

Дмитро Юрійович Бугров¹, Богдан Олегович Коробко²

¹аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: bugrov.dmitriy@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4571-5147>

²доктор технічних наук, професор кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, Україна)

E-mail: korobko@nupr.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-3904>. Scopus Author ID: 57190423064

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОЇ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ У ВІБРОЗМІШУВАЧІ З АКТИВНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

Представлені результати експериментального дослідження процесу комбінованої віброабразивної обробки в спеціально розробленому віброзмішувачі з активним робочим органом – обертовою камерою. Ця установка забезпечує одночасну дію вібраційного збурення та обертального руху робочої камери на компоненти оброблюваного середовища, що інтенсифікує контактну взаємодію між абразивними тілами та деталями. Результати експерименту були оброблені методами математичної статистики, отримано рівняння регресії, яке визначає функціональну залежність зміни показника питомої швидкості знімання матеріалу від зміни основних параметрів. Отримані експериментальні дані підтверджують підвищення ефективності процесу при оптимальному співвідношенні значень амплітуди вібрацій, швидкості обертання робочої камери та маси сипучого середовища в ній.

Ключові слова: абразивна обробка; роторна камера; активний робочий орган; коефіцієнт ефективної взаємодії; енергоефективність.

Рис.: 7. Табл.: 3. Бібл.: 10.

Актуальність теми дослідження. Інтенсифікація процесів обробки поверхонь із високими вимогами до якості, точності та продуктивності є одним із ключових напрямів сучасної інженерної технології. Віброабразивна обробка зарекомендувала себе як ефективний метод доведення та полірування деталей складної форми, однак її ефективність суттєво залежить від параметрів збурення робочого середовища. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває дослідження комбінованих методів віброобробки, які поєднують вібраційний вплив із керованим обертанням робочої камери. Такий підхід відкриває нові можливості для керування динамікою взаємодії між абразивом і деталями, зокрема через регулювання контактних навантажень та інтенсифікацію процесу знімання матеріалу. Запропоноване дослідження відповідає сучасним тенденціям розвитку технологій механічної обробки та обґрунтовано потребами автоматизованого, енергоефективного і високопродуктивного виробництва. Зокрема, воно є актуальним для галузей машинобудування, авіаційної, автомобільної та оборонної промисловості, де точність обробки і якість поверхні відіграють критичну роль.

Постановка проблеми. Враховуючи актуальність вимог підвищення продуктивності та зниження енерговитрат до процесу віброобробки, особливого значення набуває пошук нових методів та способів, які дозволяють підвищити ефективність віброабразивної обробки шляхом керованого впливу на динаміку середовища, інтенсифікацію контактної взаємодії та оптимізацію енергоспоживання.

Більшість існуючого віброобладнання характеризується обмеженою технологічною гнучкістю та недостатньою здатністю до адаптації при зміні параметрів обробки. Через відсутність можливості контрольованого керування збурювальними силами в робочому середовищі з різним типом деталей і абразивними тілами не використовує повний потенціал обладнання, тим самим не досягається максимальна ефективність процесу в заданих умовах.

Актуальні дослідження по встановленню закономірностей впливу параметрів комбінованого процесу на продуктивність обробки та встановлення оптимальних режимів роботи обладнання. Це дасть змогу підвищити ефективність існуючих установок, а також закладає наукову основу для розробки нових віброабразивних машин комбінованого типу що мають більшу продуктивність та енергоефективність.

Аналіз останніх джерел і публікацій. Аналіз наукової літератури свідчить, що віброабразивна обробка за умов класичного вібраційного збурення достатньо глибоко вивчена з погляду впливу амплітуди та частоти коливань на кінцеві результати обробки.

Питання інтенсифікації віброабразивної обробки та оптимізації умов взаємодії абразивного середовища з деталями розглядається у численних дослідженнях останніх років. Зокрема, у роботах [1–3] розглядається вплив параметрів вібрації (амплітуди, частоти, форми збудження) на інтенсивність знімання матеріалу та якість поверхні. Автори підкреслюють, що ефективність обробки значною мірою залежить від режимів збурення робочого середовища.

Згідно з результатами досліджень [4–5], лише незначна частка енергії, що подається на вібраційне збурення, безпосередньо бере участь у процесі знімання матеріалу з поверхні оброблюваної деталі. Під час класичної віброобробки в середовищі вільних абразивів лише приблизно 5-15 % енергії від загальної споживається безпосередньо на знімання матеріалу, решта – йде на втрати, зумовлені тертям, коливаннями та зношуванням абразивів.

У роботах [6-7] наведено, що причиною такої низької ефективності є складна динаміка переміщення частинок у середовищі, та енергія віброзбурення переважно витрачається на коливальний рух, що не забезпечує достатню сили контакту між абразивом і деталлю. Дослідники наголошують, що підвищення амплітуди чи частоти вібрацій не завжди призводить до зростання ефективності знімання – навпаки, надлишкове збурення знижує продуктивність.

Таким чином, аналіз існуючих досліджень підтверджує актуальність розробки нових комбінованих віброустановок та дослідження впливу зміни їхніх параметрів на продуктивність процесу з метою встановлення оптимальних режимів роботи обладнання.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз наявних публікацій і технічних розробок у сфері віброабразивної обробки засвідчує, що попри значну кількість існуючих досліджень, низка аспектів залишається недостатньо вивченою.

Зокрема, більшість наукових праць зосереджуються на дослідженні окремо вібраційного або обертового впливу в обробці вільними абразивами, у той же час комбіновані процеси, що поєднують ці впливи на робоче середовище, залишаються менш дослідженими. Недостатньо досліджено взаємозв'язок між змінами амплітудою вібрацій, частотою обертання і масою робочого середовища як взаємозалежних параметрів, що впливають на ефективність процесу абразивної обробки.

Мета статті. Метою цієї статті є обґрунтування ефективності комбінованого віброабразивного процесу в середовищі вільних абразивів та його експериментальне дослідження за допомогою спеціально розробленого віброзмішувача з активним робочим органом, що являє собою роторну робочу камеру

Отримання та аналіз експериментальної функціональної залежності продуктивності комбінованого процесу від зміни ключових параметрів обладнання.

Виклад основного матеріалу. Робоче середовище у віброабразивній обробці є сипучим та складається з великої кількості абразивних частинок та оброблюваних деталей, які взаємодіють між собою. У стані спокою така система може описуватись властивостями твердого тіла. Проте під дією певних зовнішніх сил, така система може набувати властивостей в'язкопружного тіла або навіть текучого середовища.

Під дією сил вібраційного збурення в робочій камері віброустановки виникають умови, за яких частинки абразиву набувають змінних швидкостей та прискорень, що спричиняє постійну зміну контактної сили взаємодії між ними. При певних значеннях прискорення, коли інерційна сила значно перевищує вагу частинки, сили нормального

тиску між частинками зменшуються або повністю зникають. Унаслідок цього сипуче середовище поводить себе подібно до рідини – спостерігається ефект псевдозрідження. Фізично ефект псевдозрідження проявляється у:

- 1) зменшенні коефіцієнта тертя між частинками;
- 2) перекочуванні частинок одна відносно одної без відриву;
- 3) посиленні циркуляційних потоків всередині об'єму середовища.

У барабанних галтовочних установках робоча камера обертається навколо горизонтальної осі, викликаючи рух сипучого середовища. Введемо безрозмірний критерій K_r , що описує характер його руху та визначається співвідношенням:

$$K_r = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (1)$$

де R – внутрішній радіус робочої камери;

ω – кутова швидкість обертання барабана;

g – гравітаційним прискоренням.

Розглянемо три основні характерні режими руху середовища у галтовці:

1. Режим повільного пересипання. Він спостерігається при низьких швидкостях обертання $K_r < 0,1$. Абразив і деталі частково захоплюються обертовою стінкою та піднімаються по ній, але створювана відцентрова сила є недостатньою для утримання частинок, тому вони вільно пересипаються у нижню частину камери під дією сили тяжіння. Утворюється рухомий шар частинок з похилою поверхнею середовища, що постійно оновлюється. Такий режим характеризується хаотичним рухом частинок середовища з низькою кінетичною енергією, їхніми короткочасними контактами невеликої сили та, як наслідок, низькою інтенсивністю обробки.

2. Основний робочий режим. Він спостерігається при середніх швидкостях обертання камери, коли $0,1 < K_r < 1$. Абразив та деталі піднімаються на більшу висоту (до $1/3-1/2$ висоти камери), але втрачають контакт зі стінкою і вільно падають. При цьому режимі формується змінна контактна взаємодія частинок, що забезпечує ефективне зняття матеріалу за рахунок циклічного навантаження.

3. Режим ущільнення або центрифугування. Характерний для високих швидкостей обертання, при цьому $K_r > 1$. Відцентрова сила стає значно більшою за гравітацію. Кінетична енергія частинок в цьому режимі є найбільшою, але вона спрямована на підтримання синхронного обертання із камерою, при відсутності їх взаємного переміщення. Це й пояснює зниження ефективності обробки при надмірно високих швидкостях: кінетична енергія частинок є великою, але майже не перетворюється на корисну роботу в зоні контакту через відсутність ковзання та ударної взаємодії.

Як бачимо, повна кінетична енергія абразивної частинки в різних способах обробки у середовищі вільних абразивів, зокрема у віброобробці або галтовці може досягати значних величин, проте фактично лише її частина бере участь у процесі знімання матеріалу.

Розглянемо умовну схему руху однієї абразивної частинки відносно деталі (рис. 1). Частинка абразивного середовища W_m рухається з відносною швидкістю V_r і кутом удару θ у напрямку до деталі, значення якого визначається інтенсивністю коливального руху та циркуляції середовища. Після контактної взаємодії частинка відбивається від деталі з відносною швидкістю V_r' і кутом θ' .

Відносну швидкість V_r можна виразити як функцію амплітуди абразивного середовища A_r , кутової швидкості Ω і фазового кута φ таким чином:

$$v_r = A_r \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t + \varphi). \quad (2)$$

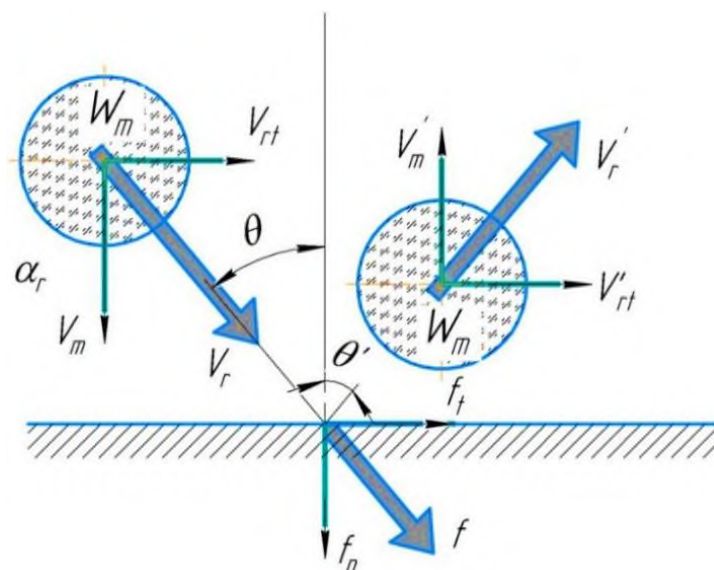


Рис. 1. Умовна схема руху абразивної частинки відносно деталі
Джерело: розроблено авторами.

Середню швидкість V_r можна отримати наступним чином:

$$\bar{v}_r = (\sqrt{2} / 2) \cdot A_r \cdot \Omega. \quad (3)$$

Середня тангенціальна швидкість до контакту V_r ідентична середній тангенціальній швидкості після контакту V_r' . Однак через поглинання, середні нормальні швидкості відрізняються:

$$\bar{v}_{rt} = \bar{v}'_{rt} = (\sqrt{2} / 2) \cdot A_r \cdot \Omega \cdot \sin \theta, \quad (4)$$

Нормальну силу, що діє на одиницю площі поверхні деталі, можна виразити так:

$$F_n' = n \frac{m_m}{g} \cdot \alpha_r \cdot \cos \theta, \quad (5)$$

де n – кількість точок контакту абразивного середовища на одиницю площі;

m – вага кожного окремого абразивного елемента;

α_r – відносне прискорення між абразивним середовищем і оброблюваною деталлю;

θ – кут удару.

Результуючу тангенціальну силу можна визначити за формулою:

$$F_t' = F_n' \cdot \sin \theta. \quad (6)$$

Отже, кут удару θ та напрям швидкості частинки визначають ефективність удару: залежно від значення сили F_n , контакт може призводити до мікрорізання або пластичної деформації. Водночас при збільшенні прискорення спостерігається тенденція до зменшення θ , внаслідок чого частинка лише ковзає по поверхні. Це призводить до зменшення сили F_n та зниження передачі енергії в зону контакту, зменшення часу контактної взаємодії та зниження коефіцієнта тертя.

З метою кількісної оцінки кінетичної енергії, що йде на знімання матеріалу пропонується ввести безрозмірний параметр – коефіцієнт ефективної взаємодії K_e . Він визначає співвідношення між ефективною кінетичною енергією, яка бере участь у корисній роботі знімання матеріалу, та загальною кінетичною енергією системи:

$$K_e = \frac{E^*}{E_k}; \quad E^* = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_{i,n}^2}{2} \cdot \cos \theta_i; \quad K_e = \frac{\sum_{i=1}^n m_i v_{i,n}^2 \cdot \cos \theta_i}{\sum_{i=1}^n m_i v_i^2}, \quad (7)$$

де E^* – ефективна кінетична енергія, реалізована в зоні контакту;

E_k – загальна кінетична енергія частинок абразивного середовища;

m_i – маса окремої абразивної частинки;

$v_{i,n}$ – нормальна складова швидкості частинки при ударі по поверхні деталі;

θ_i – кут контакту (кут між напрямком руху частинки та нормаллю до поверхні в точці зіткнення);

n – кількість частинок, які беруть участь у контакті з поверхнею деталі протягом однієї секунди.

Очевидно, що $0 \leq K_e \leq 1$, причому значення, близьке до 1, свідчить про високий ступінь ефективної енергії, тоді як значення, близьке до 0, означає її суттєві втрати на неефективні процеси.

З метою підвищення продуктивності процесу віброобробки в середовищі вільних абразивів шляхом збільшення коефіцієнту ефективної взаємодії K_e , тобто енергії що йде безпосередньо на знімання матеріалу, пропонується новий комбінований спосіб обробки. Він полягає в поєднанні вібраційного збурення та обертального руху активного робочого органу. При цьому створюються особливі умови механічної взаємодії компонентів у робочій камері, що інтенсифікують циркуляцію абразивних тіл чим збільшується їх ефективна контактна взаємодія з поверхнями оброблюваних деталей. У результаті реалізується динамічна картина з множинними контактами різного характеру – ударного, ковзного, обертального. Саме в цьому поєднанні полягає ефект перерозподілу кінетичної енергії частинок: при збереженні загального енергетичного рівня середовища, істотно зростає частка тієї енергії, що безпосередньо витрачається на контактну взаємодію з поверхнею деталі. Тобто збільшується ефективна кінетична енергія E^* , яка використовується для знімання матеріалу.

Експериментальні дослідження комбінованої обробки проводились в лабораторії КБ «Вібротехніка» кафедри галузевого машинобудування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» на спеціально розробленому віброзмішувачі з активним робочим органом (рис. 2).

Віброзмішувач побудований по модульному принципу, та має два функціонально незалежні, але взаємодіючі елементи:

1) Модуль обертальної робочої камери – це нова конструкція, яка встановлена на віброплатформу та має власний регульований привод роторної робочої камери.

2) Модуль віброплатформи – це промисловий вібраційний верстат для об'ємної фінішної обробки ВІО-8 [8-10], який у свій час використовувався для наукових досліджень науковцями під керівництвом доктора технічних наук, професора Л. І. Сердюка.

Рама 1 забезпечує надійну фіксацію обертальної робочої камери 5 та її привода 7. Її конструкція дозволяє інтегруватися з існуючим вібраційним верстатом ВІО-8, що використовується як віброплатформа. Її кріплення до віброплатформи здійснено за допомогою гвинтів.

Бокова стійка 3 виконана знімною для легкої інсталяції робочої камери 5. Вона кріпиться до поперечини рами 1 за допомогою гвинтового з'єднання В боковій стійці закріплено підшипниковий вузол 4, при чому внутрішнє кільце його підшипника має два радіальних гвинта для легкої фіксації та зняття валу робочої камери.

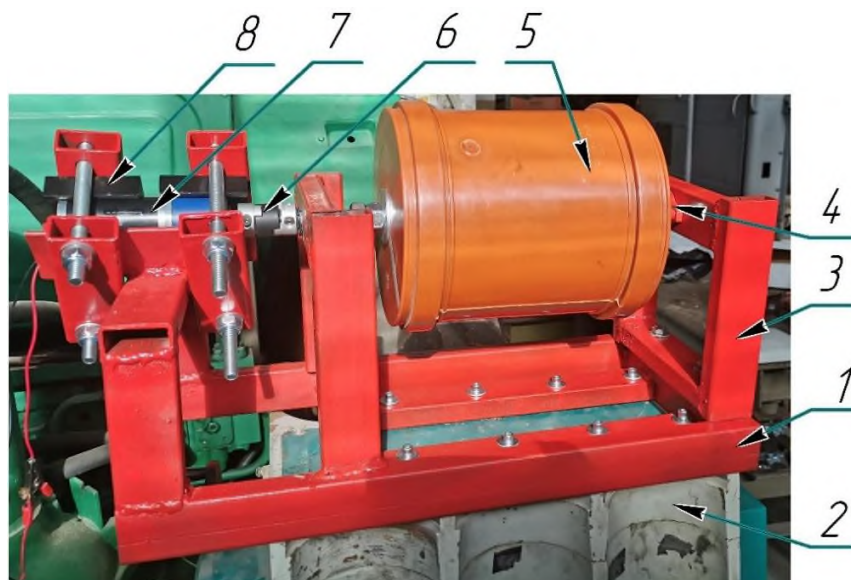


Рис. 2. Загальний вигляд дослідного віброзмішувача:

- 1 – рама; 2 – віброплатформа верстату ВІО-8; 3 – знімна стійка рами;
4 – підшипник; 5 – робоча камера (обертовий барабан); 6 – муфта;
7 – електродвигун барабана; 8 – елементи кріплення електродвигуна

Джерело: розроблено авторами.

Робоча камери (рис. 3) складається з корпусу 1, двох кришок 2. Герметичність забезпечують два гумових ущільнювачі 4. Така конструкція дозволяє легко виконувати завантаження та вивантаження компонентів робочого середовища – абразивних тіл та оброблюваних деталей. Внутрішні розміри камери складають $\varnothing 157$ мм, довжина 200 мм, загальний об'єм становить 3,9 л.

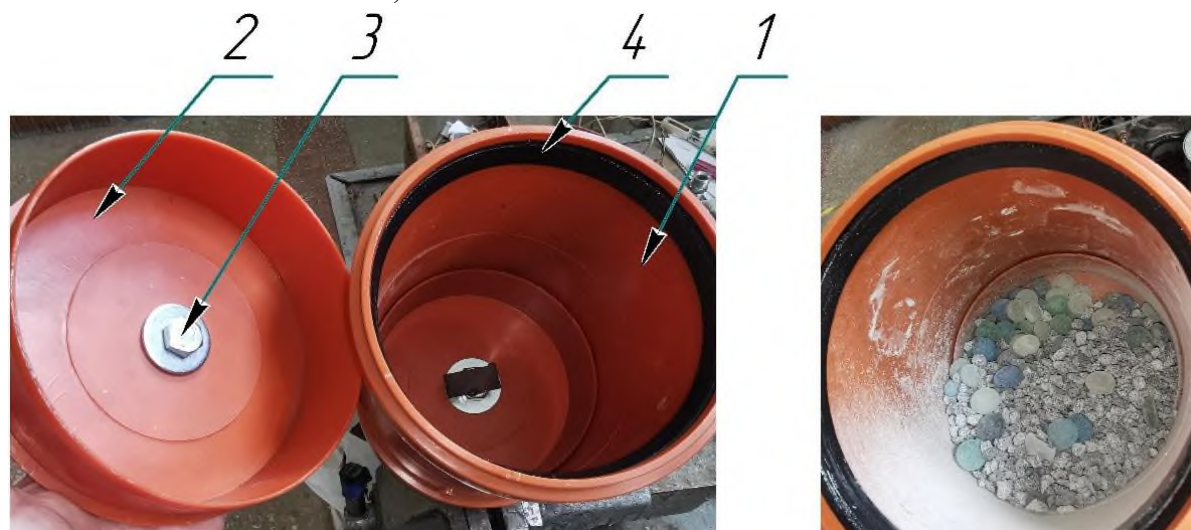


Рис. 3. Конструкція обертової робочої камери:

- 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – кріплення валу; 4 – ущільнювач кришки

Джерело: розроблено авторами.

Як вільний абразив робочого середовища використані галтовочні тіла марки TR 25A 10 СТ1 з електрокорунду середньої жорсткості, зернистість 125 мкм, форма скошений трикутник розмірами $6 \times 6 \times 6$ (мм).

Оброблюваними деталями обрані скляні декоративні елементи, форма яких наближена до сплюсненого еліпсоїда з діаметром приблизно 20 мм.



Рис. 4. Елементи робочого середовища та їх розміри:
а – галтувальні тіла; б – декоративні елементи

Джерело: розроблено авторами.

Величина співвідношення об'єму деталей до об'єму галтувальних тіл становить 1:3. Однак, оскільки об'єм залежить від маси та густини матеріалів, з практичного погляду зручніше використовувати масове співвідношення, наведене в табл. 1.

Таблиця 1 – Об'єм та маса компонентів робочого середовища

Заповнення камери, %	Об'єм середовища, л	Об'єм деталей, л	Об'єм абразиву, л	Маса деталей, кг	Маса абразиву, кг	Загальна маса, кг
30	1,17	0,39	0,78	0,98	2,2	3,2
40	1,76	0,59	1,17	1,5	3,3	4,8
60	2,34	0,78	1,56	1,95	4,4	6,4

Джерело: розроблено авторами.

З метою забезпечення об'єктивності порівняння отриманих експериментальних значень ефективності віброобробки введемо поняття питомої швидкості знімання матеріалу V_p . Цей показник визначає кількість знятого матеріалу, що припадає на одиницю маси оброблюваних деталей за одиницю часу й обчислюється за формулою:

$$V_p = \frac{m_0 - m_t}{m_0 \cdot t}, \left[\frac{\text{мг}}{\text{кг} \cdot \text{год}} \right] \quad (8)$$

де m_0 – початкова маса оброблюваних деталей;

m_t – маса оброблюваних деталей після обробки;

t – тривалість віброобробки.

З метою досягнення належної точності результатів тривалість проведення кожного експерименту становить 30 хвилин.

Основними факторами, що впливають на ефективність процесу, визначені:

1) амплітуда вібрацій робочої камери A .

2) частота обертання камери ω

3) маса завантаженого матеріалу m .

Діапазони варіювання факторів визначено на основі попередніх теоретичних досліджень та конструктивних обмежень установки. Кожен фактор варіювався на трьох рівнях: мінімальному, середньому та максимальному.

Таблиця 2 – Діапазони зміни та інтервали варіювання параметрів

Найменування	Розмірність	Позначення	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Нижній рівень (-)	Інтервал варіювання
Амплітуда вібрацій	мм	X_1	3	2	1	1
Частота обертання камери	об/хв	X_2	104	70	36	34
Маса компонентів	кг	X_3	5,6	4,2	2,8	1,4

Використовуючи механізм планування експерименту для знаходження ступеня впливу амплітуди вібрації, частоти обертання камери та маси середовища на ефективність роботи дослідної віброустановки знайдемо функціональну залежність впливу вищенаведених факторів на питому швидкість знімання матеріалу у вигляді

$$V_p = f(A, \omega, M). \quad (9)$$

Вплив дії вказаних факторів на питому швидкість знімання матеріалу відрізняється від лінійного, тому використовуємо трифакторний експеримент другого порядку на основі центрально-композиційного плану зі скоригованими зірковими точками.

У загальному вигляді для трифакторного експерименту:

$$y_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^2 + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (10)$$

де $i, j = 1, 2, \dots, k$ – порядкові номери факторів;

Матриця планування експерименту та отримані результати вимірювань наведені у таблиці 3.

Таблиця 3 – Реалізація плану експерименту

№ досл.	Код	Амплітуда вібрацій, мм	Код	Частота обертання ка- мери, об/хв	Код	Маса компонентів, кг	Питома швид- кість знімання матеріалу, мг/(кг*год)
1	+	3	+	104	+	6,4	320
2	—	2	+	104	+	6,4	300
3	+	3	—	36	+	6,4	200
4	—	1	—	36	+	6,4	190
5	+	3	+	104	—	3,2	230
6	—	1	+	104	—	3,2	210
7	+	3	—	36	—	3,2	140
8	—	1	—	36	—	3,2	120
9	+	3	0	70	0	4,8	280
10	—	1	0	70	0	4,8	270
11	0	2	+	104	0	4,8	300
12	0	2	—	36	0	4,8	180
13	0	2	0	70	+	6,4	280
14	0	2	0	70	—	3,2	220
15	0	2	0	70	0	4,8	320
16	0	2	0	70	0	4,8	330
17	0	2	0	70	0	4,8	310

Отримані результати дослідів обробляємо методами математичної статистики та одержуємо рівняння регресії:

$$V_p = 300 + 8x_1 + 53x_2 + 37x_3 - 10x_1^2 - 45x_2^2 + 35x_3^2 + 1,3x_1x_2 - 1,3x_1x_3 + 6,3x_2x_3. \quad (11)$$

Отримане рівняння перевірено на адекватність за критерієм Фішера та встановлено, що розрахункове значення критерію менше, ніж граничне. Тому розроблена на основі багатофакторного аналізу функціональна залежність адекватно описує вплив основних факторів на величину питомої швидкості знімання матеріалу.

Використовуючи прикладні програми та вихідні значення діапазонів діючих факторів з табл. 2 за отриманою залежністю (11) побудовані та зображені на рис. 5-7 графіки залежності питомої швидкості знімання від зміни параметрів.

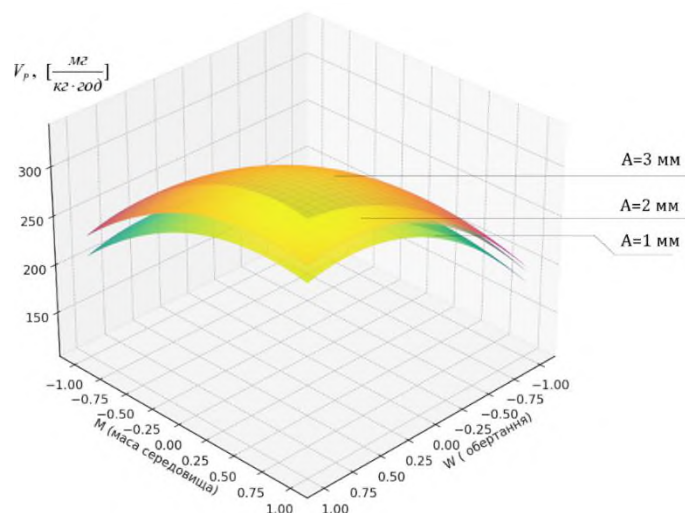


Рис. 5. Графік залежності питомої швидкості знімання матеріалу від маси та частоти обертання для різної амплітуди вібрацій

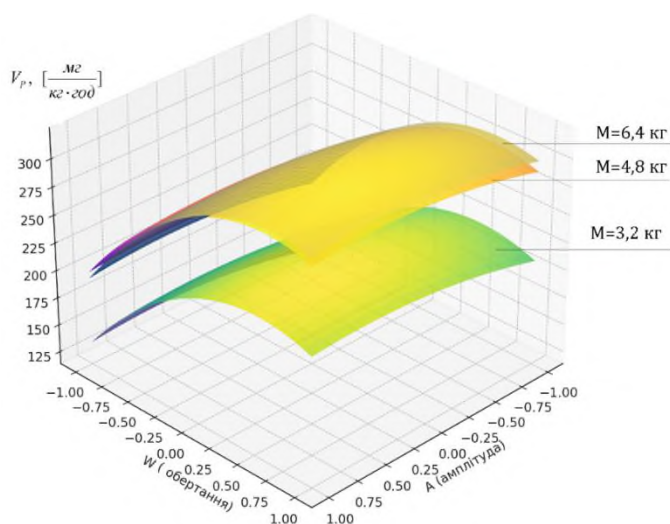


Рис. 6. Графік залежності питомої швидкості знімання матеріалу від амплітуди та частоти обертання для різної маси середовища

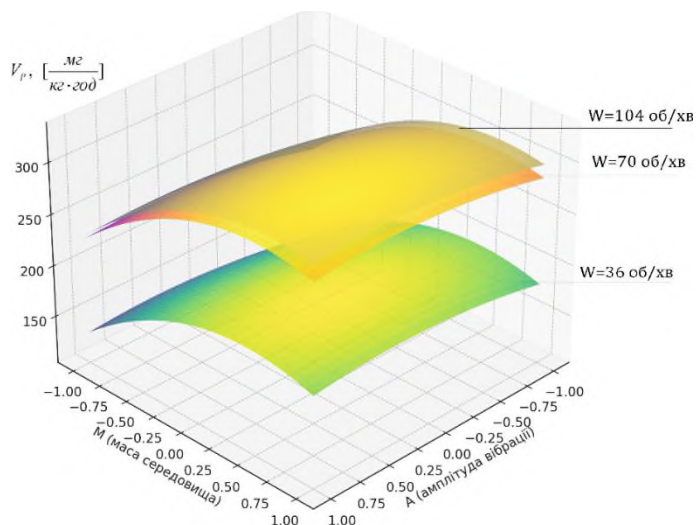


Рис. 7. Графік залежності питомої швидкості знімання матеріалу від амплітуди та маси для різної частоти обертання робочої камери

Наведені графіки мають чітко виражену опуклу форму, що свідчить про наявність оптимумів продуктивності у дослідженому інтервалі параметрів. Тому є доцільність подальших досліджень по визначенню оптимальних режимів для вдосконалення технології.

Значення питомої швидкості знімання матеріалу змінювалась у межах від 120 мг/(кг·год) до 330 мг/(кг·год) залежно від комбінації різних значень амплітуди вібрацій, частоти обертання камери та маси середовища. Максимум продуктивності становив 330 мг/(кг·год) та досягався при середньому значенні параметрів, зокрема при $A = 2$ мм, $W = 70$ об/хв, $M = 4,8$ кг. Найменша питома швидкість знімання становить 120 мг/(кг·год) та відповідає мінімальним значенням усіх трьох факторів.

Хоча режим комбінованої віброобробки при відсутності обертального руху робочої камери не був безпосередньо реалізований у рамках проведеного експерименту, аналіз отриманої регресійної залежності дозволяє зробити обґрунтований висновок про більшу ефективність процесу комбінованої віброобробки порівняно з віброустановками без активного робочого органу. Зокрема, лінійний коефіцієнт при параметрі частоти обертання робочої камери у рівнянні регресії є одним із найвищих серед усіх незалежних змінних ($b_2 = 53$), що свідчить про суттєву вагу його впливу на продуктивність процесу. Водночас квадратичний коефіцієнт $b_{22} = -45$ свідчить про наявність екстремуму значення продуктивності – функція зростає при збільшенні частоти обертання камери до певного максимального значення, після чого спадає, що характерно для процесів з нелінійними характеристиками.

Висновок. У статті проведено дослідження шляхом планування експерименту процесу комбінованої віброабразивної на спеціально створеному обладнанні. Обґрунтовано ефективність використання сумісної дії вібраційного збурення та обертального руху робочої камери. Ефективність роботи віброзмішувача визначалась значенням питомої швидкості знімання матеріалу.

Уперше запропоновано комплексний підхід до опису процесу комбінованої віброобробки в середовищі вільних абразивів із використанням коефіцієнта ефективної взаємодії, який враховує перерозподіл кінетичної енергії частинок

Побудовані за результатами експериментальних досліджень графіки залежності питомої швидкості знімання від зміни параметрів мають виражений опуклий характер, що свідчить про наявність екстремумів продуктивності в межах досліджуваного діапазону технологічних параметрів.

З урахуванням отриманих значень питомої швидкості знімання матеріалу за різних режимів роботи встановлено, що раціональний режим роботи при оптимальних параметрах віброзмішувача забезпечує зростання продуктивності у 2,75 раза в порівнянні з найменш ефективним режимом роботи. При цьому подальше збільшення значень параметрів не забезпечує додаткового підвищення питомої швидкості знімання, а призводить до зниження енергоефективності процесу.

Це підтверджує актуальність підвищення ефективності комбінованого процесу віброобробки шляхом визначення оптимальних значень параметрів віброзмішувача.

Отримані результати цього дослідження із застосування активних робочих органів у віброобладнанні можуть бути використані при модернізації існуючого устаткування та створюють умови для підвищення технологічної гнучкості процесів віброобробки, формують наукове підґрунтя для створення нових комбінованих віброустановок із керованими параметрами.

Список використаних джерел

1. Чубик Р. В., Ярошенко Л. В. (2011). Керовані вібраційні технологічні машини : монографія. Вінниця : ВНАУ, 355 с.

2. Buhrov, D. (2024). Analysis of research and modern modeling methods for vibratory abrasive processing of parts. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, (5), 78–82. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>.
3. Берник П. С., Ярошенко Л. В. (1998). Вібраційні технологічні машини з просторовими коливаннями робочих органів. Вінниця, 116 с.
4. Hashimoto, F., Johnson, S. P., & Chaudhari, R. G. (2016). Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 65(1), 325–328. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.011>.
5. Domblesky, J. P., Evans, C. J., & Evans, J. W. (2006). A process model for surface material removal in vibratory bowls. In *SUR/FIN Proceedings* (pp. 81–84). National Association for Surface Finishing.
6. Wan, S., Liu, Y., Woon, K. S., & Tnay, G. L. (2014). A material removal and surface roughness evolution model for loose abrasive polishing of free form surfaces. *International Journal of Abrasive Technology*, 6(4), 269. <https://doi.org/10.1504/ijat.2014.065828>.
7. Liu, W., Wang, S., Jiang, Q., Morgan, M., & Liu, X. (2022). Study on the motion characteristics of abrasive media in vibratory finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2198(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2198/1/012035>.
8. Zhyhylii, S., Kharchenko, M., & Katella, J. (2018). Mathematical model of the dynamic action of the controlled vibration exciter on the processed medium of mixer with toroidal working container. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 478. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14576>.
9. Жигилій, С. М., & Дяченко, К. С. (2012). Дослідження динаміки дебалансного вала керованого вібробудувача УВВ-03. *Збірник наукових праць [Полтавського національного технічного університету ім. Ю. Кондратюка]. Сер. : Галузеве машинобудування, будівництво*, (2), 186–193.
10. Коробко, Б. О., & Бугров, Д. Ю. (2024). Розробка конструкції установки для віброабразивної обробки поверхонь декоративних елементів з активним робочим органом. *Вібрації в техніці та технологіях*, 1(112), 78–82 <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-1-1>

References

1. Chubik R. V., Yaroshenko L. V. (2011). *Kerovani vibratsiyni tekhnolohichni mashyny. [Controlled vibrational technological machines]*. VNAU.
2. Buhrov D. (2024). Analiz doslidzhen ta suchasnykh metodiv modeliuvannia protsesiv vibroabrazivnoi obrobky detaliv. [Analysis of research and modern modeling methods for vibratory abrasive processing of parts]. *Visnyk KrNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, 5, 78–82. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>.
3. Bernyk, P. S., Yaroshenko, L. V. (1998). *Vibratsiyni tekhnolohichni mashyny z prostorovymy kolyvanniam y robochyykh orhaniv [Vibrational technological machines with spatial oscillations of working bodies]*.
4. Hashimoto, F., Johnson, S. P., Chaudhari, R. (2016). Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 65, 325–328. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.011>
5. Domblesky, J. P., Evans, C. J., & Evans, J. W. (2006). A process model for surface material removal in vibratory bowls. In *SUR/FIN Proceedings* (pp. 81–84). National Association for Surface Finishing.
6. Stephen W, Yuchan L, Keng Soon W, Guan Leong T (2014) A material removal and surface roughness evolution model for loose abrasive polishing of free form surfaces. *International Journal of Abrasive Technology*, 6(4), 269–285. <https://doi.org/10.1504/IJAT.2014.065828>.
7. Liu, W., Wang, S., Jiang, Q. et al. (2022). Study on the motion characteristics of abrasive media in vibratory finishing. *Journal of Physics: Conference Series*, 2198, 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2198/1/012035>.
8. Zhyhylii, S., Kharchenko, M., & Katella, J. (2018). Mathematical model of the dynamic action of the controlled vibration exciter on the processed medium of mixer with toroidal working container. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.2), 478–485. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14576>.

9. Zhygillii, S. M., & Dyachenko, K. S. (2012). Doslidzhennia dynamiky debalansnoho vala kerovanoho vibrozbudzhuvacha UVV-03. [Investigation of the dynamics of the unbalanced shaft of the controlled vibration exciter UVV-03.] *Zbirnyk naukovykh prats [Poltavskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu im. Yu. Kondratiuka]. Ser.: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo – Collection of Scientific Works. Series: Industry Engineering, Construction, Poltava National Technical University*, 2(32), 159-164.

10. Korobko B., Buhrov D. (2024). Rozrobka konstruktsii ustanovky dlia vibroabrazyvnoi obrobky poverkhon dekoratyvnykh elementiv z aktyvnym robochym orhanom [Development of a setup for vibratory abrasive treatment of surfaces of decorative elements with an active working tool]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh – Vibrations in engineering and technology*, 1(112), 5-10. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-1>.

Отримано 07.05.2025

UDC 621.9.048.6

Dmytro Buhrov¹, Bogdan Korobko²

¹PhD Student, Department of Branch Machinery and Mechatronics

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: bugrov.dmitriy@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4571-5147>

²Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Branch Machinery and Mechatronics

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» (Poltava, Ukraine)

E-mail: korobko@nupp.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9086-3904>, Scopus Author ID: 57190423064

INVESTIGATION OF COMBINED VIBRATORY-ABRASIVE TREATMENT IN VIBRATORY MIXING SYSTEM WITH AN ACTIVE WORKING ELEMENT

The article presents the results of the experimental study of the vibratory-abrasive processing of decorative elements carried out in the combined-action machine that simultaneously generates controllable vibrational and rotational effects on the medium within the working chamber. This processing approach enables optimization of interaction conditions between free abrasive media and processed parts by increasing contact interaction forces through the additional force generated by rotation of the active working element.

To perform the experimental investigation, a new design of the combined vibratory machine was specially developed and manufactured. The shape, material, and quantitative ratio of tumbling media and processed parts within the working medium were selected and optimized. The main variable factors of the process were identified as the amplitude of vibration, the rotational speed of the working chamber, and the mass of the media loaded into the chamber.

To study the impact of these factors on the efficiency of the processing, the second-order three-factor experiment was designed and conducted, with systematic variation in the levels of each factor according to the experimental plan. The specific material removal rate from the surface of the parts was adopted as the quantitative efficiency criterion.

The experimental data were processed using statistical methods, and a regression model was constructed to define functional dependence of the specific material removal rate on the key process parameters. This enables predictive evaluation of process performance. Available optimal operating modes of the machine has been confirmed, which ensure the highest process efficiency with optimal energy consumption.

The experimental methodology presented in this article can be applied to optimize technological regimes of newly developed or modernized vibratory equipment designs with active working elements, aimed at creating energy-efficient solutions in the field of vibratory-abrasive surface treatment.

Keywords: vibro-abrasive treatment; rotary chamber; active working element; effective interaction coefficient; energy efficiency.

Fig.: 7. Table: 3 References: 10.