

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ УДАРУ ПРИ СТАТИКО-ІМПУЛЬСНОМУ ЗМІЦНЕННІ ПОВЕРХНЕВИМ ПЛАСТИЧНИМ ДЕФОРМУВАННЯМ

В статті розглянуто питання підвищення ефективності використання енергії ударного навантаження. Проведено огляд останніх досліджень і публікацій та встановлено перспективні напрямки підвищення ефективності використання енергії удару. Запропоновано нову модель ударної системи з статичним навантаженням бойка та інструмента. Розроблено методику розрахунку енергосилових параметрів ударної системи та отримано математичні залежності. Одержано математичну залежність для розрахунку оптимальної енергії удару в залежності від радіуса деформуючого тіла. Запропоновано схему зміцнення біполярним ударом. Проведено комп'ютерне моделювання процесу статико-імпульсного поверхневого зміцнення.

Ключові слова: пластичне деформування, метод, енергія, параметр, зміцнення.

M.M. KOSIYUK, S.A. KOSTYUK
Khmelnytsky National University

INCREASING THE EFFICIENCY USE IMPACT ENERGY AT STATIC-PULSED SURFACE-PLASTIC STRENGTHENING

The problem of increasing the efficiency use shock load energy at static-pulsed surface-plastic strengthening are considered. The review of recent researches and publications was carried out and promising directions for increasing the efficiency use energy of blow were established. The influence of the impact system parameters on the shape and amplitude of the impact pulse is analyzed. The recommended range of correlations of the geometric parameters of the elements of the impact system is established. A new model of impact system with a static load of hammer and tool is offered. The method of calculating the energy-power parameters of proposed impact system is developed and mathematical dependences are obtained. To reaffirmation the efficiency of the proposed scheme, experimental research were carried out on the influence of the static load of hammer and tool on the change of micro hardness surface layer. In purpose to increase the productivity of the process machining and the energy use coefficient, a bipolar impact strengthening scheme is proposed, which is characterized in that during the processing of the part simultaneously receives two opposite deformation waves, whose energy is maximally used for deformation of the surface layer of the part and is not absorbed by a massive anvil, the absence of which reduces the metal capacity of the device design. The mathematical dependence of the calculation of impact energy on the use of spherical deforming bodies of different radii is obtained. Research were carried out of the stress-strain state of samples, which was strengthened by the bipolar impact scheme in the Abaqus software system, was obtained and contour voltage distribution graphs were obtained with reinforced rectangular and round-section samples.

Keywords: plastic deformation, method, energy, parameter, strengthening.

Постановка проблеми

Одним з основних напрямків підвищення ефективності використання енергії удару є забезпечення умов для протікання хвильових процесів в ударній системі за рахунок комбінацій геометричних форм, розмірів, акустичних жорсткостей виконавчих органів ударної системи.

Також підвищення ефективності процесу зміцнення можливе за рахунок удосконалення схеми обробки та введення додаткових параметрів, що сприяє розширенню технологічних можливостей способу (підвищення продуктивності, покращення фізико-механічних властивостей зміцненого поверхневого шару).

Заходи спрямовані на підвищення експлуатаційних властивостей поверхневого шару контактуючих поверхонь деталей повинні забезпечувати достатню твердість, стискаючи залишкові напруження, дрібнодисперсну структуру, шорсткість наближену до експлуатаційної та геометрично визначений на поверхні мастило утримуючий мікрорельєф. Такі характеристики поверхні можливо забезпечити за рахунок зміцнення методом поверхнево-пластичного деформування статико-імпульсною обробкою (ППД СЮ), який характеризується широкими технологічними можливостями [1, 2, 3].

Під час статико-імпульсного зміцнення в залежності від схеми та параметрів процесу обробки, енергія ударного навантаження може витратитись з різним коефіцієнтом використання. Тому питання вибору схеми обробки та розроблення методики розрахунку оптимальних параметрів процесу зміцнення, які б забезпечували максимальний коефіцієнт використання енергії удару – задача актуальна.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Технологія СЮ деталей машин передбачає статичне та періодичне імпульсне навантаження оброблюваної поверхні інструментом.

При зміцненні поверхневого шару деталей можуть застосовуватись деформуючі елементи (ДЕ) з різноманітною геометрією робочої поверхні та різні способи підведення енергії в кратер деформації. Як показує практика в процесах динамічного зміцнення з одночасним формуванням на поверхні мастило утримуючого мікрорельєфу в якості ДЕ застосовуються тіла переважно сферичної форми з радіусами $R=1...5$ мм. В залежності від фізико-механічних властивостей матеріалів інструмента та заготовки, а також від бажаної глибини, текстури і ступеня зміцнення, призначають режими обробки та радіус ДЕ, які визначають енергоємність процесу зміцнення.

Формування зміцненого поверхневого шару відбувається в результаті послідовного нанесення на поверхню заготовки пластичних відбитків, які формуються під дією статичного та керованого динамічного навантаження інструмента.

Статичне навантаження забезпечує постійний контакт інструмента з оброблюваною поверхнею та сприяє більш повному використанню енергії динамічного навантаження (удару).

Проведені дослідження [4] вказують, що на форму ударних імпульсів значний вплив чинять форма та геометричні параметри бойка й інструмента (хвилевода). Встановлено рекомендований діапазон співвідношень геометричних параметрів елементів ударної системи (бойок-інструмент) гладкої циліндричної форми, (рис. 1): $L_1/L_2=3\dots5$; $d_1/d_2=1\dots3$; $L_2/d_2 \geq 3$ та експериментально підтверджено, що кількість енергії, яка передається зміцнювальній поверхні ударною системою з ступінчастим бойком на 20...25% вища, порівняно з системою, яка складається з бойка гладкої циліндричної форми, (рис. 2).

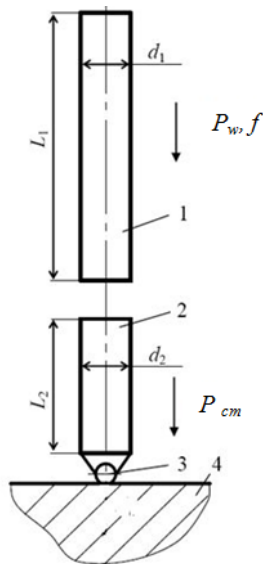


Рис. 1. Схема ударної системи бойок-інструмент гладкої циліндричної форми
1 – бойок; 2 – інструмент; 3 – деформуючий елемент; 4 – зразок

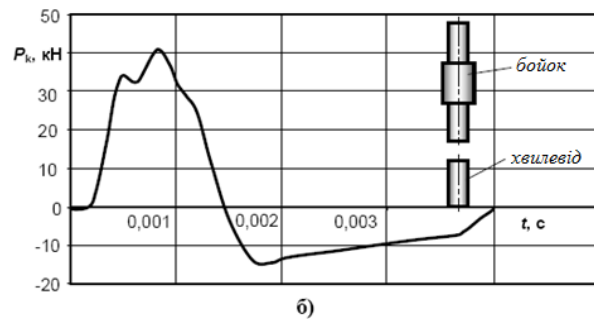
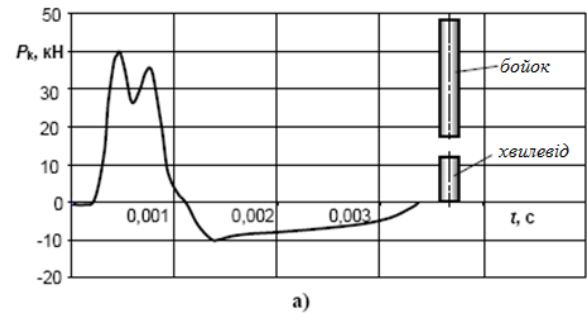


Рис. 2. Діаграма імпульсів, що генеруються ударною системою бойок-інструмент
а – бойок гладкої циліндричної форми; б – бойок ступінчатої циліндричної форми

Якщо при статико-імпульсному зміцненні в ударній системі проходять хвильові процеси, то необхідно враховувати вплив кінцевих розмірів зразків, оскільки зміцнення здійснюється за рахунок передачі енергії у вигляді хвилі деформації, яка перетворюється на всіх границях зі змінною акустичною жорсткістю, в тому числі і на границі кінцевих розмірів зміцнюваного зразка. В результаті дії деформаційної хвилі на матеріал зразка відбувається зміна твердості його поверхневого шару і структури в залежності від кінцевих розмірів деталі [5].

Рівномірність зміцнення при СЮ визначається перекриттям пластичних відбитків, залежить від режимів обробки та описується коефіцієнтом перекриття K :

$$K = 1 - \frac{V_s}{\delta f 60} \quad (1)$$

де V_s – швидкість подачі, мм/хв; f – частота ударів, Гц; δ – розмір пластичного відбитка який вимірюється в напрямку подачі, мм.

В результаті досліджень встановлено, що при режимах обробки ($0 \leq K \leq 0,5$) формується явно виражена гетерогенна структура зміцненого поверхневого шару [3]. Тобто утворюються ділянки високої та низької твердості, що забезпечує раціональний стан поверхні яка сприймає циклічні навантаження.

Раніше таку структуру отримували методами термічної обробки (ТО) [6], хіміко-термічної обробки (ХТО) [7] та завдяки нанесенню покриттів [8].

У роботах [9, 10] та ін. встановлена висока ефективність застосування зміцнення поверхневого шару комбінованими методами ППД для підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин.

Аналіз способів та пристроїв для поверхневого зміцнення методами ППД вказує на доцільність застосування СЮ та проведення заходів з підвищення ефективності використання енергії удару, а також необхідність розробки верстатних пристроїв, які б дозволяли формувати зміцнений поверхневий шар з одночасним нанесенням геометрично визначеного на поверхні мастило утримуючого мікрорельєфу та інженерної методики розрахунку режимів обробки.

Мета статі. Підвищення ефективності використання енергії удару при формуванні зміцненого поверхневого шару методом ППД СЮ.

Виклад основного матеріалу дослідження

Зміцнювальну обробку ППД як правило використовують для чистових та викінчувальних операцій технологічного процесу, замість або після ТО.

Метод викінчувальної статико-імпульсної обробки порівняно з чистовим точінням, шліфуванням та поліруванням характеризується рядом переваг: відсутнє перерізування волокон металу, створюється дрібнодисперсна структура в поверхневому шарі; відсутнє шаржування оброблюваної поверхні абразивними частинками; відсутні термічні дефекти; забезпечується стабільна якість поверхні, зберігається вихідна форма заготовки; створюється сприятлива форма мікронерівностей із шорсткістю поверхні наближеної до робочої; є можливість створення геометрично визначеного на поверхні мастило утримуючого мікрорельєфу; в поверхневому шарі створюються сприятливі залишкові напруження стиску; плавно і стабільно підвищується твердість поверхні.

Викінчувальна статико-імпульсна зміцнююча обробка підвищує зносостійкість, контактну витривалість та інші експлуатаційні властивості оброблених деталей за умови призначення оптимальних режимів обробки.

Результат зміцнення при ППД СЮ залежить від властивостей матеріалу, форми ударного імпульсу, розмірів заготовки і деформуючого тіла та енергії удару.

Для раціонального використання енергії удару необхідно забезпечити формування ударного імпульсу оптимальної форми, амплітуда якого зростає з інтенсивністю рівною інтенсивності опору під час впровадження інструмента в поверхню зміцнювального зразка. Формування імпульсу такої форми (рис. 2, б) можливе при ударі циліндричним ступінчастим бойком по статично навантаженому інструменту, геометричні співвідношення розмірів яких відповідають рекомендованим.

При розробці машин ударної дії однією з головних задач є підвищення ефективності використання енергії, що надходить від генератора механічних імпульсів (ГМІ) в зону деформації. Для вирішення даної задачі в роботі запропоновано нову модель ударної системи ГМІ з додатковим статичним навантаженням ступінчатого бойка.

З класичної теорії удару максимальна передача енергії бойка інструменту можлива за умови, коли після удару напрямки векторів швидкостей тіл співпадають і продовжують рух як одне ціле.

Конструктивна схема запропонованої ударної системи з додатковим статичним навантаженням бойка представлена на (рис. 3).

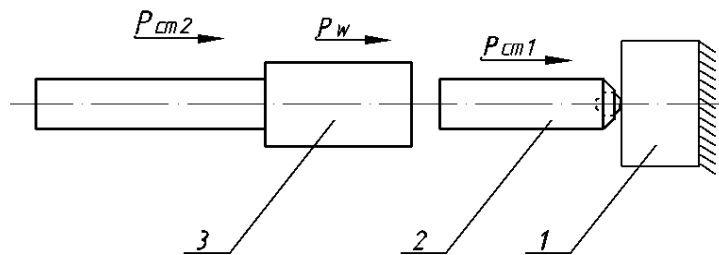


Рис. 3. Конструктивна схема ударної системи з статичним навантаженням бойка та інструмента
1 – деталь; 2 – інструмент; 3 – бойок

Статичне та динамічне навантаження бойка забезпечується за рахунок енергії пружно деформованого тіла (стисненої пружини). Характеристика пружини підбирається таким чином, щоб частина її потенціальної енергії перетворювалася в кінетичну енергію бойка (W_u), а інша її частина витрачалась на статичне навантаження бойка (P_{cm2}), і унеможливила його відрив (відскок) від інструмента.

Якщо не враховувати статичне навантаження бойка, то коефіцієнт передачі енергії бойка інструменту розраховується за формулою, [11]:

$$\eta = 1 - 4e^{-2(1+0.5e^{-2\alpha})} \tag{2}$$

де α – акустична жорсткість

$$\alpha = \frac{m_1}{m_2} \tag{3}$$

де m_1 – маса інструмента, m_2 – маса бойка.

Якщо вважати, що максимальне значення $\eta_{max} = 1$, то енергію відскоку можна знайти:

$$W_e = (1 - \eta) W_u \tag{4}$$

де W_u – енергія удару.

Таким чином мінімально-необхідна потенційна енергія стисненої пружини W_n розраховується за умови:

$$W_n \cong W_u + W_e \tag{5}$$

Отже

$$W_u + W_e = W_u + (1 - \eta) W_u = (2 - \eta) W_u \tag{6}$$

Або

$$W_n \cong (2 - \eta) W_u \tag{7}$$

Згідно із законом збереження механічної енергії: сума кінетичної і потенційної енергії тіла зберігається при його механічному русі.

Для випадку навантаження бойка згідно із запропонованою схемою, (рис. 4) закон збереження енергії можна записати наступним чином:

$$\frac{m_1 v_0^2(t_2)}{2} + \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} + m_1 g x_2 = \frac{m_1 v_1^2(t_2)}{2} + \frac{k x_1^2}{2}, \tag{8}$$

де x_1 – величина стиску пружини регулювальною втулкою; x_2 – величина стиску пружини за рахунок підйому кулачка генератора механічних імпульсів; k – жорсткість пружини бойка; t_1, t_2 – проміжки часу; m_1 – маса бойка; v_0 – швидкість бойка в початковий момент часу t_1 ; v_1 – швидкість бойка в момент часу t_2 (удар по інструменту).

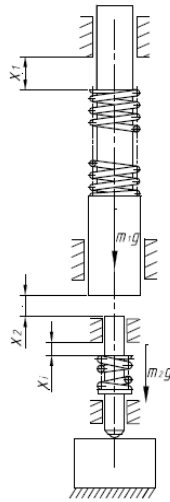


Рис. 4. Розрахунково-конструктивна схема ударної системи з додатковим навантаженням бойка

Кінетична енергія бойка в момент удару розраховується за формулою:

$$W_{k1} = \frac{m_1 v_1^2(t_2)}{2} = \frac{k(x_1 + x_2)^2}{2} - \frac{k x_1^2}{2} + m_1 g x_2 = \frac{k(x_2^2 + 2x_1 x_2)}{2} + m_1 g x_2 \tag{9}$$

Передударна швидкість бойка визначається з формули (9) :

$$v_1 = \sqrt{\frac{k}{m_1} (x_2^2 + 2x_1 x_2) + 2g x_2} \tag{10}$$

В момент дотику торця бойка (який в цей момент має швидкість v_1) з торцем інструмента, тіла набувають спільної швидкості v , яку будемо вважати початковою швидкістю удару.

Згідно із законом збереження імпульсу:

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v, \tag{11}$$

де v_2 – швидкість інструмента до удару з бойком, $v_2 = 0$

Звідки:

$$v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2} = \frac{v_1}{1 + \frac{m_2}{m_1}} \tag{12}$$

З врахуванням формули (10):

$$v = \frac{m_1 \sqrt{\frac{k}{m_1} (x_2^2 + 2x_1 x_2) + 2g x_2}}{m_1 + m_2} \tag{13}$$

Кінетична енергія системи в момент удару:

$$W_{k2} = \frac{1}{2} [(m_1 + m_2) \left(\frac{m_1 \sqrt{\frac{k}{m_1} (x_2^2 + 2x_1 x_2) + 2g x_2}}{m_1 + m_2} \right)^2] = \frac{m_1^2 \left(\frac{k}{m_1} (x_2^2 + 2x_1 x_2) + 2g x_2 \right)}{2(m_1 + m_2)} \tag{14}$$

Потенційна енергія навантаженого інструмента розраховується за формулою:

$$W_{n2}, \tag{15}$$

де k_1 – жорсткість пружини інструмента; x_1 – величина стиску пружини інструмента.

Повна енергія ударної системи в момент удару:

Або

$$\frac{m_1 \left(\frac{k}{m_2} (x_1^2 + 2x_1 x_2) + 2g x_2 \right)}{2(m_1 + m_2)} + \frac{k x_1^2}{2} + \frac{k_1 \cdot x_1^2}{2} \quad (17)$$

Потенціальна енергія ударної системи до удару:

$$W_n = mgx_2 + \quad (18)$$

Використання статичних навантажень бойка та інструмента при СІО дозволяє більш ефективно використовувати енергію ударних імпульсів і розширює можливості формування зміцненого поверхневого шару з необхідною рівномірністю зміцнення.

Оцінка впливу статичних навантажень бойка та інструмента на процес зміцнення виявлялась по зміні мікротвердості зміцненого поверхневого шару зразків. Вимірювання мікротвердості проводилось на універсальному мікротвердомірі ПМТ-3 в центрі пластичного відбитка.

Для виключення впливу параметрів СІО на процес досліджень використовувався експериментальний стенд (рис.5) з постійними технологічними параметрами та інструментом з сферичним деформуючим тілом R=1.5 мм зі сталі ШХ 15 термообробленої до твердості 61 HRC з шорсткістю R_a = 0,1 мкм.

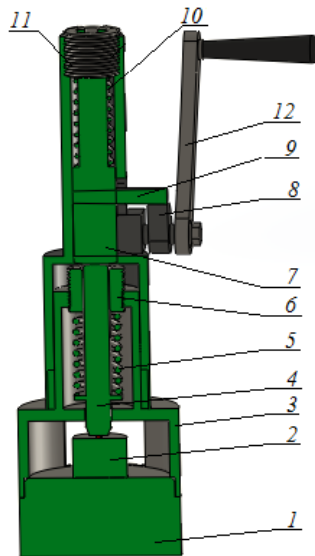


Рис. 5. Загальний вигляд експериментального стенду

1 – наковалля; 2 – зразок; 3 – корпус; 4 – інструмент; 5 – пружина; 6 – регулювальна втулка; 8 – кулачок; 9 – штовхач; 10 – пружина; 11 – регулювальна втулка; 12 – рукоятка

Дослідження проводились в три етапи (без статичного навантаження, з статичним навантаженням інструмента $P_{cm1} = 40\text{Н}$, з статичним навантаженням бойка та інструмента $P_{cm1} = 40\text{Н}$, $P_{cm2} = 150\text{Н}$) на зразках однакових розмірів зі сталі 40Х, нормалізованої до твердості $HV^{100} = 313$, при постійній енергії удару $W = 2.35\text{Дж}$.

Схеми навантажень бойка та інструмента при експериментальних дослідженнях відображені на (рис.6), а одержані результати на (рис. 7).

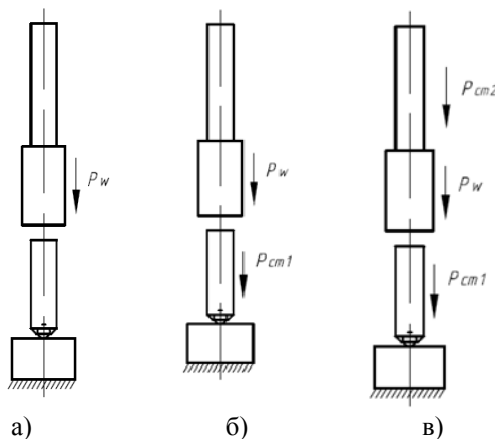


Рис. 6. Схеми навантажень бойка та інструмента

а) без статичного навантаження; б) з статичним навантаженням інструмента; в) з статичним навантаженням бойка та інструмента

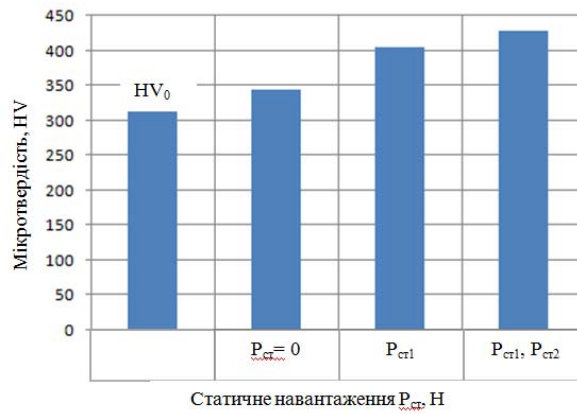


Рис. 7. Вплив статичного навантажень бойка та інструмента на зміну мікротвердості поверхневого шару

Аналіз отриманих результатів показав, що схема з використанням статичного навантаження бойка та інструмента при однаковій енергії удару забезпечує підвищення мікротвердості до 20% у порівнянні з традиційною схемою обробки (без статичного навантаження), що свідчить про зростання коефіцієнта використання енергії.

Для підвищення продуктивності процесу обробки та коефіцієнта використання енергії запропоновано схему зміцнення біполярним ударом, (рис 8). За такої схеми обробки деталь одночасно сприймає дві зустрічні деформаційні хвилі, енергія яких максимально використовується під час деформації поверхневого шару заготовки і не поглинається масивною наковальнею, відсутність якої знижує металоемкість конструкції пристрою.

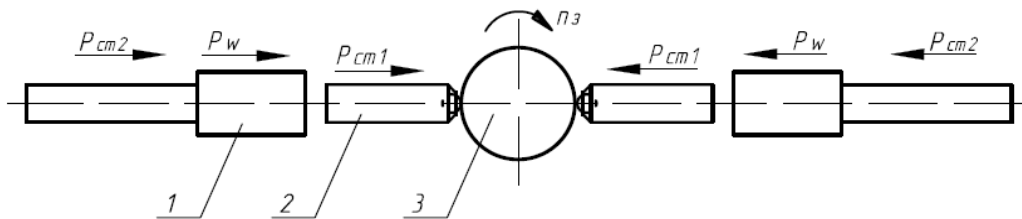


Рис. 8. Схема зміцнення біполярним ударом
1 – боек; 2 – інструмент; 3 – заготовка

Для перевірки ефективності запропонованої схеми, розроблена методика комп'ютерного моделювання та проведені дослідження процесу ППД СЮ у програмному комплексі Abaqus, який дозволяє відстежувати процес зміцнення в заданий проміжок часу. На рис. 9 наведено контурні графіки розподілу напружень при зміцненні зразків прямокутного та круглого сечення для одного із кроків експерименту.

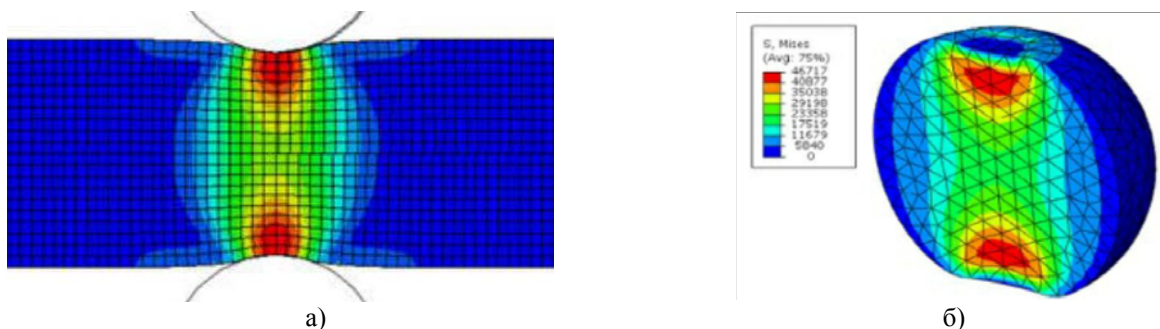


Рис. 9. Контурний графік розподілу напружень під дією біполярного удару
а – зразок прямокутного сечення; б – зразок сферичної форми

У випадку гетерогенного зміцнення поверхневого шару з одночасним нанесенням геометрично визначеного на поверхні мастило утримуючого мікрорельєфу висуваються додаткові вимоги до глибини та діаметра пластичних відбитків, величина яких залежить від радіуса ДЕ, питомої енергії ударного навантаження та коефіцієнта перекриття.

Таким чином виникає необхідність в отриманні залежності, яка б дозволяла визначати необхідну енергію одиничного ударного навантаження, при зміні радіуса сфери деформуючого тіла, за умови забезпечення сталої мікротвердості.

В зв'язку зі складністю теоретичного описання ударної хвилі, яка формується при переході через інструмент в деталь, перевагу надають експериментальним дослідженням [11].

Дослідження пропонується проводити за методом експериментально-теоретичної рівноваги.

В монографії [12] фізичний зміст явища удару описаний як процес, динамічної взаємодії двох і

більше об'єктів, при чому сили, що виникають під час удару досягають екстремальних значень за дуже короткий проміжок часу і породжують хвилі напружень, які виникають в області контакту. Розглядаючи удар як процес поширення в ударній системі механічних хвиль, що являє собою послідовну передачу руху від одної ділянки речовини до іншої, а значить і передачу енергії в кратер деформації, яку доставляє джерело хвилі, тобто деформуюче тіло, що приводить в рух безпосередньо контактуючі з ним шари металу, які здеформувалися передають залишкову енергію наступному шару і т.д.. Таким чином поширення деформаційної хвилі створює в тілі потік енергії, що розходить від джерела.

Якщо зробити припущення, що розміри сферичного джерела хвилі достатньо малі і енергія від нього поширюється у всі сторони рівномірно, то його можна вважати точковим, а поширена ним деформаційна хвиля буде сферичною, тобто енергія рівномірно розподілиться по всій поверхні хвильової сфери.

В такому випадку енергія, що перенесена хвилею через січення, площа якого дорівнює 1 м^2 за час рівний 1 с , тобто потужність перенесена через одиничне січення, називають інтенсивністю хвилі, яка може бути виражена наступною залежністю:

$$(19)$$

де P – потужність, Вт; S – площа поверхні, м^2 ; R – радіус сфери, м; τ – час передачі енергії, с.

Таким чином інтенсивність сферичної хвилі спадає обернено пропорційно квадрату відстані до центра джерела.

Будемо вважати, що з експерименту відомо твердість, глибину відбитка та (питому) енергію для випадку, коли радіус сфери деформуючого тіла R . У випадку застосування інструмента з радіусом сфери R_i , за умови $I=I_i=\text{const}$, $\tau = \text{const}$, можна записати наступне рівняння:

$$\frac{W}{4\pi \cdot R^2 \tau} = \frac{W_i}{4\pi \cdot R_i^2 \tau} \quad (20)$$

звідки:

$$W_i = \frac{W \cdot 4\pi \cdot R_i^2 \tau}{4\pi \cdot R^2 \tau} = \frac{W \cdot R_i^2}{R^2} \quad (21)$$

Отримана залежність 21 дозволяє визначити необхідну енергію удару в залежності від радіуса сфери R_i деформуючого тіла.

Для експериментальної перевірки формули (21) проводились дослідження з використанням сферичних деформуючих тіл з $R_i = 1 \dots 5 \text{ мм}$. Величини відповідних енергій W_i розраховувались за формулою 21.

Зразки піддавались ударному навантаженню в результаті чого на поверхні формувались відбитки.

Оцінку запропонованого методу проводили шляхом контролювання відхилень значення мікротвердості в центрі пластичних відбитків.

Результати досліджень зведені в таблицю 1.

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

Радіус деформуючого тіла R_i , мм	1	1.5	2.35	3.97
Енергія удару W_i , дж	1	2,25	5,52	15,76
Мікротвердість HV^{100} - до зміцнення	313			
-після зміцнення $HV_{\text{сер}}$	427	429	429	416
Відносне відхилення ΔHV , %	-	0,47	0,47	2,58

В результаті проведених досліджень отримано підтвердження запропонованого методу розрахунку енергії удару в залежності від радіуса деформуючого тіла, оскільки значення відносної похибки ΔHV не перевищує 3%.

Висновки

Розглянуто шляхи підвищення ефективності використання енергії удару при зміцненні методом ППД СЮ.

Запропоновано модель ударної системи з статичним навантаженням бойка і інструмента та схему обробки біполярним ударом. Розроблено методику розрахунку параметрів ударної системи.

Проведено комп'ютерне моделювання напружено-деформованого стану зміцнюваних зразків.

Отримано математичну залежність для визначення величини необхідної енергії удару для сферичних деформуючих тіл різних радіусів.

Результати проведеної роботи планується використати при проектуванні та виготовленні технологічного спорядження біполярної дії для статико-імпульсного зміцнення зовнішніх неповних сферичних поверхонь кульових шарнірів.

Література

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин) : учебник / Гаркунов Д.Н. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : "Издательство МСХА", 2002. – 632 с.
2. Киричек А.В. Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием (библиотека технолога) / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, А.Г. Лазуткин. – М. : Машиностроение, 2004. – 288 с.
3. Киричек А.В. Равномерность наклепа после статико-импульсной обработки / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 2. – С. 3–5.
4. Киричек А.В. Закономерности волнового деформационного нагружения очага деформации / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев, С.А. Силантьев // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2017. – № 2. – С. 144–147.
5. Киричек А. В. Особенности влияния конечных размеров детали на распределение микротвердости в поверхностном слое при его упрочнении волной деформации / А. В. Киричек, С. В. Баринин, А.В. Яшин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (48). – С. 54–58.
6. Киричек А.В. Создание гетерогенной структуры материала статико-импульсной обработкой / А.В. Киричек, Д.Л. Соловьев // СТИН. – 2007. – № 12. – С. 28–31.
7. Иванов Г.Л. Повышение износостойкости деталей созданием регулярной гетерогенной макроструктуры / Г.Л. Иванов, Л.В. Картонова, А.А. Худосин // Строительные и дорожные машины. – 1997. – № 1. – С. 33–34.
8. Смелянский В.М. Технологическое повышение износостойкости деталей методом электроэрозионного синтеза покрытий / В.М. Смелянский, В.А. Земсков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 2. – С. 27–35.
9. Маталин А.А. Технологические методы повышения долговечности деталей машин / Маталин А.А. – Киев : Техника, 1971. – 142 с.
10. Чепя П.А. Технологические основы упрочнения деталей поверхностным деформированием / Чепя П.А. – Минск : Наука и техника, 1981. – 128 с.
11. Алимов О.Д. Распространение волн деформаций в ударных системах / О.Д. Алимов, В.К. Манжосов, В.Э. Еремьянц, Ю.В. Невенчаный. – Фрунзе : ИЛИМ, 1980. – 200 с.
12. Goldsmith W. Impact. The theory and physical behavior of colliding solids / W. Goldsmith – London, 1960. – 379 p.

References

1. Harkunov D.N. Trybotekhnika (konstruyrovanye, yzghotovlenye y ekspluatatsiya mashyn): Uchebnyk. - 5-e yzd., pererab. y dop. – M.: "Yzdatelstvo MSKhA", 2002. 632 p.
2. Kyrychek A. V. Tekhnolohiya y oborudovanye statyko-ympulsnoi obrabotky poverkhnostnym plastycheskym deformyrovanyem (byblyoteka tekhnoloha)/ A. V. Kyrychek, D.L. Solovev, A.H. Lazutkin – M.: Mashynostroeny, 2004. 288 p.
3. Kyrychek A. V. Ravnomernost naklepa posle statyko-ymnulsnoi obrabotky / A. V. Kyrychek, D.L. Solovev // Uprochniaiushchye tekhnolohyy i pokrytya. 2005. No. 2, pp. 3–5.
4. Kyrychek A. V. Zakonomernosty volnovoho deformatsyonnoho nahruzheniya ochaha deformatsyy / A. V. Kyrychek, D.L. Solovev, S.A. Sylantev// herald Rybinskoi hosudarstvennoi avyatsyonnoi tekhnolohycheskoi akademyy ym. P.A. Soloveva 2017. No. 2, pp. 144–147.
5. Kyrychek A. V. Osobennosty vlyaniya konechnykh razmerov detaly na raspredelenye mykrotverdosty v poverkhnostnom sloe pry eho uprochnenyy volnoi deformatsyy. / A. V. Kyrychek, S. V. Barynov, A.V. Yashyn // herald Brianskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta.-2015. No. 4, pp. 54–58.
6. Kyrychek A.V. Sozdanye heterohennoi struktury materyala statyko-ympulsnoi obrabotkoi / A. V. Kyrychek, D.L. Solovev, A.H // STYN. 2007. No. 12, pp. 28–31.
7. Yvanov H.L. Povyshenye yznosostoikosty detalei sozdanyem rehuliarnoi heterorennoi makrostruktury / H.L. Yvanov, L.V. Kartonova, A.A. Khudoshyn // Stroytelnye y dorozhnye mashyny. 1997. No. 1, pp. 33–34.
8. Smelianskiy V.M. Tekhnolohycheskoe novyshenye yznosostoikosty detalei metodom e'lektroe'rozyonnoho synteza nokrytyi / V.M. Smelianskiy, V.A. Zemskov // Unrochniaiushchye tekhnolohyy y pokrytya. 2005. No. 2, pp. 27–35.
9. Matalyn A.A. Tekhnolohycheskye metody povysheniya dolhovechnosty detalei mashyn. Kyev: Tekhnika, 1971. 288 p.
10. Chepa P.A. Tekhnolohycheskye osnovy uprochneniya detalei poverkhnostnym deformyrovanyem. Mynsk: Nauka y tekhnika, 1981, 128 p.
11. Alymov O.D. Raspostraneniye voln deformatsyi v udarnykh systemakh / O.D. Alymov, V.K. Manzhosov, V.Э. Eremiants, Yu.V. Nevenchanyi – Frunze: YLYM, 1980. 200 p.
12. Goldsmith W. Impact. The theory and physical behavior of colliding solids / W. Goldsmith – London, 1960. 379 p.

Рецензія/Peer review : 03.05.2018 р.

Надрукована/Printed : 16.07.2018 р.
Рецензент: д.ф.-м.н., проф. Качурик І.І.