

## ПРОГНОЗУВАННЯ ШОРСТКОСТІ МЕТАЛЕВИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ДРОБЕСТРУМЕНЕВОМУ ОЧИЩЕННІ

**Горик О.В.**, д.т.н., професор,

**Ковальчук С.Б.**, к.т.н.,

**Брикун О.М.**

*Полтавська державна аграрна академія*

*ztd@pdaa.edu.ua*

**Черняк Р.Є.**

*ПАТ «АвтоКрАЗ», м. Кременчук*

*Roman.Chernyak@kraz.ua*

**Анотація.** У роботі проаналізовано відомі підходи до прогнозування параметрів шорсткості поверхонь металевих деталей, а також розкрито основні підходи до побудови математичних моделей одиначної ударної взаємодії дробу із металевою поверхнею. Із використанням основних співвідношень для розмірів сліду, залишеного дробинкою на оброблюваній поверхні, отримано залежності стандартних показників шорсткості поверхні від основних параметрів технологічного режиму дробеструменевому очищенню. На їх основі отримано залежність для визначення швидкості атаки, необхідної для забезпечення оптимальної шорсткості металевих поверхонь під нанесення захисного неметалевого покриття, при заданих кутах атаки та діаметрах дробинок.

**Ключові слова:** металева поверхня, дробеструменеве очищення, абразивний факел, кут атаки, швидкість атаки, шорсткість, зчеплення, захисне покриття.

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН ПРИ ДРОБЕСТРУЙНОЙ ОЧИСТКЕ

**Горик А.В.**, д.т.н., профессор,

**Ковальчук С.Б.**, к.т.н.,

**Брикун А.Н.**

*Полтавская государственная аграрная академия*

*ztd@pdaa.edu.ua*

**Черняк Р.Е.**

*ПАО «АвтоКрАЗ»*

*Roman.Chernyak@kraz.ua*

**Аннотация.** В работе проанализированы известные подходы к прогнозированию параметров шероховатости поверхностей металлических деталей, а также раскрыты основные подходы к построению математических моделей единичного ударного взаимодействия дроби с металлической поверхностью. С использованием основных соотношений для размеров следа, оставленного дробинкой на обрабатываемой поверхности, получены зависимости стандартных показателей шероховатости поверхности от основных параметров дробеструйной очистки. На их основе получена зависимость для определения скорости атаки, необходимой для обеспечения оптимальной шероховатости поверхности под нанесение неметаллического покрытия, при заданных углах атаки и диаметрах дробинок.

**Ключевые слова:** металлическая поверхность, дробеструйная очистка, абразивный факел, угол атаки, скорость атаки, шероховатость, сцепление, защитное покрытие.

## PROGNOSTICATION OF METALLIC SURFACES ROUGHNESS IN MACHINES DETAILS DURING THE SHOT-BLAST CLEANING

**Goryk O.**, Doctor of Engineering, Professor,

**Kovalchuk S.**, PhD.,

**Brykun O.**

*Poltava state agrarian academy*

*ztd@pdaa.edu.ua*

**Chernyak R.**

*PJSC "AutoKrAZ"*

*Roman.Chernyak@kraz.ua*

**Abstract.** The shot-blast cleaning is the effective and flexible method of surface metallic details preparation under causing of different sheeting. The durability of sheeting ground layer tripping directly depends on parameters roughnesses of geared-up metallic surface, which the technological mode of the shot-blast cleaning influences on.

The purpose and task of work is researching the dependence of indexes roughnesses metallic surfaces from the basic parameters of the technological mode of the shot-blast cleaning and establishment the dependence of necessary speed of attack abrasive stream from the indexes of project roughness of metallic surface.

It shown that the mathematical model of single shock co-operation of shot is utilized with a metallic surface was proposed for prognostication of surfaces roughness parameters of machines metallic details. The fact that the dependence of standard indexes of surface roughness on the basic parameters of the shot-blast cleaning technological mode was received with the use of basic correlations for determining a size track, leave a pellet on the processed surface. Data about dependence for determination of necessary attack's speed for providing of optimum metallic surfaces roughness under causing of the non-metal sheeting at the set corners of attack and to the particle-size of shot are given. It should be noted that we offered approach to prognostication of metallic surfaces roughness allows technological services of machine-building plants to define the optimum technological modes of the shot-blast cleaning treatment of machines details before causing of the non-metal sheeting.

**Keywords:** metallic surface, shot-blast cleaning, abrasive torch, corner of attack, speed of attack, roughness, tripping, sheeting.

**Вступ.** Очищення поверхонь металевих деталей техніки різного призначення від окалини, іржі, пригару, зварювального флюсу та інших забруднень є основною технологічною операцією підготовки перед нанесенням захисного неметалевого (скловидного, склокристалічного, полімерного, керамічного або іншого) покриття. Дробеструменеве очищення (ДО), окрім звільнення оброблюваної поверхні від різного роду забруднень, забезпечує ущільнення та активацію поверхневого шару оброблюваної деталі, ліквідовуючи при цьому тріщини, забоїни, задирки та інші механічні пошкодження. Це сприяє підвищенню міцності зчеплення та істотному збільшенню надійності і довговічності захисного покриття і, як наслідок, загального ресурсу техніки [1].

Міцність зчеплення ґрунтового шару захисного покриття безпосередньо залежить від параметрів шорсткості підготовленої металевої поверхні, на які впливають технологічні режими ДО, що характеризуються швидкістю атаки абразивним факелом оброблюваної поверхні, кутом атаки, гранулометричним складом технічного дробу [2]. Ув'язка даних параметрів технологічного режиму для досягнення необхідної шорсткості поверхні під захисне неметалеве покриття є пріоритетною проблемою технології ДО.

**Аналіз останніх досліджень.** У відомих наукових роботах, наприклад [3-5], дослідники вивчали шорсткість оброблених поверхонь і геометричні розміри лунок (слідів) на металевій

поверхні від дії атакуючих дробинки. Проте результати даних досліджень націлені на вивчення і аналіз окремих параметрів самого процесу ударної взаємодії твердих тіл, передумови якої потребують більш глибокого аналітичного обґрунтування. У [6] оптимізовано кут атаки для отримання рівномірної шорсткості, але залишилися поза увагою інші технологічні параметри, зокрема, швидкість атаки.

**Метою** роботи є дослідження залежності стандартних показників шорсткості металевих поверхонь від основних параметрів технологічного режиму дробеструменевго очищення. *Завданням дослідження* є встановлення залежності необхідної швидкості атаки абразивного струменю при заданих кутах атаки та гранулометричному складу абразиву (дробу) від показників проектно́ї шорсткості металевої поверхні.

**Об'єкт і методи дослідження.** Шорсткість металевих поверхонь в умовах змінних режимів дробеструменевго очищення (швидкість і кут атаки, гранулометричний склад дробу). При дослідженні використовувалось аналітичне математичне моделювання ударної взаємодії твердих частинок (дробу) з пружно-пластичним півпростором.

**Результати дослідження.** Шорсткість поверхні у ході ДО утворюється накладанням численної кількості слідів від одиничних ударних взаємодій сферичних дробинки із оброблюваною поверхнею. Тому параметри шорсткості можна, із деякою мірою наближення, встановити розглядаючи одиничну взаємодію. При цьому металева поверхня розглядається як пружно-пластичний півпростір, а дробинка – як тверде тіло сферичної форми діаметром  $d_{\text{дд}} = 2r_{\text{дд}}$  (рис. 1), яке здійснює в процесі взаємодії з оброблюваною поверхнею плоский рух в прямокутній системі координат  $XOY$  ( $OY$  нормальна до оброблюваної поверхні).

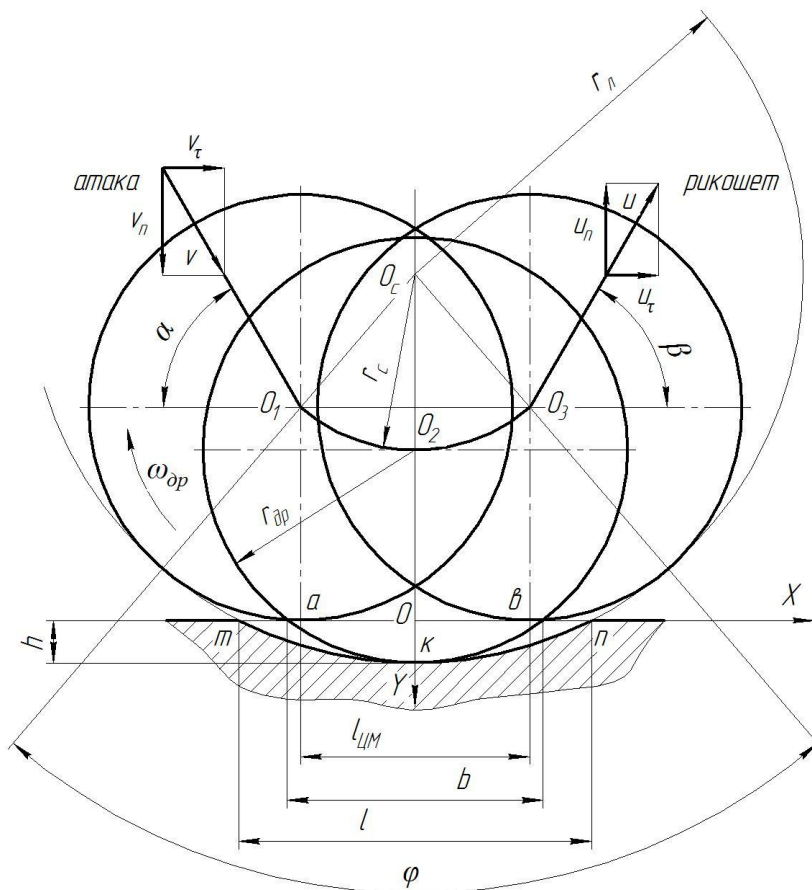


Рис. 1. Схема взаємодії дробинки з металевою поверхнею

Стикнувшись з оброблюваною поверхнею у точці  $a$  зі швидкістю  $v$  під кутом  $\alpha$ , дробинка поступово вдавлюється в поверхневий шар на глибину  $h$  (вдovж осі  $Y$ ) і

переміщається з ліва на право в тангенціальному напрямі (вздовж осі  $X$ ) на довжину  $l_{oi}$  одночасно обертаючись за годинниковою стрілкою. Досягнувши у точці  $\hat{e}$  максимального занурення на глибину  $h$ , величина якого визначається механічними властивостями матеріалу оброблюваної деталі, дробинка, обертаючись навколо центру мас, продовжує рух у тангенціальному напрямі і поступово піднімається до нульового рівня оброблюваної поверхні в точці  $\hat{a}$ , з якої рикошетує зі швидкістю  $u$  під кутом  $\beta$ . Умовно прийнято, що кут атаки  $\alpha$  рівний куту рикошетування  $\beta$ , якщо не стоїть конкретна задача встановлення залежності між ними.

Після атаки дробинка залишає на оброблюваній поверхні вм'ятину у вигляді довгастої лунки (сліду) довжиною  $l$ , глибиною  $h$  і шириною  $b$  [6]. При цьому в поздовжньому перерізі, тобто в площині пересування дробинки  $XOY$ , яка перпендикулярна оброблюваній поверхні, лунка має форму сегмента радіусом  $r_e$ , що визначається траєкторією переміщення дробинки  $O_1O_2O_3$ , а у поперечному перерізі – сегмента радіусом  $r_{\hat{a}\hat{d}}$  (рис. 1). Такі припущення стосовно геометричних розмірів сліду, який залишає дробинка на оброблюваній поверхні, добре узгоджуються з отриманими нами експериментальними даними.

Швидкість атаки  $v$  у процесі взаємодії з оброблюваною поверхнею можна розділити на дві складові: нормальну до оброблюваної поверхні в напрямку вісі  $Y$ ,  $v_n$  при атаці і  $u_n$  при рикошеті дробинки; тангенціальну – в напрямі вісі  $X$ ,  $v_\tau$  при атаці і  $u_\tau$  при рикошеті.

Нормальна складова швидкості атаки  $v_n$  зменшується від деякого початкового значення до нуля, коли дробинка досягає максимальної глибини занурення  $h$ . Потім дробинка змінює напрям свого руху на зворотній, а нормальна складова швидкості збільшується від нуля до деякого кінцевого значення  $u_n$ .

Тангенціальна складова швидкості руху дробинки в процесі взаємодії з поверхневим шаром не змінює свого напрямку, а тільки зменшується при переміщенні центру маси дробинки на величину  $l_{oi}$ , від деякого початкового значення  $v_\tau$  до кінцевого значення  $u_\tau$ .

У кожний момент часу повна енергія системи «дріб-пружно-пластичний півпростір» є постійною величиною і дорівнює сумі миттєвих значень кінетичної енергії атакуючого тіла  $T(t)$  і роботи сили інерції  $A(t)$  по деформуванню півпростору. Для руху по нормалі маємо:

$$W_n(t) = T_n(t) + A_n(t) = const. \quad (1)$$

У початковий момент часу  $t = t_0 \rightarrow y(t_0) = 0$  енергетичний баланс (1) є таким:

$$W_n(t_0) = T_n(t_0) = mv_{0,n}^2/2, \quad (2)$$

де  $m$ ,  $v_{0,n}$  – відповідно маса і початкова швидкість сферичного атакуючого тіла.

Враховуючи (1), вираз (2) перепишемо так:

$$T_n(t) + A_n(t) = mv_{0,n}^2/2, \quad (3)$$

де  $T_n(t) = mv_n^2(t)/2 = m(dy(t)/dt)^2/2$  – кінетична енергія, а  $A_n(t) = \int_0^y F(y) dy = \int_0^y \hat{e}_{\delta\delta} k y dy = 0,5 \hat{e}_{\delta\delta} k y^2$  – робота сил інерції по деформуванню поверхневого шару у ході видавлювання лунки глибиною  $y(t)$ .

У останньому виразі:  $\hat{e}_{\delta\delta}$  – коефіцієнт, що враховує втрати енергії дробинки діаметром  $d_{\hat{a}\hat{d}} = 2r_{\hat{a}\hat{d}}$  на внутрішнє тертя в об'ємі металу в процесі ударної дії;  $y$  – шлях пройдений дробинкою;  $k$  – коефіцієнт пропорційності між силою вдавлення і глибиною лунки.

Згідно з [7] коефіцієнт втрат на внутрішнє тертя у металах складає 0,1 і вище, залежно від механічної енергії, що витрачається на імпульсне навантаження металу. Таким чином,

для сталі даний коефіцієнт у процесі ударної дії повинен мати значення  $\hat{e}_{\delta\delta} \geq 1,1$ .

Коефіцієнт пропорційності  $k$  при визначенні сили вдавлювання (сили опору)  $F(y)$  може визначатись із використанням різних підходів. У пропонованій методиці нормальну силу вдавлювання визначено через динамічну границю текучості  $\sigma_{\delta.\dot{a}}$ :

$$F(y) = ky = \pi \hat{e}_{\delta\delta} \sigma_{\delta.\dot{a}} d_{\dot{a}\delta} y. \quad (4)$$

З урахуванням сказаного вище та залежності (4), співвідношення (3):

$$m(dy(t)/dt)^2/2 + \pi \hat{e}_{\delta\delta} \sigma_{\delta.\dot{a}} d_{\dot{a}\delta} y^2/2 = mv_{0,n}^2/2. \quad (5)$$

Звідки швидкість тіла (індентора) у вертикальному напрямку:

$$dy(t)/dt = \sqrt{v_{0,n}^2 - \pi \hat{e}_{\delta\delta} \sigma_{\delta.\dot{a}} d_{\dot{a}\delta} y^2/m}. \quad (6)$$

У момент досягнення максимального заглиблення тіла в півпростір, коли  $t = t_h$ :

$$dy(t_h)/dt = 0, \quad y(t_h) = y_{\max} = h. \quad (7)$$

Врахувавши (7) у (6), одержимо значення максимального заглиблення тіла (дробинки) при нормальному вдавлюванні його в півпростір:

$$h = y_{\max} = v_0 \sin \alpha \sqrt{m/(\pi \hat{e}_{\delta\delta} \sigma_{\delta.\dot{a}} d_{\dot{a}\delta})}. \quad (8)$$

Формула (8) за фізичним змістом аналогічна залежностям, які отримано розв'язуванням рівняння динаміки типу  $d^2y/dt^2 = -F_n/m$  [5, 6]. Формульний вигляд наведених співвідношень відрізняється методикою визначення нормальної сили опору: тут у (8) вона визначається так:  $F(y) = ky = \pi \hat{e}_{\delta\delta} \sigma_{\delta.\dot{a}} d_{\dot{a}\delta} y$ , а у [5] за співвідношенням:  $F(y) = ky = \pi \hat{e}_s c \sigma_{\delta} d_{\dot{a}\delta} y$ , що відповідає відомим співвідношенням теорії пластичного контакту сферичного індентора з пружно-пластичним півпростором [3]. Дані залежності є аналогічними зважаючи на те, що динамічна границя текучості  $\sigma_{\delta.\dot{a}}$  та статична  $\sigma_m$  пов'язані співвідношенням  $\sigma_{\delta.\dot{a}} \approx c \sigma_{\delta}$ , з коефіцієнтом несучої здатності  $c = 1...6$  і більше. В обох випадках встановлення значень  $\sigma_{\delta.\dot{a}}$  або коефіцієнта  $c$  становить певну проблему, але це є окремою задачею.

Певним чином знімає невизначеність значень величин  $\sigma_{\delta.\dot{a}}$  і  $c$  методика [6], де нормальна сила вдавлювання визначається через узагальнений аналітично-експериментальний коефіцієнт  $k$ , який характеризує інтенсивність опору півпростору пружно-пластичній деформації при нормальному зануренню жорсткого сферичного тіла. Відповідно до цієї пружно-пластичної моделі нормальні складові швидкості, глибини та часу занурення відповідно рівні:

$$v_y(t) = v_{0y} \cos(\sqrt{k/m} \cdot t), \quad y_{\max} = h = v_{0y} \sqrt{m/k}, \quad t_h = 0,5\pi \sqrt{m/k}, \quad (9)$$

а максимальна сила вдавлювання тіла в півпростір:

$$F_{\max} = v \sin \alpha \sqrt{km}. \quad (10)$$

Шляхом аналогічних міркувань були визначені тангенціальне переміщення дробинки  $l_{oi}$  і повну довжину лунки  $l$  (рис.1).

Ширина лунки  $b$  визначена геометричним шляхом, згідно якого:

$$b \approx 2\sqrt{d_{\dot{a}\delta} h}. \quad (11)$$

Параметри лунки визначені згідно з пропонованою методикою можуть бути використані для прогнозування шорсткості оброблюваної поверхні при масовій дії дробинок у дробеструменевому факелі.

До основних параметрів шорсткості поверхні згідно стандарту відносяться середнє арифметичне відхилення профілю  $R_a$ , середня висота нерівностей профілю по 10 точках  $R_z$

та найбільша висота профілю нерівностей  $R_{\max}$ . Із використанням параметрів сліду, отриманих згідно поданої методики, параметр  $R_a$  можна визначити, наприклад, згідно з [8].

Однак шорсткість поверхні, яку може забезпечити ДО, і яка необхідна для підготовки під неметалічні покриття, частіше за все характеризується показником  $R_z$ . Його оптимальна величина приймається за товщиною  $\delta_{\text{до}}$  ґрунтового шару захисного неметалевого покриття і становить  $R_z = (0,2 \dots 0,4) \delta_{\text{до}}$ . Така якість поверхні може бути забезпечена гранулометричним складом дробу із  $d_{\text{до}} = (10 \dots 12,5) R_z$  при куті атаки  $\alpha = 40^\circ \dots 60^\circ$  [6].

Оптимальна швидкість атаки  $v$  може бути встановлена із використанням поданих вище залежностей розмірів сліду. Зважаючи на встановлений параметр шорсткості  $R_z$ , який у першому наближенні можна порівняти з глибиною сліду, залишеного окремою дробинкою ( $h_{\text{до}} = h \approx R_z$ ) можемо записати:

$$v = R_z / \left( \sin \alpha \sqrt{m / (\pi d_{\text{до}} \sigma_{\text{д.д}} \hat{e}_{\text{д.д}})} \right). \quad (12)$$

Аналогічно можна дослідити вплив інших технологічних показників процесу, таких як кут атаки та гранулометричний склад дробу.

**Висновки.** Надійне механічне зчеплення ґрунтового шару захисного неметалевого покриття з металевою поверхнею залежить від шорсткості поверхні основи. У випадку підготовки поверхні за допомогою ДО необхідну шорсткість поверхні може забезпечити належний вибір параметрів технологічного режиму і в першу чергу швидкості атаки дробинками оброблюваної поверхні.

Запропоновані підходи до прогнозування шорсткості металевих поверхонь та отримані співвідношення дозволяють технологічним службам машинобудівних заводів визначати оптимальні параметри технологічного режиму ДО деталей машин перед нанесенням захисних неметалевих покриттів.

## Література

1. Конструирование машин. Справочно-методическое пособие в 2-х томах. / Ред. К.В. Фролов. – М.: Машиностроение, 1994. Т.1. – 530с.
2. Атген А.А. Температурустойчивые неорганические покрытия / А.А. Атген. – Л.: Химия, 1976. – 296с.
3. Непомнящий Е.Ф. Трение и износ под воздействием струи твердых сферических частиц. / Е.Ф. Непомнящий // Контактное воздействие твердых тел и расчет сил трения и износа. – М.: Наука, 1971. – С.190-200.
4. Горбунов Н.И. Математическая модель процесса взаимодействия единичной абразивной частицы с очищаемой поверхностью рельса / Н.И. Горбунов, М.В. Ковтанец, И.А. Цыгановский, М.Н. Крошко // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2011. – №4 (158) – Ч.2. – С.38-45.
5. Тамаркин М.А. Методика расчета съема металла при гидроабразивной обработке / М.А. Тамаркин, А.А. Тихонов // Вестник ДГТУ. – 2011. – Т. 11, №3(54). – С.327-332.
6. Горик А.В. Оптимизация угла атаки дробеструйного факела при очистке металлических поверхностей / А.В. Горик, С.Б. Ковальчук, С.В. Яхин // Динаміка та міцність енергетичних і сільськогосподарських машин та біотехнічних систем (колективна монографія). – Полтава: Сімон, 2015. – С.77-84.
7. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах / В.С. Постников. – М.: Металлургия, 1974. – 352с.
8. Тамаркин М.А. Исследование параметров качества поверхностного слоя при обработке дробью / М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко, В.Г. Лебеденко // Вестник машиностроения. – № 2. – 2010. – С.54-59.