

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

БРИКУН ОЛЕКСАНДР МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 621.924.9

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДРОБОСТРУМИННОГО ОЧИЩЕННЯ  
ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ КОРПУСНИХ ВИРОБІВ ТИПУ ТІЛ  
ОБЕРТАННЯ**

05.02.08 – технологія машинобудування

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Луцьк – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Полтавській державній аграрній академії  
Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
**Горик Олексій Володимирович,**  
Полтавська державна аграрна академія,  
завідувач кафедри загальнотехнічних дисциплін

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Пилипець Михайло Ількович,**  
Тернопільський національний технічний університет імені  
Івана Пулюя,  
професор кафедри інжинірингу машинобудівних технологій

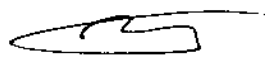
кандидат технічних наук, доцент,  
**Сичук Віктор Анатолійович,**  
Луцький національний технічний університет,  
доцент кафедри прикладної механіки та мехатроніки

Захист відбудеться «29» квітня 2021 р. о 14<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої  
ради К 32.075.06 в Луцькому національному технічному університеті за адресою:  
43018, м. Луцьк, вул. Потебні, 56.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Луцького національного технічного  
університету за адресою: 43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75.

Автореферат розісланий « 27 » березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

  
(підпис)

Лапченко Ю.С.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Великогабаритні корпусні вироби широко використовуються в хімічній, нафтохімічній, мікробіологічній, медичній та харчовій промисловості, що зумовлює жорсткі вимоги до чистоти і якості підготовки внутрішніх поверхонь такого обладнання для забезпечення міцності зчеплення з нанесеним у подальшому на них корозійностійким захисним неметалевим покриттям. Адже надійність і довговічність експлуатації порожнистих металевих виробів, поряд з фізико-механічними властивостями матеріалів основи і покриття, у більшій мірі залежать саме від стану очищеної металевої поверхні, як показника міцності контакту метал-грунт.

Найбільш ефективним і екологічно безпечним технологічним процесом для очистки сталевих поверхонь є дробоструминна обробка, яка порівняно з іншими способами очистки (фізичні, хімічні, термічні та інші) характерна простотою, гнучкістю і порівняно низькими експлуатаційними затратами. Такий спосіб обробки отримав найбільше поширення в машинобудуванні, як основна технологічна операція підготовки порожнин великогабаритних металевих виробів типу тіл обертання, для яких струминна обробка вільними металевими гранулами залишається, мабуть, єдино прийнятним технологічним процесом підготовки важкодоступних місць складної замкнутої форми для нанесення на них стійких неметалевих покриттів.

Не дивлячись на широке використання в різних галузях машинобудівельного виробництва дробоструминне очищення, в силу складності процесу і різноманітності технологічних критеріїв, залишається найменш вивченим способом обробки вільним абразивом, що негативно впливає на розвиток такого розповсюдженого технологічного процесу та рівень його механізації й автоматизації. Удосконалення технологічних рішень потребує подальшого глибшого вивчення цілої низки закономірностей процесу взаємодії абразиву (дробинок) з оброблюваною металевою поверхнею. Це і механізм руйнування поверхневого шару оброблюваного виробу, і взаємозв'язок технологічних параметрів, і вплив технологічних режимів на якість обробленої поверхні, і методика визначення оптимальних технологічних режимів, і стійкість дробу та інші. Такий комплексний підхід до розв'язання поставлених задач звужує у певних межах прогалину, що склалася в удосконаленні технології дробоструминного очищення порожнин металевих ємнісних виробів. З'являється можливість вибору раціональних технологічних режимів дробоструминного очищення об'єктів машинобудування, розробки і застосування нових технологій виконання низки трудомістких і відповідальних операцій процесу обробки поверхонь.

Таким чином удосконалення технології дробоструминного очищення внутрішніх металевих поверхонь ємнісних виробів під неметалево покриття, підвищення її ефективності шляхом дослідження і розробки нових технологічних і технічних рішень, є актуальною науково-практичною технологічною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана у відповідності до тематики науково-дослідних робіт кафедри загальнотехнічних дисциплін Полтавської державної аграрної академії у рамках тем:

«Визначення параметрів процесу дробоструминного очищення на основі моделювання ударної взаємодії пружно-пластичних тіл» (№ ДР 0113U004987, 2014-2017 р.); «Оптимізація параметрів і розробка засобів механізації дробоструминного очищення порожнин металевих великогабаритних циліндричних виробів» (№ ДР 0117U004517, 2017-2020 р.). Автор був безпосереднім, відповідальним виконавцем цих робіт. Робота пов'язана з госпдоговірною темою «Дослідження експлуатаційного ресурсу трибунної споруди стадіону «Ворскла» в м. Полтава» (Шифр № 9-04/17) у частині підготовки поверхонь металевих елементів несучих конструкцій при відновленні їх технічного стану.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є удосконалення технології дробоструминного очищення внутрішніх поверхонь корпусних виробів типу тіл обертання з низьковуглецевої сталі шляхом експериментально-теоретичного дослідження, встановлення раціональних технологічних режимів та розробки нових технологічних і технічних рішень для якісної підготовки поверхонь під корозійностійке неметалеve покриття.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення таких завдань:

- розглянути особливості та принципи застосування способу дробоструминного очищення;
- розробити наукові підходи до описання одиначної косої ударної взаємодії сферичної жорсткої дробинки із деформівним металевим півпростором та визначити на їх основі характер контактного руху дробинки в атакованому матеріалі, розміри сліду в результаті зіткнення та технологічні параметри процесу очищення;
- розробити методику та провести експериментально-теоретичні дослідження впливу динамічної дії, як окремої дробинки, так і дробино-повітряного факелу залежно від заданих режимів (швидкості і кута атаки та діаметру дробу) на наслідкові параметри технології очищення (продуктивність, часові й швидкісні показники) та на критерії якості поверхонь (шорсткість, структура та ступінь шаржування);
- запропонувати технічне рішення на конструкцію автоматичного маніпулятора для механізованого очищення внутрішніх поверхонь великогабаритних корпусних виробів типу тіл обертання;
- визначити основні характеристики руху відбитку факела по оброблюваній криволінійній внутрішній поверхні виробу та розробити технологічну карту очищення хімічного апарата;
- розробити алгоритм визначення взаємопов'язаних параметрів технології очищення хімічного апарату для досягнення вимог, що висуваються до якості очищених поверхонь;
- на основі отриманих результатів розробити рекомендації щодо використання результатів дослідження.

*Об'єкт дослідження* – технологія дробоструминного очищення внутрішніх сталевих поверхонь великогабаритних корпусних виробів типу тіл обертання.

*Предмет дослідження* – закономірності впливу технологічних режимів дробоструминного очищення та характеристик руху повітряно-абразивного факелу на показники стану очищених поверхонь корпусних великогабаритних виробів типу тіл обертання.

**Методи дослідження.** В основу дослідження покладено загальні положення технології машинобудування, теорії удару та теорії пружно-пластичного (пружно-в'язкого) деформування, методи планування експерименту і математичної статистики для проведення експериментальних досліджень та аналізу й оброблення результатів. Реалізація і аналіз отриманої математичної моделі здійснено за допомогою прикладного програмного забезпечення засобами математичного редактора Maple.

Розгін технічного дробу (кульок) здійснювали за допомогою промислового дробоструминного апарату DBS-100 та пневматичного пістолета ИЖ-53М. Для визначення швидкості дробу використовували оптоелектронний вимірювальний комплекс ИБХ-731. Дослідні зразки перед очищенням піддавали термічній обробці в електропечі СНЗ-6,3х13. Дослідження показників стану поверхневого шару вивчали на зразках за допомогою: оптичного металографічного мікроскопа МИМ-7; універсального електронного мікроскопа УЕМВ-100К; профілометра ПМ-210; твердомірів ТШ-2 та ПМТ-3. Параметри сліду дробинки міряли мікроскопом МПБ-2 та мікрометром.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У ході виконання дисертаційної роботи отримано такі основні результати, що мають наукову новизну:

- розроблено і апробовано нові наукові підходи до описання одиничної ударної взаємодії абсолютно жорсткої сферичної дробинки з площиною деформівного півпростору та встановлено параметри контактного руху дробинки з визначенням його характерних значень;

- побудовано нові методики визначення параметрів технології та характеристик стану оброблених поверхонь (шорсткість, структура та шаржування) залежно від вихідних (заданих) режимів дробоструминного очищення (швидкості атаки, кута атаки і діаметру дробу);

- встановлено економічно вигідну швидкість атаки оброблюваної поверхні залежно від показників собівартості та граничну швидкість атаки з умов міцності використовуваного технічного дробу;

- вперше одержано аналітичну залежність між технологічними параметрами дробоструминного очищення, фізико-механічними властивостями поверхневого шару оброблюваного виробу і стійкістю технічного дробу;

- експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано ефект поглинання контактним тангенціальним переміщенням дробинки нормальним за великих кутів атаки при утворенні форми сліду, що дозволяє в таких випадках нехтувати тангенціальним переміщенням при визначенні продуктивності процесу;

- визначено основні характеристики руху відбитку повітряно-абразивного факела по оброблюваній криволінійній порожнині виробу та побудована технологічна карта рівномірного якісного очищення порожнини хімічного апарата.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у можливості в заводських (виробничих) умовах визначати раціональні технологічні режими дробоструминного очищення металевих поверхонь виробів різного призначення, підвищити рівень механізації і автоматизації процесу підготовки поверхонь порожнин великогабаритних хімічних апаратів.

Запропоноване нове технічне рішення на конструкцію самохідного

маніпулятора дозволяє істотно розширити технологічні можливості очищення порожнин металевих великогабаритних циліндричних виробів (корпуси апаратів, труби великих діаметрів, цистерни та інші).

Одержані результати знайшли практичне застосування на ПАТ «Полтавський автоагрегатний завод» (м. Полтава), а також у Багатогалузевому науково-технічному центрі «Віра» при розв'язанні технічних задач, пов'язаних із очисткою металевих поверхонь виробів і конструкцій.

Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес Полтавської державної аграрної академії при підготовці фахівців за спеціальністю «Галузеве машинобудування».

Отримані результати дослідження можуть бути використанні для підвищення надійності виробів машинобудівної, хімічної, сільськогосподарської, оборонної та інших галузей промисловості. Запропоноване технічне рішення на самохідний модуль може бути запроваджено на заводі хімічного машинобудування ПрАТ «Полтавхіммаш» (м. Полтава) для удосконалення технології очищення і емалювання внутрішніх поверхонь хімічних апаратів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати експериментальних та теоретичних досліджень, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. Особистий внесок дисертанта в роботах, виконаних у співавторстві, полягає в обґрунтуванні наукового напрямку [9, 11, 13], формуванні мети роботи та розроблені методик експериментальних досліджень [3, 8, 9], розроблені математичних моделей та теоретичних залежностей [1, 2, 5, 12], дослідженні зв'язків технологічних режимів з параметрами якості обробленої поверхні [4, 15], формулюванні наукової новизни й основних висновків за результатами роботи [5, 6, 10, 14, 16], аналізі та узагальненні отриманих результатів дослідження [1, 6, 7, 12].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати роботи доповідалися та обговорювалися на: II Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка та міцність енергетичних і сільськогосподарських машин та біотехнічних систем» (м. Полтава, ПДАА, 2015 р.); виїзній науковій сесії Наукової ради з проблеми «Механіка деформівного твердого тіла» при Відділенні механіки НАН України (м. Кременчук, ПрАТ «АвтоКрАЗ», 2016 р.); III, IV та VII Міжнародній науково-практичній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (м. Одеса, ОДАБА, 2016, 2017 та 2020 р.); XIII Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «Состояние современной строительной науки - 2015» (м. Полтава, 2016 р.); XVII Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Суми, СНАУ, 2016 р.); XV Міжнародній науково-технічній конференції «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Полтава, ПДАА, 2016 р.); III Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективи і тенденції розвитку конструкцій та технічного сервісу сільськогосподарських машин і знарядь» (м. Житомир, ЖНАУ, 2017 р.); XI Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кропивницький, ЦНТУ, 2017 р.); II Всеукраїнській інтернет-конференції «Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування» (м. Полтава, ПДАА, 2019 р.); II Міжнародній науково-технічній конференції «Динаміка, міцність та моделювання в

машинобудуванні» (м. Харків, ІПМаш НАНУ, 2020 р.). У повному обсязі дисертація доповідалася і отримала позитивні відгуки на регіональному постійно діючому науковому семінарі «Проблеми механіки деформівного твердого тіла» відділення механіки НАН України (м. Полтава, ПДАА, 2019 р.); на науковому семінарі Полтавського осередку всеукраїнського Наукового товариства з механіки руйнування (м. Полтава, ПДАА, 2020 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць, серед яких – 8 статей, що входять до переліку наукових фахових і наукометричних видань України (у т.ч. 2 статті, що включені до наукометричної бази SCOPUS), 1 – публікація в колективній монографії і 3 – патенти України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 161 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 68 рисунками, 6 таблицями. Список використаних джерел містить 173 найменування.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету і завдання, визначено об'єкт, предмет досліджень та методи дослідження. Сформульовані наукова новизна та практичне значення отриманих наукових результатів для машинобудування. Подано відомості про апробацію результатів, публікації та структуру роботи.

У **першому розділі** описано сутність існуючих способів очищення сталевих поверхні від іржі, окалини, нагару, механічних та інших забруднень, наведено їх класифікацію, вказано переваги та недоліки кожного із способів. Встановлено, що для обробки деталей складної конфігурації (ємнісних циліндричних апаратів, штампів, прес-форм), в авіаційній, автомобільній, хімічній, інструментальній, ремонтній галузях машинобудування, у прокатному і ливарному виробництві та електротехнічній промисловості дробоструминний спосіб підготовки поверхонь знаходить все більш широке застосування. Цей спосіб має значні технологічні переваги у порівнянні з іншими способами обробки вільним абразивом у випадках, коли необхідно з невеликими витратами якісно й ефективно виконати очищення металевих поверхонь від окалини, лакофарбових покриттів, слідів корозії та ін.

На основі інформаційних джерел провідних вчених: Абрамова Ю.І., Андилаха А.А., Білика Ш.М., Виноградова В.Н., Горика О.В., Гольдсмита В., Дрозда М.С., Клейса І.Р., Крагельського І.В., Kirk D., Матліна М.М., Непомнящого Є.Ф., Новікова Ф.В., Пановка Я.Х., Пічка А.С., Проволоцького А.Е., Саверина М.М., Сичука В.А., Солових Є.К., Стефанович Т.О., Стоцько З.А., Тамаркіна М.А., Цигановського А.Б., Чернявського А.М., Spencer L., та багато інших описана сутність та принципи технології дробоструминного очищення, виявлено вплив технологічних параметрів на якість та продуктивність даного виду оброблення.

Незважаючи на досить широке промислове використання, технологічно гнучке дробоструминне очищення до теперішнього часу залишається мало вивченим технологічним процесом абразивної обробки. Відомі дослідження процесу дробоструминного очищення (ДО) носять не завжди системний і часто дещо суперечливий характер. Це можна пояснити складністю фізичних процесів і

різноманітністю технологічних параметрів, а також недостатньою увагою з боку дослідників. У зв'язку з цим залишаються недостатньо дослідженими багато закономірностей процесу ДО, які зокрема стосуються: фізичної сутності явищ, що відбуваються при ударній взаємодії дробинки з оброблюваною поверхнею; взаємозв'язку технологічних параметрів і впливу технологічних режимів на якість обробленої поверхні, зокрема: міри її шаржування; методики визначення раціональних технологічних режимів; стійкості технічного дробу і багатьох інших питань процесу дробоструминної обробки.

Перераховані невіршені завдання помітно стримують автоматизацію і механізацію процесів ДО, яке характеризується трудомісткими і несприятливими умовами роботи для людини. Аналіз існуючих технологій очищення показав, що машинобудування має значний арсенал технологічних прийомів і можливостей, спрямованих на досягнення високої якості й продуктивності обробки. Проте дробоструминне очищення внутрішніх поверхонь порожнистих виробів типу тіл обертання, таких як корпуси біологічних, хімічних, харчових апаратів, які широко використовуються в різних галузях промисловості, залишається немеханізованим, часто здійснюється вручну.

Існуючі нормативні показники якості оброблених поверхонь не завжди дають повну відповідь на питання, пов'язанні із ДО поверхонь та міцністю зчеплення з ними захисних неметалевих покриттів, що визначає експлуатаційну надійність виробів. Особливо це стосується ДО поверхонь порожнистих корпусних виробів, хімічна стійкість яких має визначальне значення, оскільки захист від корозії порожнин виробів на 80% забезпечується належною якісною підготовкою металевих поверхонь й тільки 20% якістю використовуваних покриттєвих матеріалів і способом їх нанесення.

На основі виконаного аналізу сформульовані мета та основні завдання досліджень.

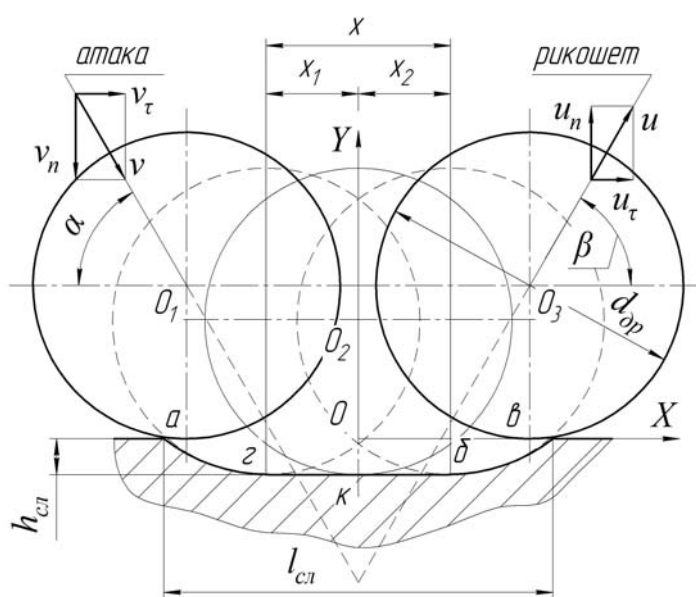


Рис. 1. Схема взаємодії дробинки з металевою поверхнею

У другому розділі приведено теоретичні дослідження основних технологічних параметрів процесу дробоструминного очищення.

Розроблені два нових підходи до описання косої ударної взаємодії дробинки з деформівною металевою поверхнею. При цьому тверда сферична дробинка, здійснюючи плоскопаралельний рух, після зіткнення зі швидкістю  $v$  під кутом  $\alpha$  і рикошету зі швидкістю  $u$  під кутом  $\beta$  залишає слід у вигляді подовженої лунки довжиною  $l_{cl}$ , глибиною  $h_{cl}$  (рис. 1) і шириною  $b_{cl}$ .

Взаємодія жорсткої дробинки з деформівним півпростором при косому



ударі описується системою:

$$\begin{cases} m \cdot d^2 y(t)/dt^2 + F_n(t) = 0; \\ m \cdot d^2 x(t)/dt^2 + F_\tau(t) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $y, x$  – координати контактного переміщення центру ваги дробинки, масою  $m$ ;  $F_n(t), F_\tau(t)$  – нормальна та тангенціальна складові сили опору півпростору.

*Пружно-пластична модель* описує складові сили опору півпростору так:

$$F_n(t) = ky(t), \quad F_\tau(t) = -\mu_s ky(t), \quad (2)$$

де  $k$  – узагальнений коефіцієнт пружно-пластичності матеріалу;  $\mu_s = 0,25 \dots 0,4$  – коефіцієнт тертя при пластичному деформуванні.

Коефіцієнт  $k$  залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу півпростору і характеризує інтенсивність його опору нормальному динамічному проникненню сферичної дробинки

$$k = \frac{\pi \eta_0 HB^{1,12}}{2,13 d_{op}} \left( d_{op} - \sqrt{\frac{4,26 T_0}{\pi d_{op} \eta_0 HB^{1,12}}} \right)^2, \quad (3)$$

де  $\eta_0 = 2,0 \dots 2,4$  – динамічний коефіцієнт, який залежить від швидкості атаки;  $HB$  – твердість за Брінеллем;  $T_0 = mv_{0n}^2/2$  – кінетична енергія дробинки діаметром  $d_{op}$  і з нормальною складовою швидкості атаки  $v_{0n}$ .

Розв'язком системи рівнянь (1) з урахуванням (2) та початкових умов знайдено вирази для визначення часу проникнення  $t_h$ , глибини  $h_{cl}$  та довжини  $l_{cl}$  сліду

$$t_h = 0,5\pi/\sqrt{k/m}, \quad h_{cl} = v_{0n}/\sqrt{k/m}, \quad l_{cl} = 2\sqrt{d_{op} h_{cl}} + \sqrt{m/k} (\mu_s v_{0n} (2 - \pi) + \pi v_{0\tau}) \quad (4)$$

*Пружно-в'язка модель* характерна більш розширеним представленням силових членів опору півпростору, окремо пружного і в'язкого деформування

$$F_n(t) = \gamma \frac{dy}{dt} + cy(t), \quad F_\tau(t) = \mu cy(t) + \sigma_s f_{on}, \quad (5)$$

де  $c$  – коефіцієнт врахування частки пружного опору деформування матеріалу півпростору;  $\gamma$  – частки в'язкого опору деформування;  $\mu$  – коефіцієнт тертя ковзання;  $\sigma_s f_{on}$  – тангенціальний опір ( $\sigma_s$  – динамічна межа текучості,  $f_{on}$  – усереднена площа поверхні половини сліду).

Розв'язком системи рівнянь (1) з урахуванням (5) та початкових умов з використанням прийнятих дійсних вихідних даних процесу ( $\gamma > 2\sqrt{mc}$ ) і прийнятих позначень  $\gamma/m = 2p$ ,  $c/m = q^2$ ,  $s^2 = q^2 - p^2$ , отримано:

$$t_h = \frac{1}{2s} \ln \left( \frac{p+s}{p-s} \right), \quad h_{cl} = \frac{v_{0n}}{2s} \left( \frac{p+s}{p-s} \right)^{\frac{-p}{2s}} \left( \frac{(p+s)/(p-s) - 1}{\sqrt{(p+s)/(p-s)}} \right), \quad l_{cl} = 2\sqrt{d_{op} h_{cl}} + v_{0\tau} t - \frac{a_\tau t^2}{2}, \quad (6)$$

де  $a_\tau = \sigma_s f_{on}/m$  – прискорення сповільненого тангенціального руху дробинки.

Аналітично встановлені вирази для коефіцієнтів, які враховують відокремлено пружний  $c$  і в'язкий опір  $\gamma$  деформування та їх співвідношення:

$$\gamma = (1 - k_{np}) F_n / v_{0n}, \quad c = \gamma \frac{k_{np}}{1 - k_{np}} \cdot \frac{F_n}{m v_{0n}}, \quad \frac{c}{\gamma} = \frac{k_{np} v_{0n}}{h(1 - k_{np})} = \frac{k_{np} \sqrt{\pi d H D_\delta}}{\sqrt{m(1 - k_{np})}}, \quad (7)$$

де  $k_{np} \approx 0,04$  – коефіцієнт частки пружного опору поверхні низьковуглецевих сталей, визначався експериментально;  $F_n = v_{0n} \sqrt{\pi d H D_\delta}$  – динамічна сила нормального вдавлювання (опору).

На рис. 2 приведені графіки функцій руху дробинки під час контакту, що отримані рішенням системи (1): пружно-в'язкої моделі  $y(t) = v_{0n} e^{-pt} (e^{st} - e^{-st}) / 2s$  (крива 1); пружно-в'язкої моделі при нехтуванні пружними деформаціями

$y(t) = v_{0n} m (1 - e^{-yt/m}) / \gamma$  (крива 2);

пружно-пластичної моделі

$y(t) = v_{0n} \sin(\sqrt{k/m} \cdot t) / \sqrt{k/m}$  (крива 3). Значення глибини проникнення дробинки за розробленими моделями практично однакові (рис. 2), що формально підтверджує адекватність запропонованих наукових підходів.

Задану швидкість атаки залежно від швидкості вильоту дробинки із сопла  $v_0$  та довжини факелу  $l_\phi$  пов'язує співвідношення  $v = v_0 e^{-k_{on}(l_\phi - a)/m}$ , у якому  $a = 0,1 \dots 0,15$  м – довжина початкової ділянки факела в межах ядра струменя, на якій швидкість дробинки приймається сталою і рівною швидкості її вильоту із сопла  $v_0$ ;  $k_{on}$  – коефіцієнт опору повітря, який для коленого дробу змінюється в межах  $(0,2 \dots 1,0) \cdot 10^{-5}$  кг/м, а для литого  $(0,09 \dots 0,45) \cdot 10^{-5}$  кг/м.

Використавши відомий функціональний зв'язок між швидкістю різання і змінною частиною технологічної собівартості операції механічної обробки різанням, визначено економічно вигідну швидкість атаки

$$v_{ек} = \sqrt{E^m C_v d_0 / r (1/m - 1)^m (t_{cm} E + S_T)^m}, \quad (8)$$

де  $E$  – вартість роботи дробоструминної установки;  $d_0$  – розрахунковий діаметр відбитка дробоструминного факела на оброблюваній поверхні;  $C_v$  – деяка стала величина;  $m$  – показник відносної стійкості;  $t_{cm}$  – час на заміну дробу у системі;  $S_T$  – витрати, пов'язані з виготовленням та експлуатацією технічного дробу за період його стійкості;  $r$  – комплексний показник.

Поряд з  $v_{ек}$  встановлено, з умови міцності  $\sigma_{pn}$  технічного дробу, граничну швидкість атаки  $v_{gp} = \sqrt{\sigma_{pn}^2 / (\pi \rho E)} / \sin \alpha$  ( $E$  – модуль пружності;  $\rho$  – густина матеріалу). Граничні швидкості призводять до істотного зниження довговічності дробу, тому рекомендованими є швидкості, які менші від граничних в 1,3 – 2,0 рази і складають

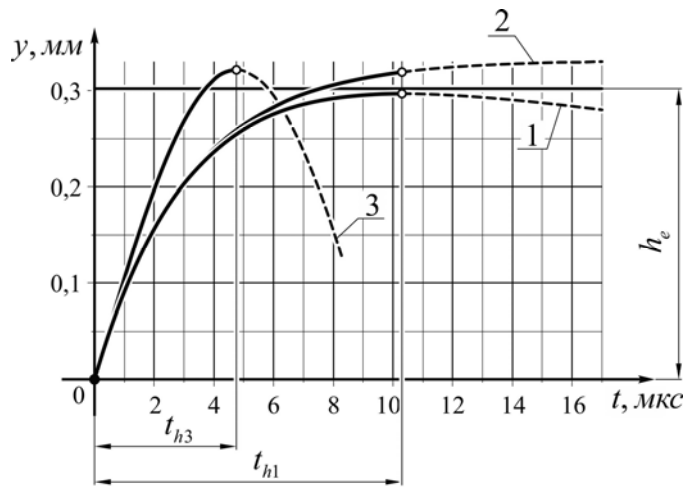


Рис. 2. Графіки функцій  $y(t)$

80...120 м/с, що дозволяє збалансувати інші вихідні і наслідкові режими процесу. Кут атаки з умови забезпечення максимальної продуктивності запропоновано визначати так:  $\alpha = \arctg \sqrt[3]{1 - k_e^2 / (0,25r_\alpha^2 \mu_s)}$ , де  $k_e$  – коефіцієнт відновлення швидкості;  $r_\alpha$  – коефіцієнт узгодження для досягнення рівномірної шорсткості;  $\mu_s$  – приведений коефіцієнт тертя при пластичному деформуванні.

Знаючи вихідні параметри, з урахуванням розв'язків (1) визначено наслідкові, якими є об'ємна  $Q_w = B_{op} v_n^2 \pi d_{op} k_w k_{pn} / k$  та поверхнева продуктивності  $Q_f = Q_w / \delta_{np}$ , у яких:  $B_{op}$  – масова подача дробу;  $k_w$  – коефіцієнт об'єму сліду, (при  $\alpha = 90^\circ$   $k_w = 0,5$  і при зменшенні кута атаки  $\alpha$  збільшується, так при  $\alpha = 60^\circ$   $k_w = 0,6...0,65$ );  $k_{pn}$  – коефіцієнт руйнування;  $\delta_{np}$  – товщина припуску.

Встановлено функціональний зв'язок між технологічними параметрами ДО, фізико-механічними властивостями поверхневого шару оброблюваного виробу і часом ефективної роботи  $T$  технічного дробу, що визначає стійкість

$$T = k_{cp} M_s n v^2 \sin^2 \alpha (1 - k_e^2) (1 - \eta) k_{pn} / (2 \sigma_s b S \delta_{np}), \quad (9)$$

де  $k_{cp} \approx 0,75$  – коефіцієнт середніх втрат;  $M_s$  – маса завантаженого дробу;  $n$  – число циклів використання дробу до критичного зносу;  $\eta$  – коефіцієнт, що враховує втрати на внутрішнє тертя в матеріалі оброблюваного виробу;  $\sigma_s$  – динамічна межа текучості оброблюваного металу;  $b$  – розрахункова ширина відбитку факела;  $S$  – швидкість переміщення відбитку факела по оброблюваній поверхні.

Побудовано метод визначення міри шаржування  $N_{ш}$  поверхні осколками дробу, як важливого критерію якості, оскільки застряглі осколки в поверхневому шарі оброблюваної поверхні є осередками корозії й створюють серйозну небезпеку

$$N_{ш} = \zeta (v \sin \alpha)^2 (1 - k_e^2) n_{oc} B_{op} / Q_f, \quad (10)$$

де  $\zeta = 0,1$  – коефіцієнт пропорційності,  $c^2 / (m^2 \cdot k\alpha)$ ;  $n_{oc}$  – кількість осколків, що утворюються від однієї дробинки.

**Третій розділ** присвячено розробці методик експериментальних досліджень впливу на поверхневий шар низьковуглецевих сталей як дії окремої дробинки, так і дії дробоструминного факела.

Вплив кута і швидкості атаки окремою жорсткою кулькою плоского зразка із сталі 08сп на геометричні параметри сліду, залишеного на атакованій поверхні, досліджено на створеній установці (стенді) з використанням однозарядного пневматичного пістолета марки ИЖ-53М, який тестувався за швидкістю вильоту дробинки з дула сертифікованим оптоелектронним вимірювальним комплексом ИБХ-731. Розміри сліду визначали мікроскопом МПБ-2 і мікрометром при заданій швидкості і різних кутах атаки від  $20^\circ$  до  $90^\circ$ .

Дослідження впливу дії дробоструминного факела на стан обробленої поверхні зразків (ступінь очищення, шорсткість, міра шаржування) та продуктивність проводили в заводських умовах на базі ПАТ «Полтавський автоагрегатний завод» на діючому удосконаленому обладнанні (рис. 3). Тиск стисненого повітря становив 0,6 МПа, діаметр циліндричного сопла – 10 мм.

Дискові зразки діаметром 80 мм піддавали термічній обробці в режимі нормалізаційного відпалу (рис. 4) в електропечі СНЗ-6,3х13. Для дослідів був обраний технічний сталевий дріб відповідно до ДСТУ 3184-95 діаметром 0,8, 1,0 та 1,4 мм.

Наладкою захисної камери змінювали кут атаки від  $15^\circ$  до  $90^\circ$  і довжину абразивного факела в межах  $l_\phi = 100 \dots 600$  мм. Швидкість руху дробу в факелі фіксували вже згаданим комплексом ИБХ-731, який розміщувався в захисній камері за спеціальною перегородкою з отвором для легкого проходу одної дробинки.

Параметри шорсткості очищених зразків вимірювали переносним профілометром ПМ-210.



Рис. 4. Дослідні зразки після нормалізаційного відпалу

Структуру поверхневого шару зразків вивчали на плоских поперечних зрізах (шліфах) за допомогою оптичного металографічного мікроскопа МИМ-7. Ступінь шаржування обробленої поверхні осколками дробу визначали із використанням стереометричної металографії за допомогою універсального електронного мікроскопа УЕМВ-100К. Контроль твердості проводили твердомірами ТШ-2, ПМТ-3.

Продуктивність очищення при постійному надлишковому тиску  $0,6$  МПа у дробоструминному апараті і зміні кута атаки від  $15^\circ$  до  $90^\circ$  та швидкості від  $60$  до  $120$  м/с, встановлена вимірюванням маси дослідних зразків до і після обробки на аналітичних вагах моделі ВЛА-200.

У четвертому розділі висвітлено результати експериментальних досліджень впливу технологічних режимів на техніко-економічні показники ДО та на якість обробленої поверхні виробів із низьковуглецевої сталі 08сп.

При дослідженні дії окремої дробинки експериментально встановлено, що форма відбитку сліду, залишеного дробинкою на поверхні зразка, має дещо видовжену сегментоподібну форму, подібну до прийнятої на схемі (рис. 1). Отримані табличні числові значення (табл. 1) ширини  $b_{сл}$  і довжини сліду  $l_{сл}$ , як і візуальні (рис. 5) при швидкості атаки  $v = 122,4$  м/с, свідчать про те, що при  $\alpha = 70^\circ$  вони вже майже рівні ( $2,70$  мм і  $2,71$  мм) і зі збільшенням кута атаки їх

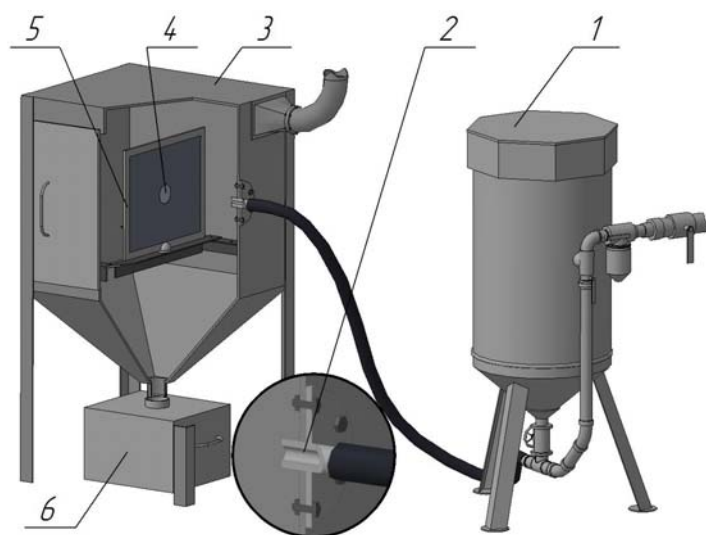


Рис. 3. Схема експериментальної установки: 1 – дробоструминний апарат DBS-100; 2 – сопло; 3 – захисна камера; 4 – зразок; 5 – поворотна плита; 6 – контейнер для дробу

співвідношення практично не змінюється  $l_{сл}/b_{сл} \approx 1$  при збільшенні глибини  $h_{сл}$  сліду. Розбіжність теоретичних і експериментальних розмірів сліду менша 14%.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень параметрів взаємодії дробинки  $d = 4,366$  мм із сталевим зразком

Геометричні параметри сліду	Усереднені значення параметрів при $\alpha$ :								
	20°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°	70°
Глибина $h_{сл}$ , мм	0,133	0,162	0,184	0,237	0,240	0,249	0,207	0,302	0,330
Ширина $b_{сл}$ , мм	1,655	1,982	2,083	2,250	2,287	2,410	2,455	2,475	2,700
Довжина $l_{сл}$ , мм	2,500	2,900	2,950	2,955	2,855	2,900	2,750	2,710	2,710

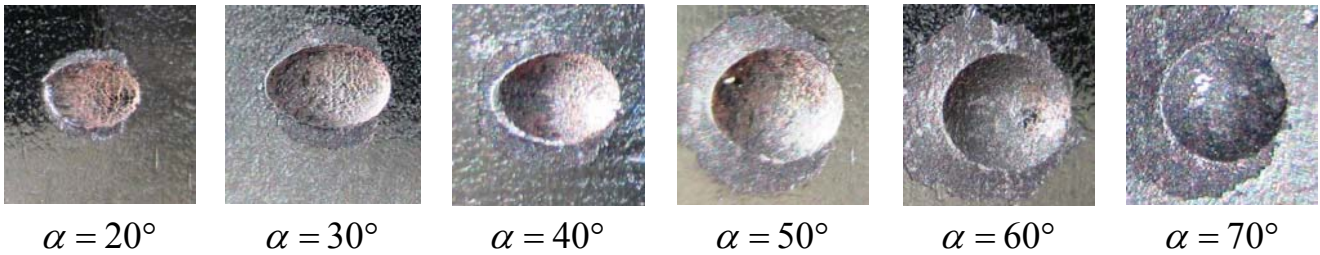
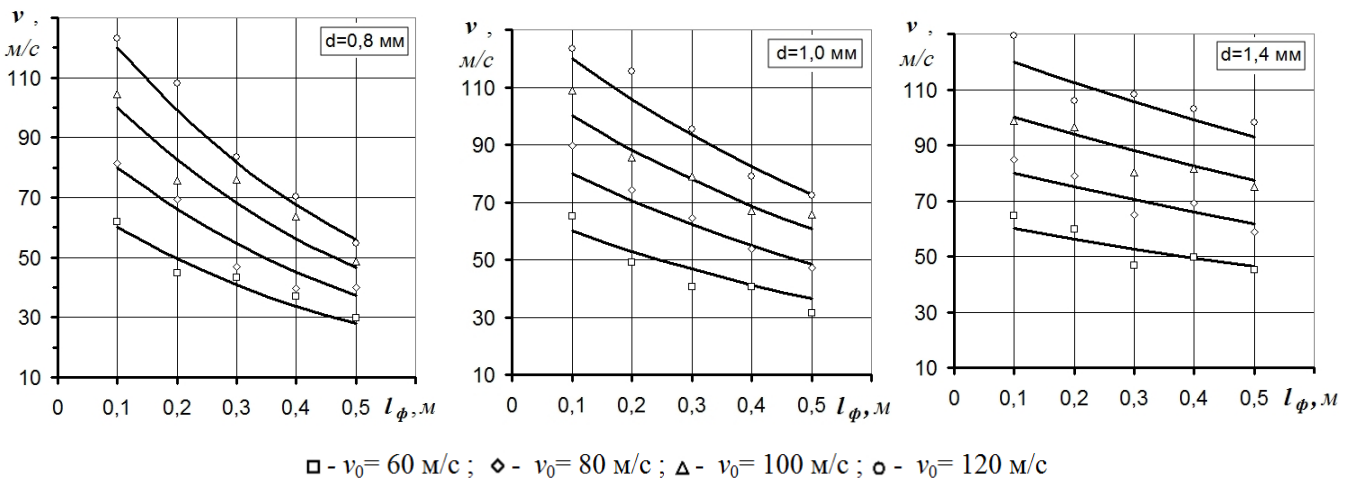


Рис. 5. Відбитки слідів (x15) дробинки на поверхні зразка при різних кутах атаки

Найбільше тангенціальне видовження сліду при малих кутах атаки не перевищує  $0,2d$ , а відношення  $l_{сл}/b_{сл}$  змінюється від 1,475 при  $\alpha = 20^\circ$  до 1,0 вже при  $\alpha \geq 70^\circ$ . Отримані теоретичні залежності по визначенню геометричних параметрів сліду були використані для прогнозування шорсткості оброблюваної поверхні при масовій дії дробинки дробоструминного факела.

Експериментально (фігурні позначки на рис. 6) встановлено швидкості руху  $v$  дробу різних фракцій залежно від довжини факела  $l_\phi$  і різних швидкостей  $v_0$  вильоту дробинки із сопла  $d_c = 10$  мм та порівняно з теоретичними графіками.

Рис. 6. Швидкість руху дробинки  $v$  залежно від довжини факела  $l_\phi$ 

Встановлено, що в межах ядра дробоструминного струменю швидкість руху

дробинки можна прийняти сталою і рівною швидкості  $v_0$  її вильоту із сопла, а далі по експоненціальній залежності, яка наближається до лінійної із збільшенням діаметру дробу (рис. 6). Межа сталої швидкості залежно від маси дробинки і швидкості вильоту із сопла за даними експерименту становила  $0,1...0,15$  м. Розбіжність теоретичних і експериментальних значень швидкості  $v$  у повітряному факелі дробинки різних фракцій отримана в межах  $\pm 12\%$ .

Дослідження мікроструктури поверхневого шару показали, що при середніх кутах атаки  $\alpha = 45...65^\circ$  разом з мікрорізнанням, поверхня піддається істотній пластичній деформації, утворюючи добре розвинутий мікрорельєф обробленої поверхні, що позитивно впливає на міцність зчеплення із захисним покриттям. Шорсткість поверхні, досягнута за 30-40 с обробки, практично не змінюється при подальшій дії факела.

Експериментально встановлено вплив кута і швидкості атаки на технологічні показники процесу очищення. Порівняння теоретичних і експериментальних даних такого впливу для різних фракцій дробу наведені на рис. 7 – 12 (позначки – дані експерименту, лінії – теоретичного розрахунку).

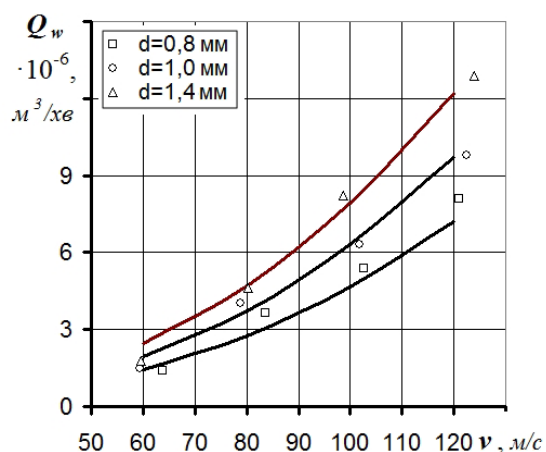


Рис. 7. Залежність продуктивності  $Q_w$  від швидкості атаки  $v$

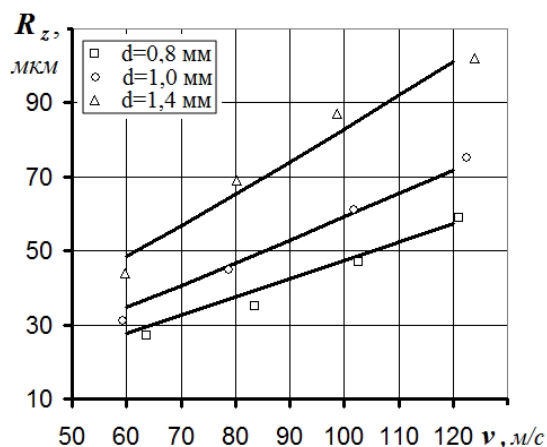


Рис. 8. Залежності параметру шорсткості  $R_z$  від швидкості атаки  $v$

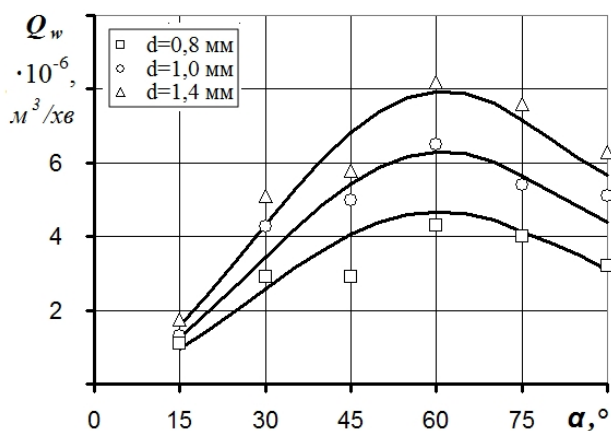


Рис. 9. Залежність продуктивності  $Q_w$  від кута атаки  $\alpha$

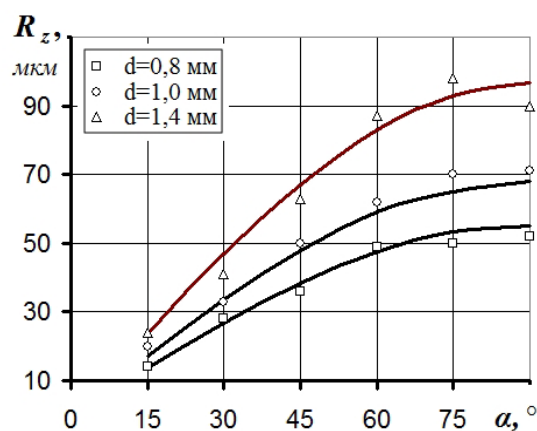


Рис. 10. Залежності параметру шорсткості  $R_z$  від кута атаки  $\alpha$



Продуктивність технології очищення очікувано зростає із збільшенням швидкості атаки і діаметру дробу (рис. 7). Характерно, що раціональний кут атаки для досягнення максимальної продуктивності змінюється у діапазоні  $55^\circ \dots 65^\circ$  не залежно від фракційного складу дробу (рис. 9). Показник шорсткості поверхні  $R_z$  (рис. 8, 10) і ступеня шаржування поверхні (рис. 11, 12) збільшуються при збільшенні швидкості і кута атаки. На характер графіків цих залежностей фракційний склад дробу практично не впливає.

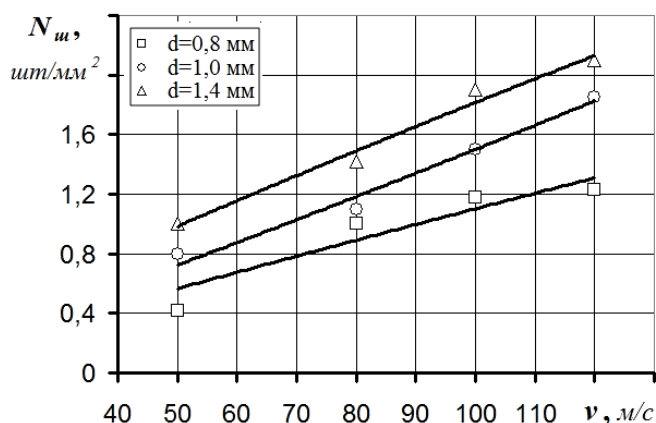


Рис. 11. Залежності ступеня шаржування  $N_{ш}$  від швидкості атаки  $v$

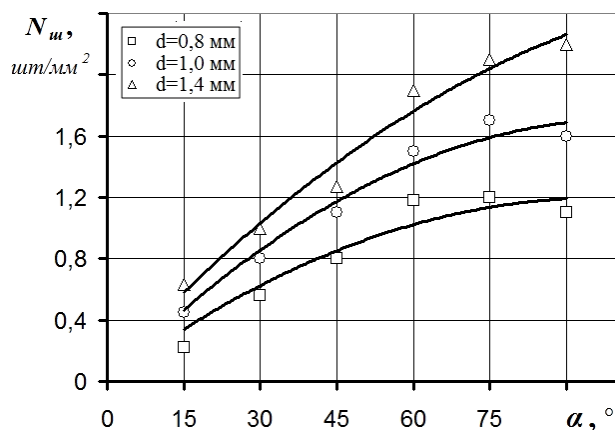


Рис. 12. Залежності ступеня шаржування  $N_{ш}$  від кута атаки  $\alpha$

За результатами експериментальних досліджень зроблено висновок про достовірність отриманих у роботі теоретичних залежностей і можливість їх використання для технологічних розрахунків продуктивності, шорсткості, ступеня шаржування та інших параметрів ДО виробів із низьковуглецевої сталі дробом  $d = 0,8 \dots 1,4 \text{ мм}$ .

У п'ятому розділі приведені технічні і технологічні рішення для механізації процесу очищення хімічних апаратів, а також запропоновано алгоритм визначення і ув'язки параметрів технології очищення корпусних виробів типу тіл обертання для досягнення вимог, що висуваються до якості очищених поверхонь.

Розроблене у роботі, запатентоване технічне рішення на конструкцію самохідного модуля (рис. 13) дозволяє покращити умови праці, збільшити продуктивність очищення, підвищить якість обробки і, як наслідок, надійність і довговічність оброблюваних виробів.

Самохідний модуль (СМ) складається із візка 1 з гусеничним рушієм, який є механізмом пересування сопла 2 прикріпленого до тримача (руки) 3, системи управління з двох задаючих механізмів: орієнтування положення по вертикалі 4 візка СМ на стінці корпусу апарату, що обертається, і механізму переміщення 5 візка СМ вздовж твірної корпусу апарату.

Модуль за допомогою магнітних пластин 6 на траках гусеничного рушія, прикріплюють на

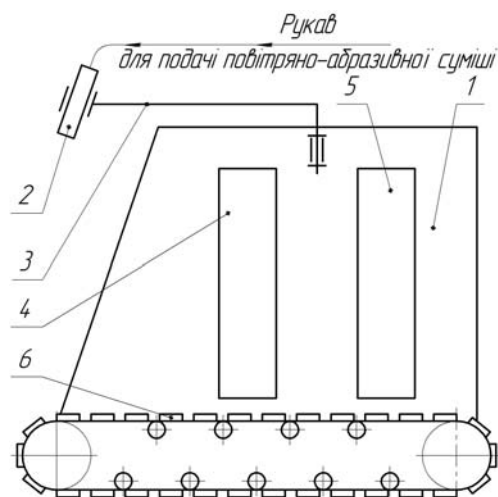


Рис. 13. Самохідний модуль

внутрішній поверхні виробу так, щоб відпрацьований дріб не заважав очищенню.

Ефективне формоутворення поверхні при обробці тіл обертання досягалося шляхом поєднання двох рухів: обертального руху оброблюваного виробу навколо власної осі симетрії з коловою швидкістю  $v_e$ , (головний рух) і поступального переміщення відбитку факела по двох взаємно перпендикулярних напрямках (подача), тобто по твірних кривих другого порядку. Обертальний рух виробу 1 надають за допомогою роликів стану 2 (рис. 14). Відбиток факела, для досягнення рівномірного очищення переміщається з постійною швидкістю, рівною  $v_e = const$ , по заданій траєкторії у вигляді: спіралі Архімеда – при обробці еліптичних днищ і гвинтової спіралі – при обробці циліндричної обичайки. При цьому переміщення по гвинтовій спіралі відбувається зі швидкістю  $v_e$  з кроком  $p_k$ , що забезпечує суцільне і якісне перекриття оброблюваної поверхні спіральними відбитками дробоструминного факела. Для дотримання умови  $v_e = const$  при обробці поверхні еліптичних днищ оброблюваний виріб необхідно обертати із змінною частотою  $n$ .

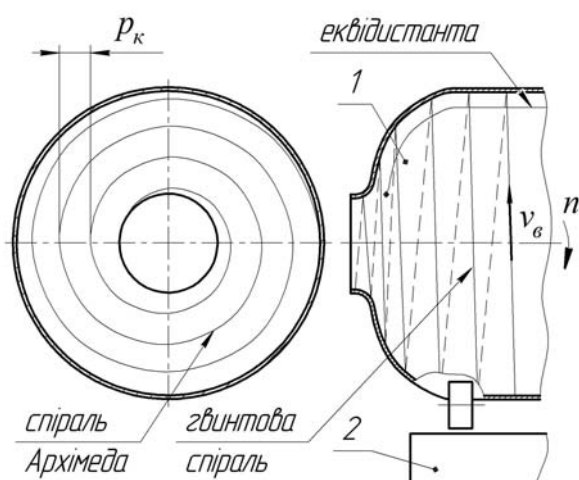


Рис. 14. Технологічна схема ДО

Поставлена задача вирішена в такий спосіб: дробоструминне сопло переміщують з установленою швидкістю по еквідистанті до твірної кривої порожнини виробу, починаючи від осі симетрії на глухому днищі і закінчуючи на межі з центральним люком відкритого днища або навпаки. При цьому дотримуються умови рівномірності очищення поверхні. У результаті розроблена технологічна карта очищення внутрішньої поверхні хімічного апарату для ПрАТ «Полтавхіммаш» (м. Полтава) з використанням наявного обладнання у вигляді автоматичного маніпулятора.

Опираючись на проведені аналітичні і експериментальні дослідження розроблено 18-ти кроковий алгоритм визначення раціональних технологічних режимів ДО внутрішньої поверхні корпусних виробів і їх послідовної ув'язки.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача удосконалення технології дробоструминного очищення внутрішніх поверхонь корпусних виробів типу тіл обертання з низьковуглецевої сталі шляхом встановлення раціональних режимів і розробки нових технічних рішень на основі дослідження впливу ударної дії дробу на стан очищеної поверхні.

Основні наукові положення та результати:

1. Дробоструминне очищення внутрішніх поверхонь великогабаритних корпусних апаратів типу тіл обертання від забруднень різного походження є чи не єдино прийнятним способом механічної абразивної обробки порожнин таких виробів з метою подальшого нанесення на них неметалевих стійких покриттів.

2. Побудовано і обґрунтовано нові наукові підходи до описання динамічної



(ударної) взаємодії абсолютно жорсткої сферичної дробинки з площиною деформівного півпростору, на основі яких визначено, залежно від заданих вихідних параметрів контактної взаємодії, розміри і форму сліду зіткнення та встановлено наслідкові основні параметри технології дробоструминного очищення поверхонь виробів із низьковуглецевих сталей.

3. На основі побудованих аналітичних моделей встановлено:

- залежність критеріїв якості оброблених поверхонь (рівномірної шорсткості, структури та міри шаржування поверхневого шару осколками дробу) від заданих технологічних параметрів процесу очищення;

- граничну швидкість ( $\approx 160$  м/с) атаки сталевим коленим дробом, виходячи з характеристики його міцності, що призводять до істотного зниження працездатності абразиву і економічно вигідну швидкість ( $v = 80 \dots 120$  м/с);

- економічний період стійкості дробу, що дозволяє більш точно розраховувати штучний час на проведення відповідальної операції поповнення системи живлення технічним дробом.

4. Експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано ефект поглинання контактного тангенціального переміщення дробинки нормальним переміщенням при формуванні довжини сліду дробинки на атакованій поверхні за великих кутів атаки  $\alpha \geq 70^\circ$ , що дозволяє в таких випадках нехтувати тангенціальним переміщенням при визначенні продуктивності процесу очищення.

5. Металографічні дослідження дозволили встановити факт шаржування поверхні застряглими осколками дробу, розміри яких коливаються від декількох до десятків мкм. Максимальні розміри осколків склали близько 50 мкм. Співвідношення дрібних і крупних осколків склало 5:1. Біля 20% дрібних виявилися повністю замуrowаними в поверхневий шар, їх вдалося виявити тільки на шліфах.

6. Встановлено раціональні вихідні технологічні режими дробоструминного очищення сталевих поверхонь для утворення стабільної заданої шорсткості, яка досягається за 30...40 с дії факела: швидкість атаки, яку забезпечують дробоструминні апарати нагнітальної дії з абсолютним тиском стислого повітря  $p = 0,6$  МПа і циліндричні сопла діаметром  $d_c = 10$  мм, сягає 120 м/с і більше; кут атаки  $\alpha = 55^\circ \dots 65^\circ$ ; діаметр сталевих осколків 0,8...1,4 мм.

7. Запропоновано принципово нове технічне рішення на конструкцію самохідного модуля в складі технологічного комплексу для дробоструминного очищення внутрішніх поверхонь хімічних корпусів, яке дозволяє істотно розширити технологічні можливості процесу очищення порожнин металевих великогабаритних виробів (корпуси апаратів, труби, цистерни та інші).

8. Визначено основні характеристики руху відбитку факела по спіралі Архімеда при очищенні днищ та гвинтовій спіралі при очищенні обичайки, а сопла по еквідистанті до твірної кривої оброблюваного виробу, та розроблено технологічну карту очищення корпусу хімічного апарату відповідно до розробленого покрокового алгоритму (18 кроків) визначення і ув'язки технологічних параметрів. При цьому:

- очищення до ступеня якості  $Sa 3$  і подальшого емалювання внутрішніх поверхонь габаритних корозійностійких хімічних ємностей диктують вимогу збільшеного припуску  $\delta_{np}$  (товщини шару, що знімається при очищенні) до  $2R_z$ ;

– максимальна частота обертання оброблюваного виробу при обробці днищ з найменшим радіусом проходки відбитку по спіралі Архімеда обмежена значенням ( $n \sim 2 \text{ об} / \text{хв}$ ) з точки зору техніки безпеки;

– раціональні технологічні режими забезпечують об'ємну продуктивність дробоструминного очищення в межах  $5 \dots 9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{хв}$ .

9. Об'ємна продуктивність очищення великогабаритних виробів за раціональних технологічних режимів не завжди дозволяє дотриматися часового проміжку  $t$  між операціями очищення поверхні і нанесення на неї захисного покриття ( $t < 8 \text{ год}$ ). Тому руку маніпулятора обладнують двома соплами або передбачають більше проходок факела (2-3) для досягнення заданого припуску  $\delta_{\text{пр}}$ .

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових періодичних виданнях, що включено до міжнародних наукометричних баз:*

1. Gorik A. V., Zinkovskii A. P., Chernyak R. E., Brikun A. N. Elastoplastic deformation of the surface layer of machinery constructions on shot blasting. *Strength Mater.* 2016. Vol. 48, № 5. P. 650–657. (Індексується в **Index Scopus**). (Здобувачем проведено експериментальні дослідження, приймав участь в розробці пружно-пластичної моделі).

2. Goryk A., Koval'chuk S., Brykun O., Chernyak R. Viscoelastic resistance of the surface layer of steel products to shock attack of a spherical pellet. *Key Engineering Materials.* 2020. Vol. 864. P. 217–227. (Індексується в **Index Scopus**). (Здобувачем проведено аналітичний огляд моделей одиначної взаємодії та експериментальні дослідження, приймав участь в розробці в'язко-пружної моделі).

### *Статті у наукових фахових виданнях України:*

3. Горик О. В., Брикун О. М., Черняк Р. Є. Вибір оптимальних параметрів технології дробеструменевої обробки внутрішніх поверхонь великогабаритних елементів автомобільної техніки. *Вісник Полтавської державної аграрної академії.* 2016. № 1-2. С. 72–77. (Здобувач приймав участь у розробці створення технологічної карти очищення порожнини суцільнозварної циліндричної ємності).

4. Горик О. В., Ковальчук С. Б., Брикун О. М., Черняк Р. Є. Прогнозування шорсткості металевих поверхонь деталей машин при дробеструменевому очищенні. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури.* 2016. № 63. С. 38–43. (Здобувачу належить аналітичний аналіз досліджень і участь у розробці теоретичної залежності для визначення швидкості атаки, необхідної для забезпечення прогнозованої шорсткості металевих поверхонь).

5. Горик О. В., Брикун О. М., Черняк Р. Є. Вибір економічно оптимальної швидкості атаки при дробеструменевому очищенні металевих поверхонь. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів».* 2016. Вип. 10/3. С. 27–30. (Здобувач приймав участь у розробці методики розрахунку економічно оптимальної швидкості атаки, виконав числову апробацію отриманої методики).

6. Горик О. В., Брикун О. М., Черняк Р. Є. Експериментальні дослідження впливу швидкості і кута атаки на технічні показники дробеструменевого очищення

*Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. № 3. С. 83–89. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження впливу режимів процесу дробоструминного очищення на продуктивність і якість обробки металевих поверхонь).

7. Горик О. В., Брикун О. М., Черняк Р. Є. Оцінка інтенсивності абразивного руйнування металевих поверхонь дією дробоструминного факелу. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин (Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник)*. 2017. № 47, ч. I. С. 72–78. (Здобувачем проведено експериментальні дослідження визначення коефіцієнту руйнування).

8. Брикун О. М., Черняк Р. Є., Горик О. В. Методика проведення експериментальних досліджень впливу на стан металевих поверхонь ударної дії дробинок. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2020. № 3. С. 257–268. (Здобувачем розроблено методику дослідження впливу дії як окремої дробинки так і дробоструминного факела на основні характеристики стану очищеної сталеві поверхні, приймав участь у розробці експериментальної установки).

#### **Статті у колективних монографіях:**

9. Шулянський Г. А., Брикун О. М. Автоматизація технологічного процесу дробеструменевого очищення сільськогосподарських резервуарів. *Динаміка та міцність енергетичних і сільськогосподарських машин та біотехнічних систем: колективна монографія*. Полтава, 2015. С. 84–87. (Здобувачем проведений аналіз існуючих сучасних машин і пристроїв для дробоструминного очищення).

#### **Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій:**

10. Горик А. В., Ковальчук С. Б., Брикун А. Н., Черняк Р. Е. Твердость и микроструктура поверхностного слоя элементов машин после дробеструйной обработке (результаты экспериментальных исследований). *Состояние современной строительной науки-2015* : сб. науч. трудов XIII-ой Междунар. науч.-практ. Интернет-конф. Полтава, 2015. С. 102–107. (Здобувачем проведено металографічні дослідження поверхневого шару дослідних зразків оброблених дробоструминним факелом при різних режимах технологічного процесу).

11. Горик А. В., Брикун А. Н., Черняк Р. Е. Общие аспекты процесса дробеструйной очистки полостей металлических крупногабаритных цилиндрических изделий. *Актуальні проблеми інженерної механіки* : тези доп. IV Міжнар. наук.-практ. конф., 16-19 трав. 2017 р. Одеса : Екологія, 2017. С. 20–23. (Здобувач приймав участь у розробці загальних аспектів технології дробоструминного очищення порожнин металевих корпусних циліндричних виробів).

12. Горик О. В., Брикун О. М., Матяшевський В. Є. Встановлення граничної швидкості атаки при дробоструминному очищенні. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування* : матеріали II Всеукр. інтернет-конф., 18-19 квіт. 2019 р. Полтава: ПДАА, 2019. С. 4–8. (Здобувачу належать аналітичні залежності для визначення граничної швидкості атаки при дробоструминному очищенні).

13. Горик А. В., Брикун А. Н. Оценка качества стальной поверхности машиностроительных изделий после дробеструйной очистки. *Динаміка, міцність та моделювання в машинобудуванні* : тези доп. II Міжнар. наук.-техн. конф., 05-08 жовт. 2020 р. Харків : ІПМаш НАНУ, 2020. С. 41–44. (Здобувачем проведений

*аналіз способів очищення металевої поверхні виробів).*

### **Отримані патенти:**

14. Самохідний модуль для дробоструминного очищення : пат. 114152 Україна : МПК В25J 9/00. № а 2016 01687 ; заявл. 23.02.2016 ; опубл. 25.04.2017, Бюл. №8. *(Здобувачем запропоновано технічне рішення на конструкцію самохідного модуля для ДО внутрішньої поверхні порожнистих виробів).*

15. Спосіб механічної обробки струменем твердих частинок (дробинок) : пат. 116936 Україна: МПК В24С 1/00, В24С 7/00. № а 2016 08492 ; заявл. 02.08.2016 ; опубл. 25.05.2018, Бюл. №10. *(Здобувач приймав участь у розробці способу, виконав числову апробацію запропонованого способу).*

16. Спосіб дробоструминного очищення порожнин корпусних виробів : пат. №136318 Україна : МПК В08В 9/00. № u 2019 02449 ; заявл. 13.03.2019 ; опубл.12.08.2019, Бюл. №15. *(Здобувачем запропоновано новий спосіб руху повітряно-абразивного відбитку по оброблюваній поверхні порожнини виробу).*

### **АНОТАЦІЯ**

**Брикун О.М. Удосконалення технології дробоструминного очищення внутрішніх поверхонь корпусних виробів типу тіл обертання. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. Луцький національний технічний університет, Луцьк, 2021.

Дисертаційна робота присвячена удосконаленню технології дробоструминного очищення внутрішніх поверхонь корпусних виробів типу тіл обертання з низьковуглецевої сталі шляхом встановлення раціональних режимів і розробки нових технічних та технологічних рішень.

Розроблено нові наукові підходи до описання ударної взаємодії абсолютно жорсткої сферичної дробинки з деформівною металевою площиною і на їх основі визначено характер контактного руху дробинки в атакованому матеріалі, розміри сліду в результаті зіткнення та встановлено технологічні параметри процесу очищення: шорсткість, структура, ступінь шаржування та продуктивність. Проведені експериментально-теоретичні дослідження дозволяють приймати раціональні технологічні режими очищення для формування на поверхнях рівномірної шорсткості заданих параметрів і якісної їх підготовки до міцного зчеплення з нанесеним на них корозійностійкого неметалевого покриття. Розроблено принципово нове технічне рішення на конструкцію самохідного модуля для очищення порожнин виробів, що дозволяє удосконалити технологію очищення, покращити умови праці, збільшити продуктивність процесу, підвищити якість обробки, і як наслідок, надійність і довговічність оброблюваних виробів. Розроблено і апробовано новий спосіб руху відбитку повітряно-абразивного факела автоматичного маніпулятора по оброблюваній криволінійній порожнині виробу та побудована технологічна карта очищення порожнини хімічного апарата відповідно до розробленого алгоритму визначення і ув'язки технологічних параметрів.

**Ключові слова:** дробоструминне очищення, швидкість і кут атаки, параметри сліду, дріб, шорсткість поверхні, ступінь шаржування, продуктивність, самохідний модуль, корпусні вироби.

## АННОТАЦИЯ

**Брикун А.Н. Усовершенствование технологии дробеструйной очистки внутренних поверхностей корпусных изделий типа тел вращения. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. Луцкий национальный технический университет, Луцк, 2021.

Диссертация посвящена усовершенствованию технологии дробеструйной очистки внутренних поверхностей корпусных изделий типа тел вращения из низкоуглеродистой стали путем исследования влияния ударного действия дроби на состояние очищенной поверхности и установления рациональных режимов, разработки новых технических и технологических решений, обеспечивающих существенное повышение уровня механизации и автоматизации подготовки поверхностей под неметаллическое защитное покрытие. Учитывая результаты экспериментально-теоретических исследований многих ученых, разработаны новые подходы к аналитическому описанию динамического взаимодействия абсолютно жесткой сферической дробинки с плоскостью неподвижной деформируемой металлической преграды. На их основе в зависимости от исходных режимов процесса очистки (скорости и угла атаки, диаметра дроби) определен характер контактного движения отдельной дробинки в атакованном материале, размеры следа в результате столкновения и следственные технологические параметры.

На основе решения построенной системы дифференциальных уравнений впервые установлено функциональную связь между технологическими параметрами дробеструйной очистки, физико-механическими свойствами поверхностного слоя обрабатываемого изделия и стойкостью абразива, что позволяет более точно рассчитывать время на проведение ответственной операции пополнения системы питания технической дробью. Получена аналитическая зависимость для определения степени шаржирования обработанной поверхности, как важного критерия качества поверхности, поскольку осколки дроби, которые застряли в поверхностном слое обрабатываемого изделия, создают серьезную опасность для защитного покрытия и изделия в целом, как очага точечной коррозии. Установлена предельная скорость атаки ( $v \approx 160$  м/с), которая приводит к существенному снижению долговечности стальной технической дроби и таким образом к увеличению расходов, и экономически выгодная скорость ( $v = 80 \dots 120$  м/с).

Экспериментально-теоретическим путем установлено: эффект поглощения контактного тангенциального перемещения дробинки нормальным в формировании длины следа при больших углах атаки  $\alpha \geq 70^\circ$ , что позволяет в таких случаях пренебрегать тангенциальным перемещением при определении продуктивности очистки; рациональные исходные технологические режимы данного процесса: скорость атаки, которая при использовании дробеструйных аппаратов нагнетательного действия с абсолютным давлением сжатого воздуха  $p = 0,6$  МПа и цилиндрических сопел диаметром  $d_c = 10$  мм, достигает 120 м/с и более, угол атаки  $\alpha = 55^\circ \dots 65^\circ$  и фракционный состав стальной дроби 0,8...1,4 мм, которые обеспечивают качественную подготовку поверхностей для нанесения на них коррозионно-стойкого защитного неметаллического покрытия.

Разработано принципиально новое техническое решение на конструкцию

самоходного модуля для дробеструйной очистки внутренних цилиндрических поверхностей корпусных изделий типа тел вращения, которое позволяет улучшить условия труда, увеличить производительность очистки, повысить качество обработки и, как следствие, надежность и эксплуатационную долговечность крупногабаритных дорогих промышленных изделий. Разработан и апробирован новый способ движения отпечатка факела по обрабатываемой криволинейной полости изделия (по спирали Архимеда при обработке эллиптических днищ и по винтовой спирали при обработке цилиндрической обечайки) с использованием самоходного модуля или автоматического манипулятора и построено соответствующую технологическую карту равномерной качественной очистки полостей химических аппаратов. Разработан пошаговый алгоритм (18 шагов) определения и увязки взаимосвязанных технологических параметров для достижения сбалансированной технологии качественной очистки химических аппаратов.

**Ключевые слова:** дробеструйная очистка, скорость и угол атаки, параметры следа, дробь, шероховатость поверхности, степень шаржирования, производительность, самоходный модуль, корпусные изделия.

#### SUMMARY

**Brykun O. Improving the technology of shot blasting cleaning of internal surfaces of hull products such as bodies of rotation. – Manuscript.**

The dissertation is devoted to the improvement of the technology of shot blasting cleaning of the inner surfaces of the hull products such as low-carbon steel rotating bodies by establishing rational modes and developing new technical and technological solutions.

New scientific approaches to the description of impact interaction of absolutely rigid spherical pellet with deformable metal plane have been developed and on their basis the character of contact motion of pellet in attacked material, trace size as a result of collision has been determined and technological parameters of cleaning process have been established: roughness, structure, degree of charging and productivity. The conducted experimental-theoretical researches allow to accept rational technological modes of clearing for formation on surfaces of uniform roughness of the set parameters and their qualitative preparation for strong coupling with the highly steady nonmetallic covering put on them. A fundamentally new technical solution for the design of a self-propelled module for cleaning product cavities has been developed, which allows to improve cleaning technology, improve working conditions, increase process productivity, improve processing quality, and as a result, reliability and durability of processed products. A new method of moving the imprint of the air-abrasive torch of the automatic manipulator on the processed curved cavity of the product has been developed and tested, and a technological map of cleaning the cavity of the chemical apparatus has been built according to the developed algorithm for determining and linking technological parameters.

**Key words:** shot blasting, speed and angle of attack, trace parameters, fraction, surface roughness, degree of charging, productivity, self-propelled module, hull products.

Підписано до друку 18.02.21. Формат 60x90/16.  
Папір офс. Друк трафаретний. Гарн. Times New Roman.  
Авт. арк. 0,85.  
Тираж 100 прим.

Видавництво ФОП Гонтар О.В.  
36000, м. Полтава, вул. Шевченка, 27, тел. 509871

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру  
Серія BO1 №595616 від 05.01.2006 р.

