

Кондратюк О.М.<sup>1</sup>,  
Галан Ю.Я.<sup>2</sup>,  
Босюк П.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет  
водного господарства та  
природокористування

м. Рівне Україна;

<sup>2</sup>Тернопільський національний  
технічний університет  
імені Івана Пулюя,  
м. Тернопіль, Україна.  
E-mail: kondratuk-o@ukr.net

## РЕГУЛЮВАННЯ ТИСКУ АБРАЗИВНОЇ ЧАСТИНКИ НА ПОВЕРХНЮ ДЕТАЛІ ПРИ ВІБРАЦІЙНО-ВІДЦЕНТРОВІЙ ОБРОБЦІ

УДК 621.9.048

*У статті проведено аналіз взаємодії гранули з оброблюваною поверхнею деталі, аналіз жорсткості оброблюваних деталей. Проведено аналіз коефіцієнта  $\lambda$  миттєвого тиску гранули по відповідній робочій поверхні, коефіцієнта форми гранули  $k$ . Визначено ефективні шляхи оптимізації параметрів технологічного процесу.*

**Ключові слова:** *вібраційно-відцентрова обробка, технологічний процес, миттєвий тиск, сила взаємодії.*

**Вступ.** Стан розроблення технологічних процесів у машинобудуванні вимагає істотного покращення експлуатаційних і технологічних параметрів машин та оснащення, які б забезпечили високу якість деталей, дали змогу підвищити продуктивність праці та ефективність виробництва при обробленні деталей складного профілю, малої жорсткості з поганим доступом ріжучих інструментів до оброблюваних поверхонь. При цьому ефективним є спосіб оброблення таких деталей вільними абразивами при вібраційно-відцентровому обробленні в сипучому абразивному середовищі. Цей спосіб є ефективним для зачисних, шліфувальних, полірувальних і зміцнюючих технологічних процесах при виготовленні деталей машин.

**Постановка проблеми.** Одним із головних напрямів інтенсифікації вібраційно-відцентрового оброблення є розробка нових її різновидностей і регулювання їх силових технологічних параметрів.

**Результати дослідження.** Інтенсивність вібраційно-відцентрового оброблення (ВВО) визначається зняттям металу, або ступенем пластичного деформування поверхні в результаті взаємодії абразивної гранули з деталлю, миттєвим її тиском на оброблювальну поверхню. Чим вище енергетичний рівень середовища, тим більша сила такої взаємодії. Так як вібраційно-відцентрове оброблення деталей в середовищі вільноколивних тіл являє собою багатофакторний процес, інтенсивність якого залежить від амплітуди і частоти коливань робочої камери, траєкторії її руху, тривалості оброблення, марки оброблюваного матеріалу, характеристики і розмірів частинок робочого середовища, об'єму робочої камери та ступені її заповнення, механічних властивостей матеріалу оброблюваних деталей та інших факторів, дають обґрунтування для дослідження основних закономірностей вібраційно-відцентрового процесу [1,2]. Вібраційно-відцентрове оброблення з вільним завантаженням деталей в залежності від характеру робочого середовища, яке використовується, являє собою механічний або хіміко-механічний процес зняття мікрочастин металу і його окисів з поверхні, яка обробляється, а також згладжування мікронерівностей шляхом їх пластичного деформування частинками робочого середовища, які в процесі роботи здійснюють коливний рух. Характер коливного руху робочої камери, що залежить від наявності додаткового руху деталей, або сипучого абразивного середовища, електрохімічної, магнітної, термічної та іншої його складової, ви-

значає тривалість миттєвого тиску абразивної гранули, величину сили взаємодії її з оброблювальною поверхнею.

Складна геометрична форма і жорсткість оброблюваних деталей в сипучому абразивному середовищі визначають величину грануляції абразивних частинок і допустиму величину сили взаємодії цих частинок з оброблюваною поверхнею. Величина сили взаємодії гранули з оброблюваними деталями не повинна привести до зміни їх номінальних розмірів і геометричних форм. Визначення розмірів деталей або зовнішніх навантажень, при яких виключається можливість появи недоступних з точки зору нормальної роботи конструкції, деформація цих деталей, є метою розрахунку на жорсткість.

Жорсткість – здатність деталей чинити опір зміні їхньої форми і розмірів під навантаженням. Для деяких деталей жорсткість є основним критерієм при визначенні остаточних розмірів.

Розрізняють власну жорсткість деталі, обумовлену деформаціями всього матеріалу деталі, і контактну жорсткість, яка пов'язана з деформаціями тільки поверхневих шарів матеріалу в зоні контакту взаємодії деталі.

Жорсткість оцінюють співвідношенням розрахункових деформацій деталей (прогинів  $f$ , кутів повороту перерізів  $\theta$ , деформації розтягнення-стиску  $\Delta l$  та ін.) при дії максимальних навантажень з допустимими деформаціями, умови жорсткості записують у вигляді [1]

$$f \leq [f]; \theta \leq [\theta]; \Delta l \leq [\Delta l]. \quad (1)$$

Механічна жорсткість – здатність пружного тіла чинити опір деформуванню (зміни розмірів або форми) від прикладеного зусилля вздовж вибраного напрямку в заданій системі координат. Характеристика механічної жорсткості обернена до характеристики механічної податливості.

Коефіцієнт жорсткості  $k_T$  тіла є мірою опору пружного тіла до деформації:

$$k_T = \frac{P}{\delta}, \quad (2)$$

де  $P$  – сила, прикладена до тіла, Н;  $\delta$  – деформація, викликана силою  $P$  вздовж напрямку дії сили, м.

Для пружного тіла можна розглядати і механічну жорсткість при крученні, тоді коефіцієнт  $k_T$  рівний:

$$k_T = \frac{M}{\theta}, \quad (3)$$

де  $\theta$  – кут закручування тіла у напрямку прикладання матеріалу, рад.

Для більшості деталей основне значення має власна жорсткість. У такому разі перевірочні розрахунки на жорсткість виконують за формулами та методами, що вивчаються в курсі опору матеріалів [2]. Визначення деформації деталей (вали, штоки, ходові гвинти, корпусні деталі та ін.) базується на принципі Сен-Венана. Розрахунок напруг при розтяганні, стиску і інших видів деформації характеризується відносним подовженням:

$$\varepsilon = \frac{N}{EA}, \quad (4)$$

де  $N$  – поздовжні сили, Н;  $E$  – модуль пружності першого роду, Н/м<sup>2</sup>;  $A$  – площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>;  $EA$  – жорсткість при розтяганні-стисканні, Н.

Гіпотеза плоских перетинів, при пружних деформаціях, залежність визначення допустимих напружень підкоряються закону Гука:

$$G = E \cdot \varepsilon; G = \frac{N}{A}. \quad (5)$$

Допустимі напруження деталей залежать від факторів [3]:

1. Вибраний матеріал і спосіб отримання заготовки (лиття і ін.), термообробка;
2. Степінь відповідальності деталі і її режим роботи;
3. Конфігурація деталі і її розміри;
4. Шорсткість поверхонь і ін.

Допустимі значення деформації визначають за емпіричними залежностями або на основі відповідних розрахунків, що відображають вимоги жорсткості, або на основі довідкових даних, здобутих в експериментальних умовах роботи подібних деталей.

Поняття контактної жорсткості деталей належить не тільки до випадку початкового контакту по лінії або в точці, але і до випадку контакту по великій, номінальній площі. В обох випадках контактні деформації суттєві в зв'язку з малою фактичною площею контакту. В першому випадку такі деформації визначаються номінальною формою контакту деталей, а в другому – обминанням мікронрівностей та хвилястостей поверхонь.

Контактні деформації однорідних деталей з початковим дотиком по лінії або в точці визначають за формулами Герца. Загальне кінематичне зміщення, при зближенні центрів деталі і гранули або центрів кривизни, повинно бути меншим допустимого [4]:

$$\Delta = \frac{2(1-\mu^2)}{\pi E} P \left( \ln \frac{4R_1 \cdot R_2}{a^2} + 0,815 \right) \leq [\Delta], \quad (6)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт Пуасона;  $E$  – модуль пружності;  $P$  – номінальний тиск, Н;  $R_1, R_2$  – радіуси центрів кривизни, м;  $a$  – напівширина контактної площадки, м.

Контактні деформації при великій номінальній площі контакту визначають на основі експериментально встановлених коефіцієнтів контактної податливості.

Роблячи висновок з вище наведеного матеріалу і з того, що основним параметром технологічного процесу вібраційно-відцентрового оброблення є сила взаємодії абразивної гранули з поверхнею оброблюваних деталей, прикладені зусилля не повинні змінювати їх геометричні і номінальні розміри.

При визначенні сили спіудару частки робочого середовища з деталями, які обробляються вібраційно-відцентровим методом, наряду з іншими параметрами важливе місце займає коефіцієнт  $\lambda$  миттєвого тертя гранули по відповідній робочій поверхні, який характеризує жорсткість поверхні тіл в зоні контакту при ударі.

В зв'язку з різновидністю форм і розмірів гранул і варіантів їх орієнтації в момент спіудару з робочою поверхнею визначення значення  $\lambda$  аналітично більш достовірне [5]. Припустимо, що імпульс сил, діючих на гранулу при ударі по дотичній, обумовлений тільки силою тертя, і гранула починає зміщуватись по робочій поверхні при найбільшому граничному значенні імпульсу цієї сили.

$$|P_\tau| = \lambda |P_n|, \quad (7)$$

де  $P_n$  – імпульс нормального тиску при ударі.

По аналогії з тертям ковзання прийнято, що коефіцієнт  $\lambda$  буде максимальним в момент переходу від удару без ковзання гранули до удару з ковзанням по робочій поверхні

$$\lambda = \left| \frac{P_\tau}{P_n} \right|, \quad (8)$$

Для аналітичного рішення поставленої задачі, визначення коефіцієнту  $\lambda$  миттєвого тертя гранули по відповідній робочій поверхні, розглянемо розрахункову схему удару гранули по робочій площині показаної на рис.1.

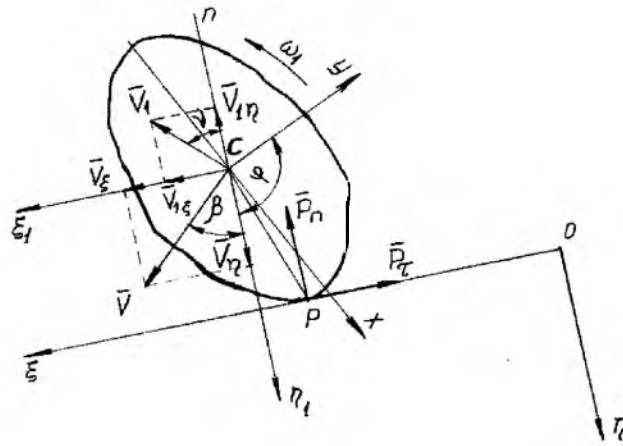


Рис. 1 – Розрахункова схема удару гранули на площину

$\xi O \eta$  - нерухома система координат;  $\xi_1 C \eta_1$ ;  $Sxy$  - рухомі системи координат, зв'язаних з гранулою;  
 $n$  - нормаль до площини;  $\beta, \nu, \varphi$  - кути падіння, відбиття і орієнтації гранули.

В момент переходу одного виду удару гранули в другий справедлива залежність, яка описує удар без ковзання:

$$\left. \begin{aligned} m(V_{1\xi} - V_{\xi}) &= P_{\tau} \\ m(V_{1\eta} - V_{\eta}) &= P_n \\ I_c \omega_1 &= P_{\tau} \cdot p_{\eta} - P_n \cdot p_{\xi} \\ V_{1\eta} &= e|V_{\eta}| \\ V_{1\xi} - \omega_1 \cdot p_{\eta} &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

де  $m$  – маса гранули;  $V_{1\xi}, V_{1\eta}$  і  $V_{\xi}, V_{\eta}$  – проекції швидкості центра  $C$  маси гранули в кінці і початку удару;  $\omega_1$  – кутова швидкість гранули після удару;  $e$  – коефіцієнт відновлення нормальної складової швидкості гранули при ударі.

Момент інерції гранули відносно головної осі, перпендикулярної площині удару  $\xi O \eta$ :

$$I_c = \frac{1}{5} m(a^2 + b^2), \quad (10)$$

де  $a, b$  – розміри головних напів осей середнього перерізу, який лежить в площині удару ( $b < a$ ).

Проекції радіуса – вектора  $CP$ , визначаючого орієнтацію гранули відносно площини

$$p_{\eta} = \sqrt{b^2 + (a^2 - b^2) \cdot \sin^2 \varphi}, \quad (11)$$

$$p_{\xi} = (a^2 - b^2) \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi / \sqrt{b^2 + (a^2 - b^2) \cdot \sin^2 \varphi}, \quad (12)$$

Із системи (4) з врахуванням підстановки в неї вирази (10)-(12) отримаємо

$$P_{\tau} = \frac{mV \left[ 5(1+e)(1-k^2) \sin \varphi \cdot \cos \varphi + (1-k^2) \sin \beta \right]}{6+k^2-5(1-k^2) \cdot \cos^2 \varphi}, \quad (13)$$

$$P_n = mV(1-e) \cos \beta, \quad (14)$$

де  $k = b/a$ .

Підставити (13) і (14) в (8), після перетворень будемо мати рівняння, зручне для аналізу

$$\lambda = \frac{5 \left[ \frac{(1-k^2)}{(1+k^2)} \right] \cdot \sin 2\varphi + 2\operatorname{tg}\beta / (1+e)}{7 - 5 \left[ \frac{(1-k^2)}{(1+k^2)} \right] \cdot \cos 2\varphi}, \quad (15)$$

Як видно із залежності (15), з збільшенням коефіцієнта  $e$  і зменшенням витягнутості форми гранули (тобто при більшому значенні  $k$ ) величина  $\lambda$  зменшується. Параметр  $\beta$  – визначений для конкретних умов удару, кут падіння гранули, при якому удар без ковзання гранули переходить в удар з ковзанням. Прийняті на початку передумови при рішенні поставленої задачі обґрунтовують кут  $\beta$ , як величину постійну в рівнянні (15). Кут  $\beta$  визначається рухом робочої камери, який обумовлюється кінематикою вібраційної установки. Також коефіцієнт  $\lambda$  залежить від кута орієнтації  $\varphi$  гранули відносно робочої поверхні при ударі і конкретних фрикційних властивостей поверхні тіл, які співударяються.

Максимальне значення коефіцієнта  $\lambda$  відповідає моменту переходу від удару без ковзання гранули до удару з ковзанням по оброблюваній поверхні. Це значення коефіцієнта  $\lambda$  може бути границею між двома технологічними процесами вібраційної обробки, що відповідає максимальному зняттю матеріалу з оброблюваної поверхні (металу, корозії, облою, ливарного штаму та ін.) при максимальному значенні  $P_n$ , до шліфування оброблюваної поверхні (зминання виступів мікронерівностей, згладжування нерівностей і т. д.) при збільшенні значення  $P_t$  з переходом до режиму полірування.

Отримані графіки залежності коефіцієнта миттєвого тертя  $\lambda$  гранули від коефіцієнта форми гранули  $k=b/a$  та кута орієнтації гранули  $\varphi$  (рис.2, рис.3), дають можливість визначити потрібні параметри гранули сипучого робочого середовища і кута її взаємодії з оброблюваною поверхнею, що визначається кінематикою вібраційної установки, яка встановлює вид циркуляції робочого середовища для певного технологічного процесу обробки деталей.

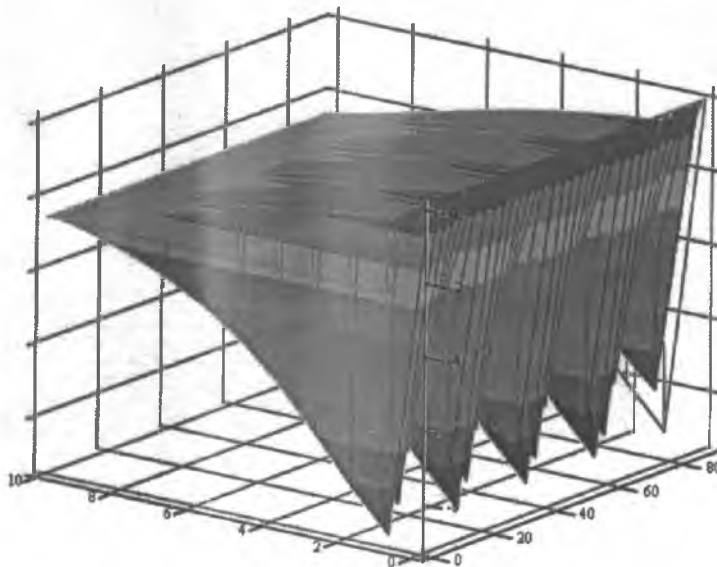


Рис. 2 – Залежність  $\lambda$  від кута  $\varphi = 0 - 90^\circ$ , співвідношення  $b/a = 0 - 0.9$

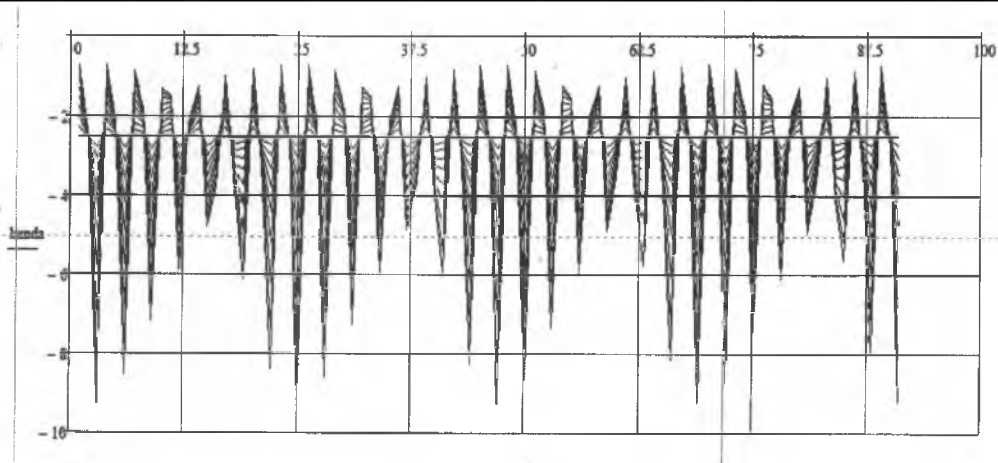


Рис. 3 – Залежність  $\lambda$  від кута  $\varphi = 0 - 90^\circ$ , співвідношення  $b/a = 0 - 0.9$  при  $V = 25$  м/с,  $m = 0.01$  кг,  $\beta = 30^\circ$

Аналізуючи отримані графіки можна констатувати факт, що при меншому значенні коефіцієнта  $k$  (втягнута, еліптична форма гранули) перепад (зміна) значень  $\lambda$  від величини  $\varphi$  є значною, з синусоїдальною періодичністю, приблизно рівною  $22^\circ$  ( $3^\circ, 25^\circ, 47^\circ \dots$ ), що відповідає переходу від режиму різання до режиму шліфування абразивної гранули і оброблюваної поверхні. При збільшенні коефіцієнта  $k$  (округлюється форма гранули) зміна значень коефіцієнта  $\lambda$  від величини  $\varphi$  незначна і відповідає в більшості режиму різання або проникнення абразивної гранули в оброблювану поверхню.

Наведені висновки аналізу графіків дають можливість стверджувати, що для певної форми (коефіцієнта  $k$ ) гранули сипучого абразивного робочого середовища, змінюючи значення кута її орієнтації  $\varphi$ , можна визначити чи задати потрібну величину сили різання  $P_n$  і сили зминання  $P_r$ , або їх певне співвідношення, яке б відповідало потрібному технологічному процесу вібраційного оброблення деталей.

Проведені експериментальні і аналітичні дослідження вібраційно-відцентрового процесу оброблення деталей [6], дають можливість розділити його на наступні етапи. В початковий період оброблення удари гранул приходяться по вершинам мікронерівностей вихідної поверхні зразків. Проходить інтенсивне зминання гребенів мікрорельєфу, в результаті інтенсивно знижується шорсткість і підвищується поверхнева міцність оброблюваної поверхні. Цей етап закінчується формуванням поверхні, яка має більш високі значення показників якості поверхні. Умовно можна назвати таку частину технологічної операції вібраційним проходом. Тривалість такого проходу при ВВО знаходиться в межах 15-30 хв. За цей час вся вихідна поверхня деталі покривається слідами взаємодії з гранулами робочого середовища.

В наступний період оброблюється поверхня, яка сформована першим вібраційним проходом. Режим оброблення не змінився, а стійкість робочого середовища забезпечує майже незмінну його оброблювану властивість.

Гранула робочого середовища, маючи ту ж енергію, що і в першому проході, залишає на поверхні повторний слід, глибина якого дещо більша, ніж висота мікронерівностей, сформованих першим проходом. Гранула деформує метал в основі виступів вихідного мікрорельєфу поверхні зразка. Збільшується степінь і глибина наклепу.

Другий вібраційний прохід характеризується підвищенням параметрів шорсткості, але числове значення  $R_a$  в кінці проходу менше вихідного (до оброблення). Цей прохід закінчується приблизно в 45 хвилин після початку оброблення.

Наступний прохід відрізняється зниженням шорсткості. Це пояснюється двома факторами. По-перше, з кожним наступним проходом зона взаємодії гранули з поверхнею наближається до основ виступів мікрорельєфу, в результаті чого збільшується

площа взаємодії гранули з поверхнею. Подруге, перших два проходи привели до підвищення поверхневої міцності матеріалу зразка. Це додатково приводить до збільшення реакції поверхні при силовій взаємодії з нею гранули робочого середовища. Від проходу до прохода пружна фаза удару гранули об поверхню буде збільшуватись.

Аналіз перших проходів ВВО свідчить, що при меншому значенні коефіцієнта  $k$  (витягнута, еліптична форма гранули) режим різання абразивної гранули буде найбільш продуктивним. Характеристика другого і третього проходів ВВО пропонує збільшення коефіцієнта  $k$  (округлюється форма гранули), що відповідає режиму більшого проникнення абразивної гранули в оброблювану поверхню. Ці спостереження дають можливість підібрати абразивне робоче середовище з певними фізико-механічними властивостями і певною геометричною формою для зрізання мікронерівностей вихідної поверхні мікрорельєфу, шліфування і полірування оброблюваної поверхні.

**Висновок.** Приведений аналіз дає можливість розширити можливості і оптимізувати параметри вібраційно-відцентрового процесу обробки деталей в сипучому абразивному середовищі, визначити оптимальну величину сили взаємодії абразивної гранули, миттєвого її тиску на оброблювальну поверхню, що не приводить до зміни номінальних розмірів і геометричних форм оброблюваних деталей.

#### Література:

1. Павлище В.Т. Основи конструювання та розрахунок деталей машин / В.Т. Павлище. – К.: “Вища школа”, 1993. – 556с.
2. Опір матеріалів. Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. За ред. Г.С. Писаренка. – К.: “Вища школа”, 1993. – 655с.
3. Куклін Н.Т. Деталі машин / Н.Т. Куклін, І.С. Кукліна. – К.: “Вища школа”, 1987. – 275с.
4. Иосилевич Г.Б. Прикладная механика / Г.Б. Иосилевич, П.А. Лебедев, В.С. Стреляев. – М.: Машиностроение, 1985. – 585с.
5. O. Kondratiuk, O. Lyashuk, V. Klendii, Y. Galan. Interaction of abrasive working environment particles at vibrating processing with the treated surface details. Вісник ТНТУ. Випуск 2(6). – Тернопіль, 2017. -С.32 – 41.
6. Кондратюк О.М. Оптимізація параметрів проведення експериментальних досліджень вібраційно-відцентрової обробки /О.М. Кондратюк// Вісник НУВГПІ наук.пр. – Випуск 1(41). - Рівне: 2008. – С. 315-321.

#### Summary

**Kondratiuk O.M., Galan Y.Y. Bosyuk P. V.** Regulation of the pressure of the abrasive part of the surface details in vibrational and virtual processing

*The paper carries out the review of the vibration processing, the analysis of the interaction of the granule with the element, the energy level of working environment, ways of their increasing. Basic parameters are determined of the vibration processment, which increases the intensiveness processiry. The factor determining the force of the working environment granule interaction with the processed surface is its speed provided by the complexity of kinetic motion applied to it. There is suggested the theoretic model of the granule interaction with the surface of the part in which the abrasive granule is simultaneously influenced by the forces of vibration and centrifugal ones increasing the total force of interaction.*

*The analysis of the interaction of the granule with the surface of the workpiece, analysis of the hardness of the machined parts is carried out. of instant gravityλThe analysis of the coefficient friction on the corresponding working surface, the coefficient of the shape of the*

*granule k. The effective ways of optimizing the parameters of the technological process are determined.*

**Keywords:** *vibration-centrifugal processing, technological process, instantaneous pressure, interaction strength.*

### References

1. Pavlishche V.T. Osnovi konstruyuvannya ta rozrakhunok detalei mashin / V.T. Pavlishche. – K.: “Vishcha shkola”, 1993. – 556s.
2. Opir materialiv. Pidruchnik / G.S. Pisarenko, O.L. Kvitka, E.S. Umans'kii. Za red. G.S. Pisarenka. – K.: “Vishcha shkola”, 1993. – 655s.
3. Kuklin N.T. Detali mashin / N.T. Kuklin, I.S. Kuklina. – K.: “Vishcha shkola”, 1987. – 275s.
4. Iosilevich G.B. Prikladnaya mekhanika / G.B. Iosilevich, P.A. Lebedev, V.S. Strelyaev. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 585s.
5. O. Kondratyuk, O. Lyashuk, V. Klendii, Y. Galan. Interaction of abrasive working environment particles at vibrating processing with the treated surface details. Visnik TNTU. Vipusk 2(6). – Ternopil', 2017. -S.32 – 41.
6. Kondratyuk O.M. Optimizatsiya parametriv provedennya eksperimental'nikh doslidzhen' vibratsiino-vidtsentrovoyi obrobki /O.M. Kondratyuk// Visnik NUVGP nauk.pr. – Vipusk 1(41). - Rivne: 2008. – S. 315-321.