


**original article** | 621.7.023.3 | doi: 10.31210/visnyk2020.03.30

**TECHNIQUE FOR EXPERIMENTAL STUDIES OF THE EFFECT OF SHOT IMPACT ACTION ON THE STATE OF METAL SURFACES**
*O. N. Brykun*<sup>1\*</sup>

 ORCID  [0000-0001-5213-9440](https://orcid.org/0000-0001-5213-9440)
*R. E. Chernyak*<sup>2</sup>

 ORCID  [0000-0002-2804-5580](https://orcid.org/0000-0002-2804-5580)
*O. V. Goryk*<sup>1</sup>
<sup>1</sup> Poltava State Agrarian Academy, 1/3, Skovorody str., Poltava, 36003, Ukraine

<sup>2</sup> Private Joint-Stock Company "AutoKrAZ", 62, Kyivska str., Kremenchuk, 39631, Ukraine

\*Corresponding author

 E-mail: [leksandr.brykun@pdaa.edu.ua](mailto:leksandr.brykun@pdaa.edu.ua)

## How to Cite

 Brykun, O. N., Chernyak, R. E., & Goryk, O. V. (2020). *Technique for experimental studies of the effect of shot impact action on the state of metal surfaces. Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, (3), 257–268. doi: 10.31210/visnyk2020.03.30

One of the technological problems is poorly studied shot blasting, which is widely used in various branches of mechanical engineering, including agricultural, for surface preparation of machine metal parts and products for protective non-metallic coatings. The reliability and durability of such products by 80% depends on the quality of surface preparation by shot blasting. That is why the study of surfaces condition after their cleaning has the priority importance in the industrial production of metal products, especially those that are operated in aggressive environments. Analytical prediction of the quality of machine processed surfaces does not always give a reliable result due to the complexity of modeling mass impulse effect of attacking particles' stream on an attacked metal obstacle, and in the majority of cases, is limited to the interaction of a separate spherical shot with it. Therefore the experimental determining of individual characteristics of short blasting process has practical importance, it is often decisive. The purpose of this article is to develop a methodology for conducting and obtaining individual results of experimental studies of shot blasting process of metal surfaces. To determine the influence of the initial parameters of the process (the angle and speed of attack, the diameter of the shot) on the geometry of the track left by the shot on the attacked surface the technique for studying the impact interaction of an individual shot with a flat plate steel sample is presented. The study was conducted in the laboratory of Poltava State Agrarian Academy on the developed installation (stand) using a single-shot pneumatic gun of the "ИЖ -53М" brand which was tested by the speed of the shot out from the muzzle using certified ІБХ-731 optoelectronic measuring complex. To determine the roughness of the treated surface, the degree of charging and the intensity of surface layer destruction, studies of the interaction with the surface of steel disc samples of shot-blasting torch were carried out on a modernized industrial installation at JSC "Poltava Automobile Aggregate Plant". The samples were subjected to heat treatment in the normalization blasting mode in CH3-6.3 x 13 electric furnace.

**Key words:** shot blasting, experimental studies, flat rectangular and disc samples, equipment.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ УДАРНОЇ ДІЇ ДРОБИНОК НА СТАН МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ****О. М. Брикун<sup>1</sup>, Р. Є. Черняк<sup>2</sup>, О. В. Горик<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Полтавська державна аграрна академія, м. Полтава, Україна<sup>2</sup> Приватне акціонерне товариство «АвтоКрАЗ», м. Кременчук, Україна

Однією із технологічних проблем є недостатньо вивчена дробоструминна очистка, яка широко використовується в різноманітних галузях машинобудування, зокрема сільськогосподарській, для підготовки поверхонь металевих деталей машин і виробів під захисні неметалеві покриття. Надійність і довговічність таких виробів на 80% залежать від якості підготовки поверхні дробоструминням. Тому вивчення стану поверхонь після їхнього очищення має пріоритетне значення у промисловому виробництві металевих виробів, особливо тих, які експлуатуються в агресивних середовищах. Аналітичне прогнозування якості оброблених поверхонь не завжди дає достовірний результат через складність моделювання масового імпульсного впливу потоку атакуючих частинок на атаковану металеву переешкоду і переважно обмежується взаємодією з нею окремої сферичної дробинки. Тому експериментальне визначення окремих характеристик процесу дробоструминня має практичне значення, а часто і визначальне. Метою цієї роботи є розробка методики проведення і отримання окремих результатів експериментальних досліджень процесу дробоструминного очищення металевих поверхонь. Для визначення впливу на геометрію сліду, залишеного дробинкою на атакованій поверхні, вихідних параметрів процесу (кута і швидкості атаки та діаметру дробинки) подано методику дослідження ударної взаємодії окремої дробинки з плоским пластинчастим сталевим зразком. Дослідження проводили в лабораторії Полтавської державної аграрної академії на розробленій установці (стенді) з використанням однозарядного пневматичного пістолета марки «ИЖ-53М», який тестувався за швидкістю вильоту дробинки з дула за допомогою сертифікованого оптоелектронного вимірювального комплексу ИБХ-731. Для визначення шорсткості обробленої поверхні, ступеня шаржування та інтенсивності руйнування поверхневого шару проводили дослідження взаємодії з поверхнею сталевих дискових зразків дробоструминного факела на модернізованій промисловій установці ВАТ «Полтавський автоагрегатний завод». Зразки піддавали термічній обробці в режимі нормалізаційного відпалу в камерній електропечі СНЗ-6,3 x 13

**Ключові слова:** дробоструминне очищення, експериментальні дослідження, плоскі прямокутні та дискові зразки, обладнання.

**МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ ДРОБИНОК НА СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ****А. Н. Брикун<sup>1</sup>, Р. Е. Черняк<sup>2</sup>, А. В. Горик<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Полтавская государственная аграрная академия, г. Полтава, Украина<sup>2</sup> Частное акционерное общество «АвтоКрАЗ», г. Кременчуг, Украина

Дробеструйная очистка широко используется в различных отраслях машиностроения для подготовки поверхностей металлических деталей машин и изделий под защитные неметаллические покрытия. Надежность и долговечность изделий на 80% зависят от качества подготовки поверхности дробеструением. Поэтому изучение состояния поверхностей после их очистки занимает приоритетное место в промышленном производстве металлических изделий, особенно тех, которые эксплуатируются в агрессивных средах. При этом экспериментальное определение отдельных характеристик процесса дробеструйной очистки имеет практическое значение, а часто и определяющее. Целью данной работы является разработка методики проведения и получения отдельных экспериментальных результатов процесса дробеструйной очистки металлических поверхностей. Для определения влияния на геометрию следа, оставленного дробинкой на атакованной поверхности, исходных параметров процесса (угла и скорости атаки и диаметра дробинки) представлена методика исследования ударного взаимодействия отдельной дробинки с плоским пластинчатым стальным образцом. Исследование проводилось в лабораторных условиях на разработанной установке

(стенде) с использованием однозарядного пневматического пистолета марки «ИЖ-53М», который служил источником кинетической энергии атакующей дробинки. А для определения шероховатости обработанной поверхности, степени шаржирования и интенсивности разрушения поверхностного слоя проводили на модернизированной промышленной установке исследования взаимодействия дробеструйного факела с поверхностью стальных дисковых образцов, подверженных термической обработке в режиме нормализационного отжига.

**Ключевые слова:** дробеструйная очистка, экспериментальные исследования, плоские прямоугольные и дисковые образцы, оборудование.

### Вступ

Однією з технічних проблем підготовки поверхонь металевих деталей машин під захисне покриття є недостатньо вивчена дробоструминна очистка, яка давно і широко застосовується на практиці в різних галузях машинобудування, зокрема й сільськогосподарській [1, 2].

Відомо, що окремі захисні неметалеві покриття, наприклад керамічні, скловидні, полімерні й інші забезпечують працездатність деталей машин із вуглеводистих сталей в умовах хімічного впливу агресивного технологічного середовища при підвищеній температурі краще, ніж відомі високолеговані сталі і сплави, які є доволі дорогими [3]. Зважаючи на це, вивчення впливу дробоструминного очищення на якість обробленої металевої поверхні набуває великого технологічного значення.

Аналітичному опису процесу абразивного очищення, який характеризується масовою імпульсивною атакою оброблюваної поверхні потоком частинок (дробинок), які розганяються до певної швидкості стиснутим повітрям через спеціальні сопла, присвячено багато наукових праць. Більшість із них присвячено дослідженню зношуванню поверхонь при терті, наприклад [1, 4–6], а також обробці при ударі [7–11] для досягнення регулярних поверхневих мікроструктур [12]. На жаль, результати дослідження, отримані на використанні аналітичної моделі взаємодії окремої дробинки з пружно-пластичним півпростором [13–21], зокрема й чисельним моделюванням [22–25] проведені без глибокого узагальнення на технологічні параметри дії дробоструминного факела. Окрім цього, варто відмітити, що деякі параметри складного процесу дробоструминня взагалі неможливо отримати аналітично, а тільки експериментально.

Зважаючи на це, експериментальні дослідження взаємодії як дробоструминного факела, так і окремої дробинки на стан поверхневого шару оброблених металевих поверхонь виробів набувають пріоритетного значення при встановленні раціональних технологічних параметрів процесу дробоструминня, хоча дослідники цим питанням приділяють не так багато уваги. Відомі експериментальні результати, отримані за вихідних даних, які не цілком відповідають режимам дробоструминного очищення за швидкістю і кутом атаки, а часом і фракцією абразивних зерен [10, 12, 13], не розкривають методику проведення дослідження, насамперед, методику визначення швидкості атаки факельного дробу [26].

Тому метою цієї роботи є проведення експериментальних досліджень, що спрямовані на виявлення закономірностей взаємодії дробу з металевою поверхнею для визначення якості дробоструминного очищення сталевих поверхонь з новим підходом до встановлення швидкості атаки.

### Матеріали і методи досліджень

Дослідження проводили в заводських умовах на базі ВАТ «Полтавський автоагрегатний завод» на переобладнаному діючому обладнанні з використанням атестованих вимірювальних приладів та виготовлених допоміжних засобів, а також у лабораторії міцності Полтавської державної аграрної академії і ліцензованій лабораторії Полтавського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру впродовж 2017–2019 років. Під час проведення досліджень були використані методи, що базуються на фундаментальних положеннях технології машинобудування, теорії контактної взаємодії твердих тіл, методах математичного моделювання та аналізу при побудові залежностей, а також методики планування і проведення експериментів з дослідження впливу дії як окремої дробинки на геометричні параметри сліду, так і дробоструминного факела на стан обробленої поверхні (ступінь очищення, шорсткість, ступінь шаржування, інтенсивність руйнування).

### Результати досліджень та їх обговорення

#### Дослідження впливу дії дробоструминного факела

**Технологічне обладнання та зразки.** Основну частину досліджень впливу дії дробоструминного факела на стан поверхні проводили на базі ВАТ «Полтавський автоагрегатний завод» у межах дого-

вору про наукову співпрацю. Ґрунтуючись на основних типових частинах промислових технологічних установок дробоструминної обробки поверхні виробів, була створена експериментальна установка очищення дослідних зразків із робочим об'ємом  $0,1\text{ м}^3$ , з максимальною подачею дробу до сопла  $30\text{ кг/хв}$  і максимальною витратою стислого повітря  $6,5\text{ м}^3/\text{хв}$ . Схема установки приведена на рис. 1.

Установка складається із дробоструминного апарату 1 моделі DBS-100 нагнітальної дії, захисної камері 2, у правій торцевій стінці якої закріплено дробоструминне сопло 3. Камера являє собою порожнистий корпус 4 прямокутного перерізу, який знизу має пірамідальний бункер 5, а згори закритий плоскою кришкою. Ліва торцева стінка 7 захисної камери є глухою, а права сторона має вихідний патрубок 6. Спереду камера закрита поворотними дверцятами 8. До бічних стінок камери прикріплені напрямні 9, на які встановлена поперечина 10, несуче установче пристосування 11 для поворотної плити 12, у якій встановлено утримувач 13 дослідного зразка 14. Камера змонтована на каркасі 15, а на вихідному патрубку її бункера 5 розміщений контейнер 16 для збору відпрацьованого дробу. Дробоструминне сопло пов'язане гумовотканинним рукавом 18 зі змішувальною камерою 17 апарату 1, де розміщений дозатор дробу 19. Стисле повітря надходить у систему живлення установки через кран 20 із заводської магістралі 21.

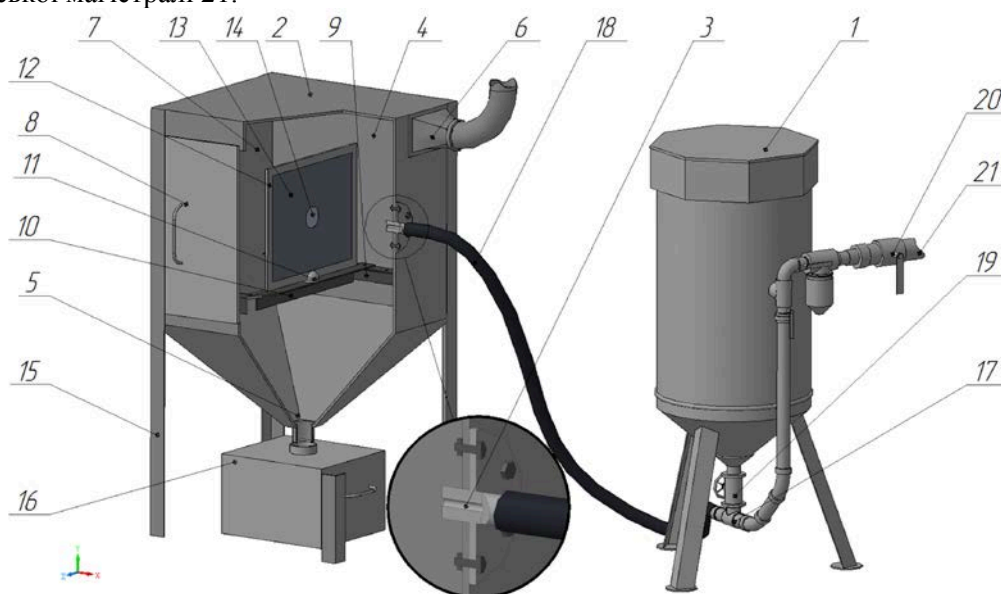


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Поперечина 10 може переміщатися по напрямних 9 уздовж осі факела, змінюючи відстань  $l$  від сопла 3 до поверхні дослідного зразка 14.

Обертанням з допомогою установчого пристрою 11 поворотної плити 12, з утримувачем 13 навколо вертикальної осі досягався необхідний кут атаки  $\alpha$  дробоструминним факелом поверхні дослідного зразка 14.

Вихідний патрубок кришки 6 давав змогу приєднати до витяжної заводської вентиляції для забезпечення необхідного обміну повітря.

Розміри камери  $1610 \times 825 \times 725\text{ мм}$  дозволяли досліджувати технологічні режими дробоструминного очищення на різних відстанях  $l$  від дробоструминного сопла до оброблюваної поверхні ( $l=0,1 \dots 0,6\text{ м}$ ) і встановлювати за спеціальною перегородкою з отвором для однієї дробинки оптоелектронний комплекс вимірювання швидкості атаки.

Система дистанційного керування апарату DBS-100 давала змогу використовувати його без втрат дробу одним оператором і досягати продуктивності  $3\text{--}10\text{ м}^2/\text{год}$  і ступеня очищення металеві поверхні  $Sa 3$  відповідно до міжнародного стандарту [27].

Як енергоносії використовували стиснене повітря, що надходило до дробоструминного апарату від заводської магістралі із тиском  $p_{\text{абс}}=0,6\text{ МПа}$ , осушене і знемаслене, 2-ї групи забрудненості згідно з ДСТУ 4169:2003 зі вмістом твердих частинок  $<2\text{ мг/м}^3$ ; парів води  $<700\text{ мг/м}^3$ ; парів мінеральних масел  $<3\text{ мг/м}^3$ , що задовольняє рекомендації [28].

Відповідно до технології дробоструминної обробки для дослідів був обраний технічний сталевий



дріб (ДСК) відповідно до ДСТУ 3184-95, діаметром описаної сфери 0,8; 1,0; 1,4мм.

Експериментальні дослідження виконували з використанням плоских дискових зразків діаметром 80мм, виготовлених зі сталевого 08сп листового прокату, товщиною 5мм (рис. 2, б). Дослідна усереднена твердість такої сталі за Брінелем склала  $HV=1280MPa$ . Разом з виготовленням дискових зразків з цього ж самого прокату виготовляли і їх утримувачі (рис. 2, а) в захисній камері експериментальної установки. Розміри прямокутних утримувачів 400х500х5мм з вирізаним центральним отвором діаметром 80мм, у який вставлялися дискові дослідні зразки. Новий утримувач для кожного окремого зразка давав змогу аналізувати розміри відбитку факела і його спрямування безпосередньо на дисковий зразок та шорсткість обробленої поверхні в різних місцях сліду. На рис. 2, в зображено заготовку до очищення.

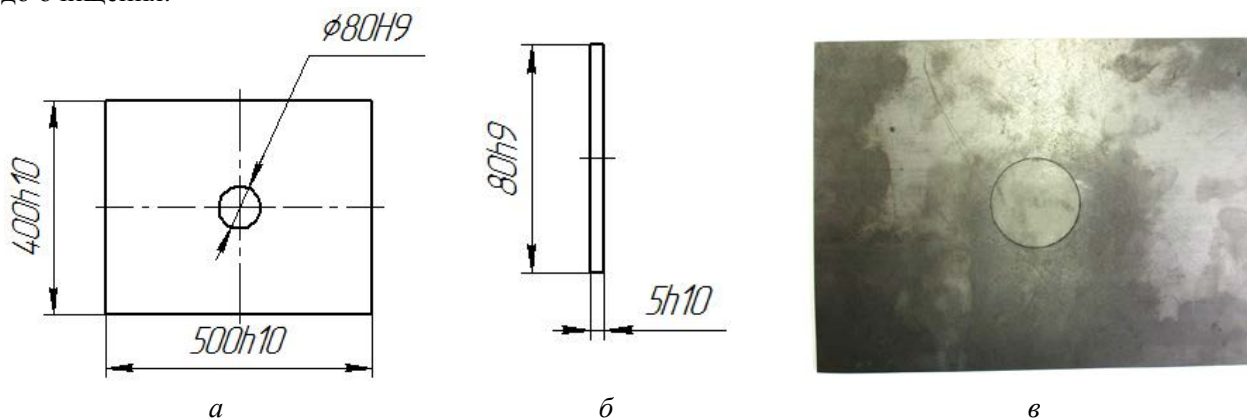


Рис. 2. Утримувач зразка (а), зразок дисковий (б), фото загального вигляду утримувача з дослідним зразком до випробування (в)

При дослідженні впливу на технологічні показники очищення враховували й результат очищення утримувача зразка. А сам зразок давав змогу визначати дослідні значення коефіцієнта руйнування, зважуванням до і після очистки, міру шаржування поверхні методом шліфів та інтенсивність руйнування поверхневого шару.

Дискові зразки разом з утримувачами готували за узгодженою в машинобудуванні технологією: піддавали термічній обробці в режимі нормалізаційного відпалу в камерній електропечі СНЗ-6,3х13 (рис.3, а) при температурі  $850\pm 20^{\circ}C$  з тривалістю витримки  $t=30xв$ . Потім охолоджували в атмосфері спокійного повітря при температурі  $20\pm 5^{\circ}C$  (рис. 3, б).



Рис. 3. Термічна обробка в електропечі СНЗ-6,3х13 (а) дослідних зразків (б)

Потім зразки встановлювали в утримувач та закріплювали в потрібному положенні в захисній камері експериментальної установки, де проводили дробострумінне очищення зразка. Після дослідного очищення вивчали стан його поверхневого шару.

**Шорсткість поверхні.** Стійкість і міцність покриття безпосередньо залежать від чистоти і шорст-

кості, які надають поверхні при підготовці сталевого виробу до нанесення захисного шару. Одним із основних показників якості, окрім вимог до чистоти, є профіль очищеної поверхні, характеристика якого визначається не тільки специфічною текстурою обробленої поверхні, але і величиною параметрів шорсткості  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ .

Висотний параметр шорсткості  $R_z$  є функцією гранулометричного складу технічного дробу  $d$ , швидкості атаки  $v$  і кута атаки  $\alpha$ , якщо виключити з неї задані фізико-механічні властивості контактуючих тіл,  $R_z \approx h_{cl} = f(d, v, \alpha)$ , яка лягла в основу дослідження.

Кількісну оцінку шорсткості проводили за допомогою цього показника ( $R_z$ ), який визначається за висотою нерівностей профілю десяти точок, як суму середніх арифметичних відхилень точок п'яти найбільших максимумів і п'яти найменших мінімумів у межах базової довжини  $l$

$$R_z = \frac{1}{5} \left( \sum_i^5 h_{i,max} + \sum_i^5 h_{i,min} \right). \quad (1)$$

Вимірювання параметрів шорсткості здійснювали на дискових зразках, підданих дробоструминному очищенню, за допомогою переносного профілометра ПМ-210 (рис. 4).



Рис. 4. Визначення шорсткості дослідних зразків

Технічна характеристика переносного профілометра ПМ-210 подана в табл. 1.

**1. Характеристика профілометра ПМ-210**

Діапазони вимірювань:	
$R_a$	0,005 – 16 мкм
$R_z$	0,020 – 160 мкм
Межа допустимої похибки	±10
Характеристика щупа:	
принцип дії	індуктивний
матеріал наконечника	алмаз
кут щупа	90°
Базова довжина	0,25 / 0,8 / 2,5 мм
Швидкість вимірювання	0,135 – 1,0 мм/с

Для встановлення розподілу величини параметра шорсткості по площі відбитку заміри проводили в різних місцях на зразку і на його утримувачі для аналізу якості очищення по площі відбитку.

Експериментальна залежність часу обробки поверхні дослідних зразків дробом фракцією 1,0 при швидкості атаки  $v=100\text{ м/с}$  наведена на рис. 5.

Із графіка видно, що із часом обробки  $t$  висота мікронерівностей (параметр шорсткості  $R_z$ ) на початку очищення стрімко збільшується, а потім стабілізується й залишається незмінною зі збільшенням часу дробоструміння. Стабільне значення шорсткості настає приблизно після  $t=40\text{ с}$  обробки. Подібний характер формування шорсткості спостерігався й при інших діаметрах і швидкостях дробу.

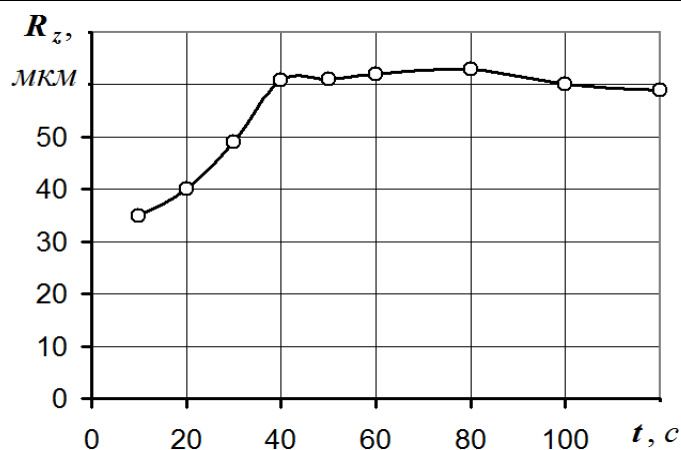


Рис. 5. Залежність шорсткості поверхні  $R_z$  від часу обробки  $t$

Отже, експериментально встановлено мінімальний час обробки поверхні для забезпечення заданого параметра шорсткості.

**Шаржування поверхні.** Ступінь шаржування поверхневого шару зразків після їхньої очистки осколками дробу вивчали металографічними методами на мікрошліфах, що спеціально виготовлялися. Для цього з очищених зразків вирізували на верстаті дисковою фрезою штапики розмірами 40x20x5мм, торцеву поверхню яких шліфували і полірували до дзеркального блиску на довідному верстаті з вертикальною віссю обертання. Шліфування здійснювали на трьох алмазних еластичних дисках діаметром 200мм з послідовним зменшенням зернистості алмазів: АСО 80/63, АСМ 40/28, АСМ 3/2. Після шліфовки мікрошліфи полірували на замшевих і фетрових дисках, просочених парафіном, на поверхню яких наносили алмазну пасту АСМ 1/0.

Мікроструктуру поверхневого шару вивчали методом електронної мікроскопії універсальним електронним мікроскопом УЭМВ-100К. Поряд з великою роздільною здатністю (0,005...0,0008мкм) і великим збільшенням (до 200000 разів) електронна мікроскопія має збільшену глибину різкості (до 2мкм) [29], що дало змогу аналізувати ступінь шаржування.

Вивчення кількісного складу і об'ємної частки застряглих осколків дробу в деякому об'ємі поверхневого шару товщиною  $\delta \approx 0,1\text{мм}$  проводили за відомими методами стереометричної металографії. Припускали, що розміри уламків дробу змінюються дискретно. Кількість розмірних груп брали рівною  $k=10$ . Зміну величини діаметрів осколків здійснювали рівномірно за арифметичним рядом, починаючи з максимального розміру  $D$ ;  $0,9D$ ; ...  $0,1D$ .

Перерізи осколків дробу, отриманих на площині шліфа, також ділили на 10 розмірних груп. До першої групи входили перерізи діаметром від нуля до  $0,1D$ , в другу – від  $0,1D$  до  $0,2D$ , і т. д, аж до останньої – 10 групи. Число перерізів  $n_i$  кожної  $i$ -ої розмірної групи підрахованих на певній площі шліфа, відносили до  $1\text{мм}^2$ , і визначали за формулою:

$$n_i = z + 0,5\omega + 0,25u, \quad (2)$$

де  $z$  – кількість цілих перерізів осколків усередині квадратного контуру;  $\omega$  – кількість перерізів, перетнутих прямими лініями контуру;  $u$  – кількість перерізів, на які потрапили вершини квадрату.

Кількість осколків дробу  $i$ -ої розмірної групи в  $1\text{мм}^3$  об'єму поверхневого шару визначали за формулою Шайля-Шварца-Салтикова:

$$N_i = (A_i n_i - A_{i+1} n_{i+1} - \dots - A_k n_k) / \Delta, \quad (3)$$

де  $\Delta$  – ціна розбивки, яка дорівнює відношенню максимального діаметра осколків  $D$  до кількості груп  $k$ ;  $A$  – коефіцієнти, значення яких розраховані Салтиковим для 15-ти інтервалів;  $n$  – кількість плоских перерізів осколків дробу певної  $i$ -ої розмірної групи на одиниці площі шліфа.

Знаючи кількість осколків дробу для кожної розмірної групи, визначали їхнє загальне число в  $1\text{мм}^3$  об'єму поверхневого шару.

**Інтенсивність руйнування.**

Після проведення дробоструминного очищення дискові зразки обдували теплим повітрям для видалення металевих пилю і зважували на аналітичних вагах моделі ВЛА-200 для визначення втрати маси.

Втрату маси зразків визначали за різницею мас до та після обробки протягом контрольованого часу  $t$ :

$$m_1 - m_2 = \Delta m, \quad (4)$$

де  $m_1$  – маса дискового зразка до очищення;  $m_2$  – маса дискового зразка після очищення.

Видалений об'єм знятого металу визначали за співвідношенням:

$$\Delta W = \Delta m / \rho, \quad (5)$$

де  $\rho$  – густина низьковуглецевої сталі.

Інтенсивність руйнування поверхні зразків характеризували таким співвідношенням

$$I_p = \Delta m / (F_3 t) = \Delta W / (\rho F_3 t), \quad (6)$$

а коефіцієнт руйнування таким

$$k_p = \Delta m / (\rho R_z F_3), \quad (7)$$

де  $F_3$  – площа оброблюваної поверхні зразка;  $R_z$  – параметр шорсткості обробленої поверхні.

Експериментальні величини  $\Delta m$  та  $R_z$ , що входять у (6) та (7) вимірювалися при часі  $t$ , який відповідає досягненню стабільності шорсткості поверхні зразка (рис. 5). Отримані критерії були покладені в основу побудови функції продуктивності дробострумінного очищення.

#### Дослідження впливу дії окремої дробинки.

Параметри технологічного процесу дробострумінного очищення металевих поверхонь (якість, шорсткість, інтенсивність руйнування та інші) дослідники пов'язують з об'ємом (геометричними розмірами) сліду, залишеного окремою дробинкою на поверхні зіткнення. Тому експериментальне дослідження впливу дії окремої дробинки на стан обробленої поверхні потребує подальшого вивчення.

**Обладнання та зразки.** Дослідження впливу дії окремої дробинки проводили в лабораторії міцності Полтавської державної аграрної академії і ліцензованій лабораторії Полтавського науково-дослідного експертно-криміналістичного центру з метою визначення впливу вихідних параметрів кої ударної взаємодії жорсткої кульки (сферичного тіла) з пружно-пластичною металевою перешкодою (площиною півпростору) на геометричні параметри сліду у вигляді лунки, який кулька залишає на поверхні зіткнення. Дослідною поверхнею зіткнення служила шліфувана поверхня плоского пластинчатого зразка розміром 90x30x5мм.

Для імітації удару одиночного атакуючого тіла по дослідному зразку використовували стандартні сталеві кульки згідно з ГОСТом 3722-2014 з діаметром  $d_{dp}=4,366 \cdot 10^{-3}m$  масою  $m=0,342 \cdot 10^{-3}kg$ . Для контролю нормованої маси кульки її зважували на лабораторних вагах електронного типу моделі ТВЕ-0,21.

Як засіб для надання початкової швидкості  $v_0$  кульці використовували однозарядний пружинно-поршневий, оснащений нарізним стволом пневматичний пістолет марки «ІЖ-53М», загальний вигляд (рис. 6) та характеристики якого приведені нижче.



а

- калібр ствола – 4,5мм;
- довжина ствола – 215мм;
- габаритні розміри – 407x175x50мм;
- вага – 1,3кг;
- дульна енергія – 3Дж.

б

Рис. 6. Зовнішній вигляд пневматичного пістолету «ІЖ-53М» (а) та його характеристики (б)

Тестування пістолету на предмет встановлення швидкості вильоту кульки з дула проводили в Полтавському науково-дослідному експертно-криміналістичному центрі за допомогою оптоелектронного вимірювального комплексу ІБХ-731 (рис. 7), який є універсальним сертифікованим приладом, призначеним для вимірювання швидкості і енергії кулі стрілецької зброї (режим вимірювання одиночних пострілів) і параметрів скорострільності зброї (режим вимірювання скорострільності).





Рис. 7. Установа для визначення швидкості руху кульок (дробинок)

Дослідження швидкості дробинки полягали у такому. Після контрольного зважування кульок здійснювали експериментальні постріли із пістолета, який нерухомо закріплювали на заданій відстані  $l=0,1 \dots 0,6$  м із кроком  $a=0,05$  м від місця вильоту дробинки до сертифікованого оптоелектронного вимірювального комплексу.

Заміри робили по 8–10 разів на кожному кроці при фіксованій відстані  $l$ , а прибор самостійно виводив середнє значення швидкості (табл. 2).

**2. Значення усереднених швидкостей атакуючої дробинки**

Відстань $l$ , м	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Швидкість $v$ , м/с	124,7	124,3	123,8	123,0	122,4	121,8

Розкид швидкостей на кожному кроці вимірювання був невеликим у межах  $5$  м/с. При виявленні більших відхилень значень швидкості їх виключали з розрахунку усереднення і збільшували кількість проб.

Як і очікувалося, швидкість  $v = f(l)$  дробинки масою  $m=0,342$  г на такому малому інтервалі пройденої відстані від дула пістолета  $l=0,1 \dots 0,6$  м, що відповідає реальній довжині дробоструминного факела  $l_f$ , змінювалася несуттєво, в межах  $121,9 \dots 124,7$  м/с за практично лінійним законом (рис. 8).

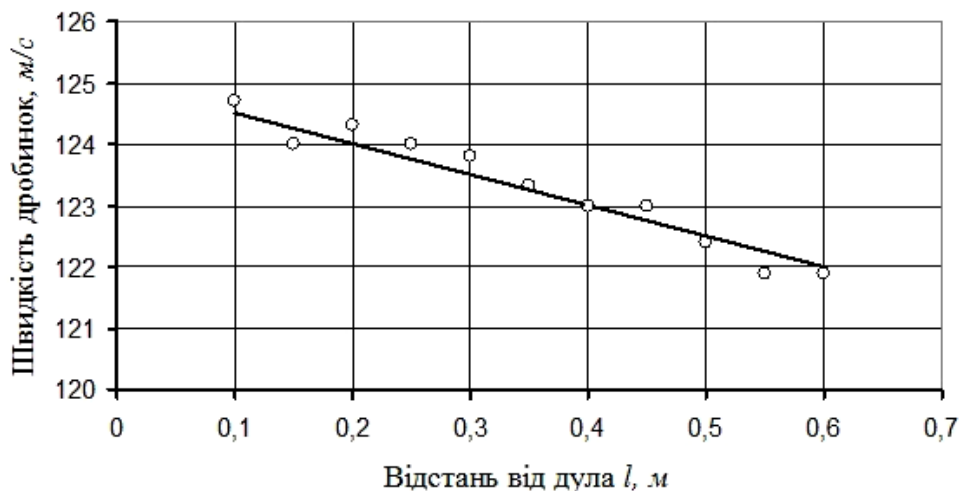


Рис. 8. Залежність швидкості дробинки ( $d_{др}=4,366$  мм,  $m=0,342$  г) від пройденого шляху  $l$  (точки – усередненні експериментальні значення)

Це пояснюється не тільки малістю відрізка графіка функції  $v = f(l)$ , а й відносно відчутними діаметром і масою кульки порівняно із дробинками, що використовуються при дробоструминному очищенні.

Для проведення дослідів була сконструйована лабораторна установка (випробувальний стенд), принципова схема та фотографія якого показані на рис. 9.

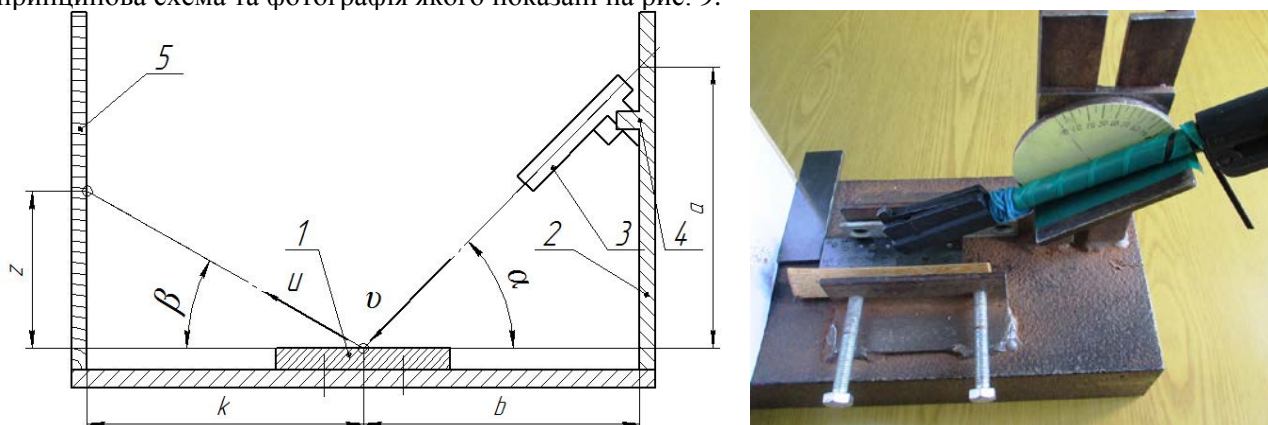


Рис. 9. Схема та фото експериментальної установки

Зразок 1 жорстко кріпився до горизонтального елемента рами 2 стенду. Пневматичний пістолет 3 закріплений на опорі 4 вертикального елемента рами з рухомим кронштейном, який давав змогу змінювати кут пострілу пістолета, тобто кут атаки. З протилежного боку вертикально закріплений дробоуловлюючий щит 5, з допомогою якого визначався кут рикошету за положенням  $z$  сліду, залишеним на щиті.

У результаті такого одноразового випробування визначали кут рикошетування  $\beta$  та вимірювали геометричні параметри сліду (ширину  $b_{сл}$ , довжину  $l_{сл}$  та глибину  $h_{сл}$ ) при заданій швидкості відповідно до табл. 2 і різних кутах атаки від  $20^\circ$  до  $80^\circ$ .

Для встановлення вихідного експериментального кута атаки  $\alpha$  і визначення наслідкового кута рикошету  $\beta$  (рис. 9) використовували тригонометричні залежності:

$$\alpha = \arctg \frac{a}{b}, \quad \beta = \arctg \frac{z}{k}. \quad (8)$$

Окрім цього, кут атаки зразка дробинкою контролювався кутомірним пристроєм при виставлянні пістолета у планове положення для чергового пострілу (рис. 9, фото).

Такі параметри сліду, як ширина і довжина, встановлювали з точністю до  $0,05\text{мм}$  за допомогою мікроскопа МПБ-2. Вимірювання цих параметрів здійснювали 5 разів відповідно до встановленої інструкції користування мікроскопом, а потім обчислювали середнє арифметичне значення.

Для визначення глибини сліду  $h_{сл}$  та контролю діаметра кульки (дробинки)  $d_{др}$  використовували мікрометр (рис. 10) з точністю до  $0,01\text{мм}$  (ГОСТ 6507-78).

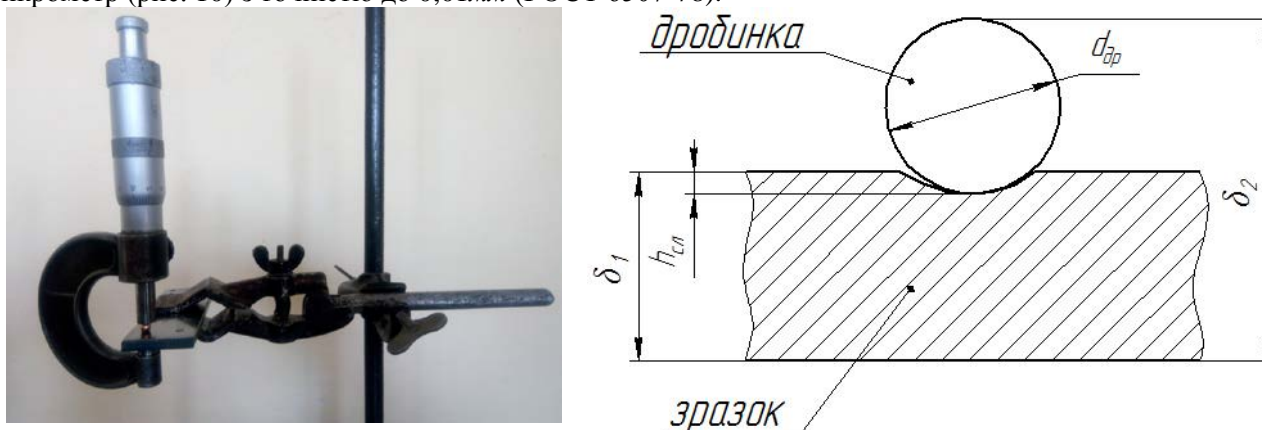


Рис. 10. Загальний вигляд та схема вимірювання глибини лунки

Дробинку після вистрілу клали в лунку, де вона займала стійке положення, досягнувши дна сліду. Вимірявши мікрометром розміри  $\delta_1$  та  $\delta_2$ , визначали глибину сліду  $h_{сл}$  як алгебраїчну суму величин  $\delta_1$ ,  $d_{оп}$  та  $\delta_2$ :

$$h_{сл} = (\delta_1 + d_{оп} - \delta_2), \quad (9)$$

де  $\delta_1$  – товщина зразка, мм;  $\delta_2$  – товщина зразка разом із дробинкою, що знаходиться в лунці, мм.

Також додаткове експериментальне обґрунтування геометричних параметрів сліду на металевій поверхні проводили й при інших реальних діаметрах атакуючої дробинки в лабораторній установці за методикою, яка тут не наводиться.

Отримані дані стосовно геометричних параметрів сліду, залишеного дробинкою на атакованій нею металевій поверхні, є невід’ємною частиною методики визначення раціональних технологічних режимів очистки металевих поверхонь.

### Висновки

Створено лабораторну установку нагнітального типу з робочим об’ємом  $0,1\text{м}^3$ , з максимальною подачею дробу до сопла  $30\text{кг/хв}$  і максимальною витратою стислого повітря  $6,5\text{м}^3/\text{хв}$  для дослідження процесу дробоструминного очищення поверхні металевих зразків, а також випробувальний стенд для вивчення параметрів косої ударної взаємодії жорсткої кульки з пружно-пластичною сталеву поверхню. Апробовано нову методику визначення швидкості руху як окремих дробинок, так і дробинок у струмені стисненого повітря, яка заснована на використанні оптоелектронного вимірювального комплексу ИБХ-731, укомплектованого двома датчиками та реєстровим пристроєм. Запропоновано методику експериментального дослідження впливу на основні характеристики стану очищеної сталеву поверхні факелом атакуючих дробинок діаметром  $0,8\dots 1,4\text{мм}$  зі швидкістю, близькою до  $100\text{м/с}$ , а також визначення параметрів сліду, що залишає окрема атакуюча дробинка діаметром  $d_{оп}=4,366\text{мм}$  і масою  $m=0,342\text{г}$  на атакованій металевій поверхні при зміні кута атаки  $20^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  та швидкості дробинки в межах реальної довжини дробоструминного факела  $0,1 \leq l_\phi \leq 0,6\text{м}$ .

Перспективи подальших досліджень полягають у з’ясуванні взаємозв’язків параметрів дробоструминного процесу, що можуть бути використані при виборі раціональних режимів процесу, а також при апробації теоретичних моделей ударної взаємодії дробинок з пружно-пластичним півпростором.

### References

1. Telnov, N. F. (1983). *Tehnologija ochistki sel's'kohozjajstvennoj tehniky*. Moskva: Kolos [In Russian].
2. Spring, S. A. (1966). *Ochistka poverhnosti metallov*. Moskva: Mir [In Russian].
3. Gorik, A. V., & Chernjavskij, A. N. (2015). *Zadachi drobestrujnoj ochistki. Dynamika ta mitsnist enerhetychnykh i silskohospodarskykh mashyn ta biotekhnichnykh system: kolektyvna monohrafiia*. Poltava: Simon [In Ukrainian].
4. Lure, G. B. (1977). *Shlifovanie metallov*. Leningrad: Nauka [In Russian].
5. Kragelskij, I. V. (1968). *Trenie i iznos*. Moskva: Mashinostroenie [In Russian].
6. Vinogradov, V. N., Sorokin, G. M., & Albagachiev, A. Ju. (1982). *Iznashivanie pri udare*. Moskva: Mashinostroenie [In Russian].
7. Panovko, Ja. H. (1977). *Vvedenie v teoriju mehanicheskogo udara*. Moskva: Nauka [In Russian].
8. Li, Z., Yang, F., Liu, Y., & Gao, Y. (2019). Numerical simulation of derusting treatment of steel parts by shot blast. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 120 (1), 157–175. doi:10.32604/cmes.2019.05187.
9. Shmanev, V. A., Shulepov, A. P., & Meshherjakov, A. V. (1995). *Strujno-abrazivnaja obrabotka detalej GTD*. Moskva: Mashinostroenie [In Russian].
10. Novikov, F. V., Andilakhai, O. O. (2014). *Osnovy strumynno-abrazivnoi obrobky dribnykh detalei: monohrafiia*. Kharkiv: Vyd. KhNEU im. S. Kuznetsia [In Ukrainian].
11. Provolockij, A. E. (1989). *Strujno-abrazivnaja obrabotka detalej mashin*. Kiev: Tehnika [In Russian].
12. Lebedenko, V. (2008). The mathematical description of process of formation of geometrical parameters of the superficial layer and hardening at processing details in fraction. *Vestnik of Don State Technical University*, 8, 202–212.
13. Drozd, M. S., Matlin, M. M., & Sidjakin, Ju. I. (1986). *Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoy kontaktnoj deformacii*. Moskva: Mashinostroenie [In Russian].

14. Zhang, C., Li, F., & Wang, B. (2013). Estimation of the elasto-plastic properties of metallic materials from micro-hardness measurements. *Journal of Materials Science*, 48, 4446-4451. doi: 10.1007/s10853-013-7263-3.
15. 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. doi: 10.1007/s11223-016-9808-6.
16. Ogar, P. M., & Tarasov, V. A. (2014). O nekotoryh obshhikh zakonernostjakh uprugoplasticheskogo vnedrenija sfericheskogo indentora. *Sovremennye Tehnologii. Sistemyj Analiz. Modelirovanie*, 5, 38-43 [In Russian].
17. Nepomnjashhij, E. F. (1971). *Trenie i iznos pod vozdejstviem strui tverdyh sfericheskikh chastic. Kontaktnoe vozdejstvie tverdyh tel i raschet sil trenija i iznosa*. Moskva: Nauka [In Russian].
18. Gorbunov, N. I., Kovtanec, M. V., Cyganovskij, I. A., Kroshko, M. N., & Levandovskij, V. A. (2011). Matematicheskaja model' processa vzaimodejstvija edinichnoj abrazivnoj chasticy s ochishhaemoj poverhnost'ju rel'sa. *Visnyk Skhidnoukrainskoho Natsionalnogo Universytetu Imeni Volodymyra Dalia*, 4, 38-45 [In Russian].
19. Martjanova, A. E. (2004). Model udarnogo kontakta tverdoj abrazivnoj chasticy s plastichnym materialom. *Vestnik Astrahanskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta*, 1, 77-81 [In Russian].
20. Koteneva, N. V. (2005). Uprugoplasticheskij kontakt gladkoj sfery s ploskoj poverhnost'ju pri dinamicheskom nagruženii. *Izvestija Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta*, 2, 114-116 [In Russian].
21. Frija, M., Hassine, T., Fathallah, R., Bouraoui, C., & Dogui, A. (2006). Finite element modelling of shot peening process: Prediction of the compressive residual stresses, the plastic deformations and the surface integrity. *Materials Science and Engineering: A*, 426 (1-2), 173-180. doi: 10.1016/j.msea.2006.03.097.
22. Komvopulos, K. (1990). Konechno-jelementnoe reshenie kontaktnoj zadachi dlja uprugoplasticheskogo sloistogo poluprostranstva. *Sovremennoe Mashinostroenie: Trudy Amerikan. Obshhestva Inzhenerov*, 2, 165-176 [In Russian].
23. 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. doi:10.1016/j.jmatprotec.2019.02.031.
24. Chen, J. S., Desai, D. A., Heyns, 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. doi: 10.1177/1687814018818277.
25. Shalamov, A. V. (2005). Modelirovanie drobestrurnoj obrabotki metodom konechnyh jelementov. *Progressivnye Tehnologii v Mashinostroenii*, 73-79 [In Russian].
26. Horyk, O. V., Brykun, O. M., & Cherniak, R. Ye. (2016). Eksperymentalni doslidzhennia vplyvu shvydkosti i kuta ataky na tekhnichni pokaznyky drobestrurnevehoho ochyshchennia. *Vibratsii v Tekhnitsi ta Tekhnolohiiakh*, 3, 83-89 [In Ukrainian].
27. *ISO 8501-1 Preparation of steel substrates before application of paints and related products - Visual assessment of surface cleanliness - Part 1: Rust grades and preparation grades of uncoated steel substrates and of steel substrates after overall removal of previous coatings*.
28. *Rukovodstvo po zashhite ot korrozii stalnyh poverhnostej metodom okrashivanija*. (2014). Finljandija: Teknos Oy [In Russian].
29. Jegerton R. F. (2010). *Fizicheskie principy jelektronnoj mikroskopii: vvedenie v prosvechivajushhuju, rastrovuju i analiticheskiju jelektronnuju mikroskopiju*. (S. A. Ivanova, Trans). Moskva: Tehnosfera [In Russian].

Стаття надійшла до редакції 23.07.2020 р.

**Бібліографічний опис для цитування:**

Брикун О. М., Черняк Р. Є., Горик О. В. Методика проведення експериментальних досліджень впливу ударної дії дробинки на стан металевих поверхонь. *Вісник ПДАА*. 2020. № 3. С. 257-268.

© Брикун Олександр Миколайович, Черняк Роман Свєнійович, Горик Олексій Володимирович, 2020