

УДК 621.9.048

Симонюк В.П., к.т.н., Денисюк В.Ю., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Красовський В.В.
Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ РЕЖИМІВ ВІБРУВАННЯ НА РУХ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА ПРИ ВІБРАЦІЙНІЙ ОБРОБЦІ

В статті розглянуто результати експериментальних досліджень залежностей режимів вібрування на рух робочого середовища при вібраційній обробці деталей, перевірено відтворюваність експерименту та достовірність отриманих результатів. Встановлено, що результати математичного моделювання в допустимих межах збігаються з результатами експерименту. Здійснено аналіз технологічних можливостей віброобробки в широкому діапазоні частоти та розмаху коливань. Наочно представлено причини проблематичності вибору оптимальних режимів віброобробки та можливі напрямки їх подолання. Змодельовано різні режими роботи вібраційного верстату. Аналіз результатів дав можливість виявити принципи оптимального підбору режимів віброобробки. Встановлено спосіб досягнення режиму роботи вібраційного верстату з максимально ефективним використанням механічної енергії коливань.

Ключові слова: вібраційна абразивна обробка, віробункер, циркуляційний рух, електромагніт, абразивний матеріал, експеримент.

Постановка проблеми. Вібраційна обробка має широкі технологічні можливості, вирізняється простотою конструкції і обслуговування відповідного обладнання, а також можливістю створення дільниць з автоматизацією допоміжних операцій і міжопераційним транспортуванням деталей.

Сучасний стан питання дозволяє в багатьох випадках призначати режими та інші умови обробки, близькі до оптимальних, але експериментальна перевірка режимів технологічних процесів для віброобробки деталей оригінальної конструкції, виготовлених із різних матеріалів, є необхідною. Крім того, актуальним є створення нових та вдосконалення конструкцій існуючих вібраційних машин, а також розгляд пропозицій щодо мірної обробки деталей та аналіз параметрів технологічного процесу, з метою його інтенсифікації. Все це потребує проведення нових теоретичних та експериментальних досліджень які забезпечать якість механообробки деталей на викінчувальних операціях.

Тому дослідження залежностей режимів вібрування на рух робочого середовища при вібраційній обробці є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процес вібраційної обробки полягає в послідовному нанесенні по поверхні оброблюваних деталей великої кількості мікроударів, а також нанесенні великої кількості мікроподряпин на поверхні частинками робочого середовища. Основою процесу є механічне або механохімічне знімання дрібних частинок металу і його окислів з оброблюваної поверхні, а також вигладжування мікронерівностей поверхні за рахунок пластичного деформування частинками робочого середовища, які відтворюють в процесі роботи складні рухи.

Формування поверхневого шару в процесі вібраційної обробки відбувається під дією багаторазових мікроударів частинок робочого середовища, які викликають утворення слідів обробки, зміну геометричних і фізико-механічних параметрів поверхневого шару (шорсткості, мікротвердості, залишкових напружень і структури). Форма і розміри слідів обробки визначаються параметрами робочого середовища, режимами обробки, властивостями оброблюваного матеріалу.

Поєднання таких елементів процесу як послідовне нанесення великої кількості мікроударів, інтенсивне перемішування робочого середовища і оброблюваних деталей при їх різній швидкості перемішування і взаємній орієнтації, супроводжується (в залежності від характеристики робочого середовища і режимів вібрування) зніманням металу і його окислів, поверхневим пластичним деформуванням, і створює умови для виконання очисних, викінчувальних, шліфувальних та інших операцій.

Постановка завдань. Формулювання методики експериментального встановлення залежності одної величини від іншої полягає в чіткому визначенні послідовності дій,

спрямованих на отримання вираженого в числовій формі значення вихідної величини при конкретному значенні вхідної величини.

Викладення основного матеріалу. Експеримент складається з багаторазового пророблення трьох вказаних етапів, кількість повторних замірів визначається математичним плануванням експерименту.

Перший етап – задання рівня завантаженості вібробункера робочою сумішшю. Здійснюється цей етап шляхом зважування певної заданої маси суміші та завантаження її в контейнер. При цьому контейнер дещо просідає на пружинах, тому необхідне повторне регулювання магнітного зазору. Після цього можна переходити до наступного етапу.

Судячи з результатів математичного моделювання та візуального спостереження за процесом віброобробки на дослідній установці, можна стверджувати, що встановлення робочого режиму відбувається менше, ніж за одну секунду, тобто практично миттєво, отже часу, що необхідний експериментатору для переходу від першого етапу безпосередньо до третього повинно вистачити для того, щоб вібраційна машина сама здійснила другий етап, тобто щоби розмах коливань контейнера стабілізувався після зміни напруги.

В ході третього етапу необхідним є кількісне визначення розмаху коливань контейнера. Зважаючи на відсутність спеціального обладнання для кількісного визначення цієї величини, розроблено власну методику. Сутність даної методики полягає в наступному. До платформи закріплений підпружинений п'єзоелемент, який сприймає коливання вібробункера при допомозі закріпленої штанги на вібробункері.

Опрацювання результатів експерименту здійснюється для перевірки достовірності даних за результатами математичного моделювання віброобробки та адекватності самої математичної моделі. Здійснення цього завдання тісно пов'язане з математичним плануванням експерименту.

Зважаючи на те, що експеримент однофакторний, необхідно кодувати рівні лише одного фактору. Приймаючи, що апроксимація залежності розмаху коливань контейнера від його завантаженості робочою сумішшю носить квадратичний характер, необхідно виділити три рівні фактору (маси завантаженої суміші): верхній (3 кг), нижній (0 кг) та нульовий (1,5 кг). Кодування відповідних рівнів фактору буде наступним: верхній +1, нижній –1, нульовий 0.

Необхідність складання плану-матриці для однофакторного експерименту відпадає, оскільки цей засіб слугує для визначення всіх необхідних для повноцінної оцінки комбінацій рівнів всіх факторів. В даному випадку фактор лише один, тобто його комбінації скласти в принципі неможливо; зазначимо лише, що експерименти необхідно здійснити по всіх трьох рівнях одного фактору: дослід №1 – на нижньому, дослід №2 – на верхньому, дослід №3 – на нульовому рівні.

Для рандомізації дослідів, тобто визначення послідовності їх виконання, найбільш зручно скористатись методом випадкових чисел. Проте досліді завжди проводяться в декількох повторностях, найчастіше в трьох. Прийmemo кількість повторностей – три. Отже, генератор випадкових чисел видав наступні послідовності проведення дослідів: I повторність: 1, 3, 2; II повторність: 3, 1, 2; III повторність: 1, 2, 3.

В ході експериментів потрібно було дослідити, як впливають на інтенсивність та якість віброабразивної обробки параметри віброприводу, а саме: амплітуда коливань A робочого органа (вібробункера); частота коливань f вібробункера; тривалість обробки (віброабразивного шліфування) T .

Показником інтенсивності віброабразивної обробки прийнято величину зняття стружки металу Q , що визначалась як різниця між масою деталі до і після віброабразивного шліфування.

Якість віброабразивного шліфування визначається шорсткістю поверхні оброблених деталей згідно діючих стандартів. Тому параметром, що характеризує якість віброабразивної обробки є середнє арифметичне абсолютних значень відхилень профілю в межах базової довжини Ra та клас шорсткості поверхні.

Також була поставлена задача з'ясувати основні закономірності віброабразивної обробки від дії ряду факторів, що залежать від типу та параметрів віброприводу або суттєво впливають на інтенсивність та якість обробки. До таких факторів слід віднести: вплив застійних зон; маса і габарити оброблюваних деталей; вплив електромагнітного поля на процес обробки деталей з магнітних матеріалів; співвідношення об'ємів; співвідношення робочого об'єму бункера та об'єму завантаженої суміші (деталі + абразив); зернистість абразиву.

Згідно рекомендацій, для побудови графіка закономірності достатньо 4 точки, оскільки вони дозволяють точно провести криву, коли немає перегинів. Тому було прийняте рішення

проводити дослідження при чотирьох рівнях значень факторів. Ці рівні встановлювались для значень амплітуди коливань A та частоти коливань f вібробункера. Дослідження впливу параметру T (часу обробки) має специфічний характер, оскільки не потребує попереднього встановлення певних значень, тому планування проводилось як для двофакторного експерименту.

При плануванні дослідження було вибрано класичний спосіб проведення експериментів, який полягає в тому, що встановлюється початкове значення (нижнє або верхнє) одного із факторів, яке потім послідовно (знизу вгору або навпаки) змінюється в межах інтервалу варіювання значень цього фактора при незмінності значень всіх інших факторів.

Інтервал варіювання для кожного із факторів вибирався з урахуванням напрацьованого досвіду подібних досліджень, що проводилися раніше. Були прийняті наступні верхні та нижні значення і кроки варіювання: нижнє значення амплітуди коливань вібробункера $A_n=1$ мм; верхнє значення амплітуди коливань вібробункера $A_B=4$ мм; крок варіювання амплітуди $I_A=1$ мм; нижнє значення частоти коливань вібробункера $f_n=17$ Гц; верхнє значення коливань вібробункера $f_B=41$ Гц; крок варіювання частоти $I_f=8$ Гц.

Експериментальні дослідження виконувались за наступними етапами.

Проводилась серія експериментів для з'ясування залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від амплітуди коливань вібробункера. Тривалість кожного експерименту становила 3 години. Марка абразиву 24 А (електрокорунд нормальний).

Було проведено один тривалий (6 годин) експеримент для визначення залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від тривалості обробки, а також дослідження інших закономірностей, про які йшлося вище.

Для встановлення залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від співвідношень об'ємів одночасно оброблюваних деталей та абразиву, робочого об'єму бункера та завантаженої суміші було проведено кілька додаткових експериментів із варіюванням вказаних параметрів. В якості дослідних зразків використовувались деталі типу тіл обертання, які мають зовнішню і внутрішню циліндричні, плоску і торцеву поверхні, що отримані різними способами (фрезеруванням, точінням) і мають різну початкову шорсткість. Це дало змогу з'ясувати ступінь оброблюваності кожного типу поверхні, оцінити ступінь заокруглення гострих кромки.

В експериментах для з'ясування залежності показників інтенсивності та якості віброобробки від амплітуди та частоти коливань використовувались зразки із немагнітної сталі 12Х18Н10Т. В дослідженні впливу електромагнітного поля на процес віброабразивної обробки використовувалась в якості дослідних зразків деталі кільця карданних підшипників після штампування із сталі ШХ15.

Експерименти проводились в такій послідовності: промивка зразків теплим мильним розчином від бруду; просушування зразків; визначення початкової маси m_1 , г та шорсткості Ra_1 , мкм зразків до обробки; встановлення міток на зразки; проведення дослідів; очистка та промивка зразків від залишків абразиву; просушування; вимірювання маси m_2 , г та шорсткості Ra_2 , мкм зразків після обробки; обчислення зняття стружки металу за формулою:

$$Q = m_1 - m_2. \quad (1)$$

На основі отриманих значень будувались графіки залежності зняття стружки металу Q , г та шорсткості Ra , мкм від амплітуди A , частоти f .

Залежність показників інтенсивності та якості віброобробки від тривалості обробки досліджувалась наступним чином. У вібробункер було завантажено 14 деталей із сталі 45, встановлено режими вібрування: амплітуду 1,5 мм, частоту 33 Гц, абразивний матеріал – подрібнені відходи абразивних кругів зернистістю 63. Під час обробки через певні проміжки часу із бункера вилучались 2 деталі і вимірювались їх параметри: зняття стружки металу Q , та шорсткість Ra , мкм по методиці, викладеній вище. Потім знаходилось середнє арифметичне кожного параметра. На основі отриманих значень будувались графіки залежності зняття стружки металу та шорсткості Ra , мкм від тривалості обробки (віброабразивного шліфування) T , хв.

В результаті експерименту були отримані наступні значення розмаху коливань контейнера в залежності від завантаженості його робочою сумішшю (таблиця 1).

З таблиці видно, що середнє арифметичне і середнє квадратичне значення розмаху коливань істотно не відрізняються, тобто можна зробити висновок про малість випадкової

похибки вимірювань. При теоретичному опрацюванні в подальших викладках всюди береться середнє арифметичне значення розмаху коливань.

Таблиця 1

Результати експериментальних вимірювань розмаху коливань контейнера, мм

Рівень завантаження		0 кг			1,5 кг			3 кг		
№ повторності		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Номер електромагніту	1	2,0	1,5	2,0	1,5	1,5	1,5	1,0	1,0	1,0
	2	2,5	1,5	2,0	1,5	1,5	2,0	1,0	1,5	1,0
	3	2,5	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	4	2,5	2,5	2,5	2,0	1,5	2,0	2	1,5	1,5
Середнє арифметичне		2,4	2,0	2,1	1,6	1,4	1,6	1,2	1,2	1,1
Середнє квадратичне		2,4	2,0	2,1	1,6	1,4	1,7	1,3	1,3	1,1

На основі таблиці 1 складено таблицю для математичної обробки результатів експерименту (таблиця 2).

Таблиця 2

Результати експерименту

Рівень завантаження, кг	Розмах коливань по повторностях, мм			Середнє арифметичне, мм	Дисперсія, мм ²
	I	II	III		
0	2,4	2,0	2,1	2,17	0,04335
1,5	1,6	1,4	1,6	1,53	0,01335
3	1,2	1,2	1,1	1,17	0,00335

За цими даними обчислюється критерій Кохрена: $G=0,722$. Табличне значення критерію Кохрена $G_T=0,977$. Оскільки значення критерію Кохрена, пораховане за результатами експерименту, менше, ніж табличне, то експериментальні дані можна вважати достовірними, а сам експеримент – відтворюваним.

За експериментальними даними проекстрапольовано по трьох точках залежність розмаху коливань контейнера від його завантаженості робочою сумішшю:

$$R = b_0 + b_1 m + b_2 m^2, \quad (2)$$

де R – розмах коливань контейнера,

m – маса завантаження контейнера,

b_0, b_1, b_2 – коефіцієнти екстраполяції.

Методом послідовної підстановки в рівняння (2) даних експерименту в кожній з трьох точок знайдено коефіцієнти екстраполяції (з точністю до двох значащих цифр). Після цього рівняння (2) прийняло вигляд:

$$R = 2,17 - 0,52m + 0,06m^2. \quad (3)$$

Адекватність цього рівняння перевірена за критерієм Фішера. Порахована для рівняння (3) дисперсія адекватності складає $S_{ad}^2 = 1,417 \cdot 10^{-4}$. Відповідно критерій Фішера $F = 7,077 \cdot 10^{-3}$. Табличне значення критерію Фішера для цього випадку – $F = 5,987$. Оскільки значення критерію Фішера, пораховане для рівняння (3) менше, ніж табличне значення для даного випадку, опис залежності розмаху коливань контейнера від його завантаження рівнянням (3) можна вважати адекватним.

Циркуляційний вихровий рух робочого середовища значною мірою забезпечує ефективність віброобразивної обробки деталей. Згідно із напрямками і задачами досліджень проведені експериментальні виміри параметрів циркуляційного вихрового руху. Вимірювання здійснені при різних законах керування електромагнітними приводами. Експериментальні виміри здійснено безпосередньо у виробункері. При вимірюванні застосований оптичний метод із покадровим реєструванням положення елементів робочого середовища. Здійснена покадрова зйомка поверхні робочого середовища у виробункері. Частота кадрів становила 1 с. Спостереження послідовні по кадрам положення елементів робочого середовища. Для

спрощення вимірів у робоче середовище додана частина спеціальних елементів (маркерів), які по своїм параметрам мало відрізняються від елементів робочого середовища. Обробка фото сусідніх кадрів послужила основою для встановлення координат набору окремих індивідуальних елементів робочого середовища. Координати елемента робочого середовища та їх зміна по окремих кадрах визначаються в декартовій прямокутній, полярній в криволінійній або спеціальній системах координат. Прийmemo декартову прямокутну систему координат XOY з центром в центральній частині вібробункера (рис. 1).

Для кількох сусідніх кадрів визначимо координати окремої гранули абразиву або маркера. Встановимо послідовні положення окремих гранул на поверхні робочого середовища. Формується масив векторів положення окремих індивідуальних елементів у вигляді набору векторів:

$$\begin{bmatrix} x_{A1} \\ y_{A1} \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x_{A2} \\ y_{A2} \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x_{An} \\ y_{An} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_{B1} \\ y_{B1} \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x_{B2} \\ y_{B2} \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x_{Br} \\ y_{Br} \end{bmatrix}; \quad \begin{bmatrix} x_{C1} \\ y_{C1} \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x_{C2} \\ y_{C2} \end{bmatrix}, \dots, \begin{bmatrix} x_{Cq} \\ y_{Cq} \end{bmatrix}.$$

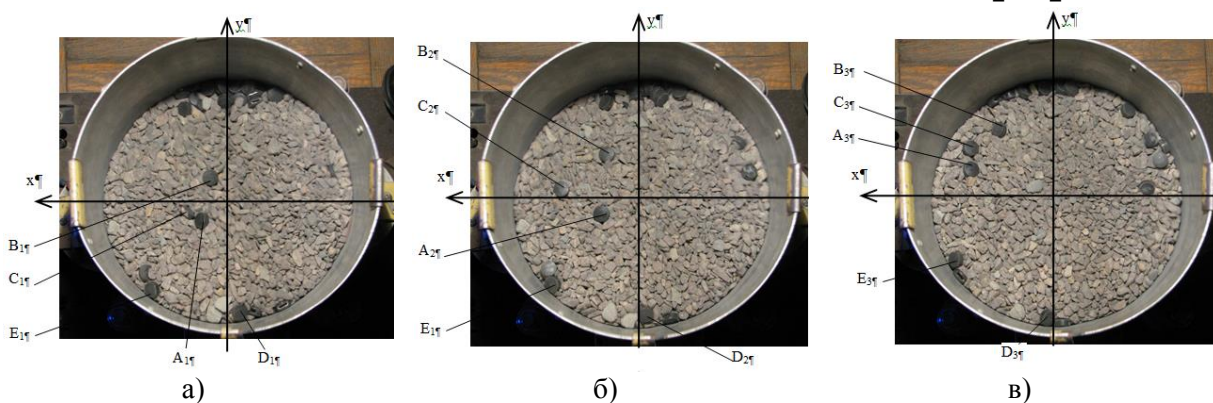


Рис. 1. Схема визначення положення деталі по окремих кадрах зйомки при використанні декартової прямокутної системи координат

Вектори визначають положення елемента робочого середовища на поверхні у вигляді точок $A_1, A_2, \dots, A_n; B_1, B_2, \dots, B_r; C_1, C_2, \dots, C_q$.

Число точок вибирається достатньо великим для того, щоб описати рух на всій поверхні робочого середовища. Число векторів залежить від того, як довго знаходиться елемент на поверхні робочого середовища. Масив вибраних точок описує траєкторію частинок на всій поверхні робочого середовища. Траєкторія має вигляд ламаних ліній (рис. 2).

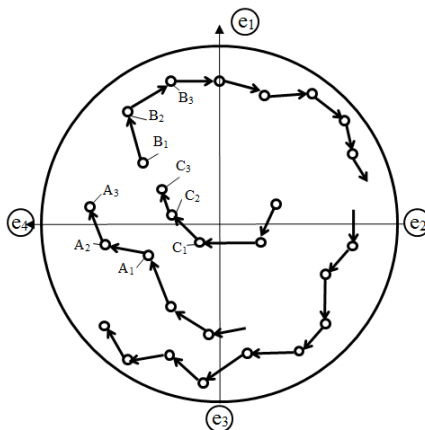


Рис. 2. Типові експериментально визначені траєкторії переміщення гранул на поверхні робочого середовища

Із збільшенням зернистості абразивного середовища, тобто розмірів гранул абразивної крихти, зняття металу зростає внаслідок збільшення маси зерен і збільшення глибини їх проникнення в метал, що викликає більш інтенсивну оброблюваність поверхні.

Висновки. В результаті досліджень встановлено, що ударно-імпульсні навантаження на вібробункер приводять до виникнення повільного циркуляційного руху робочого середовища. Даний рух інтенсифікується при несиметричному ударному навантаженні. Циркуляційний рух

має вигляд кільцевого або дугоподібного вихрового кільця, яке охоплює весь об'єм робочого середовища. Для визначення характеру вихрового руху допустимим є застосування закону зміни кількості руху в інтегральній формі для виділеного контрольного об'єму робочого середовища. Середня швидкість циркуляційного руху залежить від інтенсивності удару, швидкості вібробункера до удару та маси робочого середовища. Кутова швидкість вихрового руху пропорційна середній швидкості циркуляційного руху.

Інформаційні джерела

1. Бабичев А.П. Физико-технологические основы методов обработки: учебное пособие для вузов / А.П. Бабичев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2006. – 410 с.
2. Струтинський В.Б. Вдосконалення обладнання та процесу ударно-імпульсної обробки деталей у вібробункері: монографія / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк – Луцьк: СПД Гадяк Жанна Володимирівна друкарня "Волиньполіграф"TM, 2016. – 139 с.
3. Струтинський В.Б. Дослідження закономірностей повільного циркуляційного вихрового руху робочого середовища у вібробункері / В.Б. Струтинський, В.П. Симонюк, В.Ю. Денисюк / "Перспективні технології та прилади". Збірник статей. Випуск 10(1). м. Луцьк, червень 2017 р. – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – С. 176–185.
4. V. Symonyuk Experimental study of circulating vortex movement working environment in vibrobunker / V. Symonyuk, V. Denysiuk, Y. Lapchenko / Mechanics, Materials Science & Engineering Journal. Volume 12, September 2017, Pages 41-54, DOI 10.2412/mmse.58.82.178 provided by.

Симонюк В.П., Денисюк В.Ю., Лапченко Ю.С., Красовский В.В.
Луцкий национальный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РЕЖИМОВ ВИБРОВАНИЯ НА ДВИЖЕНИЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКЕ

В статье рассмотрены результаты экспериментальных исследований зависимостей режимов вибрирования на движение рабочей среды при вибрационной обработке деталей, проверено воспроизводимость эксперимента и достоверность полученных результатов. Установлено, что результаты математического моделирования в допустимых пределах совпадают с результатами эксперимента. Осуществлен анализ технологических возможностей виброобработки в широком диапазоне частоты и размаха колебаний. Наглядно представлены причины проблематичности выбора оптимальных режимов виброобработки и возможные направления их преодоления. Смоделировано различные режимы работы вибрационного станка. Анализ результатов позволил выявить принципы оптимального подбора режимов виброобработки. Установлено способ достижения режима работы вибрационного станка с максимально эффективным использованием механической энергии колебаний.

Ключевые слова: *вибрационная абразивная обработка, вибробункер, циркуляционное движение, электромагнит, абразивный материал, эксперимент.*

V. Symonyuk, V. Denysiuk, Y. Lapchenko, V. Krasovskyi
Lutsk National Technical University

RESEARCH THE DEPENDENCES OF VIBRATION MODES ON THE MOVEMENT OF THE WORKING ENVIRONMENT AT VIBRATION PROCESSING

In the article the results of experimental studies the dependencies of vibration modes on the motion of the working environment during the vibration processing of details are considered, the reproducibility of the experiment and the reliability of the results have been checked. It is established that the results of mathematical modeling within the permissible limits coincide with the experimental results. The analysis the technological possibilities of vibration processing in a wide range of frequency and magnitude of oscillations are carried out. The reasons for the problem of selecting the optimal modes of vibration processing and possible ways of overcoming them are presented in detail. Different operating modes of the vibrating machine are simulated. The analysis of the results allowed

© Симонюк В.П., к.т.н., Денисюк В.Ю., к.т.н., Лапченко Ю.С., к.т.н., Красовський В.В.

revealing the principles of optimal selection of vibration processing modes. The method of achieving the operating mode of a vibrating machine with the maximum effective use mechanical energy of oscillations is established.

Key words: *vibration abrasive processing, vibro-bunker, circulation movement, electromagnet, abrasive material, experiment.*

Стаття надійшла до редакції 25.05.2018.