

## ТВЕРДІСТЬ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ПІД ЧАС ДРОБОСТРУМЕННОЇ ОБРОБКИ

<sup>1</sup>А. М. Чернявський, <sup>2</sup>А. М. Бучинський\*, <sup>3</sup>Л. С. Шлапак, <sup>1</sup>М. Я. Бучинський

<sup>1</sup>ТОВ «Експертнафтогаз»; 36008, м. Полтава, вул. Європейська, 225, оф.207;  
e-mail: mbuchynskiy@ukr.net

<sup>2</sup>Національний університет «Полтавська Політехніка імені Юрія Кондратюка»;  
36000, м. Полтава, пр. Першотравневий, 24; e-mail: abuchynskiy@ukr.net

<sup>3</sup>ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: tzn@nimg.edu.ua

У машинобудівній промисловості поширені низьковуглецеві сталі. Під час виготовлення з них виробів, поверхню деталі з метою її очищення, зміцнення поверхневого шару, формування шорсткості й т.ін. піддають дробоструменевій обробці. Раціональні технологічні режими та ефективність процесу дробоструменевої обробки поверхні залежать від динамічної твердості матеріалу, який обробляють. Деякі дослідники [3-6] пропонують емпіричні залежності для визначення динамічної твердості з функціональною залежністю від тих чи інших механічних характеристик матеріалу. Проте результати обчислень за цими залежностями мають великі розбіжності. Це спричинено недо врахуванням різних факторів. У статті запропоновано методику визначення динамічної твердості низьковуглецевих сталей з урахуванням як факторів режиму навантажень, так і властивостей матеріалу під час дробоструменевої обробки. Значення динамічної твердості обчислюють діленням витраченої кінетичної енергії  $E$  на об'єм вдавненої лунки  $\omega_d$ . Розглянуто процес пластичного деформування лунки від дії кінетичної енергії атакуючого дробу. Показано, на що витрачається кінетична енергія атакуючого дробу (на пружне та пластичне деформування, на внутрішнє тертя, в результаті якого метал нагрівається, на мікрорізання, зовнішнє тертя, розколювання дробу та дисипативні втрати). Запропоновано прийнятну для практичного застосування аналітичну залежність, де враховано умови навантаження. Показано, що динамічна твердість низьковуглецевих сталей під час дробоструменевої обробки прямопропорційна масі атакуючого дробу  $m$ , квадрату швидкості атаки  $V_{no}$ , залежить від коефіцієнта відновлення швидкості дробу  $k_v$ , від величини втрати енергії  $\eta$  й оберненопропорційна квадрату параметра шорсткості  $Rz$  та діаметру описаної навколо дробу сфери  $d$ . Коефіцієнти  $k_v$  та  $\eta$  опосередковано враховують механічні властивості матеріалу. Розрахункові значення динамічної твердості низьковуглецевих сталей нижчі статичної приблизно в 2...3 рази. Це пояснюється суттєвими втратами енергії на внутрішнє тертя, яке сприяє розм'якшенню елементарних об'ємів металу в ділянці обробки внаслідок його нагрівання. Визначення за цією методикою фактичного значення динамічної твердості низьколегованих сталей під час дробоструменевої обробки забезпечує обґрунтований вибір раціональних технологічних режимів та ефективність процесу дробоструменевої обробки із заданим результатом.

Ключові слова: твердість матеріалів; динамічна твердість; низьковуглецева сталь; дробоструменева обробка.

В машиностроении широко используют низкоуглеродистые стали. Поверхность изделий, изготовленных из такой стали, часто подвергают дробеструйной обработке с целью ее очистки, упрочнения поверхностного слоя, формирования шероховатости и т.п. Рациональные технологические режимы и эффективность дробеструйной обработки поверхности прежде всего зависят от динамической твердости подвергаемого обработке материала. Некоторые исследователи [3-6] предлагают эмпирические зависимости для определения динамической твердости с функциональной зависимостью от тех или других механических свойств материала. Но расхождение результатов вычислений по этим зависимостям отличаются в разы. Это свидетельствует о недостаточном учете различных факторов. В этой статье предложена методика определения динамической твердости низкоуглеродистых сталей при дробеструйной обработке, которая учитывает как факторы режима нагружения, так и свойства материала. Значение динамической твердости определяют делением израсходованной кинетической энергии  $E$  на объем выдавленной лунки. Поэтому рассмотрен процесс пластической деформации лунки под воздействием кинетической энергии атакующей дроби. Указаны потери энергии атакующей дроби (на упругое и пластическое деформирование, на внутреннее трение, в результате которого металл нагревается, на микрорезание, внешнее трение, раскалывание дроби и диссипативные потери). Предложена приемлемая для практического использования

аналитическую зависимость, которая учитывает условия нагружения. Показано, что динамическая твердость низкоуглеродистых сталей при дробеструйной обработке прямопропорциональна квадрату массы атакующей дроби  $m$ , скорости атаки  $V_{\text{по}}$ , зависит от коэффициента восстановления скорости дроби  $K_{\text{в}}$ , от величины потерь энергии  $\eta$  и обратнопропорциональна квадрату параметра шероховатости  $Rz$  и диаметру описанной вокруг дроби сферы  $d$ . Коэффициенты  $K_{\text{в}}$  та  $\eta$  также опосредованно учитывают и механические свойства материала. Расчетные значения динамической твердости низкоуглеродистых сталей ниже статической ориентировочно в 2...3 раза. Это объясняется существенными потерями энергии на внутреннее трение, которое содействует размягчению элементарных объемов металла в зоне воздействия при его нагревании. Определенное по этой методике фактическое значение динамической твердости низколегированных сталей при дробеструйной обработки обеспечивает обоснованный выбор рациональных технологических режимов и эффективность процесса дробеструйной обработки с заданным результатом.

Ключевые слова: твердость материалов; динамическая твердость; низкоуглеродистая сталь; дробеструйная обработка.

*Low-carbon steels are widely used in mechanical engineering. The surface of products made from such steel is often shot blasted for the purpose of cleaning it, hardening the surface layer, forming roughness, etc. Rational technological modes and efficiency of shot blasting of the surface primarily depends on the dynamic hardness of the material being processed. Some researchers [3-6] offer empirical dependences for determining dynamic hardness with a functional dependence on certain mechanical properties of the material. However, the discrepancy between the calculation results behind these dependencies differ significantly. This indicates insufficient consideration of various factors. This article proposes a method for determining the dynamic hardness of low carbon steels during shot blasting, which takes into account both the factors of the loading mode and the properties of the material. The value of dynamic hardness is calculated by dividing the consumed kinetic energy  $E$  by the volume of the extruded hole. Therefore, the process of plastic deformation of the hole under the action of the kinetic energy of the attacking shot was considered. The energy losses of the attacking shot are indicated (for elastic and plastic deformation, for internal friction, as a result of which the metal heats up, for microcutting, external friction, splitting of the shot and dissipative losses). An analytical dependence acceptable for practical use is proposed, which takes into account the loading conditions. It is shown that the dynamic hardness of low-carbon steels during shot blasting is directly proportional to the square of the mass of the attacking shot, the attack speed, depends on the coefficient of recovery of the shot speed and on the amount of energy loss, and is inversely proportional to the square of the roughness parameter and the diameter of the sphere described around the shot. The coefficients also indirectly take into account the mechanical properties of the material. The calculated values of the dynamic hardness of low-carbon steels are approximately 2...3 times lower than the static one. This is due to significant energy losses due to internal friction, which causes softening of elementary volumes of metal in the affected zone due to its heating. The actual value of the dynamic hardness of low-alloy steels during shot blasting, determined behind this technique, provides a reasonable choice of rational technological modes and the effectiveness of the shot blasting process from a given result.*

Key words: material hardness; dynamic hardness; low carbon steel; shot blasting.

## Вступ

Низьковуглецеві сталі широко використовують у різних галузях машинобудування: нафтогазовій, хімічній, біологічній, у суднобудуванні тощо. Під час виготовлення виробів із низьковуглецевих сталей (ємності та апарати нафтохімічної промисловості, трубна продукція, просторові несні металоконструкції) їх поверхню піддають дробоструменевій обробці. Таку обробку зазвичай застосовують для: очищення поверхні; підготовки (очищення та формування шорсткості) поверхні виробів для нанесення захисного покриття (лакофарбового, полімерного, скловидного і т. ін.); зміцнення поверхні виробу тощо.

Незважаючи на поширення, дробоструменева обробка є найменш вивченим процесом абразивної обробки поверхонь сталевих виробів. Вона характеризується масованим швидкісним зняттям елементарних об'ємів металу по-

током швидколетючих абразивних гранул. Водночас відбувається поверхнєве зміцнення та формування шорсткості поверхні матеріалу, від яких залежить експлуатаційна властивість виробу (міцність, ресурс, стійкість зчеплення з захисними покриттями тощо).

Зазвичай швидкість впливу, тобто швидкість атаки абразивними гранулами на поверхню, яку обробляють, не перевищує  $v_{\text{ат}} = 160$  м/с. Частина гранул вдавлюється на малу глибину та пружно деформує поверхню. При цьому відбувається тертя з виділенням тепла; понад 80% до 95% механічної енергії затрачається на нагрівання поверхні виробу. Інша частина гранул вдавлюється на більшу глибину і деформує поверхню пластично [1]. Абразивними гранулами є сталевий дріб, зазвичай діаметром описаної сфери в межах  $d = 0,5 \dots 2,2$  мм та міцністю, що перевищує аналогічні показники поверхні більш ніж у 2 рази. Видалення дефектного

поверхневого шару металу товщиною  $\delta$  відбувається внаслідок пружно-пластичних деформацій, яким піддають поверхню сталевого виробу швидколетючим дробом.

Твердість матеріалу – це його здатність чинити опір деформуванню та руйнуванню, які виникають від дії місцевих контактних зусиль. Тобто у нашому випадку – чинити опір місцевій пластичній деформації, що виникає від втиснення в неї більш твердого тіла – індентора, яким є дріб.

Отже, твердість дробу та поверхні, яку обробляють, є основною ознакою ефективності дробоструменевого процесу, а встановлення достовірних величин динамічної твердості матеріалу поверхні має вагомим значення для вибору раціональних технологічних режимів дробоструменевої обробки, які забезпечать заданий результат якості та ефективності оброблюваної поверхні.

### Аналіз проблематики

Залежно від швидкості прикладання зусилля на індентор під час його вдавлення, твердість матеріалу поділяють на статичну (зусилля прикладається плавно) та динамічну (зусилля прикладається швидко). Такий поділ є цілком умовним, так як вдавлення індентора потребує руху, який здійснюють з різною швидкістю.

До методів виміру статичної твердості належать методи Брінелля, Роквелла, Віккерса та деякі інші [2]. Ці методи трактують рух індентора як повільний та плавний, а їх визначальним параметром є навантаження, під дією якого індентор вдавлюють у зразок матеріалу. Після цього вимірюють певні геометричні розміри утвореної лунки. Мірою твердості є відношення зусилля, що розвив індентор, чи роботи, яку він виконав, до встановлених геометричних параметрів лунки.

За усталеними правилами значення динамічної твердості, яку позначають  $HD$ , обчислюють діленням витраченої кінетичної енергії  $E$  на об'єм видавленої лунки  $\omega_L$ .

Для низьковуглецевих сталей найприйнятнішим та найзастосовнішим для визначення статичної твердості є метод Брінелля. Суть цього методу полягає в плавному і повільному вдавленні сталевий загартованої кульки під час регламентованого навантаження та витримці продовж встановленого часу. Величина твердості за Брінеллем ( $HB$ ) – відношення випробувального зусилля (навантаження) в кгс до площі сферичної поверхні відбитку в мм<sup>2</sup>.

Результати досліджень деяких авторів встановлюють певні емпіричні функціональні

залежності значення статичної та динамічної твердості металу  $HD = f(HB)$ .

Для суцільного зміцнення (умови неодноразових ударів дробу до елементарних ділянок поверхні) І.В.Кудрявцев, опираючись на результати досліджень [3], запропонував таку залежність між величинами твердості для сталей

$$k_{H1} \approx z^4 \sqrt{HD/HB}, \quad (1)$$

де  $k_{H1} \approx 1,5$  – коефіцієнт пропорційності;  
 $z \approx 1,3$  – коефіцієнт відповідності.

За таких відомих коефіцієнтів отримуємо

$$HD \approx 1,8 \cdot HB. \quad (2)$$

З досліджень М. С. Дрозда [4] бачимо, що між статичною  $HB$  та динамічною  $HD$  твердістю сталей є залежність, яку описано виразом

$$HB \approx a \cdot HD^b, \text{ або } HD \approx \sqrt[b]{HB/a}, \quad (3)$$

де  $a \approx 1,96$  – коефіцієнт пропорційності;  
 $b \approx 0,89$  – показник степеня.

За даними американського дослідника Тейбора [5], динамічна твердість  $HD$  низьковуглецевих сталей рівна

$$HD \approx c \cdot \sigma_T, \quad (4)$$

де  $c \approx (2,8 \dots 3,1)$  – коефіцієнт пропорційності, величина якого наведена для низьковуглецевих сталей;

$\sigma_T$  – границя плинності матеріалу, який обробляють.

Інші дослідження [6] свідчать про те, що динамічна твердість  $HD$  для металів, залежно від амплітуди навантажень, в 2...3 рази менша від статичної твердості за  $HB$ .

Розрахунок динамічної твердості  $HD$  за наведеними залежностями (2-4) дають суперечливі результати (табл. 1).

Розкид значень динамічної твердості  $\Delta HD = \left| \frac{HD(max) - HD(min)}{HD[min]} \right| 100\%$  для наведених в табл. 1 сталей сягає 800%. Так, за джерелами [3, 4], які пов'язують динамічну твердість з твердістю за Брінеллем, розбіжність становить від 80% до 117%, у цьому разі вона має значення як більше, так і менше від твердості за Брінеллем. А за джерелами [3-5], які пов'язують динамічну твердість як із твердістю за Брінеллем, так і з границею плинності матеріалу, розбіжність становить від 124% до 800%.

Така розбіжність значень динамічної твердості свідчить про недоврахування різних факторів під час її визначення. Наприклад, під час досліджень процесу дробоструменевої обробки поверхні нормалізаційно відпалених деталей, виготовлених зі сталі 10, встановлено, що об'ємна продуктивність видаленого металу, яку розраховано аналітично, значно відрізняється

Таблиця 1 – Розрахункові значення динамічної твердості низьковуглецевих сталей

Матеріал, його характеристики [7, 8]					
Марка сталі		сталь 20пс	09Г2С	08пс	10Ю
Виріб		листовий прокат			
Товщина, мм		50	10...20	4...8	5...25
Термообробка		так	ні	так	так
Твердість за Брінеллем, HB		≥156	450...490	≤98	≤140
Границя плинності, $\sigma_T$ , МПа		≥295	325	≤235	196...345
Розрахункові значення динамічної твердості за [3-5]					
за [3], формула 2	$HD \approx 1,8 \cdot HB$	≥281	810...882	≤176	≤252
за [4], формула 3	$HD \approx \sqrt[3]{HB/a}$	≥137	450...495	≤81	≤121
за [5], формула 4	$HD \approx c \cdot \sigma_T$	≥826...915	910...1008	≤658...729	549...1070

від результатів, отриманих під час експерименту. Результати експерименту мали вищі значення від розрахованих за логічно-обґрунтованими загальновідомими залежностями, у яких використано експериментальні дані глибини проникнення дробинки у поверхню  $h_{пл} \approx Rz$ . Оскільки глибина вдавлення дробинки залежить від динамічної твердості  $HD$ , то була висловлена думка, що у формулах для визначення динамічної твердості  $HD$ , запропонованих авторами [3, 4, 5], не враховані деякі суттєві фактори, що впливають на величину динамічної твердості. Такими факторами є внутрішнє тертя, яке призводить до суттєвого розігріву локального об'єму металу в зоні контактування з дробом (аж до температури плавлення), і розвинута поверхня сферичної поверхні дробу з багатьма вершинами та впадинами субмікрорельєфу. А величина внутрішнього тертя, у свою чергу, залежить від енергії впливу дробом на поверхню.

Тому завдання полягає в установленні прийнятної для практичного застосування функціональної залежності, яка б урахувала низку факторів, і передовсім енергію впливу.

**Метою роботи** є створення методики визначення динамічної твердості низьковуглецевих сталей при дробоструменевій обробці, що враховує як властивості матеріалу, так і фактори режиму навантажень (основних технологічних параметрів).

#### Методика визначення динамічної твердості

Розглянемо процес вдавлення по нормалі твердої сферичної частинки діаметром  $d$  в пружно-пластичне середовище, обмежене площиною, тобто в поверхневий шар металевого виробу. Розмірна стійкість дробу технічного

становить сотні циклів контактування з поверхнею, яку обробляють. Тому в процесі одиничного удару кожен дріб вважаємо абсолютно твердим тілом. На рис. 1 показано характерні положення під час вдавлення дробу (зображено кругами) в поверхню (затушована сірим). Круг з центром  $C_0$  показує положення дробу на початку контакту дробу з поверхнею матеріалу в точці  $O$ . Під дією дробу поверхня деформується пружно на величину  $h_{пр1}$  до точки 1. Дріб переміщується на відрізок  $C_0 - C_1$  і досягає положення, зображеного кругом з центром  $C_1$  і зупиняється. Далі пружна деформація переходить у пластичну, і дріб вдавлюється в поверхню до точки 2 (положення круга з центром  $C_2$ ). Потім настає рикошет, і за рахунок пружної деформації  $h_{пр2} \approx h_{пр1}$  лунка частково відновлює свою форму до положення дробу з контактом в точці 3 (положення круга з центром  $C_3$ ), дріб залишає лунку. У поверхні матеріалу залишається лунка глибиною  $h_{пл}$  діаметром  $d_l$ .

Розглянемо процес дробоструменевої обробки більш детально. Дріб масою  $m$  атакує поверхню, яку обробляють, зі швидкістю  $V_{n0}$ . Піддавши поверхню, яку обробляють, пружному, а потім і пластичному деформуванню, дріб рикошетить зі швидкістю  $U_{n0}$ , значення якої визначають за виразом

$$U_{n0} = V_{n0} k_v, \quad (5)$$

де  $k_v$  – коефіцієнт відновлення швидкості дробу[9].

У процесі взаємодії, тобто удару, дріб витрачає надану йому енергію на виконання певної роботи

$$A = A_{пр} + A_{пл} + A_{дод}, \quad (6)$$

де  $A_{пр}$  – робота, витрачена дробом на пружну деформацію;

$A_{пл}$  – робота, витрачена дробом на пластичне деформування;

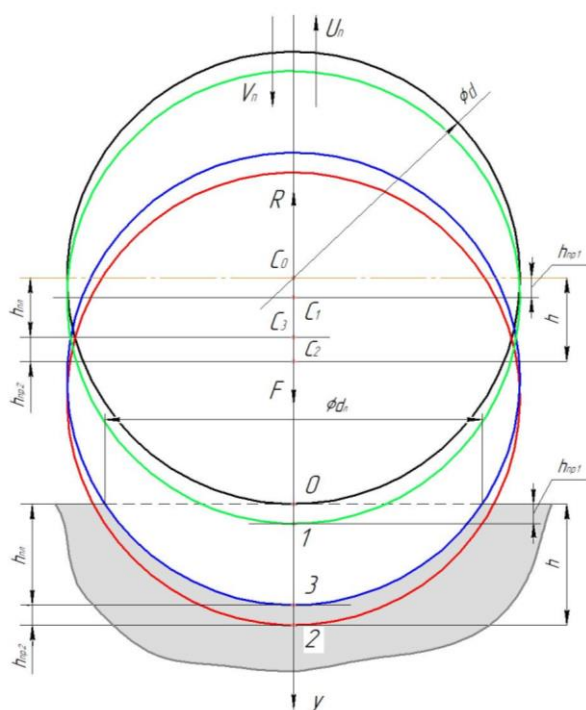


Рисунок 1 – Схема взаємодії жорсткого дробу діаметром  $d$  з пружно-пластичним тілом

$A_{\text{дод}}$  – робота, витрачена дробом на внутрішнє тертя, мікрорізання, зовнішнє тертя, розколювання дробу та дисипативні втрати.

У роботах авторів [10, 11, 12] величини втрат кінетичної енергії на кожен з цих видів робіт розподілено так:  $A = 100\%$ , з яких  $A_{\text{пр}} \approx 5\%$ ;  $A_{\text{пл}} \approx 5 \dots 10\%$ ;  $A_{\text{дод}} \approx 85 \dots 95\%$ . Тобто найбільше енергії витрачається на внутрішнє тертя та дисипативні втрати, які перетворюються в тепло, що розм'якшує поверхню металу.

У процесі вдавлювання дробу в поверхню пружно-пластичного середовища його швидкість на початку вдавлювання  $V_{n0}$  змінюється за певним законом, який у роботі [13] описано такою залежністю

$$V_n = V_{n0} e^{-\frac{ky}{m}}, \quad (7)$$

де  $V_n$  – поточна швидкість на глибині вдавлювання  $y$ ;

$V_{n0}$  – швидкість дробу на початку вдавлювання;

$y$  – поточна координата вдавлювання;

$k$  – коефіцієнт пропорційності;

$m$  – маса сферичної частинки (дробу) діаметром  $d$ .

Отже, при зіткненні дробу з поверхнею, яку обробляють, (в точці 0, рис. 1) швидкість зіткнення дробу становить  $V_{n0}$ . Спочатку дріб пружно деформує поверхню, яку обробляють. На рис. 1 цю деформацію показано від точки 0

до точки 1, а її глибина позначена  $h_{\text{пр}}$ . Внаслідок внутрішнього тертя елементарний об'єм металу в місці пружної деформації нагрівається і розм'якшується. Зусилля опору металу, який пружно деформують вдавлюванням дробу  $R_{\text{пр}}$ , зростає пропорційно величині заглиблення  $y$ , тобто

$$R_{\text{пр}} = c \int_0^{h_{\text{пр}}} dy, \quad (8)$$

де  $c$  – коефіцієнт жорсткості металу;

$h_{\text{пр}}$  – максимальна глибина пружно-деформованої сферичної лунки,

швидкість дробинки зменшується до певного значення  $V_{n1}$ .

Після пружного деформування настає пластичне деформування поверхні, яку обробляють. Закінчується воно в точці 2. Дріб зупиняється, його швидкість у цій точці дорівнює нулю, тобто  $V_{n2} = 0$ . Водночас реакція  $R_{\text{пл}}$  металу, який пластично деформують, зростає під час постійної динамічної твердості  $HD$  розм'якшеного металу пропорційно росту площі сферичної лунки  $f_l = \pi dy$  (тут  $d$  – діаметр сферичної гранули), тобто

$$R_{\text{пл}} = HD \cdot f_l = HD \cdot \pi d \int_{h_{\text{пр}}}^h dy, \quad (9)$$

де  $HD$  – динамічна твердість металу;

$d$  – діаметр сфери, яка описана навколо атакуючого дробу;

$h_{\text{пр}}$  – глибина пружнодеформованої лунки;

$h = h_{\text{пр}} + h_{\text{пл}}$  – повна глибина деформованої лунки.

Після завершення вдавлювання метал деформованої сферичної лунки починає частково відновлювати свою попередню форму, виправляючись до точки 3 на величину  $h_{\text{пр}}$  і відкидає дріб у зворотному напрямку. Дріб рикошетить з певною початковою швидкістю  $U_{n0}$ .

Вважаємо, що за фізичним змістом описаного процесу взаємодії швидкість  $V_{n1}$  дробу в точці 1 співрозмірна зі швидкістю її рикошету  $U_{n0}$  в точці 3, тобто

$$V_{n1} \approx V_{n0} - U_{n0} = V_{n0} - k_B V_{n0}. \quad (10)$$

Отже, значення складових частин рівняння (6) запишемо так:

$$A = \frac{mV_{n0}^2}{2}, \quad (11)$$

$$A_{\text{пр}} = \frac{m}{2} (V_{n0}^2 - V_{n1}^2) (1 - \eta), \quad (12)$$

$$A_{\text{пл}} = \frac{mV_{n1}^2}{2} (1 - \eta), \quad (13)$$

$$A_{\text{дод}} = A\eta = \frac{mV_{n0}^2}{2} \eta, \quad (14)$$

де  $\eta$  – частка втрат кінетичної енергії атакуючого дробу на внутрішнє тертя (близько 85...95%), в результаті якого метал нагріваєть-

ся, на мікрорізання, зовнішнє тертя, розколювання дробу та дисипативні втрати.

Таким чином, на пластичне деформування лунки витрачається частина кінетичної енергії атакуючого дробу, яку визначаємо за формулою

$$A_{пл} = \frac{mV_{n1}^2}{2}(1 - \eta) = \frac{mV_{n0}^2(1 - k_b)^2}{2}(1 - \eta). \quad (15)$$

Дріб залишає на поверхні матеріалу, який обробляють, пластично деформовану лунку глибиною  $h_{пл}$  і об'ємом

$$\omega_l = \frac{1}{3}\pi h_{пл}^2(3d/2 - h_{пл}). \quad (16)$$

Показник шорсткості поверхні  $Rz$  є сумою середніх абсолютних значень висот п'яти найбільших виступів профілю  $h_{imax}$  і глибин п'яти найбільших впадин профілю  $h_{imin}$  в межах базової довжини  $Rz = \frac{1}{5}(\sum_{i=1}^5|h_{imax}| + \sum_{i=1}^5|h_{imin}|)$ . Тому безліч лунок формують параметр шорсткості  $Rz$  поверхні, яку обробляють. Вважаємо, що  $h_{пл} \approx Rz$ , тоді формула (16) матиме такий вигляд:

$$\omega_l = \frac{1}{3}\pi Rz^2(3d/2 - Rz). \quad (17)$$

Враховуємо, що під час дробоструменевої обробки відбувається масована атака поверхні дробом, водночас вплив на елементарну ділянку поверхні неодноразовий, і на формування лунки витрачається сумарно затрачена робота

$$\sum A_{пл} = jA_{пл}. \quad (18)$$

де  $A_{пл}$  – енергія, затрачена однією дробиною на пластичне деформування;

$j$  – коефіцієнт врахування кількості впливу, який прямопропорційний коефіцієнту перекриття  $k_{п}$ . Приймаємо, що коефіцієнт врахування кількості впливу вдвічі менший за коефіцієнт перекриття за рахунок попадання дробин як на виступи, так і у впадини.

$$j \approx 0,5k_{п}. \quad (19)$$

Коефіцієнт перекриття є технологічним параметром дробоструменевої обробки, його визначають за формулою

$$k_{п} = \frac{f_{пер}}{f_{від}}, \quad (20)$$

де  $f_{пер}$  – площа поверхні, яка перекривається дробоструменевим факелом;

$$f_{пер} = nf_l,$$

де  $n = Q_c/m$  – кількість дробин, що викидається соплом за одиницю часу ( $Q_c$  – масова витрата дробу через сопло,  $m$  – маса дробу);

$f_l$  – площа поверхні лунки,  $f_l = \pi d_l h_{пл}$ ,  $d_l = 2\sqrt{h_{пл}(d - h_{пл})}$ . Оскільки  $h_{пл} \approx Rz$ , то  $f_l = 2\pi Rz\sqrt{Rz(d - Rz)}$ .

$f_{від}$  – площа відбитка факела на поверхні,

яку обробляють,  $f_{від} = \frac{n=Q_c/m}{4}$ . Тут  $d_{від}$  – діаметр відбитка факела, який є технологічним параметром дробоструменевої обробки.

З урахуванням (20) формула (19) має такий вигляд:

$$k_{п} = 8 \frac{\pi Q_c Rz \sqrt{Rz(d - Rz)}}{\pi d_{від}^2 m}. \quad (21)$$

Отже, динамічну твердість  $HD$  під час дробоструменевого очищення визначають за формулою

$$HD = \frac{\sum A_{пл}}{\omega_l} = \frac{3jmV_{n0}^2(1 - k_b)^2(1 - \eta)}{2\pi Rz^2(3d/2 - Rz)}. \quad (22)$$

Враховуємо, що дробоструменеве очищення виконується при косому ударі, коли  $V_{n0} = V_0 \sin \alpha$ , де  $V_0$  – швидкість атаки дробу,  $\alpha$  – кут атаки (зазвичай  $\alpha = 60^\circ \pm 5^\circ$ ). Тоді формула (19) такий вигляд

$$HD = \frac{3k_{п}mV_0^2 \sin^2 \alpha (1 - k_b)^2 (1 - \eta)}{4\pi Rz^2(3d/2 - Rz)}. \quad (23)$$

За цією формулою бачимо, що динамічна твердість низьковуглецевих сталей під час дробоструменевого очищення прямопропорційна квадрату швидкості атаки по нормалі, масі атакуючого дробу, залежить від коефіцієнтів відновлення швидкості та величини втрати енергії та оберненопропорційна діаметру описаної навколо дробу сфери і параметру шорсткості.

Тобто, на відміну від багатьох інших робіт, у формулі (23) враховано вплив значної кількості факторів на динамічну твердість матеріалу під час дробоструменевої обробки:

- фактор динамічного навантаження, який виражено масою дробу, швидкістю та кутом його атаки;

- фактор механічних властивостей матеріалу, що опосередковано виражено коефіцієнтами відновлення швидкості та величини втрати енергії;

- фактор шорсткості поверхні, який виражено діаметром дробу та параметром шорсткості.

### Оцінка динамічної твердості низьковуглецевої сталі під час різних режимів дробоструменевої обробки

Розрахуємо значення динамічної твердості низьколегованих сталей за різних умов дробоструменевої обробки. Вихідними даними є значення, отримані під час експериментальної промислової перевірки продуктивності дробоструменевого очищення поверхні виробу, який виготовлено зі сталі 20пс (табл. 2) в умовах ко-

Таблиця 2 – Дані експериментальних досліджень

№	Найменування параметра	Од. вим.	№ досліджень			
			1	2	3	4
1	Коефіцієнт перекриття, $k_{\text{п}}$		5	5	5	5
2	Діаметр дробу, $d$	мм	1,4	1,0	0,8	0,8
3	Маса дробинки, $m$	Н	$110 \cdot 10^{-6}$	$40 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$	$20 \cdot 10^{-6}$
4	Швидкість атаки дробу, $V_0$	м/с	85	100	100	135
5	Кут атаки дробу, $\alpha$	град	60	60	60	60
6	Коефіцієнт відновлення швидкості, $k_{\text{в}}$		0,60	0,60	0,60	0,60
7	Величина втрат енергії, $\eta$		0,85	0,85	0,85	0,85
8	Параметр шорсткості, $Rz$	мкм	125	100	80	100
9	Статична твердість матеріалу за Брінеллем, $HB$	од.	160			
10	Еквівалентне значення статичної твердості матеріалу за Брінеллем, $HB$	МПа	1569			
11	Розрахункова динамічна твердість матеріалу, $HD$	МПа·м/с	554	614	599	712

лишнього НДІ «Емальхіммаш». У наведених нижче розрахунках використовуємо систему вимірювань СІ, в якій значення динамічної твердості  $HD$  в МПа·м/с. Статична твердість за Брінеллем  $HB$  вимірюється в кгс і  $\text{мм}^2$ . Для коректного порівняння величин статичної і динамічності, одиниці виміру статичної твердості кгс і  $\text{мм}^2$  переведемо в одиниці СІ. Цю величину статичної твердості названо «еквівалентне значення статичної твердості матеріалу за Брінеллем,  $HB$ , в МПа».

За виконаними аналітичними розрахунками при заданих технологічних режимах обробки отримані значення динамічної твердості низьковуглецевих сталей нижче статичної в 2,2...2,8 рази.

### Висновки

Нами запропоновано залежність для визначення динамічної твердості низьколегованих сталей, що враховує фактори навантаження, механічні властивості матеріалу та якості поверхні. Результати обчислень підтвердили гіпотези та експериментальні результати, що динамічна твердість менша статичної.

Менше значення динамічної твердості пояснюється суттєвими втратами на внутрішнє тертя, що сприяє значному розм'якшенню елементарних об'ємів металу в ділянці очищення через його нагрівання.

У процесі вдавлювання в пружно-пластичне середовище швидкість твердого тіла поступово зменшується, тому висновок однозначний: під час обробки поверхні виробу з низьковуглецевої сталі динамічна твердість є змінною величиною. Це потрібно враховувати

під час аналітичних розрахунків геометричних параметрів профілю поверхонь, оброблених дробоструменевим методом.

Оскільки динамічну твердість металу згідно з дослідженнями [4] визначають границею плинності, то запропонована залежність також опосередковано оцінює і зміну границі плинності  $\sigma_T$  залежно від факторів впливу твердого тіла на поверхню, яку обробляють.

Визначення фактичної величини динамічної твердості низьколегованих сталей (з врахуванням багатьох факторів впливу) під час дробоструменевої обробки забезпечує обґрунтування раціональних технологічних режимів обробки та дає змогу прогнозувати якість металевих поверхонь після обробки.

Для апробації застосування запропонованої формули щодо визначення динамічної твердості необхідно з метою уточнення додатково дослідити величини коефіцієнтів  $k_{\text{в}}$  та  $\eta$  для різних марок сталей та умов навантаження, а також встановити діапазон значень технологічних режимів дробоструменевої обробки, за яких формула коректна.

Запропонована методика може бути покладена в основу розроблення установки для експериментального визначення динамічної твердості сталі. Наприклад, за еталонні умови візьмемо підшипникові кульки зі сталі ШХ15 діаметром 1 мм. Вони виконуватимуть роль дробин, що декілька разів за секунду вдаряються до елементарної ділянки поверхні сталі зі швидкістю 100 м/с. Запропоновану методику можна застосувати в різних галузях машинобудування.

## Література

## References

1. Динаміка та міцність енергетичних і сільськогосподарських машин та біотехнічних систем: колективна монографія / за ред. О. В. Горика, С. Б. Ковальчука. Полтава: видавництво «Сімон», 2015. 116 с.
2. ISO 14577-1:2015 Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method.
3. Кудрявцев И.В. Современное состояние и перспективы развития методов повышения прочности и долговечности деталей машин ППД. *Вестник машиностроения*. 1970. № 1. С. 9-13; *Вестник машиностроения*. 1972. № 1. С. 35-38.
4. Дрозд М. С., Матлин М. М., Сидякин Ю. И. Инженерные расчеты упругопластической деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
5. Куш В. И., Дуб С. Н. Оценка упругопластических свойств материалов по данным наноиндентирования и компьютерного моделирования. *Сверхтвердые материалы*. 2012. № 3. С. 3-12.
6. Мильман Ю. В., Гринкевич К. Э., Мордель Л. В. Изучение влияния условий динамического индентирования на механические свойства нанокристаллического вольфрама и поликристаллической меди. *Вопросы атомной науки и техники*. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. 2011. № 4. С. 73-77.
7. <https://evek.com.ua/materials.html>
8. <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/09g2s>
9. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. М.: Мир, 1982. 520с.
10. Артамонов Е. В., Васильев Д. В., Утешев М. Х. Резание металлов и температурный фактор: учебное пособие / под общ. ред. М.Х. Утешева. Тюмень: ТюмНГУ. 2012. 150 с.
11. Можин Н. А., Аврелькин В. А., Федулов Е.А. Основы теории резания материалов: учебное пособие. Иванково: НВГПУ, 2018. 84 с.
12. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. С.: Машиностроение. 1974. 320 с.
13. Зельдович Я. В., Яглом И. М. Высшая математика для начинающих физиков и техников. М.: Наука, 1982. 510 с.
1. Dynamika ta mitsnist enerhetychnykh i silskohospodarskykh mashyn ta biotekhnichnykh system: kolektyvna monohrafiia / za red. O.V.Horyka, S.B.Kovalchuka. Poltava: vydavnytstvo «Simon», 2015. 116 p. [in Ukrainian]
2. ISO 14577-1:2015 Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters – Part 1: Test method.
3. Kudryavtsev I.V. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya metodov povysheniya prochnosti i dolgovechnosti detaley mashin PPD. *Vestnik mashinostroeniya*. 1970. No 1. P. 9-13; *Vestnik mashinostroeniya*. 1972. No 1. P. 35-38. [in Russian]
4. Drozd M. S., Matlin M. M., Sidyakin Yu. I. Inzhenernyie raschety uprugoplasticheskoy deformatsii. M.: Mashinostroenie, 1986. 224 p. [in Russian]
5. Kusch V. I., Dub S. N. Otsenka uprugoplasticheskikh svoystv materialov po dannyim nanoindentirovaniya i kompyuternogo modelirovaniya. *Sverhtverdyie materialy*. 2012. No 3. P. 3-12. [in Russian]
6. Milman Yu. V., Grinkevich K. E., Mordel L. V. Izuchenie vliyaniya usloviy dinamicheskogo indentirovaniya na mehanicheskie svoystva nanokristallicheskogo volframa i polikristallicheskoy medi. *Voprosy atomnoy nauki i tehniki. Seriya: Fizika radiatsionnyih povrezhdeniy i radiatsionnoe materialovedenie*. 2011. No 4. P. 73-77. [in Russian]
7. <https://evek.com.ua/materials.html> [in Russian]
8. <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/09g2s> [in Russian]
9. Kuhling H. Spravochnik po fizike / Per. s nem. M.: Mir, 1982. 520 p. [in Russian]
10. Artamonov E. V., Vasilev D. V., Uteshev M. H. Rezanie metallov i temperaturnyy faktor: uchebnoe posobie / pod obsch. red. M.H.Utesheva. Tyumen: TyumNGU, 2012. 150 p. [in Russian]
11. Mozhin N. A., Avrelkin V. A., Fedulov E.A. Osnovy teorii rezaniya materialov: uchebnoe posobie. Ivankovo: NVGPU, 2018. 84 p. [in Russian]
12. Maslov E. N. Teoriya shlifovaniya materialov. S.: Mashinostroenie. 1974. 320 p. [in Russian]
13. Zeldovich Ya. V., Yaglom I. M. Vysshaya matematika dlya nachinayuschih fizikov i tehnikov. M.: Nauka, 1982. 510 p. [in Russian]