

Automated system of shot blasting processing of free surfaces of metal products

O. Goryk | O. Brykun  | O. Ivanov | S. Koval'chuk | V. Muravlov

Article info

Correspondence Author

O. Brykun

E-mail:

oleksandr.brykun@pdau.edu.ua

Poltava State Agrarian

University,

1/3, Skovorody str.,

Poltava, 36003,

Ukraine

Citation: Goryk, O., Brykun, O., Ivanov, O., Koval'chuk, S., & Muravlov, V. (2023). Automated system of shot blasting processing of free surfaces of metal products. *Scientific Progress & Innovations*, 26 (2), 122–128. doi: 10.31210/spi2023.26.02.21

In mechanical engineering, there is a steady trend of manufacturing large-sized metal products from carbon steels with protective corrosion-resistant non-metallic coatings on surfaces in contact with aggressive environments. This allows you to abandon the use of expensive nickel-chromium-molybdenum steels and special alloys such as hastelloy, remanite, and others. At the same time, the process of blast-jet preparation of working surfaces for applying such coatings plays a major technological role, as it ensures the strength of the adhesion of the protective coating to the metal base of the product. A robotic system for shot blasting of free surfaces of products is proposed, consisting of a mobile robotic module, a precision electronic tool for scanning the processing surface and a central microcontrol module for controlling the complex. An improved shot blasting cleaning technology is presented with full integration of the technical characteristics of the created automated system and mutually agreed set and consequent parameters of shot blasting. The system allows remote processing of metal surfaces of free volumetric and spatial forms (missile hulls, aircraft fuselages, tanks for storing toxic liquids, torpedo hulls, hulls of chemical, biological, food, medical and other storage devices, hulls of ships and submarines) in compliance with high productivity, processing quality, minimization of energy and economic indicators and environmental safety. The practical value of the development is revealed in the production of capacitive products that are operated in special conditions and require reliable protection from the destructive aggressive effects of chemically active environments, high pressures and temperatures. The proposed technical-technological solutions can be used in the defense and civil-industrial sectors as a high-tech and economically justified alternative to other cleaning methods and common time-consuming manual labor for the preparation and corrosion protection of metal surfaces of products. The proposed automated shot blasting cleaning system will provide the following main advantages: improvement of the quality of processing of free surfaces of metal products; the possibility of online monitoring by a central microcontroller device according to the state of the processed surface; energy saving; ecological safety; versatility; minimization of the influence of the human factor on the process; reduction of technological time for product processing.

Keywords: shot blast cleaning, metal surface, robotic complex, protective non-metallic coating.

Автоматизована система дробоструминної обробки вільних поверхонь металевих виробів

О. В. Горик | О. М. Брикун | О. М. Іванов | С. Б. Ковальчук | В. В. Муравльов

Полтавський державний

аграрний університет

м. Полтава,

Україна

У машинобудуванні спостерігається стійка тенденція виготовлення металевих великогабаритних виробів із вуглецевих сталей із захисними корозійностійкими неметалевими покриттями поверхонь, контактуючих із агресивним середовищем, що дозволяє відмовитися від використання дорогих нікель-хром-молібденових сталей і спеціальних сплавів типу хастеллой, реманіт та інші. При цьому процес дробоструминної підготовки робочих поверхонь, для нанесення на них таких покриттів, грає головну технологічну роль, оскільки забезпечує міцність зчеплення захисного покриття з металевою основою виробу. Пропонується роботизована система дробоструминної обробки вільних поверхонь виробів, яка складається з мобільного роботизованого модуля, прецизійно-електронного засобу сканування оброблювальної поверхні й центрального мікроконтрольного модуля керування комплексом. Подана удосконалена технологія дробоструминного очищення з повною ув'язкою технічних характеристик створеної автоматизованої системи і взаємоузгоджених заданих і наслідкових параметрів дробоструминня. Система дозволяє проводити дистанційну обробку металевих поверхонь вільних об'ємно-просторових форм (корпуси ракет, фюзеляжі літальних апаратів, резервуари для зберігання токсичних рідин, корпуси торпед, корпуси хімічних, біологічних, харчових, медичних та інших ємнісних апаратів, корпуси кораблів і підводних човнів) з дотриманням високої продуктивності, якості обробки, мінімізації енергетичних і економічних показників та екологічної безпеки. Практична цінність розробки виявляється при виготовленні ємкісних виробів, що експлуатуються в особливих умовах і потребують надійного захисту від руйнівного агресивного впливу хімічно активних середовищ, високих тисків та температур. Запропоновані техніко-технологічні рішення можуть бути використані в оборонній та цивільно-промисловій галузях як високотехнологічна та економічно виправдана альтернатива іншим методам очистки і поширеній трудомісткій ручній праці з підготовки та корозійного захисту металевих поверхонь виробів. Запропонована автоматизована система дробоструминної обробки забезпечить такі основні переваги: підвищення якості обробки вільних поверхонь металевих виробів; можливість онлайн-моніторингу центральним мікроконтролерним пристроєм за станом оброблюваної поверхні; енергоощадливість; екологічна безпека; універсальність; мінімізація впливу людського фактору на процес; зменшення технологічного часу на обробку виробу.

Ключові слова: дробоструминне очищення, металева поверхня, мобільний роботизований модуль, захисне неметалеве покриття.

Бібліографічний опис для цитування: Горик О. В., Брикун О. М., Іванов О. М., Ковальчук С. Б., Муравльов В. В. Автоматизована система дробоструминної обробки вільних поверхонь металевих виробів. *Scientific Progress & Innovations*. 2023. № 26 (2). С. 122–128.

Вступ

У практиці машинобудування для виготовлення деталей і нерозбірних складальних одиниць робочих машин усе частіше використовуються композитні матеріали, які мають міцну основу і стійку до агресивного впливу хімічно активного середовища поверхню. Таке ефективне поєднання фізичних властивостей досягається й при використанні для виготовлення промислових виробів вуглецевих сталей із захисними покриттями (скловидними, керамічними, склокристалічними, резиновими, полімерними та іншими). Застосування захисних неметалевих покриттів дозволяє відмовитися від використання корозійностійких дорогих нікель-хром-молібденових сталей і спеціальних сплавів типу хастелой, реманіт та інші [1, 2]. Слід відмітити, що в Україні нікель, як основний компонент для отримання спеціальних сталей і сплавів є стратегічним металом.

Перед нанесенням захисного неметалевого покриття на поверхні виробів із вуглецевої сталі виконують технологічну підготовку цих вільних поверхонь. Ефективним методом підготовки поверхонь є дробоструминна обробка (ДО), у процесі якої відбувається не тільки видалення окисних відкладень (окаліни) але і формування на очищеній поверхні рівномірної шорсткості із заданими геометричними параметрами рельєфу, які сприяють міцному щепленню ґрунтового шару захисного неметалевого покриття з металевою основою. По енергоємності ДО не поступається абразивному шліфуванню, а по гнучкості – помітно перевершує його [3, 4].

Підвищення стійкості поверхонь деталей і вузлів із недорогих низьковуглецевих сталей шляхом нанесення на їх поверхню на стадії напівфабрикатів захисних неметалевих покриттів [5, 6], що за хімічною стійкістю помітно перевершують відомі нержавіючі сталі і спеціальні сплави є перспективним засобом підвищення надійності і тривалості експлуатації техніки. Тому удосконаленню технології дробоструминного очищення металевих поверхонь приділяється належна увага дослідників й конструкторів.

Авторами [3, 7, 8] розроблено практичні рекомендації щодо конструювання та застосування високопродуктивних установок для реалізації процесу струминно-абразивної обробки дрібних деталей. Для циліндричних порожнистих виробів відома вакуумна дробоструминна установка фірми Blastrac. Вона має замкнений цикл абразиву і очищення проходить в обмеженому просторі струминної насадки. З метою підвищення продуктивності, точності позиціонування деталі в зоні обробки та керування параметрами процесу, використовують дробоструминні камери для очистки поверхні виробів, що мають малий і середній розмір або складну просторову форму. Вони обладнанні системами збору, очистки і накоплення абразиву, фільтрації і вентиляції повітря, транспортування виробів [9, 10]. Проте операція очищення потребує ручного переміщення уздовж криволінійних поверхонь.

Інші відомі пристрої [11, 12, 13], що здатні очищати внутрішню поверхню великогабаритних

заготовок механізовані, але не мають самохідних механізмів для пересування. Ці недоліки вирішені у пристроях [14, 15], виконаних у вигляді транспортного засобу з приводом, здатним вільно пересуватися всередині резервуара по горизонтальних площинах днища. Мобільний робот [16] для механічного очищення корпусу судна може нерухомо утримуватися на поверхні корпусу за допомогою магнітів.

У ряді охоронних документів описано окремі засоби автоматизації процесу ДО великогабаритних циліндричних виробів, зокрема, автоматичні маніпулятори і самохідний модуль [17], застосування яких дещо обмежується геометрією та конструкцією оброблюваного виробу. Теоретичні основи та рекомендації практичного застосування результатів дослідження, з ув'язкою технологічних параметрів процесу, приведені в [18–21]. Незважаючи на значні науково-практичні досягнення в модернізації процесу дробоструминня, машинобудівні заводи потребують подальших інновацій із застосуванням роботизованих засобів із контролем якості обробленої поверхні в автоматичному режимі, що гарантуватиме надійність захисного покриття.

Мета дослідження

Метою роботи є створення функціональної моделі адаптивного робототехнічного комплексу дробоструминної обробки вільних поверхонь металевих виробів із алгоритмічним обґрунтуванням режимних параметрів реалізації технологічного процесу для забезпечення вимог щодо якості оброблюваних поверхонь перед нанесенням на них корозійностійких захисних неметалевих покриттів із формуванням міцного та рівномірного бар'єрного шару.

Основні завдання роботи: встановити вихідні та наслідкові технологічні параметри; розробити технологічну та функціональну схеми автоматизованого робототехнічного комплексу дробоструминної обробки вільних поверхонь металевих виробів апаратів із засобами контролю якості обробленої поверхні і коректури технологічних режимів; розробити покроковий алгоритм визначення раціональних технологічних режимів дробоструминного очищення для досягнення наперед заданої якості та продуктивності дробоструминої обробки; провести техніко-економічну оцінку запропонованої автоматизованої системи.

Матеріали і методи

Для досягнення мети використовувалися логічні методи пошукового конструювання, в яких переважали алгоритмічні правила аналізу, порівняння та узагальнення. Спочатку був застосований аспектний підхід, що дозволяло при наявності досвіду творчого колективу виконавців акцентувати увагу на дослідженні найбільш вагомих складових технологічного процесу дробоструминної обробки вільних поверхонь. В подальшому був використаний принцип практичності, орієнтований на втілення результатів пошуку.

У ході досліджень використано онлайн-моніторинг за станом вже обробленої поверхні, зокрема точкової шорсткості поверхні, рівномірності її розподілення, наявності сторонніх включень на обробленій поверхні. За допомогою центрального мікроконтрольного модуля контролювалося дотримання необхідних режимів роботи для досягнення наперед заданої якості дробоструминої обробки. Окрім керування відповідно до заздалегідь обраних режимних параметрів, передбачалося адаптивне корегування функціонування роботизованого модуля, за принципом зворотного зв'язку, на підставі моніторингових даних від прецизійно-електронного засобу сканування обробленої поверхні.

Результати та їх обговорення

Аналіз технологічних можливостей і фізичної сутності дробоструминої очистки металів у результаті руйнування поверхневого шару показує, що такий технологічний процес можна широко використовувати на підприємствах, розширюючи його можливості шляхом дослідження і запровадження нових технологічних і технічних рішень.

Для створення автоматизованих систем дробоструминої обробки необхідно чітко розуміти вихідні та наслідкові технологічні параметри (рис. 1), що визначають загальну оцінку даного технологічного процесу.

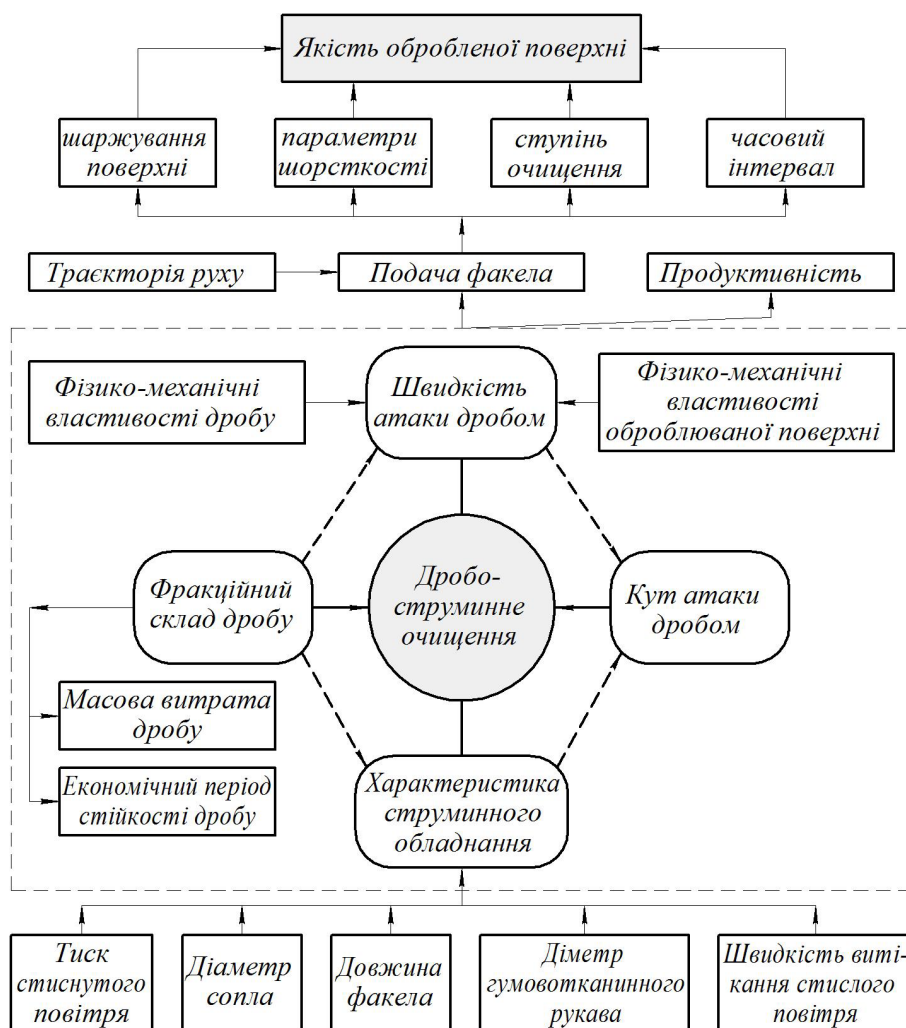


Рис. 1. Параметри, що визначають процес дробоструміння

Головними вихідними параметрами процесу, які задаються, є:

- кінетичні та динамічні характеристики дробоструминного обладнання;
- швидкість атаки дробом оброблюваної поверхні;
- кут атаки оброблюваної поверхні;
- фракційний склад дробу;

Не контролюваність деяких параметрів, таких як формування ядра струменя, розмірність руйнування, перекривання складно-сполучених поверхонь, зміна

фракційного складу дробу зношуванням в процесі дробоструміння призводить до певного впливу на контрольовані параметри [8]. Також, якість очищених сталевих поверхонь під захисне неметалеve покриття слід оцінювати, окрім показників загальноприйнятої шкали чистоти, і за допомогою таких додаткових критеріїв як: тимчасовий інтервал між процесом нанесення ґрунтового шару на очищену поверхню; рівномірність шорсткості поверхні за заданими геометричними параметрами; міра шаржування

поверхні осколками технічного дробу та граничні значення їх розмірів [22]. Такий взаємозалежний багатофакторний процес потребує особливої уваги до взаємоузгодження вихідних і наслідкових параметрів технології дробоструминня, як гарантії її оптимальної працездатності для отримання високої якості і продуктивності обробки поверхонь та підвищення керованості і автоматизації даного процесу.

На рис. 2 представлена технологічна схема автоматизованої системи дробоструминної обробки, що складається з: компресорної установки 1, ресивера 2, блока підготовки стислого повітря 3, дробоструминного апарату нагнітального типу 4, роботизованого модуля 5, пристрою для збору та регенерації відпрацьованого дробу 6; дистанційної системи керування 7.

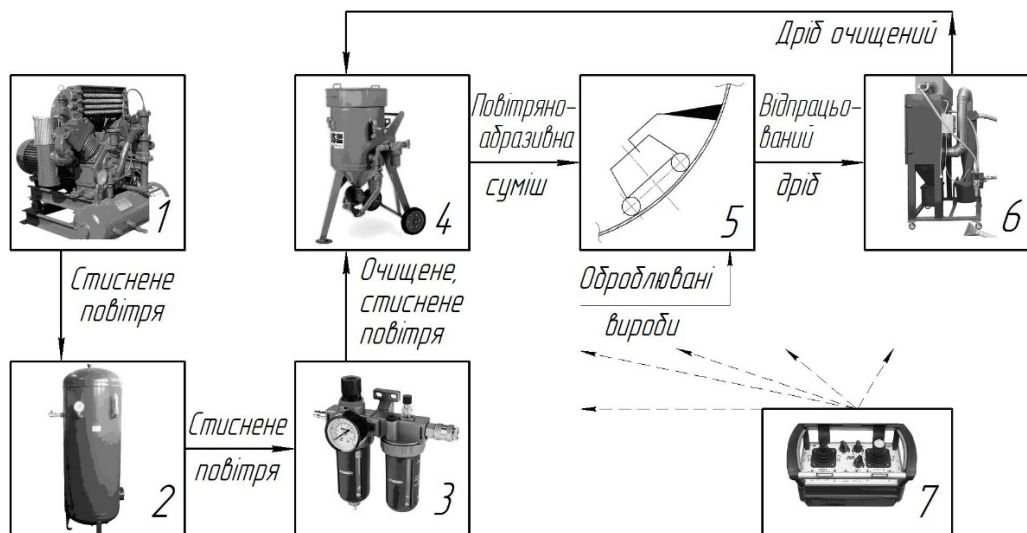


Рис. 2. Технологічна схема автоматизованого комплексу

Компресор безперервно постачає стиснене повітря в ресивер, що згладжує коливання тиску, який викликається пульсуючою подачею і переривчастою витратою. Блок підготовки стислого повітря, забезпечує осушення і очищення його від крапельок масла та твердих частинок, присутність яких може призвести до зниження якості виробничих процесів, часткової або повної неможливості проведення робіт.

Ефективність дробоструминного очищення може бути покращена, а витрата стислого повітря зменшена, якщо його підігріти до певної температури. Очищене, обезмаслене і при необхідності підігріте стисле повітря (2-ї групи забрудненості згідно ДСТУ 4169 : 2003) спрямовується до дробоструминного апарату, який оснащений дозатором абразивного матеріалу (дробу). Технічний дріб в необхідній концентрації подається через гумовотканинний рукав до дробоструминного сопла, закріпленого за допомогою тримача на корпусі робота-очисника, і у вигляді дробоструминного факела направляється на оброблювану поверхню виробу. Після дробоструминного очищення використаний дріб, збирається всмоктуючим наконечником в бункер-сепаратор дробоструминної установки, де поступово очищається від домішок, а потім надходить в дробоструминний апарат для подальшого використання. Забруднене пилом повітря в процесі дробоструминного очищення фільтрується, проходячи через циклон, далі через очищувач повітря, а потім викидається в навколишнє середовище.

Мобільний роботизований модуль 5, функціональна схема якого подана на рис. 3,

призначений для дистанційної обробки металевих поверхонь великогабаритних виробів вільних об'ємно-просторових форм із дотриманням технологічних вимог щодо продуктивності, якості обробки та мінімізації енергетичних та економічних витрат на виконання технологічної операції дробоструминня. Пересування та утримування модуля на довільно зорієнтованих до горизонту металевих поверхнях відбуватиметься під впливом притискувальної сили, що генерується магнітним полем електрокерованого магніту. При цьому належні тягово-зчіпні та кінематичні характеристики модуля забезпечуватиметься колісними рушіями з окремим для кожного привідним мотор-редуктором. Для збільшення зони обробки та підвищення продуктивності ДО на одиницю лінійного переміщення модуля передбачається коливально-обертовий механізм для сопла з дискретно-керованим кутом повороту. Коливально-обертовий механізм забезпечуватиме адаптивне до профілю оброблювальної поверхні позиціонування сопла.

Прецизійно-електронний засіб сканування оброблювальної поверхні призначений для здійснення онлайн-моніторингової функції за станом вже обробленої поверхні та сповіщення про її якість центральному мікроконтролерному модулю. Побудова засобу сканування відбуватиметься із залученням оптико-механічних засобів вимірювання параметрів якості стану поверхні, зокрема точкової шорсткості поверхні, рівномірності розподілення шорсткості по довжині та площині, наявності сторонніх включень на обробленій поверхні.

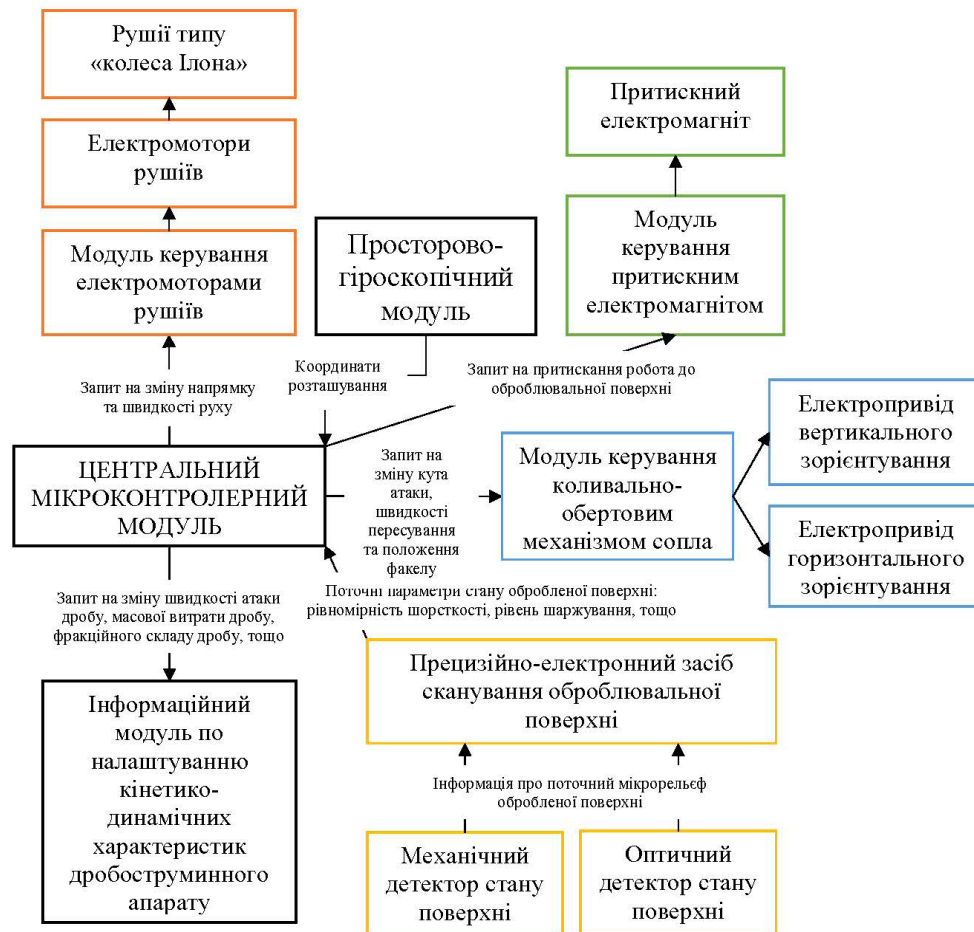


Рис. 3. Функціональна схема мобільного роботизованого модуля

Центральний мікроконтролерний модуль має функцію керування роботизованим модулем та його виконуючими органами за алгоритмом, що покликаний забезпечити дотримання необхідних та сформованих режимів роботи для досягнення наперед заданої якості дробоструминої обробки. Керування здійснюється не лише за чітко сформованою послідовністю виконання дій (розташування та коливання сопла, швидкість та характер переміщення роботизованого модуля, величина подачі дробу) відповідно до заздалегідь обрахованих режимних параметрів, але й реалізовується адаптивне корегування функціонування роботизованого модуля, за принципом зворотного зв'язку, за моніторинговими даними від прецизійно-електронного засобу сканування обробленої поверхні.

Для забезпечення злагодженої роботи роботизованого модуля потрібно дотримуватися необхідних та взаємоузгоджених режимів (параметрів) процесу дробоструминної обробки для досягнення наперед заданої якості поверхні, почергове встановлення яких подано в таблиці 1.

Систему живлення струминних апаратів періодично поповнюють свіжим дробом кожні відрізки часу, рівному $t_m = 0,25T_{ек}$, масою $M_0 = 0,1M_s$.

Виходячи з розрахункових даних таблиці,

вибирають раціональну траєкторію та швидкість пересування відбитку факела по оброблюваній поверхні і розраховують технологічну собівартість.

Собівартість виготовлення виробу із низькоуглецевої сталі 10 з нанесеним скловидного покриттям товщиною 2 мм за нашими розрахунками є в рази менше порівняно з виробами із нержавіючих сталей. Зважаючи, що потужність заводів хімічного машинобудування в містах Полтава, Фастів, Чернівці, Сміла, дозволяють виробляти емальовану хімічну апаратуру із скловидним покриттям за емальованою площею понад 300 тис. м² на рік, економічний ефект складає значну суму. Застосування захисних неметалевих покриттів не обмежується хімічними апаратами, що значно збільшує економічний ефект. Машинобудівні заводи, при виробництві сталевих виробів з неметалевим захисними покриттями, потребують інноваційних технологічних рішень процесу дробоструминної обробки із застосуванням роботизованих засобів, які здатні контролювати якість обробленої поверхні в автоматичному режимі, що гарантуватиме міцність захисного покриття з металевою основою і суцільність бар'єрного шару. Зважаючи на те, що дробоструминна обробка є екологічно чистим технологічним процесом, отримані результати мають беззаперечну практичну цінність.

Таблиця 1

Покроковий алгоритм визначення раціональних технологічних режимів автоматизованого дробоструминного очищення

№ п/п	Технологічний параметр	Визначення параметру
1	Шорсткість поверхні	$R_z = \kappa_u \delta_{sp}$, $\kappa_u = 0, 2 \dots 0, 4$ – коефіцієнт пропорційності; δ_{sp} – товщина сухого ґрунтового шару.
2	Діаметр дробу	$d_{op} = R_z / \psi$, $\psi = 0, 05 \dots 0, 1$ – коефіцієнт пропорційності. Округлюють до найближчого більшого діаметру параметричного ряду дробу.
3	Кут атаки	$\alpha = \arctg \sqrt{(1 - k_e^2) / (0, 25 r_\alpha^2 \mu_s)}$, k_e – коефіцієнт відновлення швидкості дробу; μ_s – коефіцієнт тертя-ковзання; $r_\alpha = x_{max} / h_{ca}$ – коефіцієнт узгодження.
4	Швидкість атаки	$v = R_z \sqrt{k / m_{op}} / \sin \alpha$, $v < v_{sp}$, k – коефіцієнт пружно-пластичності; m_{op} – маса дробинки.
5	Діаметр отвору дробоструминного сопла	$d_c \geq 3(d_{op} + 1)$, d_{op} – діаметр дробинки. Округлюють до наступного значення з параметричного ряду діаметрів сопел.
6	Діаметр гумовотканинного рукава	$d_p = (3 \dots 4) d_c \geq 32 \text{ мм}$
7	Максимальна витрата стислого повітря	$B_{n,max} = \psi_{max} f_c \sqrt{p_0 \rho_0}$, ψ_{max} – коефіцієнт стану повітря; p_0 – тиск стислого повітря; ρ_0 – щільність стислого повітря при p_0 ; f_c – площа отвору сопла.
8	Швидкість витікання стис. повітря	$v_{e,n} = B_{n,max} / (\rho_n f_c)$, ρ_n – щільність повітря на зрізі сопла.
9	Масова витрата дробу	$B_{op} = B_{n,max} M_k$, M_k – масова концентрація дробу в енергоносії.
10	Швидкість дробу на зрізі сопла	$v_0 = \sqrt{\rho_n f_c v_{e,n}^3 \eta / B_{op}}$, η – ККД передачі потужності в соплі від енергоносія до дробу.
11	Відстань від сопла до оброблюваної поверхні (довжина факела)	$l_\phi = -\frac{m_{op}}{k_{on}} (\ln v - \ln v_0) + a$, k_{on} – коефіцієнт пропорційності; a – довжина початкової частини факела.
12	Діаметр (ширина) відбитку факела Розрахункова ширина відбитку	$d_{aid} \approx 2l_\phi \text{tg} \gamma$, γ – кут розкриття факела. $b_{aid} = d'_{aid} \approx 0, 8 d_{aid}$.
13	Об'єм лунки	$w_s \approx \zeta_w \pi d_{op} R_z^2$, ζ_w – коефіцієнт видовження лунки у наслідок косої атаки дробинки.
14	Об'ємна продуктивність	$Q_w = k_{pyin} w_s N_{op}$, k_{pyin} – коефіцієнт абразивного руйнування; N_{op} – кількісна подача дробу через сопло.
15	Поверхнева продуктивність	$Q_f = Q_w / \delta_{np}$, $\delta_{np} \geq R_z$ – товщина шару видаленого металу.
16	Швидкість переміщення (подача) відбитку факела	$v_{nod} = Q_f / b_{aid}$
17	Міра шаржування, (шт/м ²)	$N_u = \zeta (v \sin \alpha)^2 (1 - k_e^2) n_{oc} B_{op} / Q_f$, ζ – коефіцієнт пропорційності; n_{oc} – кількість осколків, що утворюються, від однієї дробинки.
18	Економічний період стійкості дробу	$T_{ek} = \frac{0, 4 k_{cp} M_s n v^2 \sin^2 \alpha (1 - k_e^2) (1 - \eta) k_{pyin}}{Q_w \sigma_s}$, k_{cp} – коефіцієнт середніх втрат; n – число циклів використання дробу; η – коефіцієнт, що враховує втрати на внутрішнє тертя в матеріалі виробу; σ_s – динамічна межа текучості матеріалу виробу.

Висновки

Розроблено алгоритм взаємоузгодження вихідних і наслідкових параметрів дробоструміння та удосконалено із застосуванням робототехнічної системи технологію підготовки вільних поверхонь металевих виробів для нанесення на них стійких неметалевих покриттів.

У порівнянні з існуючими аналогами запропоноване технічне рішення процесу дробоструміння має такі переваги:

- широке використання для дробострумінного очищення внутрішніх поверхонь емнісної апаратури;
- онлайн-моніторинг центральним мікроконтролерним пристроєм за станом оброблюваної поверхні, зокрема точкової шорсткості поверхні, рівномірності розподілення шорсткості по площині, наявності сторонніх включень, що зумовлює дотримання необхідних або зміну режимів роботи для досягнення наперед заданої якості дробоструминої обробки;
- мінімізація впливу людського фактору на процес;
- зменшення технологічного часу на обробку виробу, що призводить до відмови від активізації очищеної поверхні перед безпосереднім нанесенням захисного неметалевого покриття.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження пов'язані з розробкою проекту робототехнічного комплексу дробострумінної обробки, створенням дослідного зразка та апробацією робототехнічної автоматизованої системи підготовки робочих поверхонь металовиробів для нанесення на них захисних стійких покриттів.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

References

1. Talbot, D. E. J., & Talbot, J. D. R. (2018). *Corrosion Science and Technology*. 3rd edn. <https://doi.org/10.1201/9781351259910>
2. Kubler, R. F., Berveiller, S., Bouscaud, D., Guiheux, R., Patoor, E., & Puydt, Q. (2019). Shot peening of TRIP780 steel: Experimental analysis and numerical simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 270, 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.031>
3. Novikov, F. V., & Andilakhai, O. O. (2014). *Osnovy strumynno-abrazivnoi obrobky dribnykh detalei*. Kharkiv: Vyd KhNEU im. S. Kuznetsia [in Ukrainian]
4. Chen, J. S., Desai, D. A., Heys, S. P., & Pietra, F. (2019). Literature review of numerical simulation and optimisation of the shot peening process. *Advances in Mechanical Engineering*, 11 (3), 1–19. <https://doi.org/10.1177/1687814018818277>
5. Rajput, A., Ak, M., Kim, S. J., Noh, S. H., Park, J. H., & Paik, J. K. (2019). Effects of the surface preparation on the life of epoxy coating in steel ship plates: an experimental study. *Ships and Off-shore Structures*, 14 (sup1), 199–206. <https://doi.org/10.1080/17445302.2019.1565072>

6. Mikulonok, O. I. (2012). *Vyhotovlennia, montazh ta ekspluatatsiia obladnannia khimichnykh vyrobnystv*. Kyiv: NTUU «KPI» [in Ukrainian]
7. Andilayah, O. (2022). Increasing the efficiency of finishing jet and abrasive processing of small parts. *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Series: Techniques in a Machine Industry*, 2, 9–17. [https://doi.org/10.20998/2079-004x.2021.2\(4\).02](https://doi.org/10.20998/2079-004x.2021.2(4).02)
8. Provolokij, A. E. (1989). *Strujno-abrazivnaya obrabotka detalej mashin*. Kiev: Tehnika [in Russian]
9. Sarbuchev, I. (2018). Obitaemye strujno-abrazivnye kamery. *Konstruksiya i tipy. Oborudovanie Razrabotki Tehnologii*, 4, 19–22. [in Russian]
10. Goranskij, G. G., Tolstyak, E. H., & Sarancev, V. V. (2006). Razrabotka tehnologij i oborudovaniya dlya podgotovki poverhnosti v UP «Tehnopark BNTU «Metolit». *Lite i Metallurgiya*, 1, 165–169. [in Russian]
11. Pike, R. (2001). Patent № 6213134 US. *Interior tank car cleaning apparatus*. Retrieved from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/de/03/67/2cb7b8956695dc/US6213134.pdf>
12. Moulder, J. E. (1996). Patent № 5518553 US. *Storage tank cleaning and stripping apparatus and method*. Retrieved from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/b3/08/14/78e20500462221/US5518553.pdf>
13. Pilyugin, Yu. S. (1985). Avtorskoe svidetelstvo № 1294398 SU. *Ustrojstvo dlya ochistki vnutrennej poverhnosti truboprovoda*. Retrieved from: <https://patentimages.storage.googleapis.com/97/ad/e1/f908d406518c1a/SU1294398A1.pdf> [in Russian]
14. Klapper, M., & Hlikha, V. (2005). Patent № 73573 UA. *Device for cleaning reservoirs from radioactive waste*. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/386368/>
15. Christ, B., Witing, H., & Rieck, R. (2005). Patent № 86351 UA. *Method and device for removing sediments from tank*. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/423314/>
16. Kushnir, V. O., Kondratenko, Y. P., Topalov, A. M., Herasin, O. S. (2015). Patent № 100341 UA. *Mobile robot for mechanical clearing ship hull*. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/879076/>
17. Goryk, O. V., Cherniavskiy, A. M., Brykun, O. M., Cherniak, R. Y., Kovalchuk, S. B., & Shulianskiy, H. A. (2017). Patent № 114152 UA. *Samokhidnyi modul dlia drobostrumynnoho ochyshchennia*. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/713328/> [in Ukrainian]
18. Goryk, A., Koval'chuk, S., Brykun, O., & Chernyak, R. (2020). Viscoelastic resistance of the surface layer of steel products to shock attack of a spherical pellet. *Key Engineering Materials*, 864, 217–227. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.217>
19. Gorik, A. V., Zinkovskii, A. P., Chernyak, R. E., & Brikun, A. N. (2016). Elastoplastic deformation of the surface layer of machinery constructions on shot blasting. *Strength of Materials*, 48 (5), 650–657. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9808-6>
20. Li, Z., Yang, F., Liu, Y., & Gao, Y. (2019). Numerical Simulation of Derusting Treatment of Steel Parts By Shot Blast. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 120 (1), 157–175. <https://doi.org/10.32604/cmes.2019.05187>
21. Srinivas Reddy, P., Ravi Kumar, P., Prasad, D. V. S. S. V., Saroja Rani, Bh., Narayana Gupta, CH. LDS., Daniel Das, A., & Subbiah, R. (2023). Effect of parameters and surface analysis on eglin steel by shot blasting method. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2833–2836. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.248>
22. Goryk, O., Koval'chuk, S., Brykun, O., & Aksonov, S. (2022). Assessment of quality criteria of shot blasting cleaning of the inner surfaces of chemically resistant containers. *Advances in Mechanical and Power Engineering*, 98–107. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_10

ORCID

- O. Goryk  <https://orcid.org/0000-0002-2804-5580>
O. Brykun  <https://orcid.org/0000-0001-5213-9440>
O. Ivanov  <https://orcid.org/0000-0002-1761-9913>
S. Koval'chuk  <https://orcid.org/0000-0003-4550-431X>
V. Muravlov  <https://orcid.org/0000-0002-3221-0411>



© 2023 Goryk O. V. et al. This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.