

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 металеві дробинки з пружно-пластичним півпростором

O. В. Горик | O. 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 металеві дробинки (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 металеві 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 металеві поверхнею, можна аналітичним шляхом визначити динамічні параметри механічних показників металу, що обробляється, маючи нормальне зусилля впливу кульки (дробинки) на атаковану поверхню та геометричні розміри утвореної дробинкою лунки, а також термодинамічний стан локального об'єму атакованого 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 атаковану поверхню в процесі формування сліду (лунки), а також витрати потужності атакуючої дробинки. Запропонована модель впливу при переміщенні дробинки по нормалі до металеві півпростору, що володіє пружними і пластичними властивостями, дозволяє визначити 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 O. В., Брикун O. М., Геращенко Є. Ю., Тихоненко В. В. Основи енергетичного балансу ударного контакту металеві 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).

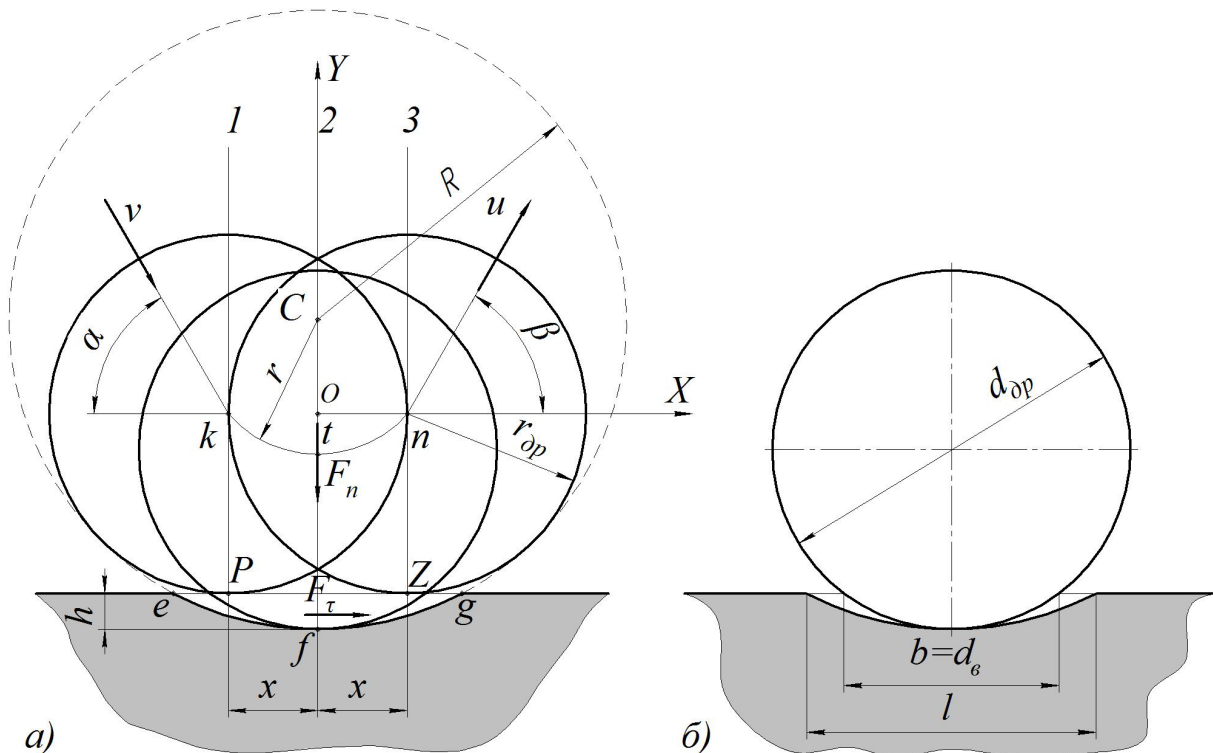


Рис. 1. Схема взаємодії жорсткої дробинки з металевим півпростором

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 $d_{op} = d$ 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_e відбитка (сліду), який залишає дробинка діаметром d_{op} при заглибленні по нормалі в поверхню на величину h (рис. 1, б).

Радіус r дуги ktn , якою переміщується 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

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

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

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

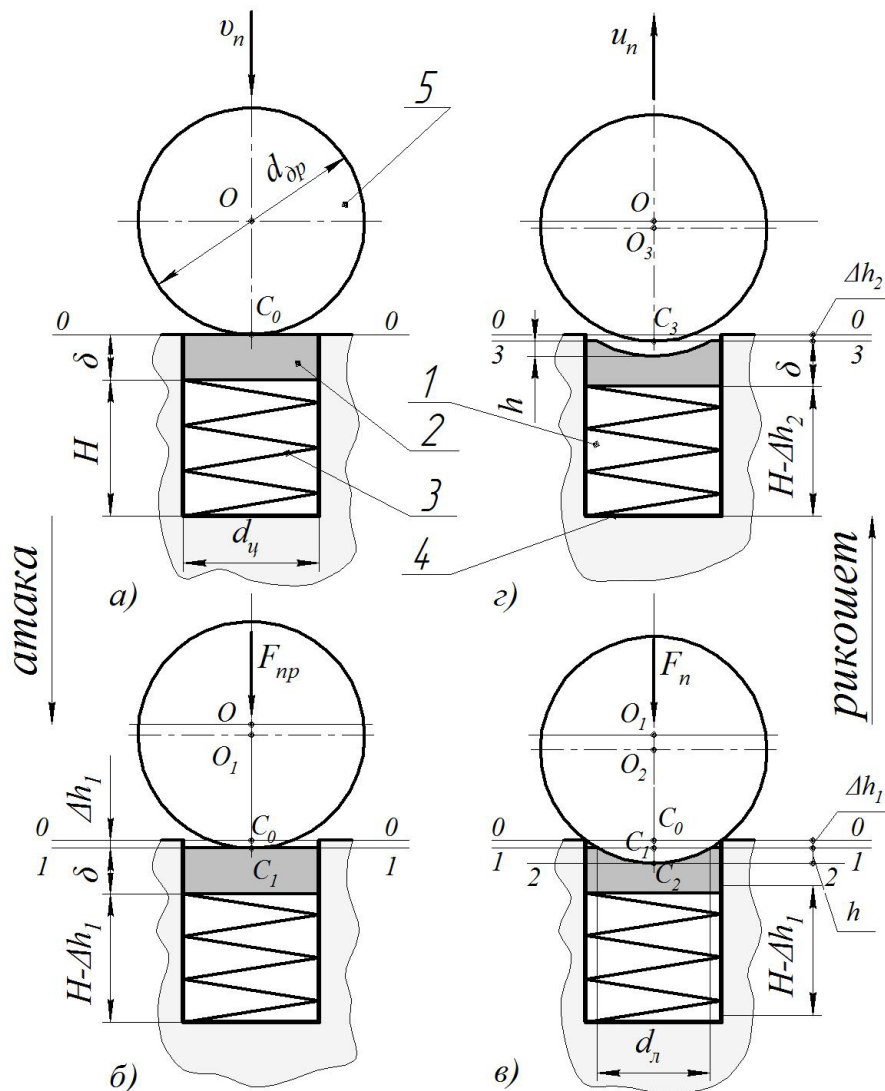


Рис. 2. Схема взаємодії дробинки з плоскою металевою поверхнею: а – дотик при атаці; б – пружне деформування; в – пружне відновлення при рикошеті; г – пластичне деформування;

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

з тертям 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. Досягнувши максимального опору пружини, дробинка починає проникати в тіло поршня, який має пластичні властивості.

При постійному питомому тиску p , величина якого визначається межею текучості атакowanego 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 атакowanego матеріалу і дає можливість розрахувати роботу, яку виконує дробинка в процесі його деформування. При цьому враховуємо, що пружна деформація передує 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 атакowanego поверхнею. Дробинка 5 атакує поршень по нормалі в деякій 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 зминає 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 переміщується 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 атакowanego металу), дробинка зупиняється. Унаслідок дії дробинки на площині поршня утворюється лунка (відбиток) діаметром $d_n = d_e$ 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 дробинці енергії пружної деформації матеріалу півпростору. Таким чином в результаті багаторазового пульсуючого впливу потоку металевих гранул (дробинок) 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 півпростір, 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 $f_e = \pi(d_{op}h_e - h_e^2)$, 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 ($u = k_e v$) 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

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

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

Використовуючи схему взаємодії дробинки діаметром d із плоскою металевою поверхню 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/cmescs.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>
- Komvopoulos, K. (1990). Konechno-elementnoe reshenie kontaktnoj zadachi dlya uprugoplasticheskogo sloistogo poluprostranstva. *Sovremennoe mashinostroenie. Trudy Amerikanskogo Obshchestva Inzhenerov-Mehnikov. Seriya B. Prochnost Materialov, Tehnologicheskie 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.