

DOI: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2024-283-3-14-20>

УДК 621.9.025.11

ВПЛИВ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРІАЛУ ВИРОБІВ МАШИНОБУДУВАННЯ НА ЇХ ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

Ніколаєнко А.П., Шумакова Т.О.

THE INFLUENCE OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE MATERIAL OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS ON THEIR WEAR RESISTANCE

Nikolaienko A.P., Shumakova T.O.

У статті обґрунтовано необхідність підвищення довговічності деталей машин та технічних виробів, з метою забезпечення конкурентоздатності вітчизняного галузевого машинобудування. Ключову роль у покращенні експлуатаційних характеристик відіграє якість поверхневого шару деталей та вузлів. До основних характеристик поверхневого шару деталей відносяться твердість та зносостійкість матеріалу, з якого вони виготовлені. Представлено аналіз поширених технологічних методів підвищення зносостійкості деталей машин шляхом пластичного деформування поверхні та їх порівняння з методом віброабразивної обробки, що проводиться на верстатах з U - подібною формою контейнера. Підкреслено, що універсальність обладнання для ВіО забезпечує можливість здійснення з її допомогою цілого ряду операцій, таких як зачисні, оздоблювальні, у тому числі зміцнюючі. Оскільки фізична природа зміцнення повністю не з'ясована, а також на процес віброабразивної обробки впливають понад 50 факторів, що його ускладнює аналітичний опис, експериментальні дослідження є актуальним завданням.

В статті наведено результати ряду досліджень процесу формування вібронаклепу та параметри, що впливають на зміну мікротвердості поверхневого шару при вібраційній обробці. Проведено дослідження таких параметрів, як амплітуда, частота коливань, робоче середовище. Аналіз результатів дослідження впливу амплітуди і частоти коливань показав, що зі збільшенням амплітуди та частоти коливань відзначається збільшення мікротвердості поверхневого шару. Дані результати пояснюються збільшенням сил мікроударів гранул робочого середовища, які впливають на оброблювану поверхню зразків. На представлених у статті графіках продемонстровано результати досліджень впливу

робочого середовища на зміну мікротвердості поверхневого шару зразків. У якості робочого середовища, яке підлягало порівнянню, використовувались сталеві загартовані кулі, фарфорові кулі та абразивні гранули.

Представлені результати експериментальних досліджень впливу вібраційної обробки на зносостійкість виробів машинобудування в умовах тертя поверхонь.

Ключові слова: вібраційна обробка, зносостійкість, тертя, вібронаклеп, мікротвердість, поверхневий шар, амплітуда, частота коливань.

Вступ. Вихід з ладу деталей та робочих органів машин за нормальних умов експлуатації є наслідком фізичного зносу різних видів: втомних руйнувань, повзучості матеріалів, механічного зносу, корозії, ерозії, кавітації, старіння матеріалу та ін. [1, 2]

Більшість машин (85 – 90 %) виходять з ладу саме через знос їх деталей. Витрати на ремонт та технічне обслуговування машини у кілька разів перевищують її вартість: наприклад, для автомобілів у 6 разів, для літаків до 5 разів, для верстатів до 8 разів [3, 4].

Аналіз досліджень і публікацій. До основних технологічних заходів, що підвищують довговічність машин, можна віднести такі: розробка високозносостійких матеріалів для різних умов експлуатації машин та отримання з них заготовок високої якості, близьких за формою та розмірами до готових деталей; створення технологічних прийомів, що забезпечують виготовлення деталей заданої

точності та стабільності, як за розмірами, так і за фізико-механічними властивостями; застосування методів контролю якості матеріалів, заготовок та готових виробів за відповідними показниками надійності, використання процесів зміцнювальної обробки для отримання необхідної якості робочих поверхонь деталей машин з високим опором зношування та поломок у різних умовах експлуатації [1, 3, 5].

Найбільш поширені наступні технологічні методи підвищення зносостійкості деталей машин: термічна обробка, хімічна обробка, хіміко-термічна обробка, поверхнєве пластичне деформування, алмазне вигладжування, зміцнення карбуванням, гідрополірування, обробка поверхні вибуховим навантаженням антифрикційних властивостей, наплавлення та ін. [5, 6]

Серед методів пластичного деформування великий інтерес становить віброабразивна зміцнююча обробка. Обробка проводиться на вібраційних верстатах (ВіО-верстатах), найчастіше, з U-подібною формою контейнера. Контейнери виготовляють з різним розмірним рядом об'ємом від 3 до 1000 дм³ і більше. Верстати забезпечують можливість роботи на різних режимах (амплітудах від 0,5 до 7...10 мм та частотах 33...80 Гц). При цьому в контейнер одночасно завантажують значну кількість деталей. Саме універсальність обладнання для ВіО забезпечує можливості здійснення з її допомогою цілого ряду операцій, таких як зачисні, оздоблювальні, у тому числі зміцнюючі [2, 7-9].

Мета досліджень. До цього часу фізична природа зміцнення повністю не з'ясована [6]. Однак всі процеси обробки металів тиском засновані на використанні пластичності металу, під якою розуміють здатність металу деформуватися без руйнування під впливом зовнішніх сил та зберігати отриману форму після припинення дії цих сил.

Пластичність при обробці тиском залежить від природи металу чи сплаву, його хімічного складу, структури, механічних властивостей, температури нагріву, швидкості та ступеня деформації, а також від схеми напруженого стану. Наявність у металі пор, газових бульбашок, твердих і крихких неметалевих включень, мікро- та макротріщин знижує його пластичність.

На процес віброабразивної обробки впливають понад 50 факторів [4, 7, 8]. Аналітично описати цей процес досить складно,

і тому велике значення надається експериментальним дослідженням.

Мікротвердість H_c є дуже важливою складовою характеристики фізико-механічних властивостей поверхневого шару і її слід розглядати як наслідок пружнопластичних деформацій, викликаних дією ударно-хвильових процесів, що супроводжують вібраційну дію [3, 5]. Метою експериментальних досліджень було вивчення процесу деформацій та аналіз параметрів, що впливають на зміну мікротвердості поверхневого шару при вібраційній обробці.

Результати експериментальних досліджень. При проведенні експериментальних досліджень використовувалися зразки з різних видів сталі та широко поширені методи та прилади, а саме вимірювання за допомогою мікротвердомірів на косому та прямому зрізах, а в окремих випадках з пошаровим стравлюванням.

Результати дослідження впливу амплітуди і частоти коливань при віброабразивній обробці зразків зі сталі 45 (відпаленої та загартованої) на формування вібронаклепу поверхні представлені на рис. 1. Аналіз отриманих результатів показує, що зі збільшенням амплітуди коливань відзначається збільшення мікротвердості поверхневого шару, що можна пояснити збільшенням сил мікроударів гранул робочого середовища (в даному випадку сталевих загартованих кульок), що впливають на оброблювану поверхню зразків. При найбільшій для прийнятих умов обробки амплітуді коливань (1,5 мм) мікротвердість загартованої сталі 45 зросла на 15...22 % і становить 388 Н/мм². Подібні дослідження проводилися у роботі [2]. При порівнянні отриманих результатів збігся характер кривих, але початкові параметри були різними, що відображено на графіках (крива 3) рис. 1.

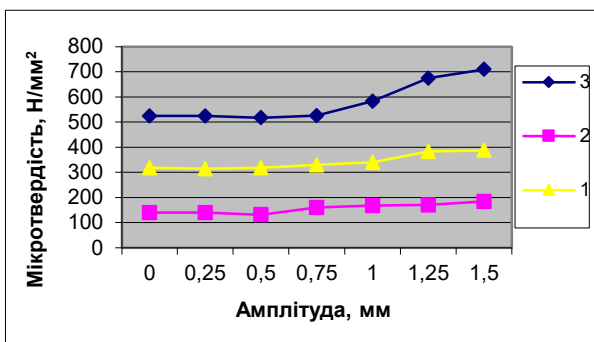
Якщо для загартованих зразків при амплітуді $A = 1,5$ мм зростання H_c припиняється, то для відпалених зразків є підстави очікувати подальшого збільшення H_c при збільшенні амплітуди коливань (див. рис. 1). Найбільша мікротвердість, виміряна на глибині 20 мкм, становила – 185 Н/мм².

Дослідження також показали, що як для відпалених, так і для загартованих зразків збільшення частоти коливань призводить до збільшення мікротвердості, що пояснюється збільшенням числа мікроударів.

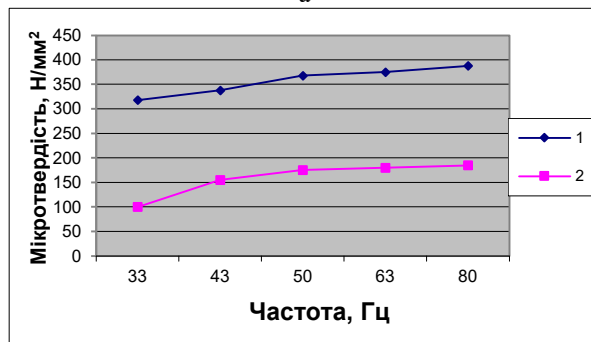
Результати досліджень показують, що після вібраційної обробки протягом 60 хв структура в

серцевині металу не змінюється, в поверхневих шарах спостерігається деяке подрібнення зерен, збільшення ділянок з сорбітною структурою і місцями розрив цементної сітки. Мікротвердість поверхневих шарів, порівняно з вихідною, підвищена на 15...22 %.

Після обробки протягом 240 та 480 хв структура серцевини також суттєво не змінюється. У поверхні ж спостерігаються щільні шари сорбітної та навіть тростосорбітної структури, цементитна сітка майже повністю розірвана. Мікротвердість поверхневих шарів, порівняно з вихідною, підвищена на 21 – 28 %.



а



б

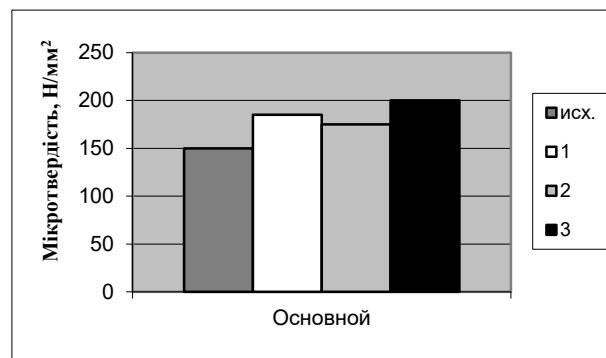
Рис. 1. Вплив амплітуди та частоти коливань на мікротвердість поверхнього шару сталі 45:
1 – загартована сталь; 2 – відпалена сталь

Досліджено вплив робочого середовища на зміну мікротвердості поверхнього шару зразків у середовищі сталевих загартованих кульок $d = (3-4)$ мм (1), фарфорових кульок $d = (20-25)$ мм (2) та абразивних гранул (АН-2) (3).

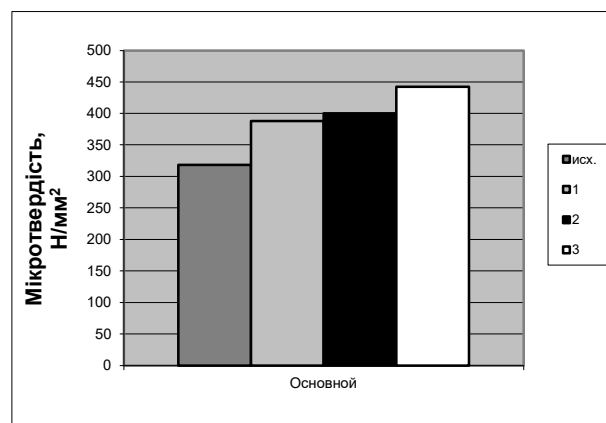
Режим та тривалість обробки: $A-1,5$ мм, $f-63$ Гц, $t=120$ хв. Оброблювані зразки мали прямокутну форму $10 \times 20 \times 5$ мм і були виготовлені із загартованої та відпаленої сталі 45. Мікротвердість вимірювали на глибині 10 мкм для загартованих зразків та на глибині 20 мкм для відпалених. Результати експериментів подано на рис. 2.

Для досліджень впливу вібраційної обробки на зносостійкість виробів машинобудування

було виготовлені два комплекти зразків (рис. 3) із трьох видів матеріалу: сталі 3, сталі 45 та швидкорізальної сталі Р9. Перша група зразків після токарної чистової обробки ($Ra=6,3$ мкм) піддавалася шліфування на верстаті моделі ПШСМ-2 ($Ra=3,2$ мкм), друга – після токарної чистової обробки ($Ra=6,3$ мкм) оброблялася на верстаті ВМІ-1003 протягом 180 хв у сталевих загартованих кульках $d=5$ мм ($Ra=3,2$ мкм).



а



б

Рис. 2. Вплив виду робочого середовища на зміну мікротвердості: а – відпалені; б – загартовані:
1 – сталеві загартовані кульки $d = (3-4)$ мм,
2 – фарфорові кульки $d = (20-25)$ мм,
3 – абразивні гранули (АН-2)



Рис. 3. Зразки для вимірювання зносостійкості деталей

Дані зразки були виконані у вигляді роликів і грали роль диска в парі, що труться, «колодка – диск». Як колодки були виготовлені зразки з гуми підвищеної твердості (по Шору – А=65-80 у.о.).

Експеримент проводився у кілька етапів:

I. Приготовлені зразки зважувалися на аналітичних терезах.

II. Зразки оброблялися на машині тертя (див. рис. 4) посуху, без охолодження, протягом 78 секунд (до моменту початку плавлення гуми) по 20 підходів для кожного зразка.

III. Після закінчення обробки проводилося повторне зважування.

У процесі експерименту також було визначено твердість зразків Брінеллю до і після

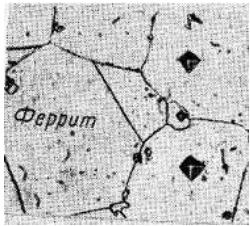


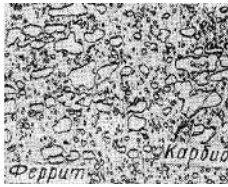
обробки. Результати досліджень зведені у таблицю.



Рис. 4. Закріплення деталей на машині тертя

Таблиця

Порівняльний аналіз результатів

Сталь 3	Сталь 45	P9
Хімічний склад		
0,14-0,22%С, не більше 0,3-0,6%Mn, 0,07%Si, 0,04%P, 0,05%S, 0,3%Cr, 0,3%Ni, 0,3%Cu, 0,08%As	0,42-0,5 % С,	0,85-0,95%С, 3,8-4,4%Cr, 8,5-9,5%W, 2,3-2,7%V, не більше 1% Мо, 0,4%Ni, 0,03%S, 0,03%P, 0,5%Co, 0,5%Si, 0,5%Mn
Мікроструктура металу		
 Феррит+Перліт	  Феррит+Перліт	Швидкорізальні сталі відносяться до карбідного (ледебуритного) класу. Їх фазовий склад у відпаленому стані є легованим ферритом і карбідами.  Феррит Карбид
Твердість матеріалу в стані поставки, НВ		
187, 170, 170	131, 131, 124	187, 187, 179
Начальна шорсткість, мкм		
6,3		
Шорсткість після ВіО, мкм		Шорсткість після шліфування, мкм
3,2		
Термічна обробка		
Не підлягає термічній обробці	Загартування + Покращення НВ 270-320	Загартування + 4-х кратний відпуск HRC 63-66
Знос матеріалу до обробки, гр.		
~0,0135	0,015	Не виявлено
Знос матеріалу після ВіО, гр.		
~0,0135	0,0061	Відбувається збільшення маси зразка за рахунок налипання гуми
Результати		
Знос матеріалу відносно постійний у часі	Знос матеріалу зменшився в 2,46 рази	Знос матеріалу не виявлено

Висновки. Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень впливу параметрів процесу вібраційної обробки на формування мікротвердості поверхневого шару зразків дозволяють зробити наступні висновки.

1. Зі зростанням маси та твердості гранул робочого середовища, при незмінних режимах обробки, спостерігається пластичне деформування та підвищення мікротвердості поверхневого шару деталей.

2. Структура сталі є одним із основних параметрів, що впливають на якість поверхневого шару, у тому числі і його зносостійкість.

Сталь 3. Структура даної сталі: ферит + перліт, з переважанням саме фериту, пухка, м'яка, не піддається термічній обробці та зміцненню, що й показали результати (знос матеріалу відносно постійний). Спостерігається стійке зниження шорсткості поверхні, тому ВіО рекомендується для обробки деталей з цієї сталі, як на зачисних операціях, так і на фінішних.

Сталь 45. Структура даної сталі: ферит + перліт, що легко піддається зміцненню за допомогою ВіО (рис. 5), що підтверджується та експериментально. Твердість матеріалу підвищується після ВіО на 15-22 %, а зношування матеріалу зменшується в 2,46 рази. Отже, як фінішні операції для отримання низької шорсткості та зміцненого поверхневого шару можна рекомендувати ВіО методи, і слід продовжити дослідження щодо вибору оптимальних режимів обробки, в першу чергу, амплітуди, частоти та часу обробки.

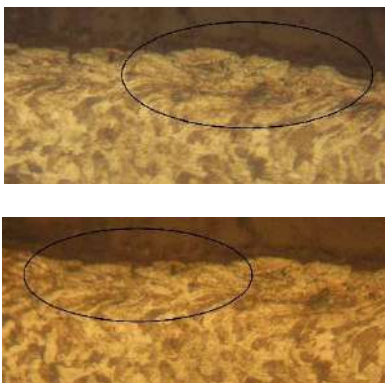


Рис. 5. Прикордонний (зміцнений) шар після ВіО

Сталь Р9. Ця сталь має високу теплостійкість, тобто. здатністю зберігати мартенситну структуру і, відповідно, високу твердість, міцність і зносостійкість при підвищених температурах. Вона зберігає мартенситну структуру при нагріванні до 600-

620°C. Тому в зоні контакту (зоні сухого тертя) при великій швидкості обертання деталей температура підвищується і утримується саме в поверхневому шарі (не поширюючись вглиб). Після ВіО шорсткість поверхні зразка зменшується, настає мікронаклеп, площа контакту ролика з гумою збільшується на 26-34 %, отже, відбувається взаємне схоплювання поверхонь, тобто. налипання гуми на сталевий ролик. Ось тому спостерігалось збільшення маси зразка. Зношування деталі при цьому виявлено не було. Враховуючи твердість сталі і зниження мікрошорсткості при ВіО, що простежується, слід провести дослідження з вибору оптимальної форми і розмірів гранул робочого середовища.

3. Зносостійкість поверхні зразків для конструкційних сталей підвищується до 15-20 %, на зносостійкість поверхневого шару впливають як величина шорсткості поверхні, і глибина наклепанного шару.

4. Попередні випробування на зносостійкість показали позитивні результати застосування вібраційного методу обробки деталей, як фінішної операції, комплексно поліпшує поверхню, зобов'язує продовжити дослідницькі роботи в цьому напрямку.

Враховуючи універсальність вібраційного обладнання, цей метод рекомендується використовувати для підвищення експлуатаційних властивостей виробу, у тому числі зносостійкості.

Література

1. Барандич К.С. Технологічне забезпечення циклічної довговічності деталей при їх токарному обробленні: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Барандич Катерина Сергіївна; МОН України, Нац. техн. ун-т України "КПІ імені І. Сікорського". Київ, 2018. 22 с.
2. Ніколаєнко А.П. Методи підвищення експлуатаційних властивостей виробів / А.П. Ніколаєнко, Ю.Ю. Дегтярьова, М.О. Калмиков, Л.М. Лубенська // Машинознавство. 2007. Вип. № 4. С. 33-43.
3. Дахнюк О.П. Технологічне забезпечення зносостійкості робочих поверхонь спряжених деталей машин на операціях механічного оброблення: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук / Дахнюк Олександр Петрович; МОН України, Луцький нац. техн. ун-т. – Луцьк, 2017. – 21 с.
4. Nikolaienko A.P. Increasing of details surface quality by vibrating processing. Вісник Східноукраїнського національного університету

- імені Володимира Даля, 2016. Вип. 2 (226), С. 60-69.
- Харламов Ю.А. Физика, химия и механика поверхности твердого тела: учебное пособие / Харламов Ю.А., Будагьянц Н.А. Луганск: ВУГУ, 2000. 624 с.
 - Опальчук А.С. Теоретичні та технологічні основи підвищення контактної втомлювальної міцності сталей / А.С. Опальчук // Вібрації в техніці та технологіях. 2004. №3. С. 31-34.
 - Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. Main technological factors determining the efficiency and quality of the vibration process. Cutting & Tools in Technological System. Kharkiv, NTU «KhPI». 2022. № 96. P. 131-137. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2022.96.14>
 - Міщук А.В. Розвиток процесів обробки вільним абразивним середовищем в коливних резервуарах і формування їх фізико-технологічних можливостей. Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2020. Вип. 4 (260), С. 55-65. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-55-65>
 - Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Mitsyk, A.V., Fedorovich, V.A., Kundrák, J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing – grinding treatment in the oscillating reservoir. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 70, 2014. P. 263-276. <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
 - Mamalis A.G., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Kundrák J. Development of modular machine design and technologies of dynamic action for finishing-grinding treatment by an oscillating abrasive medium. Journal of Machining and Forming Technologies, 2015. Vol. 7 (1-2), P. 1-10.
 - Ukrainian National University named after Volodymyr Dahl 2016. Vol. 2 (226), S. 60-69.
 - Kharlamov Yu.A. Fyzyka, khimiya ta mekhanika poverkhni tverdoho tila: navchal'nyy posibnyk / Kharlamov Yu.A., Budah'yants N.A. Luhans'k: VUHU, 2000. 624 s.
 - Opal'chuk O.S. Teoretychni ta tekhnolohichni zasady pidvyshchennya kontaktnoyi vtomlyuval'noyi mitsnosti staley / O.S. Opal'chuk // Vibratsiyi u tekhnitsi ta tekhnolohiyakh. 2004. №3. S. 31-34.
 - Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Grabchenko A.I. Main technological factors determining the efficiency and quality of the vibration process. Cutting & Tools in Technological System. Kharkiv, NTU «KhPI». 2022. № 96. P. 131-137. <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2022.96.14>
 - Mitsyk A.V. Rozvytok protsesiv obrobky vilnym abrazyvnyym seredovyshchem v kolyvnykh rezervuarakh i formuvannya yikh fizyko-tekhnolohichnykh mozh-lyvostei. Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni Volodymyra Dalia, 2020. Vyp. 4 (260), С. 55-65. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2020-260-4-55-65>
 - Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Mitsyk, A.V., Fedorovich, V.A., Kundrák, J. Mathematical simulation of motion of working medium at finishing – grinding treatment in the oscillating reservoir. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 70, 2014. P. 263-276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5257-6>
 - Mamalis A.G., Mitsyk A.V., Fedorovich V.A., Kundrák J. Development of modular machine design and technologies of dynamic action for finishing-grinding treatment by an oscillating abrasive medium. Journal of Machining and Forming Technologies, 2015. Vol. 7 (1-2), P. 1-10.

References

- Barandych K.S. Tekhnolohichne zabezpechennya tsyklichnoyi dohovichnosti detaley pry yikh tokarniy obrobtsi : avtoref. dys. na zdob. nauk. stupenya kand. tekhn. nauk / Barandich Kateryna Serhiyivna; MON Ukrainy, Nats. tekhn. un-t Ukrainy "KPI imeni I. Sikors'koho". Kyuyiv, 2018. 22 s.
- Nikolaienko A.P. Metody pidvyshchennya ekspluatatsiynykh vlastyvostey vyrobiv/A.P. Nikolaienko, YU.YU. Dehtyar'ova, M.O. Kalmikov, L.M. Lubens'ka // Mashynoznavstvo. 2007. Vip. №4 S.33-43.
- Dakhnyuk O.P. Tekhnolohichne zabezpechennya znosostiykosti robochyykh poverkhon' spryazhenykh detaley mashyn na operatsiyakh mekhanichnoho obroblennya : avtoref. dys. na zdob. nauk. stupenya kand. tekhn. nauk / Dakhnyuk Oleksandr Petrovych; MON Ukrainy, Luts'kyu nats. tekhn. un-t. Luts'k, 2017. 21 s.
- Nikolaienko A.P. Increasing of details surface quality by vibrating processing. Bulletin of the Eastern

Nikolaienko A.P., Shumakova T.O. The influence of the physical and mechanical characteristics of the material of machine-building products on their wear resistance

The article substantiates the need to increase the durability of machine parts and technical products, in order to ensure the competitiveness of the domestic engineering industry. The key role in improving operational characteristics is played by the quality of the surface layer of parts and assemblies. The main characteristics of the surface layer of parts include the hardness and wear resistance of the material from which they are made. An analysis of common technological methods of increasing the wear resistance of machine parts by means of plastic deformation of the surface and their comparison with the method of vibroabrasive processing performed on machines with a U-shaped container is presented. It is emphasized that the versatility of the equipment for maintenance and repair provides the possibility of carrying out with its help a number of operations, such as cleaning, finishing, including strengthening. Since the physical nature of

strengthening is not fully understood, and more than 50 factors affect the process of vibroabrasive processing, which complicates its analytical description, experimental research is an urgent task. The article presents the results of a number of studies of the process of forming vibro rivets and the parameters affecting the change in the microhardness of the surface layer during vibration processing. The study of such parameters as amplitude, frequency of oscillations, working environment was carried out. Analysis of the results of the study of the influence of the amplitude and frequency of oscillations showed that with an increase in the amplitude and frequency of oscillations, an increase in the microhardness of the surface layer is noted. These results are explained by the increase in microimpact forces of the granules of the working medium, which affect the treated surface of the samples. The graphs presented in the article show the results of studies of the influence of the working environment on the change in the microhardness of the surface layer of the samples. Hardened steel balls, porcelain balls, and abrasive pellets were used as the working media to be compared. The results of experimental studies of the influence of

vibration processing on the wear resistance of mechanical engineering products in the conditions of surface friction are presented.

Key words: *vibration treatment, wear resistance, friction, vibronail, microhardness, surface layer, amplitude, frequency of oscillations.*

Ніколаснко Анна Павлівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), apnikolaienko@snu.edu.ua

Шумакова Тетяна Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки, Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля (м. Київ), shumakovatania@snu.edu.ua

Стаття подана 07.03.2024.