

2024

SCIENTIFIC

Progress & Innovations



Vol. 27
Nº4



Scientific Progress & Innovations

УДК 001

До 2022 року журнал виходив під назвою
«Вісник Полтавської державної аграрної академії».
У 2023 році журнал переєстровано та перейменовано
на «Scientific Progress and Innovation»

Засновник, редакція, видавець:

Полтавський державний аграрний університет.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до
державного реєстру видавців, виготовлювачів і
розповсюджувачів видавничої продукції:
Серія ДК № 7933 від 13.09.2023 року

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого
засобу масової інформації:
Серія КВ № 25459-15399 ПР від 09.03.2023 року

Рік заснування: 1998

Мова видання:
українська, англійська

Рекомендовано до друку та поширення через мережу
Інтернет Вченою радою Полтавського державного
аграрного університету
(протокол № 5 від 24 грудня 2024 року)

**Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1554**
Ідентифікатор медіа – R30-03924

**Науковий журнал включено до категорії Б Переліку
наукових фахових видань України,**
у яких можуть публікуватися результати
дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів
доктора наук, кандидата наук та доктора філософії з
сільськогосподарських, ветеринарних та технічних
наук (наказ Міністерства освіти і науки України
№ 409 від 17.03.2020 р. та № 866 від 02.07.2020 р.)

*101 – Екологія; 162 – Біотехнології та біоінженерія;
201 – Агрономія; 202 – Захист і карантин рослин;
204 – Технологія виробництва і переробки продукції
тваринництва; 211 – Ветеринарна медицина;
212 – Ветеринарна гігієна, санітарія і експертиза;
208 – Агроінженерія*

**Журнал представлено у міжнародних
наукометричних базах даних, репозитаріях та
пошукових системах:**

Index Copernicus International, Bielefeld Academic Search Engine
(BASE), Directory of open access scholarly resources (ROAD),
Національна бібліотека України імені В.І.Вернадського,
Національна наукова сільськогосподарська бібліотека НААН,
Scientific & Scholarly Research Database (Scilit), Dimensions, Open
Ukrainian Citation Index (OUCI), Google Scholar, Fatcat, Wikidata,
Crossref, Електронний репозитарій Полтавського державного
аграрного університету

Адреса редакції:

Полтавський державний аграрний університет,
36003, вул. Сковороди, 1/3, м. Полтава, Україна
e-mail: visnyk@pdau.edu.ua
http://www.pdau.edu.ua
https://doi.org/10.31210

© Полтавський державний аграрний університет

UDC 001

Until 2022, the journal was published under the name
“Bulletin of Poltava State Agrarian Academy”.
In 2023, the journal was re-registered and renamed
“Scientific Progress and Innovation”

Founder, Editorial and Publisher:

Poltava State Agrarian University
Certificate of making a publishing house subject to the state
register of publishers, manufacturers and distributors of
publishing products:

Series DC No. 7933 of September 13, 2023

Certificate of state registration print mass media:
Series KV No. 25459-15399 PR of March 09, 2023

Year of foundation: 1998

Language edition:
Ukrainian, English

Recommended for printing and distribution via the Internet
by the Academic Council of Poltava State Agrarian
University
(Minutes No. 5 of December 24, 2024)

**Decision of the National Council
of Television and Radio Broadcasting of Ukraine No. 1554**
Media identifier – R30-03924

**The scientific journal is included in category B of the
List of scientific professional publications of Ukraine,**
in which the results of thesis papers for Doctor of Sciences,
Candidate of Sciences, and Ph.D degrees in agricultural,
veterinary, and technical sciences (Order of the Ministry of
Education and Science of Ukraine
No. 409 of March 17, 2020 and №886 July 02, 2020)

*101 – Ecology; 162 – Biotechnology and Bioengineering;
201 – Agronomy; 202 – Plant Protection and Quarantine;
204 – Technology of Production and Processing of Livestock
Products; 211 – Veterinary Medicine;
212 – Veterinary hygiene, sanitation and examination;
208 – Agricultural Engineering*

**The journal is presented international
scientometric databases, repositories
and scientific systems:**

Index Copernicus International, Bielefeld Academic Search Engine
(BASE), Directory of open access scholarly resources (ROAD),
Vernadsky National Library of Ukraine, National Scientific
Agricultural Library, Scientific & Scholarly Research Database
(Scilit), Dimensions, Open Ukrainian Citation Index (OUCI), Google
Scholar, Fatcat, Wikidata, Crossref, Electronic repository of Poltava
State Agrarian University

Editorial address:

Poltava State Agrarian University,
36003, 1/3, Skovorody str., Poltava, Ukraine
e-mail: visnyk@pdau.edu.ua
http://www.pdau.edu.ua
https://doi.org/10.31210

© Poltava State Agrarian University

Голова Редакційної ради

В. І. АРАНЧІЙ, к. екон. наук (Україна)

Головний редактор

О. О. ГОРБ, к. с.-г. наук (Україна)

Заступники голови Редакційної ради

М. С. САМОЙЛІК, д. екон. наук (Україна)

Т. О. ЧАЙКА, к. екон. наук (Україна)

Заступник головного редактора

П. В. ПИСАРЕНКО, д. с.-г. наук (Україна)

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

Редакційна колегія з галузі СІЛЬСЬКЕ ГОСПОДАРСТВО:

А. ДОЛГАНЬЧУК-ШЬРУДКА, док. габ. (Польща)

А. В. КАЛІНІЧЕНКО, д. с.-г. наук (Україна, Польща)

І. В. КОРОТКОВА, к. хім. наук (Україна)

В. Ю. КРИКУНОВА, к. хім. наук (Україна)

М. М. МАРЕНИЧ, д. с.-г. наук (Україна)

Н. М. ОПАРА, к. с.-г. наук (Україна)

В. М. ПИСАРЕНКО, д. с.-г. наук (Україна)

А. А. ПОЛІЩУК, д. с.-г. наук (Україна)

С. В. ПОСПЕЛОВ, д. с.-г. наук (Україна)

М. РАЙФУР, док. габ. (Польща)

Т. П. РОМАШКО, к. хім. наук (Україна)

А. О. ТАРАНЕНКО, к. с.-г. наук (Україна)

А. М. ШОСТЯ, д. с.-г. наук (Україна)

Редакційна колегія з галузі ВЕТЕРИНАРНА МЕДИЦИНА:

А. А. АНТИПОВ, к. вет. наук (Україна)

В. П. БЕРДНИК, д. вет. н. (Україна)

О. О. БОЙКО, к. біол. наук (Україна)

О. Б. ГРЕБЕНЬ, к. біол. наук (Україна)

В. О. ЄВСТАФ'ЄВА, д. вет. н. (Україна)

Б. П. КИРИЧКО, д. вет. н. (Україна)

Л. М. КОРЧАН, к. вет. наук (Україна)

О. В. КРУЧИНЕНКО, д. вет. наук (Україна)

Т. А. КУЗЬМІНА, к. біол. наук (Україна)

С. М. КУЛИНИЧ, д. вет. н. (Україна)

Т. П. ЛОКЕС-КРУПКА, к. вет. наук (Україна)

В. В. МЕЛЬНИЧУК, д. вет. наук (Україна)

О. Б. ПРИЙМА, к. вет. наук (Україна)

Редакційна колегія з галузі ТЕХНІЧНІ НАУКИ:

О. В. ГОРИК, д. тех. наук (Україна)

І. А. ДУДНИКОВ, к. тех. наук (Україна)

С. Б. КОВАЛЬЧУК, д. тех. наук (Україна)

О. М. КОСТЕНКО, д. тех. наук (Україна)

В. М. САКАЛО, к. тех. наук (Україна)

В. О. СУКМАНОВ, д. тех. наук (Україна)

В. О. ШЕЙЧЕНКО, д. тех. наук (Україна)

Члени Ради почесних членів:

А. БРЗОЗОВСКА, д. екон. наук (Польща)

З. ДАЦКО-ПІКІЄВІЧ, док. габ. (Польща)

О. ПЕРЕХОЖУК, д. екон. наук (Німеччина)

В. М. САМОРОДОВ, заслужений винахідник України (Україна)

Назва, концепція, зміст і дизайн «Scientific Progress & Innovations» є інтелектуальною власністю Полтавського державного аграрного університету й охороняється Законом України «Про авторські та суміжні права». Матеріали друкуються мовою оригіналу. У разі передруковування посилання на «Scientific Progress & Innovations» є обов'язковим.

Редакція залишає за собою право на редагування текстів, яке не змінює позиції автора.

Автор несе відповідальність за фактичний виклад матеріалу.

Chief of Editorial Council

V. I. ARANCHIY, Cand. Econ. Sci. (Ukraine)

Editor-in-chief

O. O. GORB, Cand. Agr. Sci. (Ukraine)

Deputy Head of Editorial Council

M. S. SAMOILIK, Dr. Econ. Sci. (Ukraine)

T. O. CHAIKA, Cand. Econ. Sci. Professor (Ukraine)

Deputy Chief Editor

P. V. PYSARENKO, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

MEMBERS OF THE EDITORIAL COUNCIL

Editorial board in the field of AGRICULTURE:

A. DOLHANCZUK-SRODKA, Dr. hab. (Poland)

A. V. KALINICHENKO, Dr. Econ. Sci. (Ukraine, Poland)

I. V. KOROTKOVA, Cand. Chem. Sci. (Ukraine)

V. YU. KRYKUNOVA, Cand. Chem. Sci. (Ukraine)

M. M. MARENYCH, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

N. M. OPARA, Cand. Agr. Sci. (Ukraine)

V. M. PYSARENKO, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

A. A. POLISHCHUK, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

S. V. POSPIELOV, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

M. RAJFUR, Dr. hab. (Poland)

T. P. ROMASHKO, Cand. Chem. Sci. (Ukraine)

A. O. TARANENKO, Cand. Agr. Sci. (Ukraine)

A. M. SHOSTIA, Dr. Agr. Sci. (Ukraine)

Editorial Board in the field of VETERINARY MEDICINE:

A. A. ANTIPOV, Cand. Vet. Sci. (Ukraine)

V. P. BERDNYK, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

O. O. BOYKO, Cand. Biol. Sci. (Ukraine)

O. B. GREBEN, Cand. Biol. Sci. (Ukraine)

V. O. YEVSATIEVA, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

B. P. KYRYCHKO, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

L. M. KORCHAN, Cand. Vet. Sci. (Ukraine)

O. V. KRUCHYNNENKO, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

T. A. KUZMINA, Cand. Biol. Sci. (Ukraine)

S. M. KULYNYCH, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

T. P. LOKES-KRUPKA, Cand. Vet. Sci. (Ukraine)

V. V. MELNYCHUK, Dr. Vet. Sci. (Ukraine)

O. B. PRIJMA, Cand. Vet. Sci. (Ukraine)

Editorial Board in the field of TECHNICAL SCIENCES:

O. V. HORYK, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

I. A. DUDNIKOV, Cand. Tech. Sci. (Ukraine)

S. B. KOVALCHUK, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

O. M. KOSTENKO, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

V. M. SAKALO, Cand. Tech. Sci. (Ukraine)

V. O. SUKMANOV, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

V. O. SHEICHENKO, Dr. Tech. Sci. (Ukraine)

Members of Council:

A. BRZOZOWSKA, Dr. Econ. Sci. (Poland)

Z. DACKO-PIKIEWICZ, Dr. hab. (Poland)

O. PEREKHOZHUK, Dr. Econ. Sci. (Germany)

V. M. SAMORODOV, Honored inventor of Ukraine (Ukraine)

The title, conception, content, and design of the "Scientific Progress & Innovations" are intellectual property of Poltava State Agrarian University and are protected by the Law of Ukraine "On Copyright and Related Rights." Materials are published in original language. In case of reprinting, the reference to the "Scientific Progress & Innovations" is compulsory.

Editorial stuff reserves the right to edit the texts without changing author's attitude.

The author is responsible for the factual account of material.

<i>Сільське господарство. Рослинництво</i>	<i>6</i>	<i>Agriculture. Plant growing</i>
Антонєць О. А., Силенко С. І., Силенко О. С., Барилко М. Г. Продуктивність сортів горошку посівного (ярого) (<i>Vicia sativa</i> L.) в умовах Південного Лісостепу України	6	Antonets O., Sylenko S., Sylenko O. S., Barylko M. Productivity of varieties of spring vetch (<i>Vicia sativa</i> L.) in the conditions of the Southern Forest Steppe of Ukraine
Бакалова А. В., Тимошук Т. М., Грицюк Н. В., Іващенко І. В. Стійкість сортів смородини чорної проти звичайного павутинного кліща в умовах Полісся України	11	Bakalova A., Tymoshchuk T., Gritsyuk N., Ivachenko I. Resistance of black currant varieties against the common spider mite in the Forest conditions of Ukraine
Антонєць О. А., Кочерга В. Я. Продуктивність кормових трав в умовах Південного Лісостепу України	16	Antonets O., Kocherga V. Productivity of fodder grasses in the conditions of the Southern Forest Steppe of Ukraine
Ляшенко В. В., Полежак Є. Ю. Врожайність пшениці твердої ярої в Лівобережному Лісостепу	21	Liashenko V., Polezhak Ye. Spring durum wheat yield capacity in the Left-Bank Forest-Steppe
Білявська Л. Г., Гарбузов Ю. Є. Перспективні неопушені сорти сої культурної	26	Biliavska L., Garbuzov Y. Promising non-pubescent varieties of cultivated soybean
Коба К. В., Маренич М. М. Ефективність фунгіцидів у різні фази розвитку материнських ліній кукурудзи та їх вплив на урожайність	31	Koba K., Marenych M. Effectiveness of fungicides at different stages of development of maize maternallinesandtheirimpactonyield
Поспєлова Г. Д., Коваленко Н. П., Поспєлов С. В., Литвиненко С. О., Сиваш К. С. Ефективність застосування біопрепаратів на пшениці озимій	37	Pospelova G., Kovalenko N., Pospelov S., Lytvynenko S., Syvash K. The effectiveness of using bio-preparations on winter wheat
Рожко І. І., Кулик М. І., Гончаров М. О. Біологічні особливості та основні аспекти технології вирощування квасолі звичайної (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) на насіння	43	Rozhko I., Kulyk M., Honcharov M. Biological features and main aspects of the growing technology of common beans (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) from seeds
Сєвідов В. П. Ефективність позакореневого підживлення нітратом калію на розвиток і продуктивність помідора (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)	53	Sievidov V. Effectiveness of potassium nitrate foliar fertilization on development and productivity of tomato (<i>Solanum lycopersicum</i> L.)
Харченко Л. Я., Харченко М. Ю., Поспєлова Г. Д., Поспєлов С. В., Лісовий В. М., Лавриненко І. Г. Оцінка стійкості зразків кукурудзи з колекції Устимівської дослідної станції рослинництва до основних шкідників та хвороб	59	Kharchenko L., Kharchenko M., Pospelova G., Pospelov S., Lisovyi V., Lavrynenko I. Evaluation of resistance of maize samples from the collection of the Ustymivka experimental plant production station to major pests and diseases
Юрченко С. О., Степаненко Б. В., Хачатурян А. Е. Урожайність гібридів кукурудзи на зерно залежно від їх групи стиглості	66	Yurchenko S., Stepanenko B., Khachaturian A. Grain yield of corn hybrids depends on their maturity group
Шевніков М. Я., Лотиш І. І. Конкурентоспроможність рослин сої до бур'янів залежно від строків сівби та норми висіву	72	Shevnikov M., Lotysh I. The competitiveness of soybean plants against weeds depending on the timing of sowing and the rate of sowing
Антонєць О. А., Купріянова Т. М., Антонєць М. О. Кормова і харчова якість сортів картоплі	79	Antonets O., Kupriianova T., Antonets M. Feed and food quality of potato varieties
Четверіков Б. В., Бабій Л. В. Визначення пошкоджених культур за допомогою використання космічних знімків у точному землеробстві	84	Chetverikov B., Babiy L. Definition of damaged crops using satellite imagery in precision agriculture
<i>Екологія</i>	<i>91</i>	<i>Ecology</i>
Шевчук С. М., Глухота В. О. Просторово-часові трансформації урболандшафтів міста Полтави	91	Shevchuk S., Hlukhota V. Space-time transformations of urban landscapes of the city of Poltava
Романчук Л. Д., Валерко Р. А. Органічне сільське господарство як чинник впливу на рівень нітратів у воді з децентралізованих джерел сільських населених пунктів	98	Romanchuk L., Valerko R. Organic agriculture as a factor influence on the level of nitrates in water from non-centralized sources of rural settlements
<i>Сільське господарство. Тваринництво</i>	<i>105</i>	<i>Agriculture. Animal breeding</i>
Качанов І. О., Побережець Ю. М. Вплив пробіотичної кормової добавки на ріст молодяку перепелів	105	Kachanov I., Poberezhets Y. The effect of a probiotic feed additive on the growth of young quails
Сичов М. Ю., Пітера В. О., Ільчук І. І., Баланчук І. М., Голубєва Т. А., Вознюк Р. Р., Уманець Д. П., Шостя А. М., Усенко С. О. Огляд ролі глутамату та глутаміну в сучасному свинарстві	109	Sychov M., Pitera V., Ilchuk I. I., Balanchuk I. M., Holubieva T., Vozniuk R., Umanets D., Shostia A. M., Usenko S. A review on the role of glutamate and glutamine in modern swine production
<i>Ветеринарна медицина</i>	<i>115</i>	<i>Veterinary medicine</i>
Євстаф'єва В. О., Плахотна Є. В., Мельничук В. В., Юськів І. Д., Корчан Л. М., Канівець Н. С., Слинько В. Г. Особливості перебігу акарозів у собак, викликаних паразитуванням акариформних кліщів	115	Yevstafieva V., Plakhotna Y., Melnychuk V., Yuskiv I., Korchan L., Kanivets N., Slynko V. Characteristics of the course of acaroses in dogs caused by parasitism of acariform ticks
Альжобурі Н. А., Джавад М., Алхеснаві А. Ш. М., Алшімрі А., Алалі Ф. Поширення ендопаразитозів курей у провінції Кербела, Ірак	120	Aljoboury N. A., Jawad M., Alhesnawi A. Sh. M., Alshimry A., Alali F. Prevalence of internal parasites in local chicken in Karbala province, Iraq
Кручиненко О. В., Петренко М. О., Омельченко Г. О., Авраменко Н. О., Натягла І. В. Поширення сказу тварин у Полтавській, Кіровоградській та Сумській областях	126	Kruchynenko O., Petrenko M., Omelchenko H., Avramenko N., Natiahla I. Spread of animal rabies in Poltava, Kirovohrad and Sumy regions
Левицька В. А., Кравченко А. І. Ефективність антигельмінтної терапії за елюстронгілозу котів	132	Levytska V., Kravchenko A. Effectiveness of anthelmintic therapy in the treatment of aelurostrongylosis in cats
Лівощенко Є. М., Павловський В. В. Особливості морфологічних показників крові у перепелів	138	Livoshchenko Ye., Pavlovskiy V. Peculiarities of morphological indicators of blood in quails

Кітченко А. С. Випробування ефективності удосконаленого способу копроовоскопії за шлунково-кишкових нематодозів собак	145	Kitichenko A. Testing the efficiency of the improved method of coproovoscopy for gastrointestinal nematodoses of dogs
Медвідь О. О., Щербаківа Н. С., Передера С. Б. Доцільність застосування сертифікування щодо традиційних харчових продуктів відповідно до географічного походження	151	Medvid O., Shcherbakova N., Peredera S. Applicability of certification regarding traditional food products according to geographical origin
Євстаф'єва В. О., Натяглий О. М. Порівняльна ефективність методів кількісної копроовоскопічної діагностики стронгілідозів травного тракту овець	156	Yevstafieva V., Natiahlyi O. Comparative efficiency of methods of quantitative coproovoscopic diagnostics of strongylidoses of the digestive tract of sheep
Погорелова Г. М. Порівняльна ефективність методів лабораторної діагностики токсокарозу собак	161	Pohorelova H. Comparative efficiency of laboratory diagnostic methods of dog toxocarosis
Пономаренко В. М. Ефективність способу кількісної копроовоскопічної діагностики нематодірозу великої рогатої худоби	166	Ponomarenko V. Efficiency of the method of quantitative coproovoscopic diagnostic of nematodirosis in cattle
Левицька В. А., Полюхович В. І. Оцінка ефективності досліджень на антиген у діагностиці дирофіляріозу собак	171	Levytska V., Poliukhovych V. Evaluation of the effectiveness of antigen testing in the diagnosis of canine dirofilariasis
Суворов Р. С., Мельничук В. В. Ефективність удосконаленого способу лабораторної діагностики цистоізоспорозу собак	176	Suvorov R., Melnychuk V. Efficiency of the improved method of laboratory diagnostics of canine cystoisosporosis
Ромазан І. В., Турко І. Б. Бактерицидна ефективність розробленого дезінфектанта «РабітДез» у виробничих умовах кролегосподарства	181	Romazan I., Turko I. Bactericidal effectiveness of the developed disinfectant "RabbitDez" in the production conditions of a rabbit farm
Технічні науки		187
Кобець А. С., Алієв Е. Б., Теслюк Г. В., Золотовська О. В. Передумови інжинірингу біонічних технічних засобів обробітку ґрунту	187	Kobets A., Aliiev E., Tesliuk H., Zolotovska O. Prerequisites of the engineering of bionic technical tools for soil processing
Горик О. В., Брикун О. М., Геращенко Є. Ю., Тихоненко В. В. Основи енергетичного балансу ударного контакту металевої дробинки з пружно-пластичним півпростором	200	Goryk O., Brykun O., Herashchenko Ye., Tykhonenko V. Basics of energy balance of impact contact of metal shot with elastic-plastic half-space

Basics of energy balance of impact contact of metal shot with elastic-plastic half-space

O. Goryk | O. Brykun | Ye. Herashchenko | V. Tykhonenko

Article info

Correspondence Author

O. Brykun

E-mail:

oleksandr.brykun@pdaa.edu.ua

Poltava State Agrarian

University,

1/3, Skovorody Str.,

Poltava, 36003,

Ukraine

Citation: Goryk, O., Brykun, O., Herashchenko, Ye., & Tykhonenko, V. (2024). Basics of energy balance of impact contact of metal shot with elastic-plastic half-space. *Scientific Progress & Innovations*, 27 (4), 200–207. doi: 10.31210/spi2024.27.04.33

The study of abrasive wear processes, mechanical treatment of product surfaces in the construction, agricultural, and mechanical engineering industries by a mass high-speed jet (flow) of working solid particles for cleaning the surface layer or strengthening is based on one or another theoretical model of interaction between a separate spherical body (shot) and a deformable flat body (barrier). The barrier creates plastic resistance to penetration of the attacking ball. In this case, the physical nature of the phenomena of impact contact of a metal ball (shot) with an elastic-plastic half-space is of interest. The process still remains poorly understood. In particular, the relationship of these phenomena with the energy balance of the process, as the main criterion for influencing the results of the dynamic interaction of contacting bodies. An analysis of the energy balance of the interaction of a separate attacking shot with the surface of a metal half-space is proposed. This makes it possible to create reliable models for calculating and optimizing the main parameters of the impact of an air-abrasive torch (a mass of shots) on the state of free surfaces of products. Using the interaction diagram of the ball with a flat metal surface, it is possible to analytically determine the dynamic parameters of the mechanical properties of the metal being processed, given the normal force of the ball (pellet) impact on the attacked surface and the geometric dimensions of the dimple formed by the pellet, as well as the thermodynamic state of the local volume of the attacked body due to plastic deformation. The proposed physical model-diagram of the pellet impact on the treated surface, the essence of which is the rotational-translational motion of the pellet, makes it possible, based on the energy balance of the system, to determine the movement, speed, acceleration, as well as the forces of normal and tangential pressure of the pellet on the attacked surface during the formation of a trace (dimple), as well as the power consumption of the attacking pellet. The proposed model of impact when the pellet moves along the normal to the metal half-space, which has elastic and plastic properties, makes it possible to determine the dynamic parameters of the mechanical properties of the metal of a particular product. In this case, the initial data for performing analytical calculations are: the diameter of the sphere described around the pellet, the attack speed of the treated surface and the geometric dimensions of the groove.

Keywords: shot blasting, energy balance, kinetic energy, elastic and plastic deformation, process parameters.

Основи енергетичного балансу ударного контакту металевої дробинки з пружно-пластичним півпростором

О. В. Горик | О. М. Брикун | Є. Ю. Геращенко | В. В. Тихоненко

Полтавський державний
аграрний університет
м. Полтава,
Україна

В основі дослідження процесів абразивного зношування, механічної обробки поверхонь виробів у будівельній, сільськогосподарській, машинобудівній галузях масовим швидкісним струменем (потоком) робочих твердих частинок для очищення поверхневого шару або зміцнення лежить та чи інша теоретична модель взаємодії окремого сферичного тіла (дробинки) із деформівним плоским тілом (перепороною), який створює пластичний опір проникненню атакуючої кульки. Інтерес у цьому випадку викликає фізична природа явищ ударного контакту металевої кульки (дробинки) з пружно-пластичним півпростором, що досі залишається мало вивченою, зокрема, ув'язка цих явищ з енергетичним балансом процесу, як основного критерію впливу на наслідкові результати динамічної взаємодії контактуючих тіл. Пропонується аналіз енергетичного балансу взаємодії окремої атакуючої дробинки з поверхнею металевого півпростору, що розкриває можливості створення достовірних моделей розрахунку та оптимізації основних параметрів впливу дії повітряно-абразивного факела (масою дробинки) на стан вільних поверхонь виробів. Використовуючи схему взаємодії кульки із плоскою металевою поверхнею, можна аналітичним шляхом визначити динамічні параметри механічних показників металу, що обробляється, маючи нормальне зусилля впливу кульки (дробинки) на атаквану поверхню та геометричні розміри утвореної дробинкою лунки, а також термодинамічний стан локального об'єму атакваного тіла внаслідок пластичної деформації. Запропонована фізична модель-схема впливу дробинки на оброблювану поверхню, суттю якої є обертально-поступальний рух дробинки, дає можливість, на основі енергетичного балансу системи, визначити переміщення, швидкості, прискорення, а також сили нормального і тангенціального тиску дробинки на атаквану поверхню в процесі формування сліду (лунки), а також витрати потужності атакуючої дробинки. Запропонована модель впливу при переміщенні дробинки по нормалі до металевого півпростору, що володіє пружними і пластичними властивостями, дозволяє визначати динамічні параметри механічних показників металу того чи іншого виробу. При цьому вихідними даними для виконання аналітичних розрахунків є: діаметр сфери, описаної навколо дробинки, швидкість атаки оброблюваної поверхні та геометричні розміри сліду.

Ключові слова: обробка дробом, енергетичний баланс, кінетична енергія, пружна і пластична деформація, параметри процесу.

Бібліографічний опис для цитування: Горик О. В., Брикун О. М., Геращенко Є. Ю., Тихоненко В. В. Основи енергетичного балансу ударного контакту металевої дробинки з пружно-пластичним півпростором. *Scientific Progress & Innovations*. 2024. № 27 (4). С. 200–207.

Вступ

Історія розвитку техніки свідчить про те, що в ряді випадків основною причиною зниження довговічності машин та механізмів є знос під час того чи іншого технологічного процесу металевих поверхонь внаслідок їх контакту з твердими рухомими абразивними частинками [1, 2]. Ця проблема, зокрема ерозійне зношування, є характерною для більшості машин і механізмів, особливо в будівельній, сільськогосподарській, машинобудівній галузях [3]. З іншого боку, процес масової швидкісної дії потоку металевих гранул-дробинок широко використовується в згаданих сферах для підготовки знежирених поверхонь металевих виробів перед нанесенням на них захисних покриттів [4, 5], а також для зміцнення поверхневого шару [6].

Незважаючи на ефективність абразивної обробки поверхні металевих виробів цей технологічний процес є одним з найменш вивчених. Метод механічної обробки не в достатній мірі забезпечений теоретичними і експериментальними дослідженнями, що стримує його широке використання. Проблемними питаннями залишаються контактні явища, механізм руйнування поверхневого шару, механіка утворення мікроскопічної стружки, фізичні причини зношування абразиву, визначення раціональних технологічних режимів та ін. Інженерно-технічні працівники підприємств не достатньо мають у своєму розпорядженні необхідну технічну інформацію щодо вибору параметрів та режимів обробки, конструкцій струминних апаратів, наявного технологічного обладнання. Звичайно, такий стан є стримуючим фактором для успішного широкого використання в різних галузях, особливо у машинобудуванні і будівництві, технологічних процесів механічної обробки металевих поверхонь виробів, пріоритетним серед яких є дробоструміння.

Відомо багато робіт вітчизняних та зарубіжних авторів, у яких викладено результати теоретичних та експериментальних досліджень дуже складного процесу абразивної обробки металевих виробів спрямованим струменем вільних металевих гранул, що розганяються через спеціально спрофільовані канали (сопла) за допомогою стисненого повітря. Ці роботи присвячені в основному вивченню механізму взаємодії окремої атакуючої дробинки з металевою поверхнею, що базуються на різних підходах та моделях: чисельних [7–10], аналітичних пружно-пластичних [11–14], в'язко-пружних [15] з подальшим узагальненням такого впливу на дію повітряно-абразивного факела, в результаті чого настає руйнування (очищення) поверхневого шару [16–18]. Що стосується аспектів процесу руйнування при масовій дії струминного потоку частинок, цікавість викликає 3D моделювання процесу [19], аналітична модель для прогнозування рельєфу обробленої поверхні [20] та оцінка критеріїв якості поверхні виробів [21]. Автори таких досліджень особливо увагу приділяли встановленню впливу технологічних режимів процесу дробоструміння на якість обробленої поверхні, на продуктивність обробки, на ступінь шаржування обробленої поверхні уламками дробу,

на стійкість абразивних металевих гранул. Проведені дослідження дозволяють встановлювати раціональний гранулометричний склад дробу, характер розподілу залишкових напружень у поверхневому шарі обробленої деталі, ступінь нагрівання оброблюваної поверхні в зоні дії дробинки, раціональні технологічні режими очищення знежирених поверхонь металевих виробів та інші параметри процесу.

Однак, незважаючи на велику різноманітність проведених досліджень, фізична природа явищ ударного контакту металевої кульки (дробинки) з пружно-пластичним півпростором потребує подальшого дослідження, зокрема ув'язки цих явищ з енергетичним балансом процесу, як основного критерію впливу на наслідкові результати динамічної взаємодії контактуючих тіл.

Мета дослідження

Мета роботи полягала у проведенні аналізу енергетичного балансу взаємодії окремої атакуючої дробинки з поверхнею металевого півпростору, як основу побудови достовірних моделей визначення розмірів утвореного дробинкою сліду на атакуючій поверхні та узагальнення і поширення результатів на розробку методів розрахунку і оптимізації основних параметрів впливу дії повітряно-абразивного факела (масою дробинки) на стан вільних поверхонь виробів.

Основні завдання роботи:

- розробити модель взаємодії окремої кульки (дробинки), що атакує поверхню металевого півпростору, який володіє пружними і пластичними властивостями;

- на основі складеного енергетичного балансу системи, визначити геометрію сліду, швидкості та сили тиску кульки (дробинки) на оброблювану поверхню в процесі формування сліду (лунки), а також витрати потужності атакуючої дробинки.

Матеріали і методи

Для проведення дослідження енергетичного балансу взаємодії окремої атакуючої кульки з поверхнею металевого півпростору використовували плоскі зразки з вуглецевої сталі, алюмінієвих сплавів, які широко використовуються у виробництві конструкцій машинобудівних виробів. Товщина прямокутних зразків приймалася різною для аналізу можливого впливу на результати неконтактних ефектів. Для імітації удару одиничного атакуючого тіла по дослідному зразку використовувалися абразивні матеріали з різними параметрами (діаметр, маса, форма), зокрема, сталеві та керамічні кульки різної крупності, що дозволило моделювати вплив різних умов на результати експерименту. Контроль нормованої маси кульки здійснювалося на електронних вагах. Засобом для надання початкової швидкості кульці можна використовували пневматичний пістолет, що попередньо тестування на предмет встановлення швидкості вильоту кульки з дула.

Реєстрація траєкторій та швидкості дробинки під час удару здійснювалося із застосуванням високошвидкісної камери, а вимірювання залишкових деформацій на поверхні металу за допомогою 3D-сканування.

Дані, отримані в ході чисельного моделювання та експериментів, піддавалися статистичному аналізу для оцінки достовірності результатів та визначення факторів, які найбільше впливають на складові енергетичного балансу взаємодії.

Результати та їх обговорення

Поверхня належить півпростору, який має пружні та пластичні властивості. Дробинка атакує поверхню

зі швидкістю v під кутом α та після проникнення в поверхневий шар на деяку глибину h рикошетує зі швидкістю u під кутом β (рис. 1, а). Припускаємо, що на активній стадії удару сферична частинка не деформується, а швидкість удару істотно менша за швидкість поширення збурень у вигляді пружних хвиль стиснення і зсуву в матеріалі [22].

Дотик (початок контакту) атакуючої дробинки з поверхнею відбувається у точці P (положення 1), а кінець контакту дробинки, що рикошетує, від поверхні в умовній точці Z (положення 3).

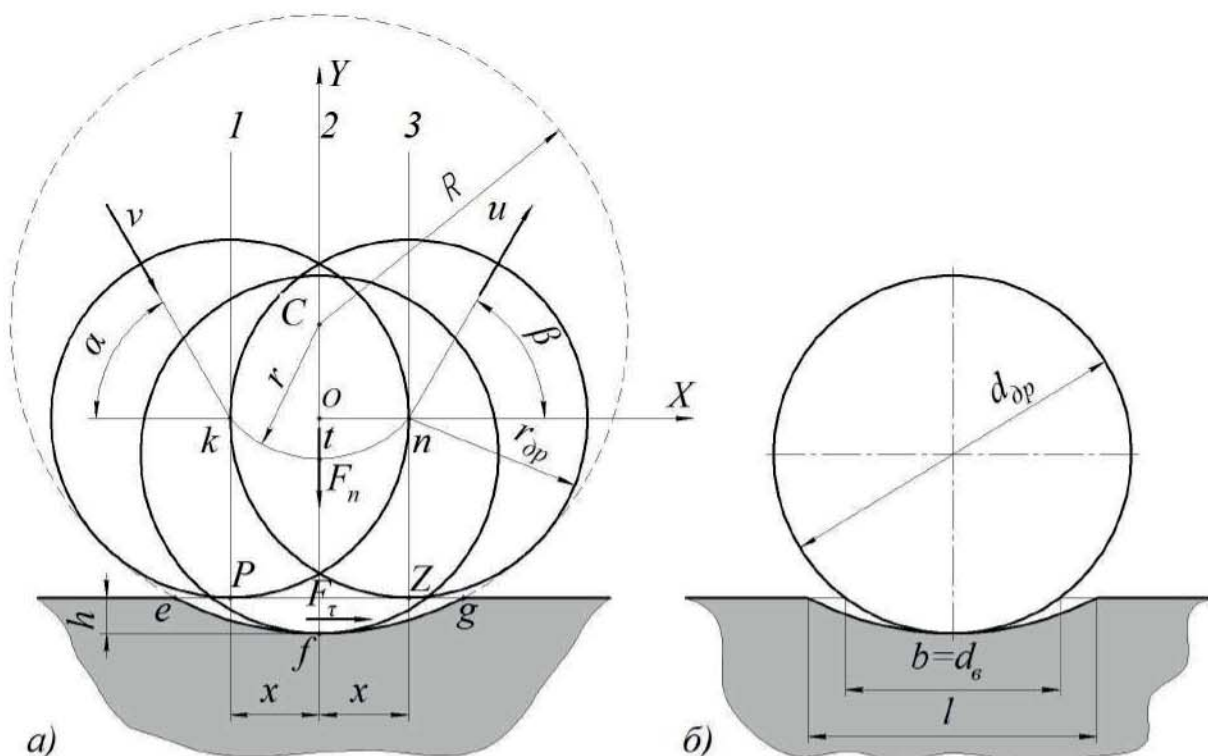


Рис. 1. Схема взаємодії жорсткої дробинки з металевим півпростором

У процесі взаємодії з поверхнею півпростору дробинка здійснює поступально-обертальний рух і проникає в неї на максимальну глибину h у точці f (положення 2), повертаючись при цьому на деякий невеликий кут навколо довільного миттєвого центру швидкостей C .

Вважатимемо що, своєю зовнішньою поверхнею дробинка діаметром $d_{dp} = d$ деформує металеву поверхню за деякою дугою efg , радіус якої R з центром у точці C . Центр тяжіння дробинки переміщується по еквідистантній дузі ktn радіусом r і проходить при цьому за напрямом абсциси прямокутної системи координат XOY відстань $2x$.

Після зіткнення з поверхнею в точці P дробинка різко змінює свою прямолінійну траєкторію атаки на криволінійну траєкторію взаємодії з півпростором, унаслідок опору металу, що деформується. Криво-

лінійна траєкторія переміщення дробинки призводить до утворення на металевій поверхні відбитку (сліду) в формі дещо подовженої за напрямом атаки лунки. При досягненні точки n траєкторія руху дробинки знову стає прямолінійною траєкто-рією рикошету.

Враховуючи швидкоплинність процесу взаємодії, початкова швидкість проникнення дробинки в півпростір v_0 дорівнює за модулем швидкості атаки v , а кінцева швидкість утворення лунки в поверхневому шарі u_0 дорівнює за модулем швидкості рикошетування u .

Визначимо деякі геометричні параметри ударного контакту дробинки із пружно-пластичним півпростором.

Розглядаючи сектор із центром C (рис. 1), можна констатувати, що між радіусом сектора r (дуги переміщення центру мас дробинки), глибиною

сегмента h (проникнення) та половиною хорди x (тангенціальне переміщення) існує функціональна геометрична залежність:

$$x^2 = r^2 - (r - h)^2 = 2hr - h^2. \quad (1)$$

Числові значення величин x і h можна визначити за відомими аналітичними залежностями, для певних умов контакту або виходячи із енергетичного балансу, що буде продемонстровано далі. Їх можна встановити й шляхом натурних вимірів лунки, що залишає дробинка на атакованій поверхні.

При цьому необхідно враховувати, що

$$2x = l - b, \quad (2)$$

де l – довжина лунки, а b – найбільша її ширина в поперечному перерізі, що дорівнює діаметру d_s відбитка (сліду), який залишає дробинка діаметром d_{dp} при заглибленні по нормалі в поверхню на величину h (рис. 1, б).

Радіус r дуги ktn , якою переміщається центр мас дробинки (рис. 1) визначаємо із (1)

$$r = (x^2 + h^2) / (2h). \quad (3)$$

Радіус R дуги efg , за якою відбувається контакт зовнішньої поверхні дробинки з поверхнею півпростору, дорівнює

$$R = r + r_{dp}, \quad (4)$$

де $r_{dp} = 0,5d_{dp}$ – радіус сфери, описаної навколо дробинки.

Схему пружно-пластичної взаємодії дробинки діаметром d_{dp} і масою m при нормальному ($\alpha = 90^\circ$) зануренню вздовж нормалі до площини, покажемо на **рисунку 2**.

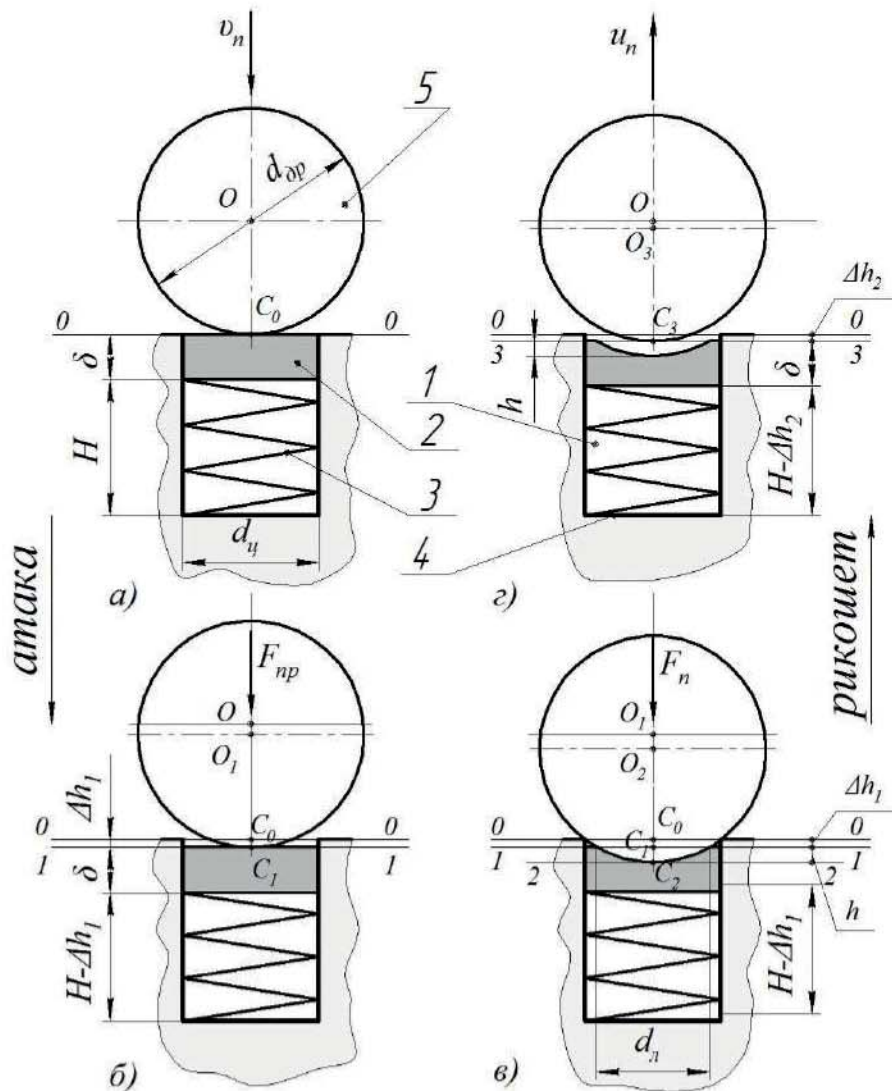


Рис. 2. Схема взаємодії дробинки з плоскою металевою поверхнею:
а – дотик при атаці; б – пружне деформування; в – пластичне деформування;
г – пружне відновлення при рикошеті

Представимо атакований зі швидкістю по нормалі $v_n = v \sin \alpha$, жорсткою дробинкою поверхневий шар металу у вигляді локального циліндра 1 діаметром d_y і висотою H , в якому переміщається умовний поршень 2, що має пластичні властивості. Поршень переміщається вгору-вниз щодо стінки циліндра

з тертя і спирається на пружину 3, яка розміщена між поршнем 2 і глухою основою 4 циліндра 1. При атаці дробинки 5 на поршень 2, тобто на поверхню, пружина пружно стискається. Пружина деформується на певну величину, що визначається межею пружності. Досягши максимального опору пружини, дробинка починає проникати в тіло поршня, який має пластичні властивості.

При постійному питомому тиску p , величина якого визначається межею текучості атакованого матеріалу, що знаходиться в тривісному напруженому стані, дробинка поступово утворює в тілі поршня лунку у вигляді сферичного сегмента глибиною h та діаметром відбитка d_e .

Витративши кінематичну енергію на пластичне деформування поверхневого шару поршня, дробинка зупиняється, пружина починає повертати поршню частину накопиченої потенційної енергії та, випрямляючись, змушує дробинку рикошетувати.

Подана схема взаємодії відповідає пружним і пластичним властивостям поверхневого шару атакованого матеріалу і дає можливість розрахувати роботу, яку виконує дробинка в процесі його деформування. При цьому враховуємо, що пружна деформація передуює пластичній, і те, що в процесі утворення лунки кінетична енергія атакуючої дробинки витрачається також на збільшення поверхневої енергії і на нагрівання зони контакту.

Розглянемо окремі фази впливу жорсткої дробинки на вихідну складову частину пружно-пластичної поверхні, виконану у вигляді пластичного поршня розміщеного в циліндрі на пружні (рис. 2).

Фаза 1 (рис. 2, а). Початковий рівень (0-0) верхньої площини поршня збігається з атакованою поверхнею. Дробинка 5 атакує поршень по нормалі в декількох точці C_0 зі швидкістю v_n .

Фаза 2 (рис. 2, б). Дробинка продовжує свій рух по нормалі до поверхні, протягом якого вона переміщає поршень 2 на відстань Δh_1 з точки C_0 в точку C_1 (рівень 1-1) на нерухомому циліндрі. При цьому поршень стискає пружину 3 до довжини $H - \Delta h_1$. У процесі руху дробинки пружина чинить опір, що постійно збільшується. У положенні 1-1 верхньої площини поршня сила опору пружини досягає максимального значення F_{np} . Стиснення пружини припиняється. Витративши частину своєї кінетичної енергії на стиск пружини і на тертя поршня об стінки циліндра, дробинка продовжує свій рух вниз уже при нерухомому поршні. При цьому нерухомі витки пружини мають напружений стан, приблизно еквівалентний межі текучості

матеріалу поршня.

Фаза 3 (рис. 2, в). Протягом цієї фази дробинка змінює поверхневий шар поршня при постійному питомому усередненому тиску p . Питомий тиск відповідає межі текучості пластичного металу, що деформується. При цьому сила опору руху дробинки F_n збільшується із збільшенням поточної площі відбитка f_e і його діаметра, що викликано зростанням глибини проникнення дробинки. Цю силу можна уявити як добуток

$$F_n = p f_e. \quad (5)$$

Згідно з даними [23] проникнення кульового пуансону в пластично деформівний півпростір, що в принципі має місце в нашому випадку, відбувається при постійному питомому тиску, величина якого визначається механічними властивостями металу, що чинить опір.

У процесі пластичного деформування поверхні (формування лунки) нижня контурна точка дробинки переміщається вниз з положення C_1 у положення C_2 , займаючи рівень 2-2. Пружина протягом третьої фази не змінює свою довжину $(H - \Delta h_1)$, що була досягнута в другій фазі.

Витративши частину своєї кінетичної енергії на пластичне деформування поршня (поверхневого шару атакованого металу), дробинка зупиняється. Унаслідок дії дробинки на площині поршня утворюється лунка (відбиток) діаметром $d_x = d_e$ та глибиною h .

Фаза 4 (рис. 2, г). Ця фаза завершує взаємодію дробинки з півпростором. Тепер вільна від тиску стиснута пружина, що має кінетичну енергію, починає розпрямлятися, переміщуючи поршень вгору на величину $\Delta h_1 - \Delta h_2$. Таким рухом пружина викидає дробинку вгору зі швидкістю рикошету u_n , яку можна пов'язати зі швидкістю атаки v наступною залежністю:

$$u_n = k_e v_n, \quad (6)$$

де k_e – коефіцієнт відновлення, який зазвичай встановлюють для нормальних складових швидкостей.

Верхня площина поршня займає положення, що відповідає рівню 3-3, щодо нерухомого циліндра. Точка C_3 відповідає знаходженню поверхні дробинки на прямій 3-3 у процесі рикошету.

Як бачимо, положення поршня після завершення контакту дробинки з оброблюваною поверхнею не відповідає вихідному положенню на 1-ій фазі. Верхня площина поршня зупиняється на рівні 3-3, яка дещо нижча за початковий рівень 0-0 на величину Δh_2 . Це свідчить про те, що сила тертя поршня об стінки циліндра перевищує спадаючу силу розпрямлення пружини. Можна вважати, що об'єм

металу, що пластично деформується, навколо утвореної лунки гальмує повне повернення дробинки енергії пружної деформації матеріалу півпростору. Таким чином в результаті багаторазового пульсуючого впливу потоку металевих гранул (дробинки) на поверхню відбувається накопичення потенційної енергії в поверхневому шарі металу. Цей процес накопичення потенційної енергії називається активуванням поверхні.

Основні співвідношення процесу взаємодії кулястої частинки з пружно-пластичним півпростором (можливу силу вдавлювання індентора і глибину лунки, по значеннях яких можна судити про твердість, а отже і про пружно-пластичний коефіцієнт, що характеризує властивості матеріалу атакованої поверхні визначимо виходячи з енергетичного балансу динамічного контакту тіл [24–25]. У кожен момент часу t повна енергія системи $W(t)$, яка складається з жорсткого сферичного тіла і пружно-пластичного півпростору, є сталою величиною і дорівнює сумі миттєвих значень кінетичної енергії тіла $T(t)$ і роботи сили інерції $A(t)$, витраченої на деформацію півпростору:

$$W(t) = T(t) + A(t) = 0,5mv_0^2 = \text{const}. \quad (7)$$

де m , v_0 – відповідно маса і початкова швидкість атаки дробинки.

У випадку нормальної атаки дробинки (по нормалі до атакованої площини) складові співвідношення (7) мають вид:

$$T(t) = \frac{1}{2}mv_n^2(t) = \frac{1}{2}m\left(\frac{dy(t)}{dt}\right)^2;$$

$$A(t) = \int_0^y F(y)dy = \int_0^y kydy = \frac{1}{2}ky^2;$$

де v_n – поточна швидкість дробинки по нормалі до атакованої площини;

$y = h$ – поточна ордината глибини занурення дробинки (глибина лунки);

k – пружно-пластичний коефіцієнт пропорційності атакованого матеріалу [12].

Тоді співвідношення (7) отримаємо у такому вигляді:

$$\frac{1}{2}m\left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \frac{1}{2}ky^2 = \frac{1}{2}mv_{0n}^2, \quad (8)$$

із якого швидкість дробинки, як індентора, в нормальному напрямку:

$$\frac{dy}{dt} = v_n(t) = \sqrt{v_{0n}^2 - \frac{1}{m}ky^2} = v_{0n} \cos(\sqrt{k/m} \cdot t). \quad (9)$$

При максимальному заглибленні тіла в пів-простір, коли $t = t_h$:

$$\frac{dy(t_h)}{dt} = 0, \quad y(t_h) = y_{\max} = h. \quad (10)$$

З (10), враховуючи (9), отримаємо значення максимального проникнення (занурення) дробинки в півпростір:

$$h = y_{\max} = \left(\frac{mv_{0n}^2}{2k}\right)^{1/2} = \left(T_0 \frac{2}{k}\right)^{1/2} = v_{0n} / \sqrt{k/m}. \quad (11)$$

Максимальна сила вдавлювання дробинки в півпростір:

$$F_{\max} = ky_{\max} = (2kT_0)^{1/2} = v_{0n} \sqrt{km}. \quad (12)$$

Доцільно відмітити, що розділивши максимальну силу вдавлювання (12) на площу сферичного відбитку сліду $f_s = \pi(d_{op}h_s - h_s^2)$, залишеного дробинкою-індентором, отримаємо пластичну твердість атакованого металу.

Отже, на основі енергетичного балансу атакуючого і атакованого тіл отримано основні співвідношення пружно-пластичної моделі ударної взаємодії абсолютно жорсткої сферичної частинки (дробинки) з пружно-пластичним півпростором, при атаці по нормалі.

При атаці під кутом α (рис. 1) робота сил інерції (7) будемо визначати через тангенціальну силу опору F_τ .

Для визначення сили, з якою дробинка, відповідно до схеми взаємодії (рис. 1), тисне на атакуючу поверхню, розглянемо зміну швидкості центру ваги дробинки при переміщенні по дузі ktn радіусом r , приймаючи допущення про її симетричність.

Відомо, що початкова швидкість дробинки $v_0 = v$, (швидкість атаки), і кінцева контактна швидкість u (швидкість рикошету), пов'язані між собою залежністю (6) без індексів ($u = k_v v$) при прийнятому припущенні, що кут атаки α дорівнює куту рикошету β .

Отримане поточне значення швидкості центру мас дробинки V дозволяє визначити швидкість v_p переміщення точки нормального контакту дробинки з півпростором по круговій траєкторії efg . Для цього скористаємося співвідношенням:

$$v/r = v_p/R, \quad (13)$$

де r і R – радіуси дуг ktn і efg відповідно (рис. 1, а).

У процесі утворення лунки (сліду) довжиною l і шириною $b = d_n$ (рис. 1, б), рухаючись по колу, дробинка тисне на поверхню зі змінною відцентровою силою:

$$F_n = mv^2 / R. \quad (14)$$

Відцентрова сила нормального тиску F_n дробинки на поверхню викликає появу тангенціальної сили абразивного руйнування F_r , що призводить до утворення на поверхні борозенки (лунки) внаслідок пластичних деформацій та мікрорізання поверхневого шару:

$$F_r = F_n f, \quad (15)$$

де f – коефіцієнт абразивного руйнування, величина якого за нашими дослідженнями сягає 0,3...0,4 для найбільш поширених режимів дробоструміння вуглецевих сталей.

Роботу деформування $A_r(t)$ поверхневого шару виконує тангенціальна сила F_r . Тому на підставі залежностей (13-15) можна записати

$$A_r(t) = \int_0^t F_r dl = f \frac{m}{R_0} \int_0^t v_p^2 dl \quad \text{або} \quad A_r(t) = f \frac{m}{r} \int_0^t v^2 dl. \quad (16)$$

Функція швидкості v (16) визначається по відомій пружно-пластичній моделі контактної удару [12].

Використовуючи схему взаємодії дробинки діаметром d із плоскою металевою поверхнею на основі енергетичного балансу можна аналітичним шляхом визначити динамічні параметри механічних показників металу, що обробляється, маючи нормальне зусилля F_n впливу дробинки на атаковану поверхню та геометричні розміри утвореної дробинкою лунки, а також термодинамічний стан локального об'єму атакованого тіла внаслідок пластичної деформації.

Висновки

Запропонована фізична модель-схема впливу дробинки на оброблювану поверхню, суттю якої є обертально-поступальний рух дробинки, дає можливість, на основі енергетичного балансу системи, визначити переміщення, швидкості, прискорення, а також сили нормального і тангенціального тиску дробинки на оброблювану поверхню в процесі формування сліду (лунки), а також витрати потужності атакуючої дробинки.

Запропонована модель впливу при переміщенні дробинки діаметром d та масою m по нормалі до металевого півпростору, що володіє пружними і пластичними властивостями, дозволяє визначити динамічні параметри механічних показників металу виробу. При цьому вихідними даними для виконання аналітичних розрахунків є: діаметр сфери, описаної навколо дробинки, швидкість атаки оброблюваної поверхні та геометричні розміри сліду.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження пов'язані з проведенням чергових лабораторних досліджень взаємодії дробинки різних

діаметрів і матеріалів, що мають різні механічні властивості для підтвердження достовірності розробленої моделі-схеми, порівняння отриманих аналітичних результатів з експериментальними даними. Це дозволить удосконалити існуючу модель та розширити її застосування у практичних інженерних задачах, технологіях механічної обробки вільних поверхонь виробів.

Конфлікт інтересів

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

References

- Novikov, F. V., & Andilakhai, O. O. (2014). *Osnovy strumynno-abrazivnoi obrobky dribnykh detalei*. Kharkiv: Vyd KhNEU im. S. Kuznetsia [in Ukrainian]
- Buchynskiy, M. Ya., Mokhnii, I. Yu., & Cherniavskiy, A. M. (2020). *Shlifivannia emalovanykh detalei*. Kyiv: Lira-K [in Ukrainian]
- Doroshenko, Ya. (2020). Investigation of the influence two-phase flows parameters on the erosion wear of the gas pipelines bends. *Municipal Economy of Cities*, 1 (154), 240–248. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2020-1-154-240-247>
- Choi, D., Kim, T., Yang, C., Nam, J., & Park, J. (2019). Discrete element method and experiments applied to a new impeller blade design for enhanced coverage and uniformity of shot blasting. *Surface and Coatings Technology*, 367, 262–270. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.04.008>
- Li, Z., Yang, F., Liu, Y., & Gao, Y. (2019). Numerical Simulation of derusting treatment of steel parts by shot blast. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 120 (1), 157–175. <https://doi.org/10.32604/cmes.2019.05187>
- Yksan, Zh. M., Ussenova, G. A. (2018). Investigation of the blasting process of threaded connections of pump-compressor pipes. *Nauka i Tehnika Kazahstana*, 1, 111–121.
- Edward, A. B., Heyns, P. S., & Kok, S. (2019). A numerical investigation of a single-shot in a DEM-FEM approach to shot peening simulation. *Metals*, 9 (11), 1183. <https://doi.org/10.3390/met9111183>
- Kubler, R. F., Berveiller, S., Bouscaud, D., Guiheux, R., Patoor, E., & Puydt, Q. (2019). Shot peening of TRIP780 steel: Experimental analysis and numerical simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 270, 182–194. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.02.031>
- Konvopoulos, K. (1990). Konechno-elementnoe reshenie kontaktnoj zadachi dlya uprugoplasticheskogo sloistogo poluprostranstva. *Sovremennoe mashinostroyeniye. Trudy Amerikanskogo Obshchestva Inzhenerov-Mehnikov. Seriya B. Prochnost Materialov, Tekhnologicheskie Processy i Oborudovanie, Avtomatizatsiya Proektirovaniya i Proizvodstva, Mehanizmy i Roboty* 2, 165–176 [in Russian]
- 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). <https://doi.org/10.1177/1687814018818277>
- Wang, T., Wang, J. B., Zhang, X. J., & Liu, C. (2023). A study on energy conversion behavior of single-shot elastic-plastic impact during shot peen forming. *International Journal of Impact Engineering*, 176, 104566. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104566>
- Gorik, A. V., Zinkovskii, A. P., Chernyak, R. E., & Brikun, A. N. (2016). Elastoplastic deformation of the surface layer of machinery constructions on shot blasting. *Strength of Materials*, 48 (5), 650–657. <https://doi.org/10.1007/s11223-016-9808-6>
- Bitter, J. G. A. (1963). A study of erosion phenomena. *Wear*, 6 (3), 169–190. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(63\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0043-1648(63)90073-5)
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.03.097>

15. Goryk, O., Koval'chuk, S., Brykun, O., & Chernyak, R. (2020). Viscoelastic resistance of the surface layer of steel products to shock attack of a spherical pellet. *Key Engineering Materials*, 864, 217–227. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.217>
16. Arifvianto, B., Mahardika, M., Salim, U. A., & Suyitno, S. (2020). Comparison of surface characteristics of medical-grade 316L stainless steel processed by sand-blasting, slag ball-blasting and shot-blasting treatments. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 52 (1), 1–13. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2020.52.1.1>
17. Žagar, S., Markoli, B., Naglič, I., & Šturm, R. (2021). The influence of age hardening and shot peening on the surface properties of 7075 aluminium alloy. *Materials*, 14 (9), 2220. <https://doi.org/10.3390/ma14092220>
18. Lupkin, B. V., & Pogrebelnyj, N. S. (2013). Uprochnyayushaya obrabotka poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem. *Otkrytye informacionnye i kompyuternye integrirovannye tehnologii* 58 (13), 40–48. [in Russian]
19. Shortiss, J., & Tanner, D. A. (2022). Residual stress prediction in shot blasted cobalt–chromium biomedical cast components. *Materials Science and Technology*, 38 (12), 853–865. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2065764>
20. Zhao, J., Zhou, W., Tang, J., Jiang, T., & Liu, H. (2022). Analytical and experimental study on the surface generation mechanism in shot peening. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22 (3). <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00431-7>
21. Goryk, O., Koval'chuk, S., Brykun, O., & Aksonov, S. (2022). Assessment of quality criteria of shot blasting cleaning of the inner surfaces of chemically resistant containers. *Advances in Mechanical and Power Engineering*, 98–107. https://doi.org/10.1007/978-3-031-18487-1_10
22. Vinogradov, V. N. (1981). Experimental study of the kinematic parameters of the impact of the ball on the flat surface of the material. *Friction and Wear*, 2 (4), 584–588.
23. Drozd, M. S., Matlin, M. M., & Sidiyakin, Yu. I. (1986). *Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoy kontaktnoj deformacii*. Kiev: Tehnika [in Russian]
24. Shin, I. G., Maksudov, R., Milasius, R., Mominov, M. R., Shukhratov, Sh., & Rajabo, O. (2020). Energy relations in the contact interaction of fractions with the surface of machine parts to be strengthened. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 11 (12), 1008–1017. <https://doi.org/10.34218/IJARET.11.12.2020.100>
25. Maksudov, R. X., Djurayev, A., & Shukhratov, Sh. (2018). Improving the design and justification of the parameters of the saw section of the cotton-cleaning unit. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, 6 (12), 7549–7555.

ORCID

O. Goryk  <https://orcid.org/0000-0002-2804-5580>
O. Brykun  <https://orcid.org/0000-0001-5213-9440>



2024 Goryk O. et al. This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.