

А. О. КЕЛЕМЕШ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9429-8570

О. А. БУРЛАКА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-2296-7234

С. В. ЛЯШЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-3227-3738

В. В. ЛАВРЕНКО

старший викладач кафедри агроінженерії та автомобільного транспорту
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0001-6145-9224

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ БРОНЗОВИХ ВТУЛОК В АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНАХ

У науковій публікації наведено результати дослідження по визначенню впливу пластичного вібраційного деформування бронзових втулок автомобільних двигунів внутрішнього згоряння при їх відновленні. Основну увагу теоретичного та експериментального дослідження приділено удосконаленню складових технологій відновлення деталей автомобільних двигунів методами вібраційного пластичного деформування та вивченню механічних властивостей робочих поверхонь відновлених деталей таких автомобільних двигунів. На основі теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано механізми підвищення зносостійкості робочих поверхонь бронзових втулок системи газорозподілу автомобільних двигунів як застосування вібраційного пластичного деформування поверхневого шару бронзових втулок. Низка експериментального дослідження виконувалась при відновленні вібраційним пластичним деформуванням бронзових втулок розподільчого валу автомобіля КРАЗ.

Отримані закономірності зміни маси зсунутого на торець бронзової втулки металу за умови варіації кількісними значеннями кутів ухилу робочої поверхні пуансона та зусилля деформування при звичайній та вібраційній пластичній деформації підтверджують перевагу технологій вібраційного відновлення бронзових втулок автомобільних двигунів.

За порівняльними результатами дослідження мікроструктури робочих поверхонь бронзових втулок автомобільних двигунів зазначено, що при відновленні таких деталей вібраційним пластичним деформуванням, поверхнева зміцнена структура стає більш дрібнозернистою та має більшу ступінь рівномірності в порівнянні зі звичайною пластичною деформацією таких зразків. Збільшення глибини пластичного деформування призводить до додаткового зміцнення приконттактних відносно оброблюваного інструменту шарів робочої поверхні бронзової втулки. За умови застосування вібраційної пластичної деформації такі процеси відбуваються з більшою інтенсивністю.

Ключові слова: вібраційне деформування, автомобільний двигун, машинобудування, бронзова втулка, пластичність, зносостійкість, відновлення, пластична деформація.

А. О. KELEMESH

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9429-8570

O. A. BURLAKA

PhD, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-2296-7234

S. V. LIASHENKO

PhD, Associate Professor,
Head of the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0000-0002-3227-3738

V. V. LAVRENKO

Senior Lecturer at the Department of Agricultural Engineering
and Automobile Transport
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0001-6145-9224

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF PLASTIC DEFORMATION ON THE WEAR RESISTANCE OF BRONZE BUSHINGS IN AUTOMOTIVE ENGINES

The scientific publication presents the results of a study on determining the influence of plastic vibration deformation of bronze bushings of automobile internal combustion engines during their restoration. The main attention of theoretical and experimental research is paid to improving the components of the technology for restoring automobile engine parts by methods of vibration plastic deformation and studying the mechanical properties of the working surfaces of restored parts of such automobile engines. Based on theoretical and experimental research, mechanisms for increasing the wear resistance of the working surfaces of bronze bushings of the gas distribution system of automobile engines are proposed as the application of vibration plastic deformation of the surface layer of bronze bushings. A series of experimental studies was carried out during the restoration of bronze bushings of the KRAZ vehicle camshaft by vibration plastic deformation.

The obtained regularities of the change in the mass of the metal shifted to the end of the bronze bushing under the condition of varying the quantitative values of the angles of inclination of the working surface of the punch and the deformation force during conventional and vibrational plastic deformation confirm the superiority of the technologies of vibrational restoration of bronze bushings of automobile engines.

According to the comparative results of the study of the microstructure of the working surfaces of bronze bushings of automobile engines, it is noted that when restoring such parts by vibrational plastic deformation, the surface strengthened structure becomes finer-grained and has a greater degree of uniformity compared to conventional plastic deformation of such samples. An increase in the depth of plastic deformation leads to additional strengthening of the layers of the working surface of the bronze bushing in contact with the tool being processed. When using vibrational plastic deformation, such processes occur with greater intensity.

Key words: vibration deformation, automobile engine, mechanical engineering, bronze bushing, plasticity, wear resistance, recovery, plastic deformation.

Постановка проблеми

Рівень технічного стану вантажного та спеціалізованого автомобільного транспорту виробничих підприємств, що використовується для перевезення значної кількості вантажів, можливо визначати ступенем технічної справності та експлуатаційної надійності вузлів і агрегатів таких машин.

Відповідно, дослідження, експериментальна перевірка та виробниче впровадження нових технологічних процесів щодо ремонтного відновлення, а також виготовлення деталей дає змогу підвищити ступінь надійності та термін міжремонтного використання автомобільного транспорту.

З урахуванням сучасних важких умов використання автомобілів, зумовлених в тому числі і воєнним станом, особливо вантажних, призводить до значного збільшення витрат на відновлення автомобілів як фінансових, так людських ресурсів [1].

Можливо зауважити, що в сучасному автомобілебудуванні все більшого поширення набуває використання деталей, виготовлених з кольорових металів і сплавів. Відомо, що такі деталі при використанні у вузлах та агрегатах автомобільного транспорту витримують значні питомі динамічні та статичні навантаження та працюють при високих швидкостях. Більшість таких деталей виконані у формі бронзових підшипників ковзання типу «втулка» [2]. Прикладом використання описаних кінематичних пар, що використовують бронзові деталі,

є підшипники ковзання в розподільчих валах механізму газорозподілу та підшипники ковзання в турбонаддуві системи забезпечення повітрям двигуна внутрішнього згоряння.

На основі виробничої перевірки механічних властивостей робочих поверхонь бронзових деталей, що відновлені або зміцнені при виготовленні вібраційним пластичним деформуванням, можливо запропонувати таку технологію відносно бронзових втулок, що використовуються в автомобільних двигунах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомо, що використання вібраційних коливань та пластичної деформації у якості складових технологічних процесів відновлення просторових форм та зміцнення робочих поверхонь деталей типу «втулка», і в ремонтному виробництві, і при виготовленні нових, дає змогу отримати суттєві переваги в порівнянні з загальнопоширеними традиційними методами обробки та виготовлення таких деталей, що використовуються в машинобудуванні.

Відносно сучасних досліджень з даної тематики, то дослідження експериментального характеру [1], представлені як результати вивчення впливу пластичної деформації на міцність, на розрив і втомну довговічність при крученні бронзового сплаву CuSn7Zn4Pb7 . Такі дослідження спрямовані на систематизацію різних видів пошкоджень при пластичній деформації, з урахуванням різних комбінацій пластичної деформації та навантажень. Додатково було розглянуто мікроструктуру деформованого матеріалу [1] з перевіркою на відповідність стандартам бронзи. А в нашому випадку пропонується досліджувати пластичну деформацію як елемент технологічного процесу з відновлення геометричних форм і розмірів бронзових деталей автомобільних двигунів без руйнування.

Результати досліджень щодо пластичної деформації та бронзового покриття [2] може ефективно використовуватися при покращенні з'єднання втулка-вал. Нанесення на попередньо насичений вуглецем цементований шар м'якого антифрикційного шару, в тому числі з олов'яної бронзи, дає змогу підвищити втомну міцність валу.

У праці [3] розглядається та пропонується стратегія «внутрішньогранулярного ультрананоосадження». Мета – доволі сильна пластифікація з одночасним зміцненням полікристалічних сплавів Cu . При цьому, за твердженням авторів, внутрішньогранулярна дисперсія ультрананочастинок підвищує пластичність сплаву олов'яної бронзи на розтяг більш ніж у 2 рази, а також на 20% підвищує міцність сплаву.

Автори роботи [4] презентують результати досліджень щодо поведінки гарячої деформації сплаву C83600 Tin Bronze за підвищених температур. Отримано модифіковану модель типу Арреніуса поведінки гарячої деформації сплаву олов'яної бронзи C83600 , що має кращу передбачуваність. При цьому отримано реальну криву напруження-деформація сплаву C83600 Tin Bronze під час ізотермічного випробування на стиск з температурним діапазоном $873\text{--}1073\text{ K}$ і діапазоном швидкості деформації $0,001\text{--}1\text{ s}^{-1}$. Були встановлені основні рівняння для опису високо-температурного напруження течії цього сплаву.

Тобто пластична деформація бронзи, характер поведінки такого матеріалу при різних навантаженнях та температурних режимах, є досить актуальною науковою проблемою, питання подальшого дослідження можуть бути подані в напрямку здійснення пластичної деформації з використанням вібраційного інструменту.

Фізична природа вібраційного зміцнення в своїй основі містить коливальні гармонійні рухи відносно поверхні деталі, що піддається обробці при взаємодії з оброблювальним інструментом [5]. В наукових працях [6–7] авторами визначено підвищення опору втому металу за умови здійснення віброударних навантажень, крім цього, зазначено покращення механічних властивостей робочих поверхонь за умови використання відцентрового вібраційного зміцнення. Авторами у праці [7–8] зазначається зменшення використання матеріальних та трудових ресурсів в ремонтному виробництві за умови використання вібраційних технологій.

Фізична природа вібраційної обробки може бути охарактеризована циклічним періодичним відривом робочої поверхні інструмента відносно поверхні, що обробляється. Останнє дає змогу утворювати мікропроцеси розвантаження вказаних поверхонь. Ступінь динамічного навантаження при вібраційному зміцненні деталей збільшується зі збільшенням таких параметрів, як амплітуда та частота коливань [9–10]. Викладені в науковій літературі результати дослідження щодо впливу технологічних та технічних параметрів вібраційного пластичного деформування на робочі поверхні деталей є недостатніми.

Відомо, що ступінь зносостійкості матеріалу деталей, які пройшли вібраційну обробку, в значній мірі можливо визначити глибиною зміцненого шару, при цьому, за твердженням авторів [11–12] конкретні рекомендації по такій технології відсутні.

Відповідно, з урахуванням вищевикладеного, вважаємо за необхідне проведення розширених досліджень щодо визначення закономірностей вібраційного деформування деталей автомобілів.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження при цьому може бути визначена як поглиблене дослідження та визначення оптимальних параметрів технологій вібраційної обробки робочих поверхонь бронзових деталей автомобільних двигунів за умови підвищення їхньої експлуатаційної надійності та зносостійкості. Отримані при цьому результати дослідження мають як теоретичний, так і практичний інтерес.

Для досягнення поставленої мети нами передбачено вирішення наступних задач дослідження:

1) провести обґрунтування технологічного процесу вібраційного пластичного деформування бронзових втулок автомобільних двигунів, спрямованих на підвищення надійності та зносостійкості робочих поверхонь таких втулок;

2) здійснити порівняльний аналіз механічних властивостей деталей автомобільних двигунів, що виготовлені або відновлені за допомогою звичайного та вібраційного пластичного деформування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Предметом дослідження було обрано зразки натуральних зношених деталей автомобільних двигунів.

За досліджувані зразки використовували опорні втулки розподільчого валу двигуна автомобіля КРАЗ, виготовлені з бронзи БрОЦС 5-5-5 у двох розмірних групах: перша розмірна група – $L = 38,5$ мм; $d = 68$ мм; $d_0 = 54$ мм; друга розмірна група – $L = 30$ мм; $d = 68$ мм; $d_0 = 54$ мм.

Вібраційне відновлення та зміцнення внутрішньої поверхні досліджуваних зразків було виконано з використанням спеціального пуансону, що в свою чергу виготовлений з інструментальної сталі У7 [13].

Технологія виготовлення основного робочого інструменту – пуансонів (рис. 1) включала технологічну операцію термічного загартування в оливі з попереднім нагріванням пуансона до температури 780–800°C. Після цього здійснювався термічний відпуск при температурі 400–420°C, подальша витримка протягом 15...20 хв та охолодження. Важливо, що після термічної обробки твердість робочої поверхні пуансона становила 55–58 одиниць HRC, при цьому твердість хвостовика пуансона складала 40–45 одиниць HRC.

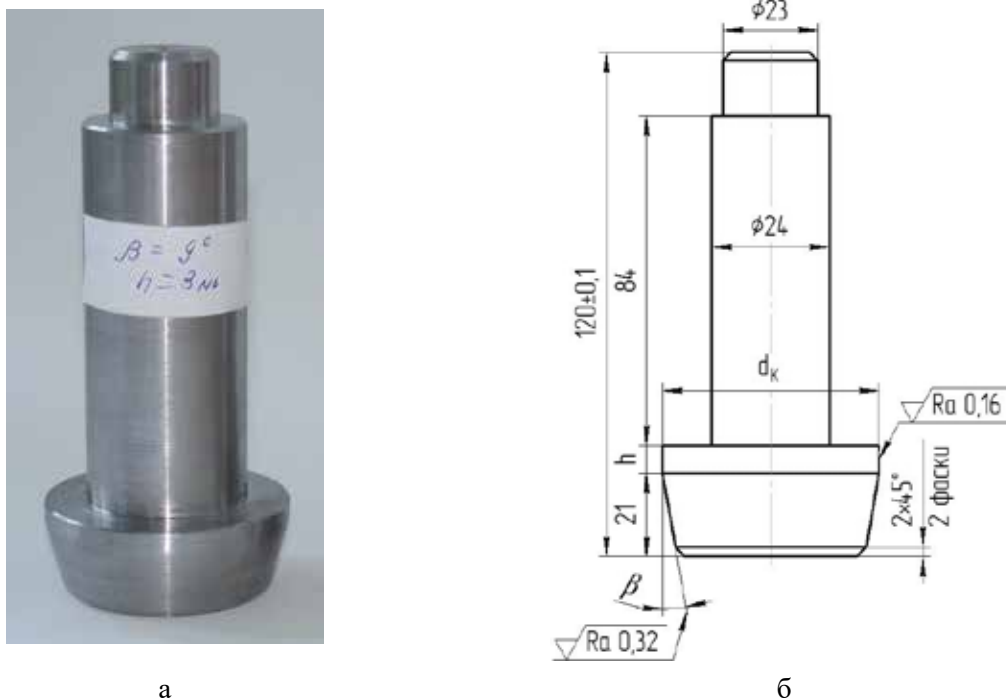


Рис. 1. Пуансон, що використаний для обробки робочих поверхонь бронзових втулок автомобільних двигунів: а – натурний зразок; б – компоновальна схема [13]

Одним з важливих факторів експериментального дослідження було визначення ступеню впливу зміни кута нахилу робочої поверхні пуансона на міцнісні характеристики обробленої поверхні бронзових втулок автомобільних двигунів. Експериментальні дослідження були проведені у варіаціях кута нахилу робочої поверхні пуансона β : 8°, 9°, 10°. Щодо особливості методики проведення експериментального дослідження, то у варіаціях експерименти по пластичному вібраційному деформуванню зношених бронзових втулок автомобільних двигунів було виконано як із застосуванням мастильної речовини, так і без неї. В якості останньої було використано моторне мастило М10Г2.

Експериментальні дослідження щодо віднайдення закономірностей та режимів вібраційної пластичної деформації відносно відновлення та зміцнення робочих поверхонь бронзових втулок автомобільних двигунів було здійснено з використанням спеціального експериментального обладнання (рис. 2). Основними складовими такого обладнання – експериментальної вібраційної установки визначено: збудувач вібраційних коливань (1), що змонтований на основі. Вертикальний рух збудувача вібраційних коливань, а відповідно і робочого пуансона став

можливий за допомогою системи гідравлічного приводу (3). Масивність основи установки (2) та віброізоляція запобігали передачі коливань відносно підлоги виробничого приміщення, рамна конструкція призначена для надійного кріплення вібраційного вузла.

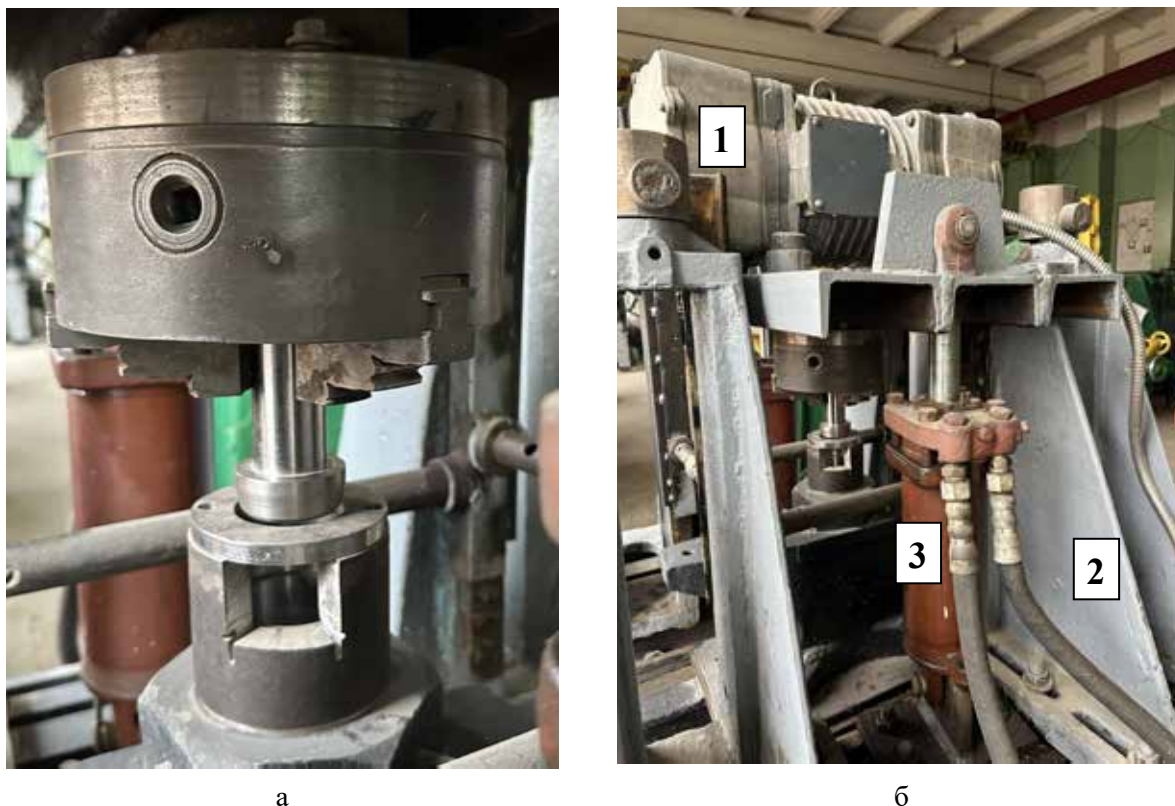


Рис. 2. Загальний вигляд експериментального обладнання для дослідження режимів вібраційної пластичної деформації при відновленні та зміцненні робочих поверхонь бронзових втулок автомобільних двигунів: а – система пуансон-матриця, б – силова вібраційно-гідравлічна система

За допомогою використаного в нашому дослідженні спеціального експериментального обладнання стало можливо виконувати низку дослідів з вібраційного пластичного деформування бронзових деталей, а саме: роздачі внутрішньої робочої поверхні, зовнішнього обтискання деталей типу «втулка» з одночасним зміцненням робочих поверхонь.

При одночасному використанні гідравлічного дроселя в системі гідроприводу даного експериментального обладнання, а також з урахуванням технічних та технологічних характеристик вібраційного вузла установки стало можливим змінювати основні режими проведення процесу вібраційного пластичного деформування: амплітуда, частота коливань робочого інструменту, швидкість руху вібраційного вузла.

Щодо методики визначення механічних та міцнісних властивостей оброблених бронзових втулок автомобільних двигунів, то такі дослідження було виконано з використанням спеціально відшліфованих пластин, що в свою чергу виготовлені з опорних втулок розподільчих валів автомобільних двигунів автомобіля КРАЗ за умов їхнього відновлення (чи виготовлення нових) із застосуванням звичайної технології та вібраційного пластичного деформування. При дослідженні мікроструктури досліджуваного матеріалу використано мікроскоп з кратністю збільшення зображення 100–400.

Додатково величину шорсткості обробленої вібраційним пластичним деформуванням поверхні було виміряно з використанням портативного профілометра моделі 296 по параметру R_a .

Щодо визначення інтенсивності зношування оброблених пластичним вібраційним деформуванням робочих поверхонь бронзових втулок автомобільних двигунів, то в такому випадку застосовано машину МІ-1М. Режими випробувань було визначено з урахуванням роботи кінематичної пари спряження: бронзова втулка – розподільчий вал автомобільного двигуна ЯМЗ-238, відповідно частота обертання ролика склала 550 хв^{-1} , навантаження на пару тертя – 460 Н.

За результатами експериментального дослідження, як мінімум з десятикратною повторністю (для забезпечення достатнього рівня достовірності експериментальних даних), було виявлено, що кількість зсунутого металу

поверхневого обробленого шару бронзової втулки має суттєву ступінь впливу від величину кута нахилу β , а також припуску на обробку та швидкості вібраційного деформування.

Виявлено, що при збільшенні швидкості руху пуансона маса зсунутого поверхневого шару металу на торець досліджуваного зразка бронзової втулки автомобільного двигуна збільшується. Прийняте для проведення дослідів кількісне значення припуску на обробку $\Pi = 0,4$ мм.

Результати експериментального дослідження щодо залежностей величини зсунутого поверхневого шару металу на торець досліджуваних зразків бронзових втулок автомобільних двигунів за умови зміни кількісних характеристик кутів нахилу робочої поверхні пуансона та швидкості пластичного деформування $0,03$ м/с подано на рис. 3 у вигляді поверхні відгуку другого порядку.

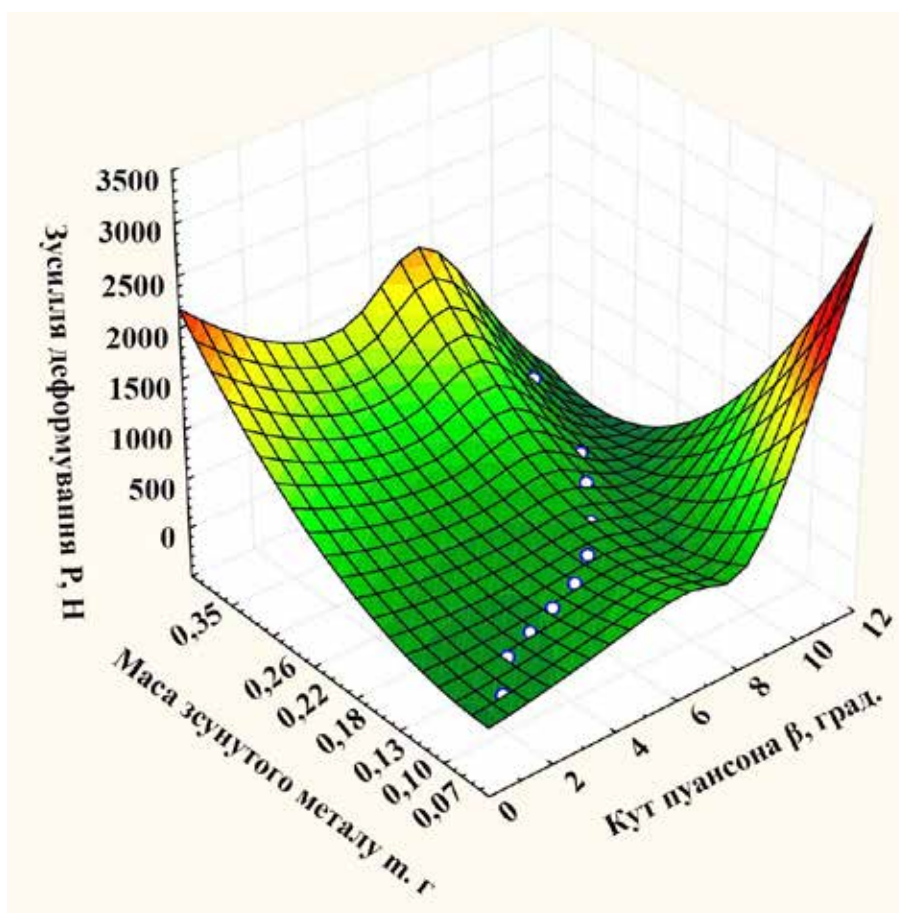


Рис. 3. Поверхня відгуку зміни маси m зсунутого на торець бронзової втулки металу за умови варіації кількісними значеннями кутів нахилу робочої поверхні пуансона β та зусилля деформування P при звичайній пластичній деформації

Експериментальними дослідженнями було визначено, що оптимальна за умови відновлення кількість зсунутого металу на поверхневому шарі обробленого зразка бронзової втулки автомобільного двигуна мала місце за умови значення кута нахилу робочої поверхні пуансона $\beta = 9^\circ$. При цьому, застосування вібраційного пластичного деформування дало змогу отримати значно меншу інтенсивність зсунутого металу на поверхневому обробленому шарі бронзової втулки (довжина обробленої поверхні $L = 38,5$ мм) автомобільного двигуна в порівнянні зі звичайним деформуванням.

Як приклад, можливо зазначити, що при встановленні кута нахилу робочої поверхні пуансона $\beta = 9^\circ$, обраного припуску $\Pi = 0,4$ мм та із застосуванням пластичного вібраційного деформування маса зсунутого металу поверхневого обробленого шару складала величину у $6,5$ разів менше в порівнянні зі звичайним пластичним деформуванням.

Важливо, що оцінку технологічного процесу пластичного вібраційного деформування та звичайного пластичного деформування можливо здійснювати при встановленні кількісних характеристик зусиль обробки досліджуваних бронзових зразків деталей автомобільних двигунів.

В нашому випадку такі зусилля визначено за показниками манометра гідравлічного приводу вібраційного столу експериментальної установки та шляхом тензометрування з використанням тензометричних датчиків.

На рис. 4 відтворено поверхню відгуку зміни маси m зсунутого на торець бронзової втулки металу за умови варіації кількісними значеннями кутів нахилу робочої поверхні пуансона β та зусилля деформування P при вібраційній пластичній деформації.

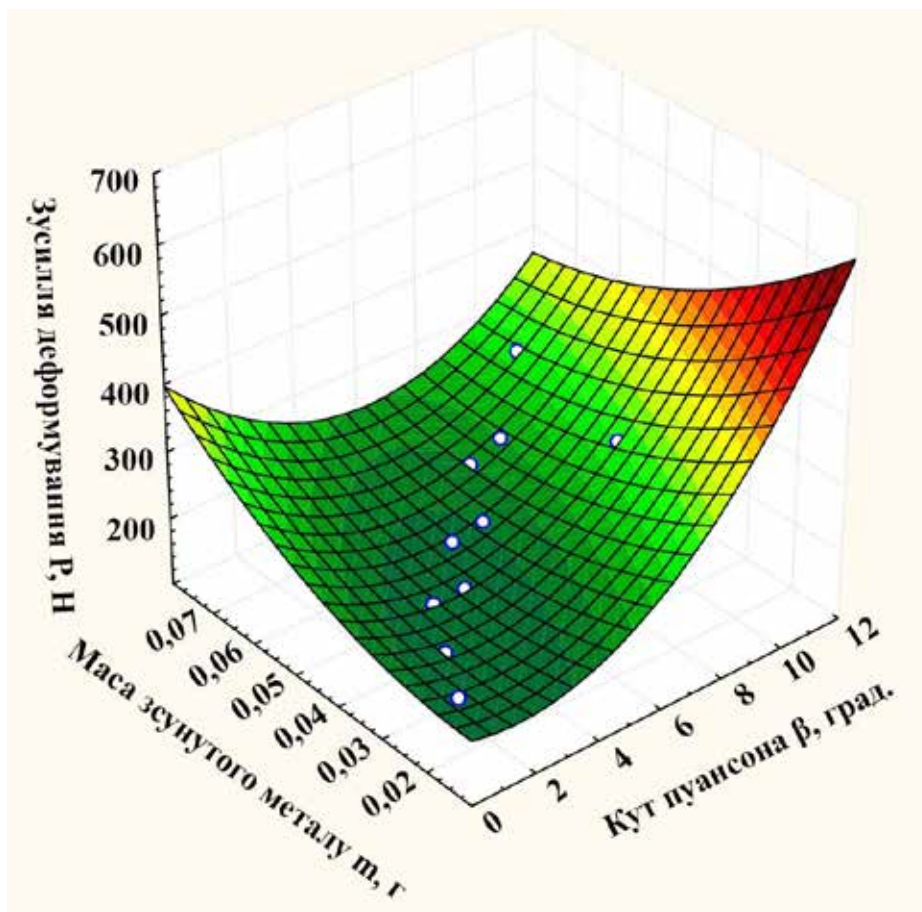


Рис. 4. Поверхня відгуку зміни маси m зсунутого на торець бронзової втулки металу за умови варіації кількісними значеннями кутів нахилу робочої поверхні пуансона β та зусилля деформування P при вібраційній пластичній деформації

При здійсненні дослідів величина зміни зусилля деформування зразків із бронзи БрОЦС 5-5-5 за умови встановлення припуску на обробку $\Pi = 0,4$ мм та значенню кута ухилу робочої поверхні пуансона $\beta = 9^\circ$ у 1,15 та 1,33 рази менше, в порівнянні з кутом нахилу $\beta = 8^\circ$ і $\beta = 9^\circ$ відповідно.

З метою порівняння якості матеріалу зразків бронзових втулок автомобільного двигуна, що були відновлені звичайною пластичною деформацією та вібраційним пластичним деформуванням, було здійснено металографічне дослідження на відповідних шліфах, що виготовлені з опорних втулок розподільчого валу автомобільного двигуна.

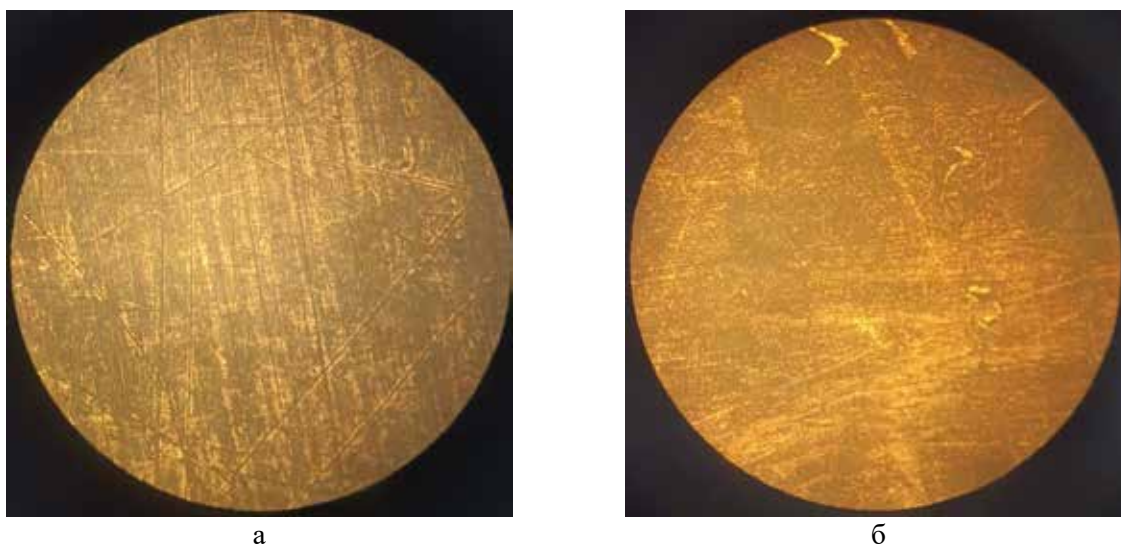
Відомо, що основні механічні властивості бронзи визначаються її мікроструктурою, а саме видом та складом елементів такого сплаву – фазовим складом [12].

Відповідні зображення мікроструктури досліджуваних зразків з метою порівняння при звичайному та вібраційному пластичному деформуванні подано на рис. 5.

Дослідження такої мікроструктури дали змогу зробити висновки, що при вібраційному пластичному деформуванні поверхнева зміцнена структура стає більш дрібнозернистою та має більшу ступінь рівномірності в порівнянні зі звичайною пластичною деформацією таких зразків.

Збільшення глибини пластичного деформування призводить до додаткового зміцнення приконттактних відносно оброблюваного інструменту шарів робочої поверхні бронзової втулки. За умови застосування вібраційної пластичної деформації такі процеси відбуваються з більшою інтенсивністю.

За умови застосування звичайного пластичного деформування, залежності зміни кількості зсунутого металу обробленої поверхні на торець бронзової втулки носять нелінійний стохастичний характер в межах припусків $\Pi = 0,4$ мм; при вібраційному пластичному деформуванні такі залежності мають практично пропорційний характер.



**Рис. 5. Мікроструктура зразків бронзи БрОЦС 5-5-5 за умови збільшення $\times 100$:
а – звичайне деформування; б – вібраційне деформування**

Співставлена з вимогами щодо відновлення втулок автомобільних двигунів, мінімально можлива кількість зсунутого на торець бронзової втулки матеріалу, так і матеріалу бронзи, що налипає на пуансон за умови застосування звичайного та вібраційного деформування має місце з встановленим кутом ухилу робочої поверхні пуансона $\beta = 9^\circ$.

Таке явище можливо пояснити тим, що менші значення кута ухилу призводять до збільшення поверхні контакту бронзової втулки з робочою поверхнею пуансона, збільшенню місць контакту та, відповідно – збільшенню налипання бронзи на пуансон.

При збільшенні кута ухилу робочої поверхні пуансона спостерігається зменшення площі контактної поверхні, але при цьому збільшується питомий тиск на оброблюваний матеріал деталі, що також сприяє налипанню часточок бронзи на робочу поверхню пуансона.

Якщо застосовувати вібраційне пластичне деформування бронзового зразка типу «втулка», то унаслідок циклічно повторюваних відривів пуансона має місце зниження сили тертя. Останнє, в свою чергу, зменшує зсув поверхневого шару бронзи на торець оброблюваного зразка та підвищує величину пластичної деформації у радіальному напрямку. Додаткові напруження розтягу колового характеру, що виникають при таких процесах, призводять до переміщень металу в шарах, що дотичні до пуансона. Як наслідок – центральні шари деформованого металу отримають значні видовження, а такі умови сприяють утворенню додаткових поздовжніх та поперечних напружень в поверхневих шарах та напружень стискання у центральних шарах досліджуваних зразків.

Проведені нами дослідження дали змогу стверджувати, що за умови застосування вібраційної пластичної деформації має місце вирівнювання складу структури обробленої поверхні бронзової втулки автомобільного двигуна. Таке вирівнювання спрямовано на отримання більш рівномірної та дрібнозернистої структури. Тобто при вібраційному пластичному деформуванні утворюються більше дрібних зерен та створюються сприятливі умови для зародження дислокацій. При цьому дислокації в свою чергу сприяють підвищенню ступеня деформації в радіальному напрямку.

Під час контакту пуансона з бронзовою втулкою автомобільного двигуна відбувається зростання величини деформації, збільшується кількість дефектів кристалічної будови. Таке явище створює додаткові перешкоди щодо руху дислокацій та призводить до їх зміцнення, останнє відповідно підвищує зносостійкість обробленої деталі.

Останнє твердження можливо пояснити циклічним відривом пуансона відносно оброблюваної поверхні. Відповідно, за умови застосування вібраційного пластичного деформування лінії ковзання будуть перетинати оброблювану поверхню під кутом, що змінюється від 45° до 90° .

Тому, за умови застосування вібраційного пластичного деформування зусилля та величина деформації у радіальному напрямку будуть мати суттєве значення в порівнянні зі звичайним пластичним деформуванням. Відповідно, вібраційні процеси в такому випадку сприяють більшому зміцненню поверхневого шару оброблюваної поверхні.

Висновки

1. За проведеними експериментальними дослідженнями можливо зазначити, що доцільно використовувати вібраційне пластичне деформування при відновленні ремонтних та виготовленні нових бронзових втулок автомобільних двигунів.

2. На основі кількісних та якісних результатів експериментального дослідження отримані оптимальні параметри технологічного процесу щодо застосування вібраційного пластичного деформування при зміцненні робочої поверхні бронзових опорних втулок розподільного валу автомобільних двигунів, як ремонтних, так і нових.

3. Застосування вібраційної обробки дає змогу зменшити експлуатаційний знос. Зменшення величини зношування свідчить щодо підвищення рівня зносостійкості деталей типу «втулка», що відновлені з використанням методу вібраційного пластичного деформування в порівнянні з традиційними методами пластичного відновлення.

Список використаної літератури

1. Hebda A., Łagoda T., Małecka J. Investigating the effects of preliminary overloading and fatigue on the mechanical strength and fractographic characteristics of CuSn7Zn4Pb7 bronze alloy fractures. *Engineering Failure Analysis*. 2024. Vol. 163, Part B. P. 108593. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108593>.

2. Tarelnyk V., Haponova O., Mościcki T., Tarelnyk N. Improving a Process for Completing a Positive Connection of Hub-Shaft Type Using Combine Methods. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2024. Springer, Cham. P. 392-402. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_34.

3. Kaixuan Chen, Jiangxu Shen, Zongxuan Li, Xiangkai Chen, Kaisheng Ming, Yuzhi Zhu, Xiaohua Chen, Tianxin Weng, Zidong Wang. Extra-ductile and strong tin bronze alloy via high-density intragranular ultra-nano precipitation with minimal lattice misfit. *Scripta Materialia*. 2023. Volume 234. P. 115535. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115535>.

4. Yangbiao Zeng, Lirong Huang, Wen Liu, Chungue Wang, Chaoyang Wang, Xiang Yan, Chaoyan Lian. The hot deformation of c83600 tin bronze alloy based on Arrhenius constitutive models. *Proc. SPIE 13082, Fourth International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing, and Automation Technology (MEMAT 2023)*, (1 April 2024). <https://doi.org/10.1117/12.3026109>.

5. Marquis G., Mikkola E., Yildirim H., Zuheir B. Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines. *Weld World*. 2013. Vol. 57(6). P. 803–822. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0075-x>.

6. Djema M., Hamouda K., Babichev A., Saidi D., Halimi D. Effect of vibro-impact strengthening on the fatigue strength of metallic surfaces. *Metal*. 2012. Vol.5. P.23–25.

7. Stotsko Z., Kusy J., Topilnytskyj V. Research of vibratory-centrifugal strain hardening on surface quality of cylindrical long-sized machine parts. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*. 2012. Vol. 11. P.15–17.

8. Mamalis A., Grabchenko A., Mitsyk A., Fedorovich V., Kundrak J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing–grinding treatment in the oscillating reservoir. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. N.70(1). P.263–276. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>

9. Hamouda K., Bournine H., Tamarkin M., Babichev A., Saidi D., Amrou H. Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State. *Materials Science*. 2016. Vol. 52. P.216–221. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9946-9>

10. Gichan V. Active control of the process and results of treatment. *Journal of Vibroengineering*. 2011. Vol. 13. P.371–375.

11. Jurcius A., Valiulis A., Kumslytis V. Vibratory stress relieving – It's advantages as an alternative to thermal treatment. *Journal of Vibroengineering*. 2008. Vol. 10 (1). P.123–127.

12. Djema M., Hamouda K., Babichev A., Saidi D., Halimi D. The Impact of Mechanical Vibration on the Hardening of Metallic Surface. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 626. P.90–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.90>

13. Kelemesh A., Gorbenko O., Dudnikov A., Dudnikov I. Research of wear resistance of bronze bushings during plastic vibration deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 2(11 (86)). P. 16–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97534>.

References

1. Hebda, A., Łagoda, T., Małecka, J. (2024). Investigating the effects of preliminary overloading and fatigue on the mechanical strength and fractographic characteristics of CuSn7Zn4Pb7 bronze alloy fractures. *Engineering Failure Analysis*, 163 (B), 108593. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108593>.

2. Tarelnyk, V., Haponova, O., & Tarelnyk, N. (2024). Improving a Process for Completing a Positive Connection of Hub-Shaft Type Using Combine Methods. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VII. DSMIE 2024. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer, Cham, 392-402. https://doi.org/10.1007/978-3-031-63720-9_34.

3. Kaixuan Chen, Jiangxu Shen, & Zidong Wang. (2023). Extra-ductile and strong tin bronze alloy via high-density intragranular ultra-nano precipitation with minimal lattice misfit. *Scripta Materialia*, 234, 115535. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2023.115535>.
4. Yangbiao Zeng, Lirong Huang, & Chaoyan Lian. (2023). The hot deformation of c83600 tin bronze alloy based on Arrhenius constitutive models. *Proc. SPIE 13082, Fourth International Conference on Mechanical Engineering, Intelligent Manufacturing, and Automation Technology (MEMAT 2023), (1 April 2024)*. <https://doi.org/10.1117/12.3026109>.
5. Marquis G., Mikkola E., Yildirim H., Zuheir B. (2013). Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines. *Weld World*, 57(6), 803–822. <https://doi.org/10.1007/s40194-013-0075-x>.
6. Djema M., Hamouda K., & Halimi D. (2012). Effect of vibro-impact strengthening on the fatigue strength of metallic surfaces. *Metal*, 5, 23–25.
7. Stotsko Z., Kusyj J., Topilnytskyj V. (2012). Research of vibratory-centrifugal strain hardening on surface quality of cylindrical long-sized machine parts. *Journal of Manufacturing and Industrial Engineering*, 11, P.15–17.
8. Mamalis A., Grabchenko A., & Kundrak J. (2014). Mathematical simulation of motion of working medium at finishing–grinding treatment in the oscillating reservoir. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1), 263–276. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
9. Hamouda K., Bourmine H., & Amrou H. (2016). Effect of the Velocity of Rotation in the Process of Vibration Grinding on the Surface State. *Materials Science*, 52, 216–221. <https://doi.org/10.1007/s11003-016-9946-9>
10. Gichan V. (2011). Active control of the process and results of treatment. *Journal of Vibroengineering*, 13, 371–375.
11. Jurcius A., Valiulis A., Kumslytis V. (2008). Vibratory stress relieving – It’s advantages as an alternative to thermal treatment. *Journal of Vibroengineering*, 10 (1), 23–127.
12. Djema M., Hamouda K., & Halimi D. (2013). The Impact of Mechanical Vibration on the Hardening of Metallic Surface. *Advanced Materials Research*, 626, 90–94. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.626.90>
13. Kelemesh A., Gorbenko O., Dudnikov A. & Dudnikov I. (2017). Research of wear resistance of bronze bushings during plastic vibration deformation. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(11(86)), 16–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.97534>