. Однак широке застосування твердих вибухових речовин (ВР) обмежене насамперед за вимогами безпеки. Тому все більша увага викликає використання безпечнішого та зручнішого джерела енергії у вигляді газової детонації. Рівень тисків, температур і швидкостей, що розвиваються за детонаційними або близькими до них за інтенсивністю ударними хвилями в газах, а також імпульсний характер впливу зазначених факторів, визначають великі потенційні можливості їх технічного та технологічного використання [1 – 3]. Основні напрями практичного застосування газової детонації розглянуті у роботах [2 – 5]. Найбільш докладно розробленою та широко застосовуваною областю практичного використання газової детонації є детонаційно-газове напilenня захисних та функціональних покриттів [6].

При реалізації технологічних процесів газотермічного напilenня, в т.ч. детонаційно-газового, персонал робочих піддається впливу низки небезпечних та шкідливих виробничих факторів: підвищеному вмісту пилу та газових інгредієнтів продуктів детонації у повітрі робочої зони; підвищеним рівнями шуму та вібрації; підвищеній температурі поверхонь технологічного обладнання та деталей, що напильються; підвищеній яскравості спалаху в період детонації та ін. Це зумовлює відповідні підвищені вимоги до технології та детонаційно-газових установок та їх розміщення у виробничих приміщеннях [7]. Ці підвищені вимоги та, особливо, необхідність застосування спеціально обладнаних виробничих приміщень стримують широке впровадження мето-

дів детонаційно-газового напilenня, обмежують широке впровадження цієї прогресивної технології.

Метою статті є систематизація та аналіз можливих схем компонування обладнання для газотермічного напilenня покриттів у виробничих умовах, їх недоліків та переваг.

Результати дослідження

Особливості експлуатації обладнання для детонаційно-газового напilenня пов'язані з: утворенням підвищеного вмісту пилу та компонентів продуктів детонації (оксиди азоту, вуглець, оксид вуглецю, двоокис вуглецю CO_2) у повітрі робочої зони; підвищеною температурою поверхонь деяких вузлів обладнання (стовбура, камери запалення) і деталей, що напильються; наявністю електромагнітного випромінювання ультрафіолетового та видимого спектра (особливо при комбінованих технологіях з використанням плазмових та електродугових джерел); підвищеною яскравістю спалаху під час вихлопу продуктів детонації; фізичні та нервово-психічні навантаження операторів та ін. Для мінімізації впливу на робочих небезпечних та шкідливих виробничих факторів загальноприйнятим підходом є ряд обов'язкових вимог [7, 8]: розміщення детонаційно-газових установок у герметичних, звукоізованих боксах; використання місцевих відсмоктувачів у технологічній зоні напilenня та загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції робочого боксу в цілому; виконання вимог щодо безпеки подачі горючих газів та ін.

Пил, газів та випарів, що утворюються при газотермічному напilenні, можуть призвести до раптового загоряння і вибуху, особливо при напilenні таких металів, як алюміній, цинк, хром, кобальт, мідь, залізо та ін. Необхідність перерв для виконання установа напильованих деталей, регулювання та налагодження ДГУ, переходи оператора від пульта управління в бокс до ДГУ та інші втрати часу на технічне обслуговування суттєво знижують продуктивність ділянок ГТНП.

Структура комплексу обладнання для детонаційно-газового напilenня. Устаткування для детонаційно-газового напilenня може істотно відрізнитися за складністю, ступенем автоматизації, конструктивним виконанням основних вузлів та ін. Воно являє собою складний комплекс основного та допоміжного обладнання і включає безпосередньо детонаційно-газові установки (гармати), транспортно-завантажувальні пристрої напильованих виробів, системи: енергоживлення, газоживлення, охолодження, вентиляційні та пиловловлюючі системи, захисту від шуму і вібрацій, контролю та ін.

Зазвичай ДГУ мають у своєму складі такі основні вузли: 1 – стовбур (камера згоряння); 2 – камера запалення; 3 – газорозподільний механізм, що здійснює дозування компонентів горючої суміші газів, їх змішування та подачу в стовбур, а в ряді випадків і транспортує порошок газу; 4 – порошковий живиль-

ник; 5 – запальовач горючої суміші газів, 6 – система локалізації горіння в стовбурі; 7 – система охолодження; 8 – блок керування, що забезпечує необхідну послідовність і тривалість спрацювання виконавчих механізмів ДГУ при кожному робочому циклі, а також тривалість роботи ДГУ в цілому, включення та відхилення окремих елементів за керуючими командами або сигналами від системи контролю; 9 – блок газорегулювання; 10 – система контролю, що включає датчики основних параметрів процесу ДГНП; 11 – пульт дистанційного керування. Зараз дедалі виразніше проявляється тенденція блокування ДГУ з маніпуляторами для оброблюваних деталей, у склад ДГУ входять додаткові виконавчі механізми, елементи управління й контролю. Надалі неминуче створення роботизованих комплексів, що спричинить відповідні зміни у складі та конструкції ДГУ.

Схеми компонування обладнання газотермічного напilenня. Розробка раціональних компонувань обладнання для газотермічного напilenня пов'язана із забезпеченням низки вимог: забезпечення захисту навколишнього простору та робочих від шкідливостей, що виникають; захист зони формування покриттів від взаємодії з повітряною атмосферою; зручність обслуговування та безпечність експлуатації та ін.

При аналізі забезпечення захисту навколишнього простору слідує ряд принципових схем компонування обладнання ГТНП.

1. Повне розміщення всіх вузлів та систем обладнання у звичайних виробничих цехах (приміщеннях) без використання засобів захисту. Використовувалося на початкових стадіях розвитку ГТНП або за невеликих обсягів робіт. Відомо застосування практично для всіх різновидів ГТНП (ручні операції), і навіть детонаційно-газового (ДГНП) (механізовані операції). Тут є обов'язковим використання індивідуальних засобів захисту. При ДГНП оператор виконує завантажувальні операції, налагодження, пуск та зупинку ДГУ та маніпуляторів. Джерела газів зазвичай розміщуються поза приміщенням. Робочі місця можуть бути оснащені локальною витяжною. Така схема компонування нераціональна зі збільшенням обсягів виробництва та може бути використана для проведення короткострокових випробувань та приймально-здавальних робіт. Така схема займає великі виробничі площі та не забезпечує необхідних санітарно-гігієнічних умов роботи.

2. Розміщення розпилювача в напівзакритих камерах для виконання ручних або механізованих операцій ГТНП і насамперед плазмово-дугового, що забезпечують часткову ізоляцію зони напilenня. У камері розміщується розпилювач (плазмотрон). При ДГНП не застосовуються. Забезпечують ізоляцію зони напilenня та приєднуються до систем витяжки газів та пилу. Дозволяють скоротити виробничі площі та покращити санітарно-гігієнічні умови роботи.

3. Повне розміщення обладнання в ізольованих приміщеннях з повітряною вентиляваною атмосферою для проведення механізованих операцій ГТНП з дистанційним керуванням. Герметизовані бокси застосовують при ДГНП. Дистанційне керування здійснюється оператором із пульта біля спостережного вікна. Джерела газів розміщуються поза боксів. Займають досить великі виробничі площі, вимагають великих витрат часу виконання допоміжних операцій та переходів операторів.

4. Повне розміщення обладнання в ізольованих герметичних камерах (боксах) з контрольованим середовищем для виконання ручних операцій із плазмового напилення великих деталей з активних металів та сплавів, що обслуговуються операторами у скафандрах. Знаходять дуже рідкісне застосування, займають великі виробничі площі, вимагають високих витрат на систему забезпечення заданого складу робочого середовища, великі витрати часу на допоміжні операції, і переходи.

5. Камери напилення, що встановлюються у виробничих лініях для ізоляції робочих місць ГТНП, включаючи напилювальне обладнання та маніпулятори. Можуть виконуватись з дистанційним керуванням операторами або у вигляді роботизованих комплексів.

6. Компактні камери для повної ізоляції деталі (або часткової – зони напилення). Подібні рішення описані в роботах [9 – 12].

7. Герметичні компактні камери для повної ізоляції деталі із введенням у неї вихідного сопла напилювального пристрою. Така схема компонування є дуже привабливою, як із позицій забезпечення безпеки праці, так і захисту зони напилення від впливу навколишнього середовища. Наприклад, відомі аналогічні рішення для ізоляції вибухових процесів, коли технологічні вибухові пристрої розташовуються у спеціальних захисних вибухостійких камерах (вибухових камерах), що є по суті промисловими вибуховими установками [1]. Тут технологічні вибухові пристрої включають об'єкти впливу (зварювані пластини, зміцнювані деталі, заготовки для штампування та ін.), спеціальне оснащення (матриці для штампування, контейнери для збереження готового виробу, основи з опорами), заряди ВР і системи їх ініціювання. При газотермічному напиленні немає потреби розміщувати весь комплекс обладнання в таких камерах. Так, при плазмовому напиленні в динамічному вакуумі у водоохолоджуваній вакуумній камері розміщують маніпулятори деталей, що напилюються, і плазмотрона (або роботизовані маніпулятори) [13, 14].

В [15] запропонована установка детонаційного напилення зі звукоізоляційною камерою і відсіком напилення, в якому розміщено засіб маніпулювання оброблюваним виробом, причому в порожнину відсіку герметично введена тільки вихідна частина стовбура ДГУ. В аналогічній установці Сибірського хімічного комбінату герметична звукоізоляційна камера забезпечена засобом очищення, що працює за замкненим циклом.

Зазвичай процес ДГНП здійснюють на повітрі. Однак цілком можливо проводити його в контрольованому газовому середовищі або у вакуумі. Одну з можливих принципових схем ДГУ показано на рис. 1. Вихідний кінець стовбура 1 вводять в герметичну камеру 2. У середині камери на маніпуляторі 3 розміщують напилюваний виріб 4. Камера через шумопоглинач 5 з'єднана з системами газообміну і забезпечена запобіжним люком 6. Таким чином, досягається не тільки здійснення процесу та звукоізоляція, що допускає встановлення ДГУ у звичайних виробничих приміщеннях. Ще вища ефективність процесу може бути досягнута при нанесенні покриттів у вакуумній камері. Для цього стовбур 1 ДГУ забезпечують на виході або поблизу зони з'єднання з камерою кільцевою порожниною 7, з'єднаною з робочою порожниною стовбура, а також через канал 8 із системою відкачування (рис. 2).

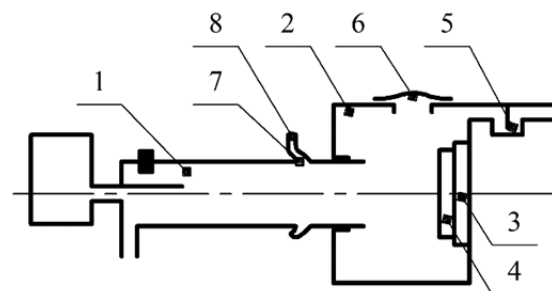


Рис. 1. Схема ДГУ для напилення в контрольованому середовищі

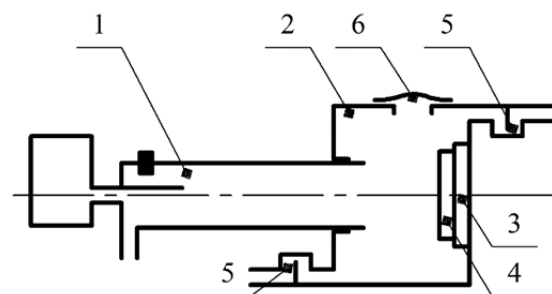


Рис. 2. Схема ДГУ для напилення у вакуумній камері

Процес здійснюють у режимі динамічного вакууму, тобто з безперервним відкачуванням як безпосередньо з камери через шумопоглинач 5, так і зі стовбура 1 через порожнину 7. Остання при відкачуванні створює своєрідний вакуумний затвор, що забезпечує необхідний ступінь заповнення стовбура горючою сумішшю. Вихід детонаційно-газового

струменя у вакуум або розріджене середовище може суттєво змінити теплофізичні та газодинамічні особливості процесу, а також вимоги до його звукоізоляції. При напilenні в камері замість вакуумного затвора можуть бути використані різні заслінки на зрізі ствола, а також перекриття його плівками, що легко руйнуються, і фольгами в т.ч. на основі напилуваного матеріалу.

Інший шлях розв'язання проблеми нанесення покриттів у вакуумній камері полягає в імпульсному натіканні горючої суміші з порошком у стовбур у режимі динамічного вакууму з боку закритого торця до відкритого із запалювачем. Схему такої ДГУ наведено на рис. 3 [24]. При закритому клапані 6 та відкритому клапані 8 через вакуумну камеру 2 зі стовбура 1 та накопичувальної місткості 7 відкачуються гази. Клапан 8 перекриває магістраль, а клапан 6 відкривається, накопичувальна місткість 7 заповнюється горючою сумішшю. З живильника 3 в стовбур 1 подається наважка порошку. Потім клапан 6 закривається, а клапан 8 відкривається, і горюча суміш через вогнеперешкоджувач 9 витікає в стовбур. При досягненні фронтом горючої суміші запалювача 4 виникає горіння, що веде до викиду порошку на виріб 11, встановлений на маніпуляторі 12.

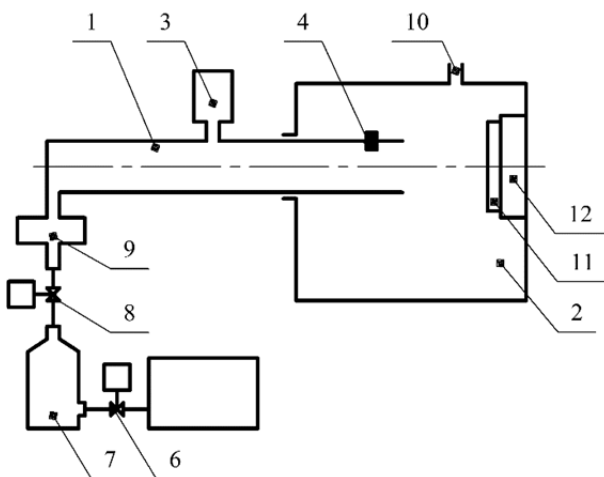


Рис. 3. Схема ДГУ для напilenня у вакуумі з накопичувальною місткістю

Можливі варіанти ДГУ із двосекційним стовбуром (рис. 4). Початкова секція 1 високого тиску є накопичувальною і відокремлюється від вихідної секції 2 за допомогою запірного клапана 3 з приводом 4. Вихідна секція стовбура введена у вакуумну камеру 5, де на маніпуляторі 6 встановлено виріб, що напильється. Порошковий живильник 8 приєднаний до вихідної секції 2, а запалювач до накопичувальної секції 12. При запаленні горючої суміші відкривається клапан 3, забезпечуючи викид продуктів згоряння та нагрітого порошку на напильований виріб. Запальник може бути встановлений на вихідній секції, а замість запірного клапана можуть бути використані розривні мембрани та плівки, в т.ч. виготовлені на основі напилуваного матеріалу.

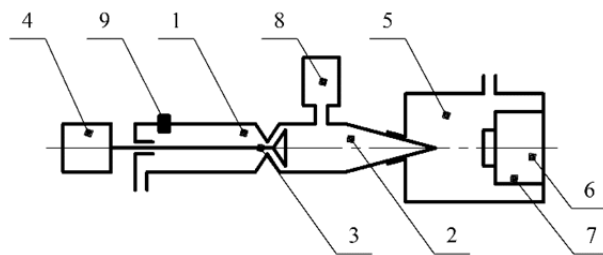


Рис. 4. Схема ДГУ для напilenня у вакуумі з двосекційним стовбуром

Нанесення покриттів у камерах з вакуумом або контрольованим середовищем дозволяє, крім зазначених вище переваг, уникати окислення напилуваного виробу при нагріванні та інших небажаних явищ, створює більш сприятливі санітарно-гігієнічні умови, забезпечує можливість збирання відходів розпилюваного порошку, підвищення продуктивності, спрощення обслуговування та зниження капітальних витрат на впровадження процесу.

Захист зони напilenня. При газотермічному напilenні слід враховувати вплив навколишньої атмосфери на формування покриттів. Як атмосферний тиск, так і склад (наприклад, вологість) надають сильний вплив на зовнішній вигляд струменя, а також на передачу тепла та імпульсу частинкам, що розпилюються, оскільки навколишній газ змішується з напилувальним газом в турбулентному струмені. Видно, що змішування з повітрям призводить до найсильнішого гасіння струменя. Гасіння буде ще сильнішим за підвищеної вологості повітря. Нижчий атмосферний тиск не тільки призведе до меншого гасіння та більшої довжини струменя, але також зменшить передачу тепла та імпульсу частинкам [14, 17].

За ступенем захисту процесу розрізняють газотермічне напilenня без захисту, із місцевим захистом та загальним захистом [17].

Газотермічне напilenня без захисту проводять на повітрі без ізоляції напилувального струменя, потоку частинок, що напильються, і плями напilenня. При цьому створюються сприятливі умови для попадання повітря до зони протікання процесу. З'являється можливість окислення напилуваного матеріалу та насичення його азотом. Навіть застосування інертних плазмоутворюючих газів не забезпечує захист процесу від взаємодії з повітрям.

Газотермічне напilenня із місцевим захистом. Для цих цілей застосовують місцеві камери або кільцевий газовий захист із використанням додаткових соплових пристроїв. У насадках на сопловій частині розпилювача відбувається нагрівання та прискорення напилуваних частинок напилувальним струменем при повній їх ізоляції від повітря. На виході струмів може відбиратися за допомогою відсмоктування. Потік частинок, що напильються, і пляма напilenня легко ізолюються кільцевим газовим потоком захисного газу. Можна також усувати або регулювати термосиловий вплив напилувально-

го струменя на поверхню напilenня [13, 14, 17 – 19].

Управління середовищем обробки у зоні формування детонаційно-газового покриття може здійснюватися і простішими шляхами, а саме – локальним зонуванням газовим середовищем необхідного складу. Найбільш просто це здійснюється шляхом організації потоків захисного газу, що охоплюють зону витікання імпульсного двофазного потоку та обдувають поверхню напilenня у зоні формування покриттів. Схема напilenня у такий спосіб показана на рис. 5, а. На вихідному кінці стовбура 1 змонтовано кільцеве сопло 2, приєднане до системи подачі захисного газу 3. Кільцевий струмінь 4 захисного газу екранує потік частинок і пляму напilenня 5 від навколишнього середовища. На рис. 5, б показаний варіант такої схеми напilenня з подовженою зовнішньою стінкою кільцевого сопла, що забезпечує більш надійну екранізацію імпульсного двофазного потоку і поверхні, що напilenня від навколишнього середовища.

Можливе детонаційне напilenня з локальним розрідженням у зоні формування покриття. Два мо-

жливі варіанти цього способу показані на рис. 5, в, г. Перший передбачає наявність на вхідному кінці стовбура 1 кільцевого сопла 2 з подовженою зовнішньою стінкою при невеликому зазорі між його торцем і поверхнею, що напilenня. Кільцеве сопло приєднується до системи витяжки (відкачування) 3. У середині сопла 2 і в зоні плями напilenня 5 створюється розрідження, а через зазор між соплом і поверхнею, що напilenня, підсмоктується навколишнє середовище. Більш ефективно ця схема буде працювати при герметичному з'єднанні торця сопла з поверхнею, що напilenня, через прокладку 6 (рис. 5, г). Можливе також поєднання кільцевих струменів захисного газу, що екранують, і місцевої витяжки в зоні напilenня (рис. 5, д). Тут 1 – стовбур, 2 – кільцеве сопло, приєднане до системи відкачування 3, 4 – кільцеве сопло, приєднане до системи подачі захисного газу 5. У зоні формування плями напilenня 6 може бути створене розріджене середовище. Кільцевий струмінь, що витікає із сопла 4, екрануватиме зону напilenня від навколишнього середовища.

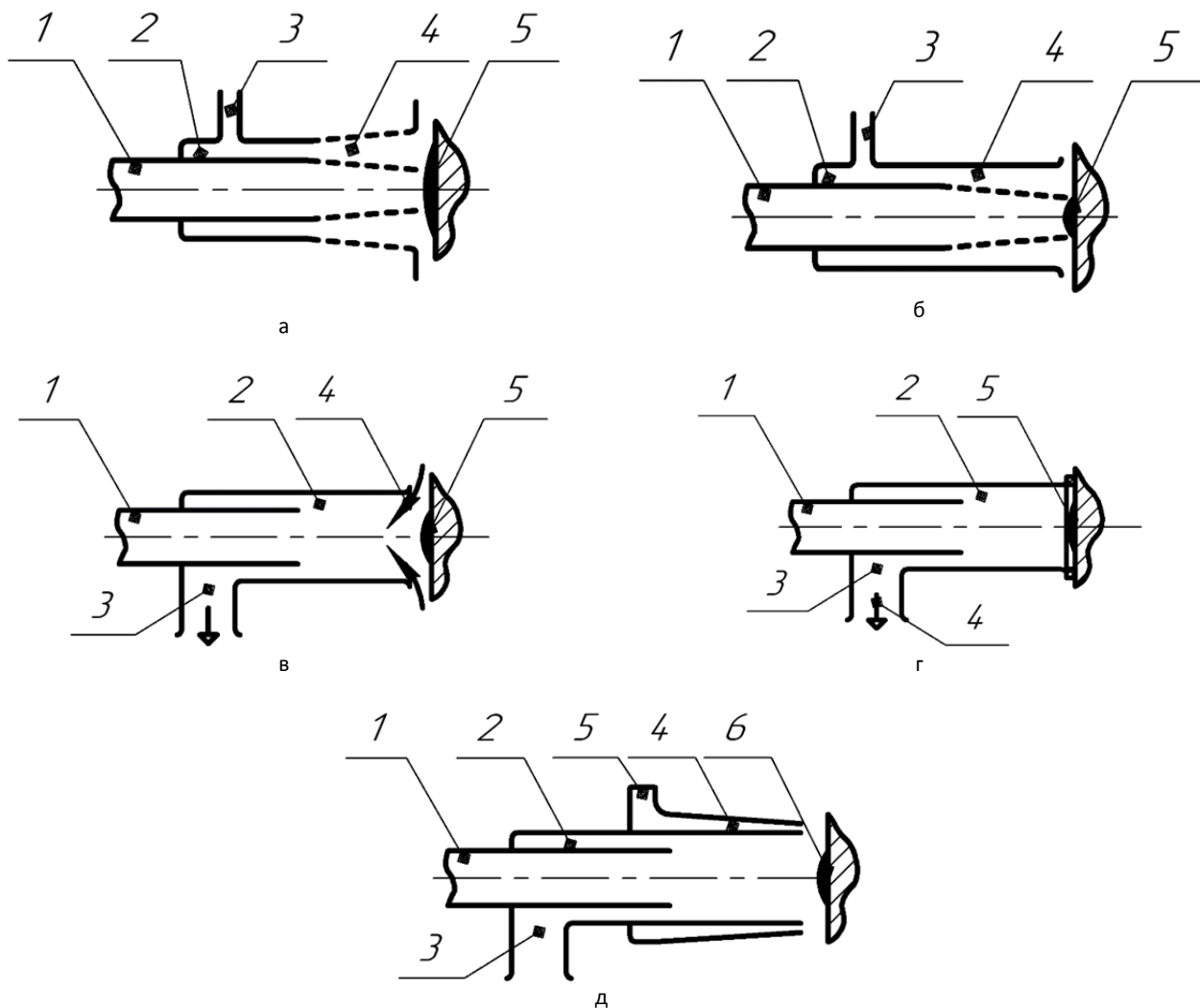


Рис. 5. Схеми ДГН з локальним газовим захистом зони обробки

До напilenня з місцевим захистом можуть бути віднесені підводні способи ГТНП, що розвиваються. Дослідження вчених Білорусії та ФРН показали, що методом підводного плазмового напilenня можливе формування високоякісних покриттів не лише з порошків легкоплавких металів, а й з кераміки [20]. Зараз розробляються методи підводного напilenня різними способами ГТНП. У патенті [21] підвищений тиск контрольованого складу газів підтримують постійним, як мінімум, з моменту введення напilenого матеріалу у газотермічний потік до моменту його фіксації на деталі. Обмежений об'єм захисного середовища формують у вигляді газового дзвону в об'ємі з рідиною, причому межу між газом і рідиною в обмеженому об'ємі визначають газопроникною поверхнею шляхом перевищення сил тиску і тяжкості над силою поверхневого натягу. Газовий міхур у ванні з рідиною формують на глибині занурення не більше глибини, на якій тиск стовпа рідини перевищує статичний тиск контрольованого складу газу.

Газотермічне напilenня із загальним захистом. Напilenня проводиться в камері та процес може бути повністю ізольований від повітря. При плазмовому напilenні атмосфера в камері формується із плазмоутворюючого газу. Застосовується для напilenня покриттів особливо відповідального призначення. Використовують два способи напilenня із загальним захистом, при нормальному тиску газу в камері (невеликий надлишковий тиск) та при зниженому тиску $(0,133 - 2.66) \cdot 10^3$ Па. Останній називають плазмовим напilenням у динамічному вакуумі. Його застосування обумовлює отримання покриттів найвищої якості. У цьому способі реалізуються: найвища чистота атмосфери по активних газів; високі швидкості напильованих частинок; можливість активації поверхні напilenня газовими розрядами та ін. [13, 14, 17, 20]. Розробляються способи напilenня в камерах при підвищеному та високому тиску. Відомі розробки з електродугової металізації при зниженому тиску.

Розробки з детонаційно-газового напilenня із загальним захистом невідомі, проте принципово можливі. Тут може бути використаний успішний досвід розробки та впровадження технології та обладнання для очищення від задирок детонуючими газовими сумішами [22, 23], коли тиск горючих сумішей у герметичних високомісних камерах досягає декількох десятків атмосфер.

Висновки

1. У статті систематизовано основні можливі схеми компоновки обладнання газотермічного напilenня, в т.ч. детонаційно-газового, що включає власне установки для напilenня, і інші допоміжні системи, необхідних надійної безпечної реалізації процесів отримання якісних покриттів.

2. При виборі типу компоновки газотермічного напильовального обладнання слід враховувати

конструктивно-технологічні особливості виробів, що напильовуються, і річну програму їх випуску.

3. Розглянуто можливі схеми компоновки обладнання для детонаційно-газового напilenня, що забезпечують зону захисту формування покриття та матеріалу, що напильовується.

Література

1. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G.D. Roy, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (2004) pp. 545 – 672.
2. Інноваційні можливості газової детонації / Харламов Ю.О., Полонський Л.Г., Балицька Н.О., Клименко С.А. *Наука та інновації*, 2020, т. 16, № 6. С. 105 – 112.
3. Харламов Ю.А. Детонационно-газовые процессы в промышленности / Ю.А. Харламов, Н.А. Будагянц; Восточноукр. гос. ун-т. Луганск: Изд-во ВУГУ, 1998. 223 с.
4. Баженова Т.В., Голуб В.В. Использование газовой детонации в управляемом частотном режиме. *Физика горения и взрыва*. 2003. Т. 39, № 4. С. 3 – 21.
5. Шоршоров М.Х., Харламов Ю.А. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий. М.: Наука, 1978. 224 с.
6. Газотермические покрытия из порошковых материалов: Справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
7. Шестерненко В.И. Детонационное нанесение покрытий. *Порошковая металлургия*, 1968, № 1. С. 37 – 46.
8. А.с. 629682 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.А. Харламов, Ю.И. Писклов, Н.М. Рыбалка, О.И. Малышев.
9. Щелоков Я.М., Телегин Э.М., Подымов В.Н. Пособие по освоению систем релаксационного вибрационного горения. Казань: Изд-во КГУ, 1971. 80 с.
10. Моин Ф.В., Шевчук В.У. Явление заброса пламени при горении предварительно перемешанных газов в проточной системе – ФГВ, 1968, № 2. С. 209 – 214.
11. Левин А.М., Брюханов О.Н. Влияние температуры стенок огневого канала на условия возникновения проскока пламени. *Газовая промышленность*, 1963, № 10.
12. Бартенев С.С., Федько Ю.П., Григоров А.И. Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. 215 с.
13. Федько Ю.П. Исследование процесса нанесения и свойств окисных детонационных покрытий. Автореф. диссер. канд. техн. наук. М.: 1980. 20 с.
14. Федько Ю.П., Бартенев С.С., Неделько В.Е. Физические основы конструирования бесклапанных дозаторов детонирующей смеси газов. *Детонационные покрытия*. Калинин, 1980. с. 54 – 63.
15. А.с. 508994 (СССР). Установка для нанесения порошковых материалов детонационным методом. Ю.П. Федько.
16. А.с. 539400 (СССР). Устройство для детонационного нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
17. А.с. 769853 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
18. А.с. 980318 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.И. Писклов, Ю.А. Харламов.

19. Детонационно-газовая аппаратура для напыления покрытий / Ю.А. Харламов, М.Х. Шоршоров, Ю.И. Писклов, Б.Л. Рябошапко. М.: ИМЕТ АН СССР, 1980. 65 с.
20. Харламов Ю.А., Писклов Ю.И., Рябошапко Б.Л. Оптимизация конструкции детонационно-газовой установки для нанесения покрытий. *Защитные покрытия на металлах*, вып. 16. Киев: Наукова думка, 1982, с. 62 – 64.
21. А.с. 705734 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов Тверь-2. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
22. А.с. 690688 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов Тверь-3. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
23. А.с. 736442 (СССР). Установка для детонационного нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
24. А.с. 736440 (СССР). Устройство для детонационного напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
25. А.с. 752894 (СССР). Детонационная установка для напыления покрытий. Ю.А. Харламов.
26. Пути повышения точности автоматического дозирования компонентов детонационно-газовой смеси. А.М. Зингер, Л.Т. Гордеева, В.И. Смирнов и др. *Детонационные покрытия*. Калинин, 1980, с. 42 – 53.
27. А.с. 656252 (СССР). Установка Тверь-1 для детонационного нанесения порошковых материалов. А.М. Зингер, Л.Т. Гордеева, В.И. Смирнов, В.А. Тютяев.
28. А.с. 720859 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов/ Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов и др.
29. А.с. 666712 (СССР). Устройство для детонационного нанесения порошковых материалов. Л.Т. Гордеева, А.М. Зингер, В.И. Смирнов, В.А. Тютяев.
30. А.с. 736441 (СССР). Устройство для нанесения покрытий. Ю.А. Харламов.
7. Shesternenkov V.Y. Detonatsionnoe naneseniye pokrytij. *Poroshkovaya metallurgiya*, 1968, № 1. S. 37 – 46.
8. A.s. 629682 (USSR). Ustrojstvo dlja detonatsionnogo napyleniya pokrytij. Ju.A. Harlamov, Ju.Y. Pysklov, N.M. Rybalka, O.Y. Malyshev.
9. Shhelokov Ja.M., Telegyn E.M., Podymov V.N. Posobyе po osvoenyju system relaksatsionnogo vybratsionnogo gorenyja. *Kazan': Yzd-vo KGU*, 1971. 80 s.
10. Moyn F.V., Shevchuk V.U. Javlenye zabrosa plameni pry gorenyy predvarytel'no peremeshannyh gazov v protchnoj systeme – FGV, 1968, № 2. S. 209 – 214.
11. Levyn A.M., Brijuhanov O.N. Vlyjanye temperatury stenok ognеvogo kanala na uslovyja voznyknoveniya pros-koka plameni. *Gazovaja promyshlennost'*, 1963, № 10.
12. Bartenev S.S., Fed'ko Ju.P., Grygorov A.Y. Detonatsionnye pokrytija v mashynostroenyy. L.: Mashynostroenye, 1982. 215 s.
13. Fed'ko Ju.P. Yssledovanye processa nanesenija y svojstv oksylnyh detonatsionnyh pokrytij. Avtoref. dysser. kand. tehn. nauk. M.: 1980. 20 s.
14. Fed'ko Ju.P., Bartenev S.S., Nedel'ko V.E. Fyzicheskye osnovy konstruyrovanya besklapannyh dozatorov detonyrujushhej smesy gazov. *Detonatsionnye pokrytija*. Kalynyn, 1980. s. 54 – 63.
15. A.s. 508994 (USSR). Ustanovka dlja nanesenija poroshkovyh materyalov detonatsionnym metodom. Ju.P. Fed'ko.
16. A.s. 539400 (USSR). Ustrojstvo dlja detonatsionnogo nanesenija pokrytij. Ju.A. Harlamov.
17. A.s. 769853 (USSR). Ustrojstvo dlja detonatsionnogo napyleniya pokrytij. Ju.A. Harlamov.
18. A.s. 980318 (USSR). Ustrojstvo dlja detonatsionnogo napyleniya pokrytij. Ju.Y. Pysklov, Ju.A. Harlamov.
19. Detonatsionno-gazovaja apparatura dlja napyleniya pokrytij / Ju.A. Harlamov, M.H. Shorshorov, Ju.Y. Pysklov, B.L. Rjaboshapko. M.: YMET AN USSR, 1980. 65 s.
20. Harlamov Ju.A., Pysklov Ju.Y., Rjaboshapko B.L. Optymyzacija konstrukcyi detonatsionno-gazovoj ustanovky dlja nanesenija pokrytij. *Zashhytne pokrytija na metal-lah*, vyp. 16. Kyev: Naukova dumka, 1982, s. 62 – 64.
21. A.s. 705734 (USSR). Ustrojstvo dlja detonatsionnogo nanesenija poroshkovyh materyalov Tver'-2. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov y dr.
22. A.s. 690688 (USSR). Ustrojstvo dlja detonatsionnogo nanesenija poroshkovyh materyalov Tver'-3. L.T. Gordeeva. A.M. Zynger, V.Y. Smyrnov y dr.
23. A.s. 736442 (USSR). Ustanovka dlja detonatsionnogo nanesenija pokrytij. Ju.A. Harlamov.
24. A.s. 736440 (USSR). Ustrojstvo dlja detonatsionnogo napyleniya pokrytij. Ju.A. Harlamov.
25. A.s. 752894 (USSR). Detonatsionnaja ustanovka dlja napyleniya pokrytij. Ju.A. Harlamov.
26. Puty povyshenija tochnosti avtomaticheskogo dozirovanya komponentov detonatsionno-gazovoj smesy. A.M. Zynger, L.T. Gordeeva, V.Y. Smyrnov y dr. *Detonatsionnye pokrytija*. Kalynyn, 1980, s. 42 – 53.

References

1. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G.D. Roy, S.M. Frolov, A.A. Borisov, D.W. Netzer. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30 (2004) pp. 545 – 672.
2. Innovacijni mozhylyvosti gazovoi' detonacii' / Harlamov Ju.O., Polons'kyj L.G., Balyc'ka N.O., Klymenko S.A. *Nauka ta innovacii'*, 2020, t. 16, № 6. S. 105 – 112.
3. Formirovanie gazotermicheskikh pokrytij pri proizvodstve detalej. S.A. Klimenko, L.G. Polonskij, M.Ju. Harlamov, Ju.A. Harlamov, P.A. Vitjaz', V.S. Ivashko, M.L. Hejfec, S.A. Chizhik; pod obshh. red. Ju.A. Harlamova i M.L. Hejfeca; *Nac. Akad. nauk Belarusi, Otd. Fiz.-tehn. Nauk, Nac. akad. nauk Ukrainy, In-t sverhtverdyh materialov im. V.N. Bakulja*. Minsk: Belaruskaja navuka, 2020. 416 s.
4. Bazhenova T.V., Golub V.V. Yspol'zovanye gazovoj detonacyy v upravljajemom chastotnom rezhyme. *Fyzyka gorenyja y vzryva*. 2003. T. 39, № 4. S. 3 – 21.
5. Shorshorov M.H., Harlamov Ju.A. Fyzyko-hymycheskye osnovy detonatsionno-gazovogo napyleniya pokrytij. – M.: Nauka, 1978. – 224 s.
6. Gazotermicheskye pokrytija yz poroshkovyh materyalov: Spravochnyk / Ju.S. Borysov, Ju.A. Harlamov, S.L. Sydorenko, E.N. Ardatovskaja. Kyev: Naukova dumka, 1987. 544 s.

27. A.s. 656252 (USSR). Ustanovka Tver'-1 dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. A.M. Zynger, L.T. Gordeeva, V.Y. Smynov, V.A. Tjutjaev.
28. A.s. 720859 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smynov y dr.
29. A.s. 666712 (USSR). Ustrojstvo dlja detonacyonnogo nanesenija poroshkovyh materiyalov. L.T. Gordeeva, A.M. Zynger, V.Y. Smynov, V.A. Tjutjaev.
30. A.s. 736441 (USSR). Ustrojstvo dlja nanesenija pokrytij. Ju.A. Harlamov

Kharlamov Y., Mitsyk A., Romanchenko O. Analysis of layouts of equipment for D-Gun and other methods of thermal spraying

From explosive processing methods, attention is growing towards the use of a safer and more convenient source of energy in the form of gaseous detonation. The level of pressures, temperatures and velocities that develop behind detonation or close to them in intensity shock waves in gases, as well as the impulsive nature of the impact of these factors, determine the great potential for their technical and technological application. The most detailed and widely used field of practical use of gaseous detonation is the D-Gun spraying of powder protective and functional coatings. The increased requirements for this technology and, especially, the need to use specially equipped production facilities hinder the widespread introduction of D-Gun spraying methods. In order to minimize the impact of hazardous and harmful production factors on workers, a generally accepted approach is a number of mandatory requirements: placement of D-Gun installations in hermetic, soundproof boxes; the use of local suction in the process zone of spraying and general exchange of supply and exhaust ventilation of the working box as a whole; compliance with the requirements for the safety of the supply of combustible gases, etc. The article is devoted to the analysis of the main layouts of equipment for thermal spraying of coatings on the example of detonation-gas installations. Detonation-gas installations (D-guns) contain the following main units: barrel (combustion chamber); ignition chamber, gas distribution

mechanism; powder feeder; igniter of a combustible mixture of gases; system of localization of combustion in the barrel; cooling system; a control unit that provides the necessary sequence and duration of operation of the D-gun actuators at each operating cycle, as well as the duration of the operation of the D-gun as a whole, the inclusion and deviation of individual elements according to control commands or signals from the control system; gas control unit; control system, including sensors of the main parameters of the spraying process; remote control. The main layout schemes are: full placement of all components and systems of equipment in production shops (premises); placement of the sprayer in semi-closed chambers for performing manual or mechanized operations of thermal spraying; complete placement of equipment in isolated rooms with remote control; complete placement of equipment and operators in sealed chambers with a controlled environment; spraying chambers installed in production lines to isolate D-Gun workplaces; compact chambers for complete isolation of the part (or partial - spraying zone; hermetic compact chambers for complete isolation of the part with the introduction of the output nozzle of the spraying device into it.
Keywords: gas detonation; thermal spraying; spray zone protection; spray chambers; production factors; structure of detonation-gas installations; layout diagrams.

Харламов Юрій Олександрович – д.т.н., проф., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)
yuriy.kharlamov@gmail.com

Мічик Андрій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк) an.mitsyk@gmail.com

Романченко Олексій Володимирович – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Сєвєродонецьк)
alexvromanchenko@gmail.com

Стаття подана 27.01.2022 р.