

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

УДК 621.9.048.6

БУГРОВ ДМИТРО ЮРІЙОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

**ОБґРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ З АКТИВНИМ
РОБОЧИМ ОРГАНОМ ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ
ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ**

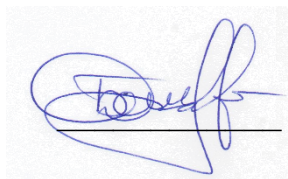
Спеціальність 133 — «Галузеве машинобудування»

Галузь знань 13 — «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.



Дмитро БУГРОВ

Науковий керівник –

Коробко Богдан Олегович,

доктор технічних наук, професор

АНОТАЦІЯ

Бугров Д. Ю. Обґрунтування параметрів обладнання з активним робочим органом для комбінованої віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Полтава, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальній науково-технічній задачі підвищення енергоефективності віброабразивної обробки, яка є одним із найбільш ефективних методів фінішної обробки поверхонь деталей складної форми, але має високу енергоємність внаслідок значних непродуктивних втрат енергії. Для розв'язання цієї задачі проведено теоретичні та експериментальні дослідження комбінованого способу віброобробки на спеціально розробленій дослідній установці з активним робочим органом, новизна якої підтверджена патентом України на корисну модель. Встановлено закономірності та ступінь впливу основних параметрів установки на продуктивність процесу. Розроблено методику визначення енергоефективності та встановлено закономірності її зміни залежно від параметрів обладнання. Отримані експериментальні результати засвідчили, що активний робочий орган створює додатковий фактор впливу, який при незначному збільшенні загальних енергетичних витрат суттєво підвищує продуктивність та енергоефективність процесу. Обґрунтовано використання показника енергоефективності як критерію визначення раціональних параметрів обладнання.

У першому розділі проведено аналіз наукових досліджень віброабразивної обробки та встановлено актуальні питання, які потребують вирішення, зокрема зменшення енергоємності процесу за рахунок зменшення непродуктивних втрат шляхом визначення раціональних параметрів обладнання. Проведено аналіз існуючих конструкцій віброобладнання та способів підвищення продуктивності та якості процесу та обґрунтований комбінований спосіб обробки поверхонь

деталей складних форм, який забезпечується активним робочим органом – віброуючою обертовою камерою.

У другому розділі обґрунтована конструктивна схема нової віброустановки з активним робочим органом та виконано її математичне моделювання з метою встановлено закономірності руху обертової робочої камери від основних параметрів обладнання. У результаті моделювання контактної взаємодії абразивних тіл з поверхнею деталей встановлено вплив амплітуди і частоти віброколивань, швидкості обертання робочої камери та маси компонентів робочого середовища на величини нормальної і тангенціальної контактних сил та кут ударної взаємодії. Розроблено класифікатор деталей для раціональної організації процесу та узагальнення базових закономірностей комбінованої віброобробки. Обґрунтовано, що раціональні параметри повинні забезпечувати інтенсифікацію руху компонентів і збільшення кількості контактних ударів з енергією, достатньою для знімання матеріалу, за мінімальних енерговитрат.

У третьому розділі обґрунтовано методику проведення експериментальних досліджень з метою встановлення закономірностей впливу параметрів дослідної віброустановки на продуктивність та енергоефективність процесу. Аналізом отриманих даних експерименту при варіюванні амплітуди віброколивнь, частоти обертання робочої камери, маси робочого середовища встановлено, що активний робочий орган зумовлює інтенсифікацію процесу віброабразивної обробки з підвищенням його енергоефективності. Встановлено, що залежність питомої швидкості знімання матеріалу від параметрів процесу має нелінійний характер та екстремум, при якому її значення у 2,75 раза перевищує мінімальне. Досліджено закономірності енергоспоживання установки, при цьому встановлено, що 88 % споживаної енергії припадає на вібропривод. Побудована залежність енергоефективності демонструє її зростання до максимального значення, що у 1,6 раза перевищує мінімальне, після чого спостерігається зниження показника внаслідок різкого зростання дисипативних втрат та зменшення сил контактної взаємодії компонентів робочого середовища.

У четвертому розділі наведено результати виробничих випробувань дослідної віброустановки при обробці лопаті робочого колеса насоса на підприємстві ТОВ «УКРНАСОСПРОМ». За результатами випробувань встановлено зниження тривалості обробки на 10 % та витрат електроенергії на 15 % порівняно з діючим обладнанням, що підтверджує ефективність запропонованого технічного рішення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

Вперше:

– обґрунтовано використання комбінованого способу віброабразивної обробки поверхонь деталей складних форм для підвищення енергоефективності технологічного процесу;

– встановлено закономірності впливу амплітуди віброколивачів, частоти обертання активного робочого органу, маси компонентів середовища на продуктивність комбінованої віброобробки;

– запропоновано визначення енергоефективності комбінованого віброобладнання кількісним показником та наведена методика його визначення, що враховує продуктивність та енерговитрати. Встановлені закономірності енергоефективності від амплітуди віброколивачів та частоти обертання активного робочого органу;

– обґрунтовано застосування показника енергоефективності як критерію визначення раціональних параметрів обладнання для комбінованої віброабразивної обробки.

Вдосконалено:

– методику моделювання контактної взаємодії абразивних тіл та оброблюваних деталей в умовах сумісної дії вібраційного впливу та обертального рухів під час комбінованої віброобробки.

Практичне значення одержаних результатів полягає у:

– створенні нового технічного рішення установки з активним робочим органом для реалізації комбінованого способу вібраційної обробки поверхонь

деталей складної форми. Технічна новизна запропонованої конструкції установки підтверджена патентом України на корисну модель;

– виготовленні установки для проведення наукових досліджень обладнання та процесів віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми у навчальній лабораторії кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

– одержали подальший розвиток науково-технічні положення з конструювання віброабразивних машин комбінованої дії, що можуть бути використані при проектуванні нового та модернізації існуючого обладнання.

Ключові слова: віброабразивна обробка, вібраційна машина, роторна камера, активний робочий орган, віброзбуджувач, амплітуда коливань, дебаланс, математична модель, експериментальна установка, оптимізація параметрів, енергоефективність.

ABSTRACT

Buhrov D. Yu. Substantiation of parameters of equipment with an active processing element for combined vibratory finishing of complex-shaped parts. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 133 – Branch Mechanical Engineering. National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic". Poltava, 2026.

The dissertation is devoted to solving the relevant scientific and technical problem of improving the energy efficiency of vibratory abrasive finishing, which is one of the most effective methods for finishing surfaces of complex-shaped parts but is characterized by high energy consumption due to significant non-productive energy losses. To solve this problem, theoretical and experimental studies of a combined vibratory finishing process were carried out using a specially developed experimental installation with an active working body, the novelty of which is confirmed by a Ukrainian utility model patent. The regularities and degree of influence of the

installation parameters on process productivity were determined. A methodology for evaluating energy efficiency was developed, and the regularities of its variation depending on equipment parameters were established. The obtained experimental results demonstrated that the active working body creates an additional influencing factor which, with a slight increase in total energy consumption, significantly improves the productivity and energy efficiency of the process. The use of the energy efficiency index as a criterion for determining rational equipment parameters was substantiated.

The first chapter presents an analysis of scientific research on vibratory abrasive finishing and identifies the relevant issues requiring further investigation, in particular the reduction of process energy consumption through minimizing non-productive energy losses by determining rational equipment parameters. An analysis of existing vibratory equipment designs and methods for improving process productivity and quality was carried out, and a combined method for finishing surfaces of complex-shaped parts was substantiated. This method is implemented by means of an active working body — a vibrating rotating chamber.

The second chapter substantiates the structural design of a new vibratory machine with an active working body and presents its mathematical modeling aimed at establishing the motion regularities of the rotating working chamber depending on the main equipment parameters. As a result of modeling the contact interaction between abrasive media and the part surfaces, the influence of vibration amplitude and frequency, rotational speed of the working chamber, and mass of the working media components on the values of normal and tangential contact forces, as well as the impact interaction angle, was determined. A classification system for parts was developed for the rational organization of the process and generalization of the fundamental regularities of the combined vibratory finishing process. It was substantiated that rational parameters should ensure intensification of component motion and an increase in the number of contact impacts with sufficient energy for material removal while maintaining minimal energy consumption.

The third chapter substantiates the methodology for conducting experimental studies aimed at determining the regularities of the influence of the experimental

vibratory machine parameters on process productivity and energy efficiency. Analysis of the obtained results under variation of the installation parameters showed that the use of a rotating working chamber significantly increases the productivity and energy efficiency of the process. It was established that the dependence of the specific material removal rate on the process parameters is nonlinear and exhibits an extremum at which its value exceeds the minimum by 2,75 times. The regularities of the installation energy consumption were investigated, and it was determined that 88% of the consumed energy is associated with the vibration drive. The obtained energy efficiency relationship demonstrates its increase up to a maximum value exceeding the minimum by 1,6 times, followed by a decrease in the indicator due to a sharp increase in dissipative losses and a reduction in the contact interaction forces between the components of the working media.

The fourth chapter describes industrial trials of the experimental vibratory installation for processing a pump impeller blade at UKRNASOSPROM LLC. The results demonstrate a reduction in processing time by 10% and electrical energy consumption by 15% compared to the existing equipment. Recommendations for determining the main design and technological parameters of the combined vibratory installation for industrial application have been developed.

The scientific novelty of the obtained results is as follows:

For the first time:

- an increase in the energy efficiency of abrasive finishing of complex-shaped part surfaces has been proposed through the application of a combined vibratory finishing method with substantiation of the rational parameters of equipment incorporating an active working body;;
- the regularities of the influence of vibration amplitude, rotational speed of the working chamber, and mass of the working media components on the productivity of the combined vibratory finishing process were established;
- a quantitative indicator for evaluating the energy efficiency of combined vibratory equipment was proposed, and a methodology for its determination, taking into account process productivity and energy consumption, was developed. The

regularities of the dependence of energy efficiency on vibration amplitude and rotational speed of the working chamber were established;

- the application of the energy efficiency indicator as a criterion for determining the rational parameters of equipment for combined vibratory abrasive finishing was substantiated.

Improved:

- a methodology for modeling the contact interaction between abrasive media and machined parts under the combined action of vibrational excitation and rotational motion during combined vibratory finishing.

The practical significance of the obtained results lies in:

- the development of a new technical solution for a machine with an active working body intended for implementing a combined method of vibratory finishing of complex-shaped part surfaces. The technical novelty of the proposed machine design is confirmed by a Ukrainian utility model patent;;

- the manufacture of an experimental installation for scientific research on equipment and processes of vibratory abrasive finishing of complex-shaped part surfaces in the educational laboratory of the Department of Industrial Engineering and Mechatronics at Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic National University;

- further development of scientific and technical principles for the design of combined-action vibratory abrasive machines, which may be applied in the development of new equipment and modernization of existing machines.

Keywords: vibro-abrasive machining, vibration machine, rotary chamber, active working element, vibration exciter, vibration amplitude, unbalance, mathematical model, experimental setup, parameter optimization, energy efficiency.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ

Статті у наукових фахових виданнях України категорії «Б»:

1. Buhrov D., Buhrova T. Calculation of optimal parameters for a vibratory finishing machine for decorative elements with an active working tool. Academic

Journal Industrial Machine Building Civil Engineering. 2023. Vol. 2(61). P. 52 – 59.
<https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3853>.

2. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Розробка конструкції установки для віброабразивної обробки поверхонь декоративних елементів з активним робочим органом. Вібрації в техніці та технологіях. 2024. Вип. 1(112). С. 78 – 82.
<https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-1>.

3. Бугров Д. Ю. Аналіз досліджень та сучасних методів моделювання процесів віброабразивної обробки деталей. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2024. Вип. 5(148). С. 78 – 82.
<https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>.

4. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Параметри віброабразивного процесу та їхній вплив на ефективність обробки в віброустановках із активним робочим органом. Техніка будівництва. 2025. № 42. С. 61 – 69.
<https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0507>.

5. Бугров Д.Ю., Коробко Б.О. Дослідження процесу комбінованої віброабразивної обробки у віброзмішувачі з активним робочим органом. Технічні науки та технології. 2025. № 2(40). С. 116 – 127.
[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-116-127](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-116-127).

6. Бугров Д. Ю. Математичне моделювання процесу віброабразивної обробки з використанням DEM у системах з активним робочим органом. Modern Engineering and Innovative Technologies. 2024. Iss. 36, Pt. 2. P. 11 – 18.
<https://doi.org/10.30890/2567-5273.2024-36-00-051>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Розробка конструкції установки для віброабразивної обробки поверхонь декоративних елементів з активним робочим органом. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки: матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (25 квітня 2024 р., Полтава). Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2024. С. 28 – 30.

8. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Моделювання процесу комбінованої віброабразивної обробки методом дискретних елементів. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки: матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (24 квітня 2025 р., Полтава). Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. С. 19 – 22.

9. Бугров Д. Ю., Коробко Б. О., Бугрова Т. М. Експериментальне дослідження енергоефективності комбінованого віброабразивного процесу. Енергоощадні машини і технології: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції (20 – 21 травня 2025 р., Київ). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2025. С. 66 – 69.

10. Бугров Д. Ю., Коробко Б. О. Експериментальне дослідження віброабразивної обробки на комбінованій дослідній установці. Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. С. 252 – 253.

11. Коробко Б.О. Особливості режимів роботи обладнання для комбінованої віброабразивної обробки з активним робочим органом / Б.О. Коробко, Т.М. Бугрова, Д.Ю. Бугров // Підвищення ефективності експлуатації, обслуговування і сервісу технологічних машин та обладнання – 2026 : зб. наук. пр. Всеукр. наук. конф., 29 січ. 2026 р. – Х. : ХНАДУ, 2026. – С. 64 – 67.

12. Пристрій для вібраційної обробки деталей у середовищі вільних абразивів : пат. на корисну модель № 161214, Україна: МПК В24В 31/02, В24В 31/06 (2025.01)/ Бугров Д. Ю., Коробко Б. О., Бугрова Т. М.; № u202500686; опубл. 19.11.2025, Бюл. № 47.

ЗМІСТ

ВСТУП	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ	20
1.1 Аналіз особливостей механізму дії та закономірностей процесу віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми.....	20
1.2 Аналіз сучасного стану наукових досліджень віброабразивної обробки деталей складної форми.....	27
1.3 Аналіз конструктивних особливостей віброобладнання	33
1.5 Аналіз методів визначення оптимальних параметрів та умов підвищення ефективності роботи обладнання	42
1.6 Висновки по розділу та постановка задач дослідження.....	46
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ	48
2.1 Обґрунтування конструктивної схеми віброустановки з активним робочим органом.....	48
2.2 Визначення динамічного впливу керованого вібробуджувача.....	53
2.3 Визначення кінетичної енергії обертової робочої камери.....	56
2.4 Визначення узагальнених сил обертової робочої камери.....	58
2.5 Складання диференціальних рівнянь руху обертової робочої камери.....	66
2.6 Моделювання контактної взаємодії компонентів середовища робочої камери комбінованої віброустановки	68
2.7 Розробка класифікатора деталей для віброабразивної обробки.....	78

2.8 Обґрунтування умов раціонального режиму роботи обладнання для комбінованої віброобробки	81
2.9 Висновки по розділу 2	85
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОУСТАНОВКИ З АКТИВНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ	87
3.1 Мета та завдання експериментальних досліджень	87
3.2 Обґрунтування технічного рішення дослідної віброустановки з активним робочим органом	87
3.3 Обґрунтування компонентів робочого середовища, методів та засобів вимірювання для проведення експерименту	94
3.4 Обґрунтування методики планування експерименту дослідження продуктивності віброустановки з активним робочим органом.....	101
3.5 Обґрунтування методу дослідження енергоефективності експериментальної віброустановки.....	110
3.6 Дослідження впливу параметрів віброустановки з активним робочим органом на продуктивність комбінованої віброобробки	112
3.7 Дослідження енергоефективності віброустановки з активним робочим органом для комбінованої віброобробки	117
3.8 Висновки по розділу 3	122
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ	124
4.1 Виробничі випробування дослідної комбінованої віброустановки.....	124

4.2 Техніко-технологічне обґрунтування параметрів обладнання комбінованого віброабразивного процесу	132
4.3 Рекомендації щодо інженерного розрахунку параметрів комбінованої віброустановки.....	136
4.4 Висновки по розділу 4	139
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	140
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	142
ДОДАТКИ.....	157

ВСТУП

Актуальність теми. У сучасному виробництві високі вимоги до якості поверхонь деталей набувають особливої актуальності в широкому спектрі галузей – від машинобудування до ювелірної промисловості. Це зумовлено тим, що якість поверхні визначає не лише естетичні властивості виробу, а й його функціональні характеристики, зокрема довговічність, надійність та технологічну готовність до подальших операцій (складання, нанесення покриття тощо).

Відомо, що ділянки деталей з гострими краями, гратом, задирками які залишаються після первинної механічної обробки такої як штампування, лазерне різання або інших способів, можуть бути причиною виробничого травматизму та є концентраторами напружень, що негативно впливає на міцнісні характеристики деталей, що працюють в умовах змінних або ударних навантажень. Напруження у таких ділянках можуть багаторазово перевищувати допустимі, що може призвести до виникнення мікротріщин, а це в свою чергу, зменшує довговічність та надійність виробів.

З огляду на вищезазначене, технологічні операції по фінішній обробці, а саме – очищення, заокруглення гострих країв, видалення задирок та грату, полірування тощо, набувають вагомого значення для забезпечення довговічності та безпечної експлуатації деталей різного призначення.

З ускладненням геометрії деталей їх обробка на верстатах із жорсткими кінематичними в'язями у ряді випадків стає неможливою, тоді як використання об'ємної обробки у середовищі вільного абразиву дозволяє досягти високої продуктивності та якості процесу.

Саме тому віброабразивна обробка набула широкого застосування в промисловості завдяки своїй ефективності, універсальності та здатності до масової обробки деталей. Основною перевагою є можливість одночасної обробки великої кількості виробів з різною геометрією та складністю форм поверхні, що дозволяє зменшити кількість додаткових технологічних операцій

та загальну тривалість обробки. У результаті цього вдосконалюється виробничий процес, підвищується енергоефективність, знижується кінцева собівартість продукції.

На даний час розроблено значну кількість різноманітних конструкцій віброобладнання різного призначення та накопичено досвід їх виробничого впровадження. Водночас енергоефективність віброабразивної обробки є нижчою порівняно з іншими методами абразивної обробки, що зумовлено значними втратами енергії внаслідок дисипативних процесів, зокрема взаємного тертя та зношування абразивних частинок. З урахуванням сучасних тенденцій розвитку енергоощадного виробництва постає актуальна задача підвищення енергоефективності обладнання при забезпеченні високих показників продуктивності та якості обробки.

Разом із тим, визначення раціональних параметрів обладнання є складною науково-технічною задачею, що зумовлено складним характером взаємодії абразивних тіл з оброблюваними деталями та потребує проведення комплексних досліджень для встановлення закономірностей процесу.

Таким чином удосконалення обладнання та технології віброабразивної обробки з метою підвищення якості та енергоефективності процесу шляхом розробки та впровадження нових конструктивно-технологічних рішень у виробництво є актуальною та необхідною науковою задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота відповідає тематиці наукових досліджень кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки та виконувалася у відповідності до напрямків і завдань науково-технічних програм Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» у складі держбюджетної науково-дослідницької теми: «Створення ефективного малогабаритного обладнання для комплексної механізації робіт в умовах будівельного майданчика» (номери державної реєстрації 0115U001078) затвердженої Міністерством освіти і науки України.

Мета роботи – підвищення продуктивності та енергоефективності фінішної обробки поверхонь деталей складної форми шляхом застосування комбінованого способу віброабразивної обробки на обладнанні з активним робочим органом та обґрунтування раціональних режимів його роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- проаналізувати та оцінити ефективність технологій віброабразивної обробки та існуючих конструкцій віброобладнання, їх особливості, переваги та недоліки. Обґрунтувати ключові параметри віброабразивного процесу дослідженням ефективності віброобладнання методом оцінки зміни маси оброблюваних деталей;
- обґрунтувати конструктивну схему нової установки з активним робочим органом, що реалізує комбінований спосіб віброабразивної обробки;
- виготовити дослідну віброустановку та провести експериментальні дослідження для підтвердження теоретичних припущень щодо ефективності запропонованого рішення;
- на основі отриманих результатів дослідження розробити узагальнені рекомендації по визначенню оптимальних параметрів обладнання для забезпечення раціонального режиму віброабразивної обробки.

Методи дослідження. У даній науковій роботі використано загальні положення теорії пружності та пластичності, закони Ньютона. Диференціальні рівняння динаміки руху робочого органу отримано з використанням рівняння Лагранжа II-го роду. Експериментальні дослідження віброабразивної установки проводилися в умовах науково-дослідної лабораторії кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» із застосуванням математико-статистичного методу планування експериментів, натурних спостережень і методів електронного вимірювання. Обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснювалася з використанням методики кореляційно-регресійного аналізу.

Отримані результати досліджень опрацьовувались на ПК за допомогою програмного забезпечення: SolidWorks, Microsoft Excel.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

Вперше:

- обґрунтовано використання комбінованого способу віброабразивної обробки поверхонь деталей складних форм для підвищення енергоефективності технологічного процесу;
- встановлено закономірності впливу амплітуди віброколивань, частоти обертання активного робочого органу, маси компонентів середовища на продуктивність комбінованої віброобробки;
- запропоновано визначення енергоефективності комбінованого віброобладнання кількісним показником та наведена методика його визначення, що враховує продуктивність та енерговитрати. Встановлені закономірності енергоефективності від амплітуди віброколивань та частоти обертання активного робочого органу;
- обґрунтовано застосування показника енергоефективності як критерію визначення раціональних параметрів обладнання для комбінованої віброабразивної обробки.

Вдосконалено:

- методику моделювання контактної взаємодії абразивних тіл та оброблюваних деталей в умовах сумісної дії вібраційного впливу та обертального рухів під час комбінованої віброобробки;

Об'єктом досліджень є технологічний процес віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми комбінованим способом.

Предметом дослідження є закономірності впливу режимів роботи обладнання для комбінованої віброабразивної обробки деталей складної форми на показники продуктивності та енергоефективності технологічного процесу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у:

- створенні нового технічного рішення установки з активним робочим органом для реалізації комбінованого способу вібраційної обробки поверхонь

деталей складної форми. Технічна новизна запропонованої конструкції установки підтверджена патентом України на корисну модель;

– виготовленні установки для проведення наукових досліджень обладнання та процесів віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми у навчальній лабораторії кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»;

– одержали подальший розвиток науково-технічні положення з конструювання віброабразивних машин комбінованої дії, що можуть бути використані при проектуванні нового та модернізації існуючого обладнання.

Особистий внесок здобувача. Основні положення наукових досліджень виконано здобувачем самостійно, постановку завдань, аналіз і трактування отриманих результатів проведено спільно з науковим керівником. Результати проведених науково-дослідних робіт дисертації опубліковано здобувачем в 6 статтях фахових видань та патенті України на корисну модель. Особистий внесок здобувача полягає в: [24, 52, 55] – проведенні аналізу існуючого віброабразивного обладнання та встановленню шляхів підвищення продуктивності процесу; [98, 104] – обґрунтуванні та теоретичному дослідженні комбінованого процесу віброобробки деталей складної форми; [125] – плануванні та проведенні трифакторного експерименту, виконанні обробки та аналізу отриманих даних; побудові рівняння регресії, визначенні функціональної залежності продуктивності та енергоефективності від зміни параметрів процесу.

Апробація результатів наукових досліджень. Основні положення досліджень висвітлювались і обговорювались на науково-технічних конференціях: VII Всеукраїнська науково-технічна конференція (25 квітня 2024 р., м. Полтава); VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція (24 квітня 2025 р., м. Полтава), VI Міжнародна науково-практична конференції (20 – 21 травня 2025 р., м. Київ); II Міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики» (7 листопада 2025 р., м. Полтава); Всеукраїнська наукова конференція

здобувачів вищої освіти, молодих вчених, наукових керівників, а також стейкхолдерів, фахівців галузі; «Підвищення ефективності експлуатації, обслуговування і сервісу технологічних машин та обладнання – 2026» (29 січня 2026 р., м. Харків)

Публікації. Основні положення та результати проведених досліджень за темою дисертації опубліковано у 12 наукових працях, у тому числі: 5 статей у наукових фахових виданнях України категорії «Б»; 1 у періодичних наукових іноземних виданнях; 5 тез наукових доповідей в збірниках матеріалів всеукраїнських та міжнародних конференцій; 1 патент на корисну модель в «Український інститут інтелектуальної власності» (Укрпатент).

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 134 найменувань та додатків; викладена на 173 сторінках: основного тексту 128 сторінок, рисунків – 54, таблиць – 14.

Дисертант щиро вдячний своєму науковому керівнику, д.т.н., професору Б.О. Коробку за корисні поради в ході роботи над дисертацією.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

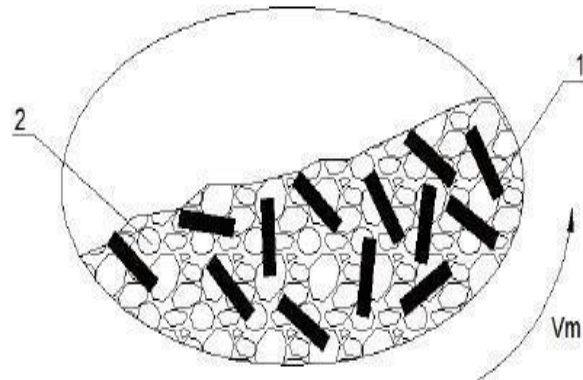
1.1 Аналіз особливостей механізму дії та закономірностей процесу віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми

Враховуючи сучасні вимоги до високої якості поверхонь виробів різного функціонального призначення в усіх галузях господарства, зростає важливість операцій фінішної обробки, таких як очищення, видалення задирків та грату, заокруглення гострих країв, полірування та формування розвинутої поверхні заданої шорсткості з метою збільшення адгезії до нанесених різноманітних покриттів. Особливо складною та трудомісткою є обробка поверхонь деталей зі складною геометрією, що може включати внутрішні важкодоступні порожнини та отвори. У таких випадках перевагу мають способи обробки в середовищі вільних абразивів – віброабразивний, галтовочний, відцентрово-абразивний, струминно-абразивний тощо. Зазначені способи не мають вимог до взаємного розташування інструменту відносно поверхні оброблюваної деталі, при цьому забезпечують рівномірну обробку всієї поверхні виробу при можливості одночасної обробки великої кількості деталей різноманітних форм та розмірів, що значно підвищує продуктивність процесу зі зменшенням енерговитрат.

Серед зазначених способів фінішної обробки саме віброабразивний посідає провідне місце у машинобудуванні та зарекомендував себе як високоефективний та універсальний.

Протягом останнього часу науковими дослідженнями віброабразивної обробки займались такі провідні вітчизняні та зарубіжні вчені: П.С. Берник [1, 5, 9, 11], Л.І. Сердюк [2, 4], І.П. Паламарчук [3, 6], Б.М. Гевко [7,10], О.В. Цуркан [8, 12], О.М. Кондратюк [16, 14], Л.В. Ярошенко [15], Р.В. Чубик [17, 18], К. Hashemnia [20], Y. Tian [21], A. Sofronas [22], W. Stephen [23]. Результати їхньої праці сформували фундамент цієї галузі науки та є підґрунтям для подальшого дослідження та нових розробок.

Спосіб віброабразивної обробки базується на взаємодії деталей з вільними абразивними тілами (рис. 1.1). Під дією віброзбурюючої сили відбувається їх взаємне перемішування та переміщення, що забезпечує знімання шару матеріалу, очищення, пластичну деформацію та поверхневе зміщення (наклеп) [24].



1 – оброблювані деталі, 2 – абразивні тіла

Рисунок 1.1 – Принцип дії абразивної обробки

У віброустановці з робочою камерою кільцевої форми (тороподібною) рух частинок робочого середовища має циркуляційний характер і може бути розкладений на два простіших види – транспортувальний та перемішувальний (рис.1.2). При транспортувальному русі частинки рухаються у площині камери за або проти годинникової стрілки, при цьому їх траєкторії орієнтовані вздовж кільцевої осі тора. Перемішувальний рух підіймає частинки уздовж зовнішньої стінки камери з подальшим їх опусканням донизу, а їх траєкторії спрямовані перпендикулярно до кільцевої осі тора та траєкторії транспортувального руху.

Варто зазначити про технологічну універсальність віброабразивної обробки, що полягає у можливості поєднання декількох процесів в одному технологічному циклі. Зокрема, паралельно можуть здійснюватися такі процеси як нагрівання, сушка або охолодження виробів. Це розширює функціональні можливості обладнання, підвищує ефективність виробничих процесів та сприяє зменшенню кількості окремих технологічних операцій.

При зіткненні абразиву з поверхнею оброблюваної деталі характер взаємодії залежить від геометрії зерна, його орієнтації відносно поверхні, сили удару.

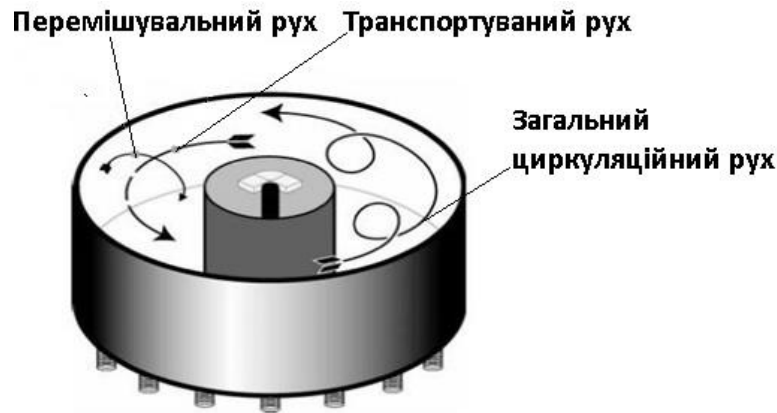


Рисунок 1.2 – Схема руху частинок у камері кільцевої форми віброустановки

Мають місце такі види взаємодій, що можуть відбуватися одночасно:

- абразивні тіла поступово зрізають дрібні матеріал з поверхні оброблюваного виробу. При цьому кожна абразивна частинка виконує функцію мікроінструменту – різця.

- пластична деформація (вібраційний наклеп), створює поверхневе напруженням матеріалу, зі зміною форми та розміру мікрорельєфу. Цей ефект може бути використаний для зміцнювальних операцій, так званого вібронакатування (вібровиглажування) для збільшення довговічності обробленої деталі.

- пружна деформація, коли абразивні частинки відбиваються від поверхні деталі, з перерозподілом їх кінетичної енергії та швидкостей. При цьому стан поверхні деталей суттєво не змінюється.

Упродовж усього циклу обробки окреме абразивне зерно може декілька разів змінювати вид взаємодії.

Також для віброабразивної обробки характерні такі недоліки:

- значна тривалість обробки деталей з матеріалів високої твердості зі складною формою поверхні;

- різна якість обробки поверхонь в межах однієї деталі;
- необхідність застосування додаткових технічних засобів та заходів для запобігання взаємного зіткнення та злипання крихких деталей, особливо низької міцності, для уникнення їх взаємопошкодження;
- необхідність додаткових засобів захисту виробничого персоналу від негативного впливу віброколивань, в тому числі від шумового забруднення;
- необхідність використання додаткових технічних рішень для забезпечення надійної та безперебійної роботи механізмів обладнання під дією навантажень вібраційного характеру.

Ключовими параметрами процесу віброабразивної обробки є обладнання, робоче середовище (абразивні тіла та оброблювані деталі, компаунд), режим роботи (рис. 1.4). Ефективність певного технологічного процесу головним чином залежить від раціонального визначення кожного з цих параметрів. У зв'язку з цим необхідною умовою є визначення функціонального впливу кожного ключового параметра, що бере участь у процесі.

Енергетична ефективність віброабразивної обробки є одним із найсуттєвіших чинників, що визначають її економічну доцільність використання. Попри відносну простоту реалізації віброобробка характеризується високою питомою енергією знімання на одиницю обробленої поверхні деталі у порівнянні з іншими способами обробки шляхом зняття стружки [28].

На відміну від процесів обробки інструментами з жорстким кінематичним зв'язком, зокрема шліфувальним кругом, у якому абразивні зерна закріплені зв'язкою, у віброабразивній обробці абразивні тіла перебувають у вільному стані та здійснюють хаотично-циркуляційний рух. Унаслідок цього взаємодія абразивних зерен з деталями носить ймовірно-статистичний характер, що зумовлює знімання надзвичайно малих об'ємів матеріалу під час кожного окремого контакту.

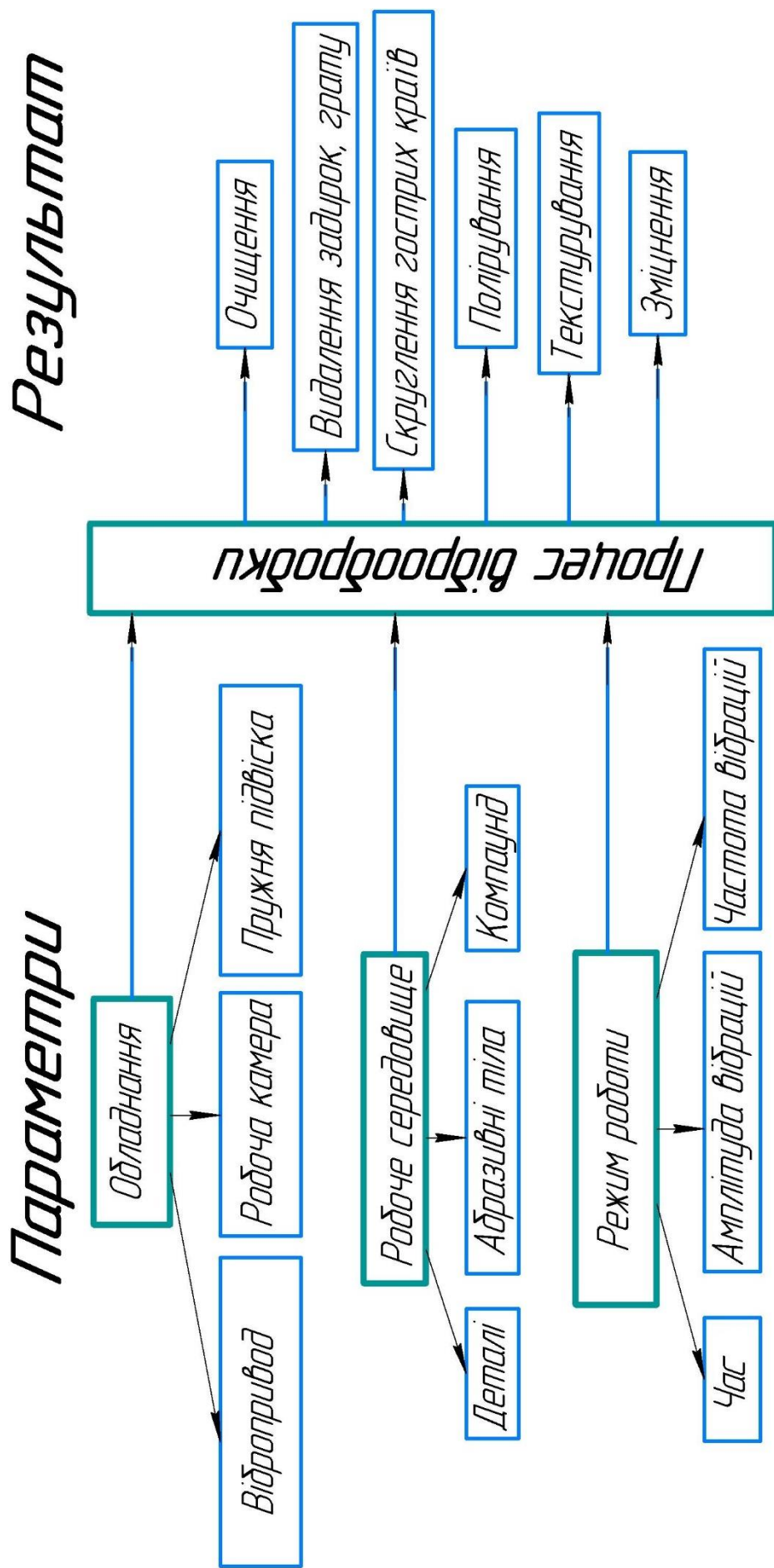


Рисунок 1.4 – Ключові параметри вирободки та результати процесу

Тому лише частка від загальної кількості енергії джерела віброзбурюючої сили йде на корисну роботу – знімання матеріалу з поверхні деталей з утворенням стружки.

Детальним вивченням та науковими дослідженнями цих процесів у [27, 28, 29] встановлено наступні закономірності:

- абразивні частинки контактують не лише з поверхнею оброблюваної деталі, але й взаємодіють одна з одною. Це призводить до значних дисипативних втрат, коли значна кількість енергії витрачається на взаємне тертя та їх нагрівання замість знімання матеріалу. Відбувається руйнування самих абразивних частинок що зменшує їх різальну здатність;

- при класичній віброобробці частинки абразиву в переважній більшості рухаються хаотичними траєкторіями, при цьому велика частка ударів мають недостатньою енергією для знімання матеріалу деталі із-за малих швидкостей відносного руху та сил контактної взаємодії.

Зважаючи на складний характер контактної взаємодії значної кількості абразивних частинок із поверхнею деталі, безпосереднє визначення геометричних параметрів стружки, що формується в процесі мікрорізання, є практично неможливим. У зв'язку з цим у праці [28] для процесу віброабразивної обробки введено узагальнений параметр – еквівалентна товщина стружки h_{eq} (мкм), який відображає середню ефективну товщину шару матеріалу, що видаляється вільним абразивом, та є еквівалентним товщині шару, який був би зрізаний за умови безперервного контакту абразивних зерен із поверхнею деталі що відповідає умовам процесу різання інструментом зі жорстким кінематичним зв'язком.

Експериментально отримані залежності питомої енергії від еквівалентної товщини стружки у різних дослідях [28, 30] показують, що зі зростанням останньої питомі енерговитрати зменшуються завдяки зростанню частки власне різання порівняно з деформаціями та загальними дисипативними втратами.

На рис. 1.5 наведено графік залежності питомої енергії від товщини еквівалентної стружки при обробці деталі з загартованої сталі твердістю 58 – 64

(HRC). Як бачимо значення питомої енергії віброабразивної обробки значно вищі при меншій величині стружки. Це зумовлено високою часткою пластичної деформації і ковзанням абразивних тіл по поверхні деталі коли товщина еквівалентної стружки зменшується. У той же час менший розмір стружки формує поверхню з меншою шорсткістю.

Питома енергія для різних способів механічної обробки зі зняттям стружки наведена на рис. 1.6. Зазначимо, що менша товщина стружки необхідна для досягнення більш гладкої поверхні. При цьому зі зменшенням товщини стружки спостерігається стрімке зростання питомої енергії різання, що свідчить про зниження енергоефективності процесу.

Це зумовлено тим, що переважаючими механізмами взаємодії стають пружна та пластична деформація поверхні без видалення матеріалу зі зняттям стружки.

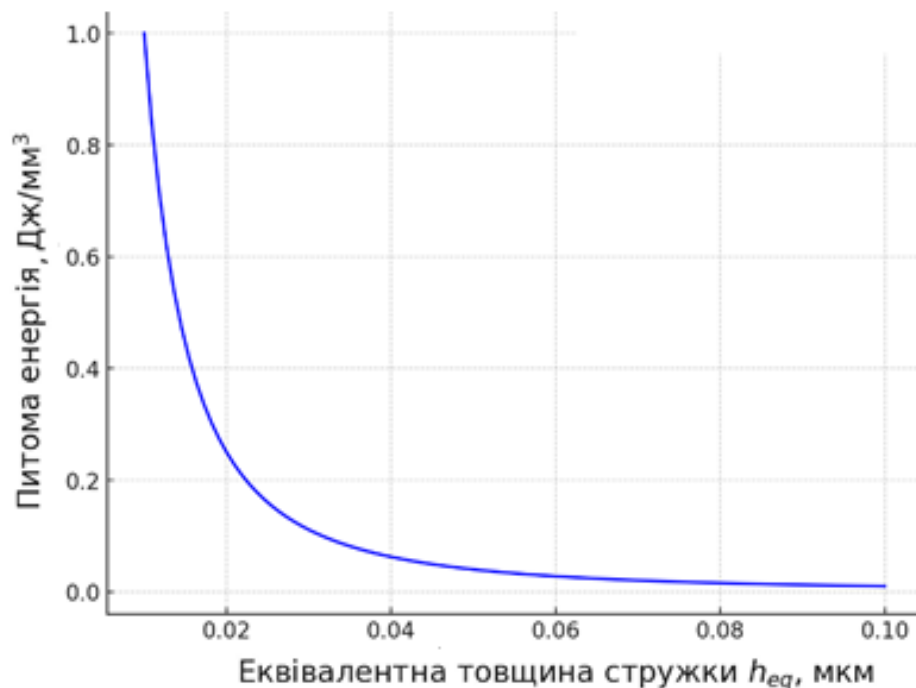
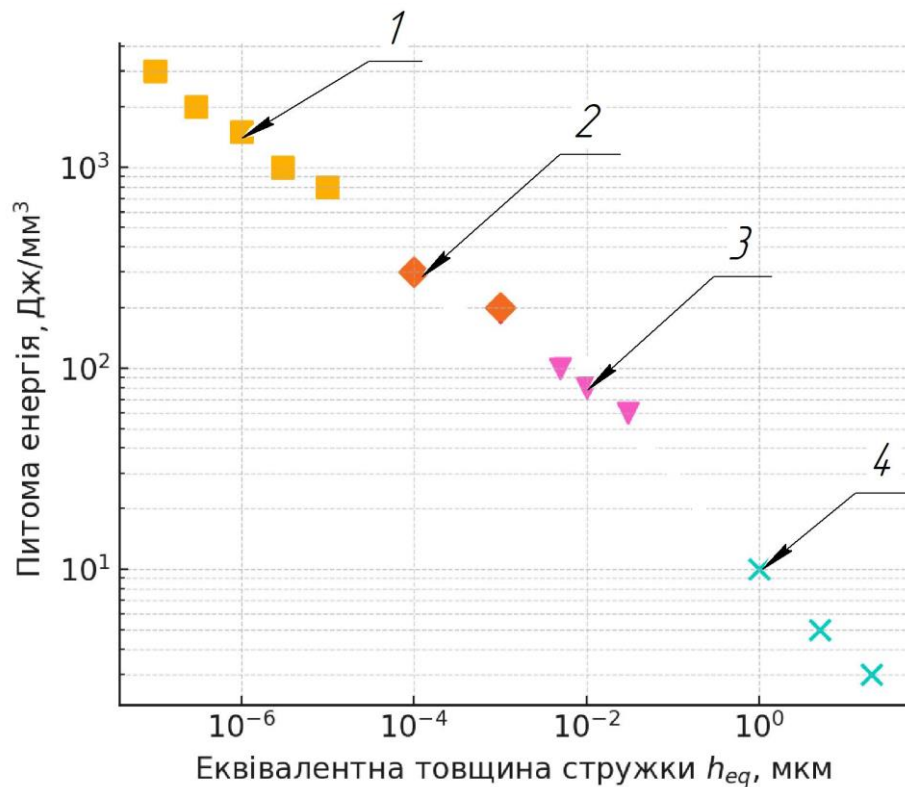


Рисунок 1.5 – Питома енергія при різних величинах еквівалентної стружки



1 – віброабразивна, 2 – полірування, 3 – шліфування, 4 – точіння

Рисунок 1.6 – Питома енергія знімання матеріалу при різних величинах еквівалентної стружки для різних способів механічної обробки

Отже, більша частина енергії у віброоброці йде на дисипативні втрати – тертя між абразивними частинками та їх взаємодію з стінками робочої камери. Унаслідок цього лише від 1 % до 5 % загальної енергії безпосередньо йде власне на знімання матеріалу, тоді як при інших способах обробки зі зняттям стружки цей показник становить 20 % – 70 %. Це свідчить про низьку енергетичну ефективність віброабразивної обробки, що засвідчує актуальність пошуку шляхів підвищення енергоефективності процесу.

1.2 Аналіз сучасного стану наукових досліджень віброабразивної обробки деталей складної форми

Теоретичні засади віброабразивної обробки були сформовані в результаті досліджень вітчизняних та іноземних учених, серед яких істотний внесок у розвиток даного напрямку зробили: В.Б. Струтинський [31], В.Й. Сівко [32], Б.

Капаціла [33], Р.Д. Іскович-Лотоцький [34, 51], S. Wan [35, 36], E. Uhlmann [25], F. Hashimoto [28, 38], S. Johnson [28, 37, 38], R. Chaudhari [28].

Незважаючи на удавану простоту процесу віброабразивної обробки, теоретичне вивчення її механізмів викликає значні труднощі. У науковій літературі представлено різні методи дослідження механізмів знімання матеріалу в процесі віброабразивної обробки. Проте, незважаючи на значну кількість моделей, що описують окремі аспекти цього процесу, узагальнений механізм знімання матеріалу залишається недостатньо з'ясованим, що підкреслює складність та багатофакторність проблеми. Існуючі моделі віброабразивного процесу здебільшого мають спрощений характер [39], що обмежує їх універсальність та точність розрахунків. Тому для визначення оптимальних параметрів значна частина досліджень виконується експериментальним шляхом. Сучасні основні напрямки наукових досліджень зображені на схемі рис.1.7.

Проведений патентний пошук показав, що найбільша кількість винаходів стосується розробки нових конструкцій віброзбуджувачів та спеціальних засобів закріплення деталей на шпинделі з метою скорочення часу обробки (рис. 1.8). Водночас наявність винаходів, пов'язаних із робочим середовищем, компаундами та засобами розділення деталей від абразивного завантаження, свідчить про різносторонній характер наукових досліджень. Це підкреслює, що на процес впливає велика кількість факторів, жоден з яких не може розглядатися окремо.

Зазначимо власників найбільшої кількості патентів у галузі віброабразивної обробки. Так компанія Hammond Machinery отримала патент на винахід обладнання для високочастотного віброоброблення з оригінальною конструкцією віброзбуджувача, зі спеціальним розташуванням дебалансів та підвищеною потужністю приводу [40]. Компанія Walther Trowal є власником патентів на винаходи, пов'язаних із застосуванням електромагнітних систем закріплення феромагнітних заготовок. У свою чергу, REM Technologies отримала патент на

нову віброустановку з хімічно прискореним процесом фінішного оброблення [41].



Рисунок 1.7 – Схема напрямів наукових досліджень у віброобробці

Опис механізмів знімання матеріалу та встановлення закономірностей у віброобробці здійснив F. Hashimoto [28], який сформулював три основні правила:

- кожному виду віброабразивної обробки відповідає певна усталена структура мікрорельєфу оброблюваної поверхні деталі та шорсткість, що досягається після певного часу обробки (рис. 1.9). Значення шорсткості експоненційно зменшується та прямує до усталеного, який визначається як технологічними параметрами, такими як амплітуда, частота віброколивачів так і абразивними тілами та оброблюваними деталями;

- швидкість зміни величини шорсткості оброблюваної поверхні пропорційна різниці між поточним та усталеним значеннями шорсткості;

- після досягнення усталеної шорсткості поверхні оброблюваної деталі швидкість знімання матеріалу є постійною величиною.

У роботі C. Wang [42] описаний експеримент з спеціально розробленим датчиком для вимірювання нормальних контактних сил між абразивними частинками та деталлю в віброустановці з робочою камерою кільцевої (тороподібної) форми

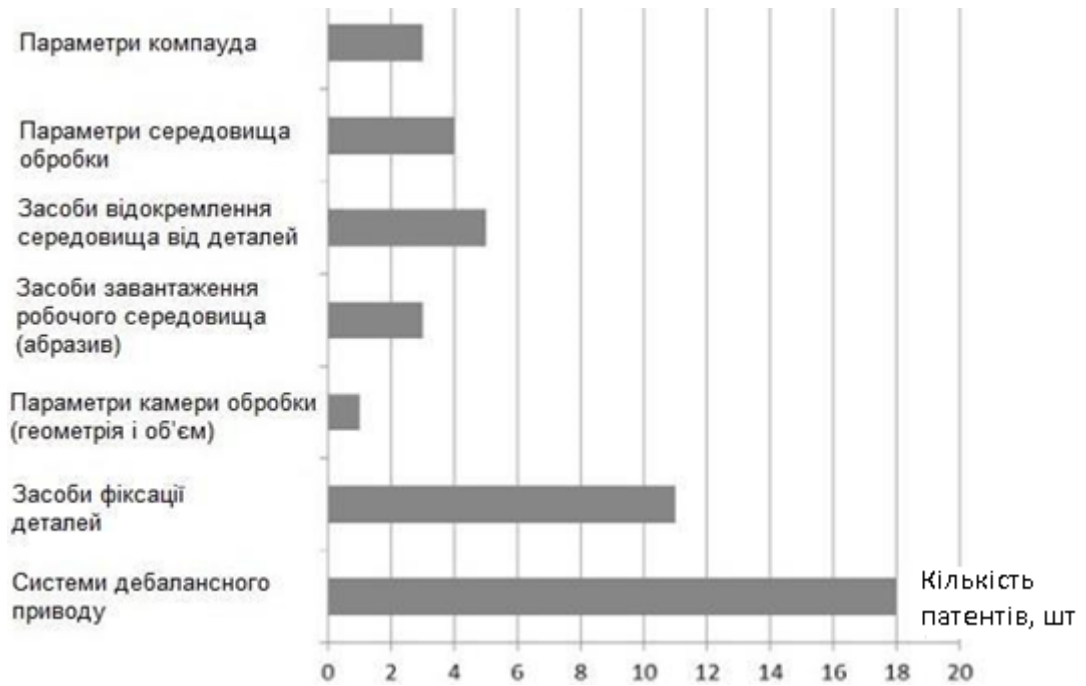


Рисунок 1.8 – Структура різновидів винаходів у віброобробці

Був проведений аналіз масиву отриманих даних методом спектрального розкладу сигналу від цього датчика в ряд Фур'є на складові гармоніки, який

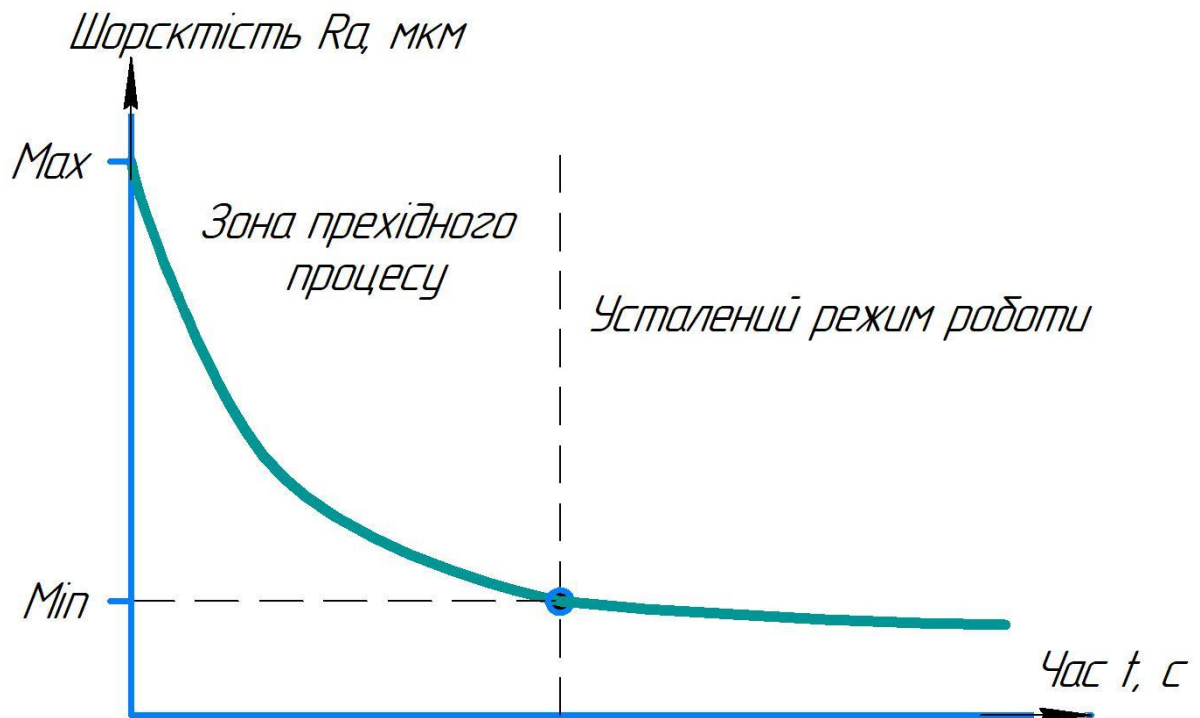


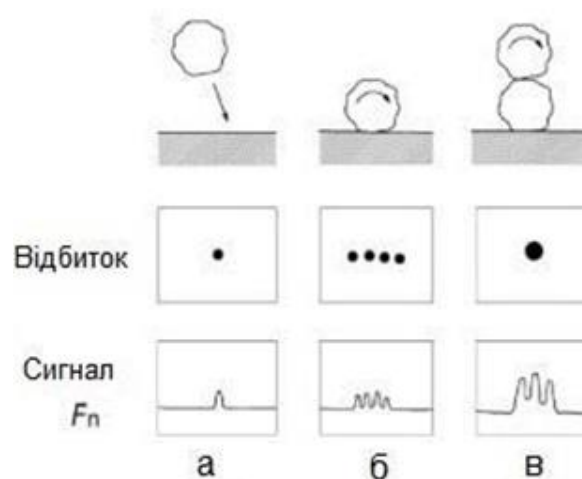
Рисунок 1.9 – Динаміка зміни шорсткості оброблюваної поверхні

встановив, що більшість енергії, переданої від вібробудувача до деталі, відбувалася на основній гармоніці, тобто на робочій частоті. При цьому отримана енергія від гармоніки вищого порядку є незначущою.

Додатково був проведений експеримент при різному розміщенні цього датчика на поверхні оброблюваної деталі. Отримані результати показали, що кількість знятого матеріалу оброблюваної деталі була відносно сталою (в межах статистичної похибки) для усієї поверхні деталі. Проведені експерименти з закріпленою деталлю встановили, що контактні сили були більшими ніж у вільному стані.

У праці А. Yabuki [45] описано дослідження віброабразивної установки з спеціально розробленим датчиком для вимірювання нормальних та тангенціальних складових від сил ударної взаємодії частинок абразиву з деталлю. Шляхом відеофіксації моменту контакту абразивної частинки з деталлю встановлено три види контактної взаємодії (рис.1.10):

- вільний удар (рис. 1.10 а) створив відбиток невеликого розміру, датчик зафіксував низький рівень сигналу;
- прокочування окремих верхніх частинок абразиву (рисунок 1.10 б) створило відбиток середнього розміру та сигнал з кількома екстремумами через певний часовий інтервал;



а – вільний удар, б – прокочування окремих частинок, в – прокочування сусідніх частинок через шар нерухомих

Рисунок 1.10 – Види контактної взаємодії

– прокочування сусідніх частинок абразивного матеріалу через нерухому частину абразивного матеріалу (рисунок 1.10 в) створило заглиблення найбільшого розміру на найбільший сигнал від датчику.

Як показано у працях дослідників [46, 47], при застосуванні шпиндельного способу закріплення деталі її слід орієнтувати таким чином, щоб оброблювана поверхня була розташована максимально перпендикулярною до напрямку циркуляційного руху абразивного середовища. Також було встановлено, що максимальна сила та частота ударів були набагато вищими, чим з технологічною рідиною – компаундом. Це свідчить про значимий вплив зменшення коефіцієнту тертя внаслідок змочування. Це пояснюється тим, що водяна плівка збільшує адгезію та проявляє демпфуючі властивості. Таким чином, можна зробити висновок, що хоча компаунд і збільшує якість обробленої поверхні, однак його кількість має бути оптимальною, адже його надлишок може збільшити загальний час обробки.

J. Domblesky [48] провели дослідження з встановлення залежності швидкості знімання матеріалу з поверхонь оброблюваних деталей для різних матеріалів – алюмінію, латуні та сталі від прискорення абразивних часток та тривалості обробки. Автори зазначили, що віброобробка та шліфування тісно пов'язані між собою, так як в обох процесах абразивні частки знімають матеріал з поверхні деталі. Ними була висунута гіпотеза, враховуючи механічні властивості матеріалів, що алюміній матиме найбільшу швидкість знімання матеріалу, а сталь – найнижчу. По результатам експерименту встановлено, що латунь мала найвищу швидкість знімання матеріалу, алюміній – найнижчу. Це пояснюється тим, що густини абразивних тіл та алюмінію є співмірними, чим зменшується їх взаємна швидкість руху. Однак авторами зазначено, що необхідно провести додаткові дослідження для розуміння причини того, що для латуні швидкість знімання матеріалу була у два рази більшою, ніж у сталі. Твердість деталі також виявилася фактором, що впливає на швидкість знімання матеріалу, причому менш тверді деталі мають вищі швидкості знімання матеріалу.

Р. Kumar та ін. [49] розробили та виготовили одновимірний симулятор процесу віброабразивного оброблення для дослідження швидкостей знімання матеріалу, зміни значень шорсткості поверхні та вимірювання контактних сил. Для експериментів були використані деталі з титану, та розміщувались в робочій камері на різній глибині. В ході дослідження було встановлено, що поверхні, які розташовані глибше в абразивному середовищі і перпендикулярно до циркуляційного руху частинок демонструють вищі швидкості знімання матеріалу. Це пояснюється тим, що на абразив та деталі, які знаходяться глибше діє додаткова сила від ваги верхніх шарів середовища, що знаходиться над ним.

Отже, проведений аналіз існуючих досліджень встановив відсутність загальноприйнятої теорії, яка описує вплив характеристик руху абразивних частинок на інтенсивність знімання матеріалу та якість обробки поверхні деталі. Актуально уточнення існуючих та встановлення нових закономірностей між вхідними та вихідними параметрами, що враховують вплив ключових параметрів процесу.

1.3 Аналіз конструктивних особливостей віброобладнання

В Україні розробкою та дослідженням віброобладнання для абразивної обробки виробів займається низка наукових установ, зокрема: Вінницький національний аграрний університет, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне), Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Інститут геотехнічної механіки імені М.С. Полякова НАН України (м. Дніпро), Національний університет «Львівська політехніка», Полтавський державний аграрний університет.

Основними представниками зарубіжних компаній, що займаються розробкою, виробництвом та впровадженням вібраційних технологічних машин є: «Rösler Oberflächentechnik», «SPALECK Oberflächentechnik», Walther-Trowal (Німеччина), «Rösler-Kromas» (Туреччина), «Vijimech» (Індія), «Hammond Roto-Finish», (США), «Almco» (Великобританія).

Основним функціональним вузлом вібромашин є приводна система з незбалансованою масою, яка реалізується у вигляді електродвигуна з дебалансами, що є джерелом віброзбурювальної сили, що генерує коливальний рух. Двигун з дебалансами жорстко закріплений до робочої камери, заповненої абразивним середовищем, яка, у свою чергу, монтується на рамі через пружні елементи [50].

На рис. 1.12 зображена конструкція та основні елементи типової віброустановки з робочою камерою кільцевої форми (тороподібною) фірми Kromas.

Подальшим розвитком техніки для вібраційної обробки стало створення обладнання з активними робочими, які окрім вібраційного впливу створюють додатковий вплив на рух частинок робочого середовища.

Активний робочий орган створює додаткові зусилля, які сприяють більш інтенсивній обробці поверхні та дозволяє обробляти більшу кількість деталей за одиницю часу. Покращуються умови для обробки деталей складної геометрії, оскільки додатковий механічний вплив дозволяє проникати в важкодоступні місця.

По характеру коливань робочого органу всі існуючі вібраційні установки поділяють на 2 великі групи [51, 52]. Одні з них створюють коливання в одній площині (два взаємоперпендикулярні напрями), інші просторові (три напрями). Вважається, що при інших рівних параметрах, установки з просторовими коливаннями мають переваги на 20 %–25 % порівняно з площинними.

Такі установки широко впроваджені на ОАО «МоторСіч» [53], за допомогою яких здійснюється фінішна обробка лопаток компресорів газотурбінних двигунів зі жаростійких титанових сплавів. До недоліків просторових установок можна віднести більшу вартість та складнішу конструкцію, труднощі пов'язані зі зміною режимів їх роботи.

Відцентрово-планетарна обробка характеризується підвищеною продуктивністю, що зумовлено дією інерційних сил на частинки робочого середовища [54, 55, 58]. Цим створюються сприятливі умови для вирішення

широкого спектра технологічних завдань, зокрема обробки деталей складної форми з невеликою масою та розмірами, а також виготовлених із матеріалів високої твердості та, оскільки інші методи об'ємної обробки для них є малоефективними.

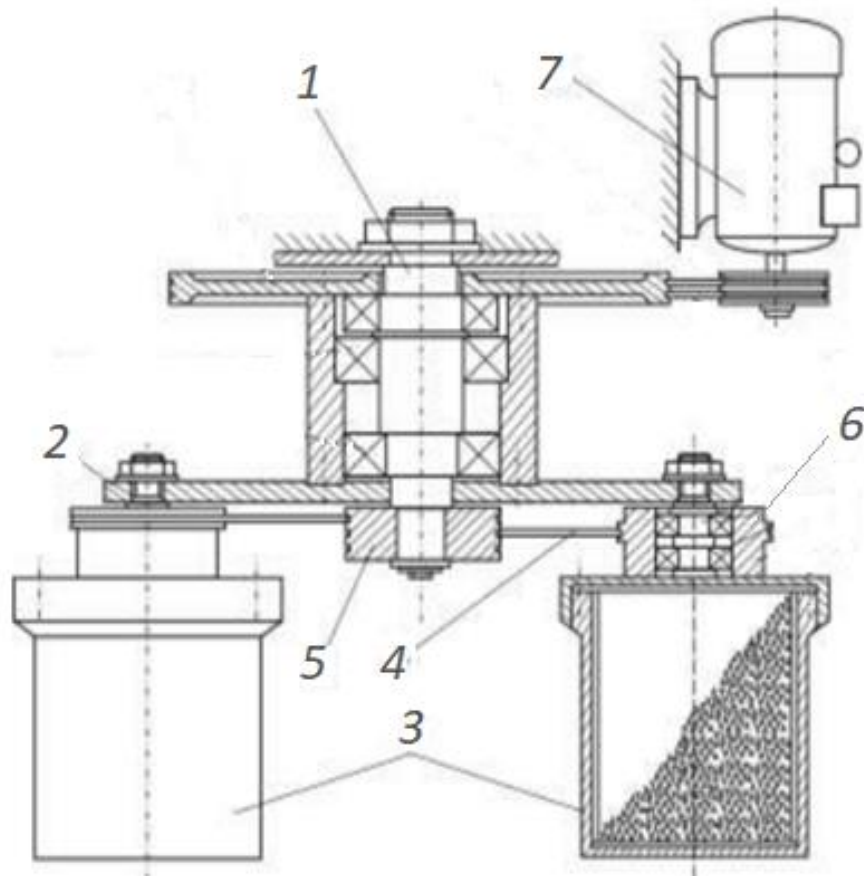


1 – камера обробки, 2 – двигун, 3 – дебаланс, 4 – поліуретанове покриття,
5 – сепаратор, 6 – пружини, 7 – кришка

Рисунок 1.12 – Будова та основні елементи віброустановки

Конструктивна схема відцентрово-планетарної установки наведена на рис. 1.13. Розглянемо принцип її роботи. Робоче середовище (оброблювані деталі, абразивні тіла та компаунд) завантажуються в закриті барабани 3. При вмиканні приводного електродвигуна 7, за допомогою пасової передачі, обертовий рух передається на водило 2, яке обертається навколо центральної нерухомої осі 1. При цьому, разом з водилом, навколо цієї ж осі 1 обертаються вертикальні осі із шківками 6 та барабанами 3, а оскільки шківки 6 за допомогою пасових передач 4 з'єднані із нерухомим центральним шківком 5, то барабани 3 починають

здійснювати планетарний рух, обертаючись навколо центральної осі 1 і навколо власних вертикальних осей.



1 – нерухома центральна вісь, 2 – водило, 3 – барабани, 4 – пасова передача, 5 – центральний шків, 6 – шків барабана, 7 – електродвигун

Рисунок 1.13 – Конструктивна схема відцентрово-планетарної установки

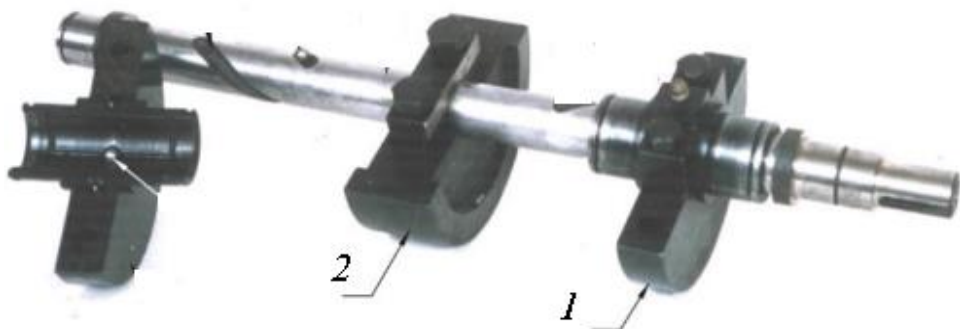
В результаті дії відцентрових сил, які виникають при роботі машини гранули абразивного середовища притискаються до поверхонь оброблюваних деталей, а провертання барабанів 3 навколо власних осей, призводить до перемішування деталей і гранул робочого середовища.

На рис. 1.13, 1.14 зображені загальний вигляд та конструктивна схема керованого відцентрового дебалансного віброзбуджувача.

Ця оригінальна конструкція розроблена, виготовлена та досліджувалась в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» під керівництвом професора Сердюка Л.І. [59].

Особливістю ВІО–8 є можливість використання нестационарних режимів, коли зовнішнє керування в автоматичному режимі рухомими дебалансами дає можливість створювати вібраційне поле заданої інтенсивності й у широких межах змінювати параметри цього поля, що суттєво підвищує енергію віброабразивної дії на оброблювані деталі [60, 61].

Конструкція керованого дебалансу зображена на рис. 1.16. Розглянемо принцип дії. Ковзна посадка рухомого дебаланса 2 дозволяє його переміщення уздовж дебалансного вала, а перекочування кулькових шпонок у гвинтових канавках забезпечує одночасний поворот рухомого дебаланса 4 відносно нерухомого 1.



1 – нерухомий дебаланс, 2 – рухомий дебаланс

Рисунок 1.16 – Конструкція керованого дебалансу

Розглянемо принцип роботи ВІО–8. Дебалансний вал 1 за допомогою підшипників 2 закріплений у корпусі віброзбуджувача. На валу 1 розташовані дебаланс 3, що закріплений нерухомо, та дебаланс 4, який установлений на валу ковзною посадкою та пов'язаний з ним кульковими шпонками 5. Останні знаходяться в напівсферичних гніздах рухомого дебаланса 4 і при переміщенні його уздовж вала 1 перекочуються по гвинтових канавках 6, які мають відповідний до діаметру кулькових шпонок 5 напівкруглий переріз.

Керування величиною сили віброзбурення ВЮ–8 забезпечується зміною положення рухомого дебаланса 4. Механізм керування складається з маховика 14 (або мотор-редуктора), ходового гвинта 11 та вилки 8 механізму керування. Підшипники 7 механізму керування своїми внутрішніми кільцями закріплені на маточині рухомого дебаланса 4, а зовнішніми кільцями – в обоймі 9 вилки 8, на іншому кінці якої мається різьбова втулка 10, що знаходиться в зчепленні з ходовим гвинтом 11. Останній має можливість виконувати обертальний рух відносно корпусу 12 віброзбуджувача в підшипниках 13 та приводиться в обертання маховиком 14.

Шпиндельне закріплення деталей розглядається [62] як відносно новий підхід у віброобробці (рис. 1.17). Воно може реалізовуватися у двох варіантах – статичному та динамічному. Динамічний спосіб передбачає обертання або поступальне переміщення деталей за визначеною траєкторією у робочій камері, заповненій абразивним середовищем, на яке діє віброзбурююча сила. За таких умов деталі можуть здійснювати рухи з різними напрямками та траєкторіями, що забезпечує інтенсифікацію процесу обробки та підвищує його рівномірність.



Рисунок 1.17 – Приклад шпиндельного закріплення деталей

Таким чином збільшується відносна швидкість між деталлю і середовищем та сила взаємодії. Метод закріплення забезпечує зменшення часу обробки деталей майже на 33 % [63] порівняно зі класичною віброабразивною обробкою.

Прикладом типової віброустановки з активним робочим органом є конструкція зображена на рис. 1.18.

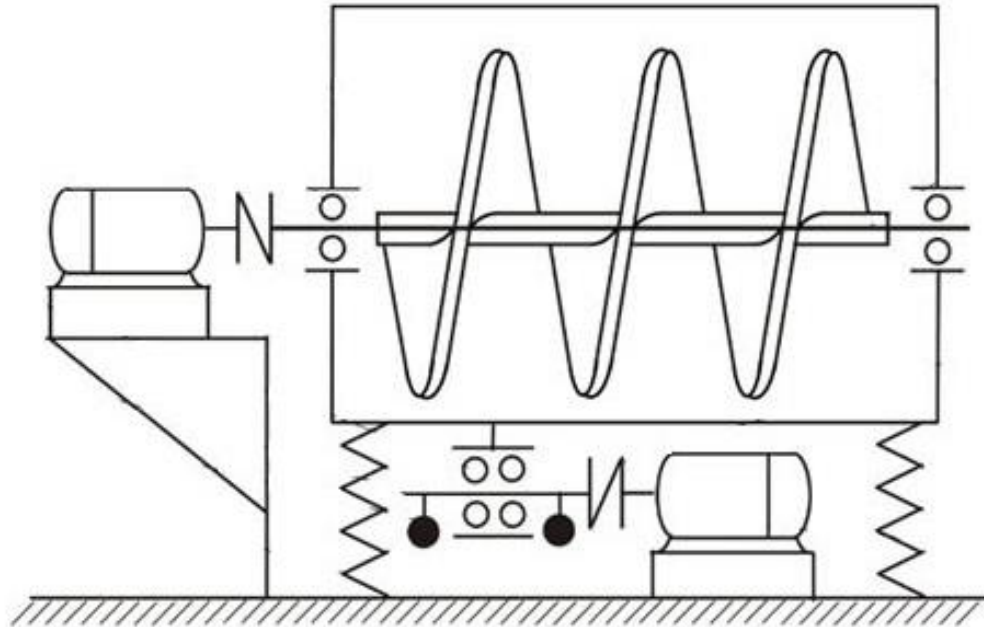


Рисунок 1.18 – Схема віброабразивної установки зі шнековим робочим органом

Шнекові установки мають високу ефективність при обробці великої кількості дрібних деталей. Наприклад, такі установки широко використовуються в автомобільній промисловості для видалення задирок та полірування деталей після лиття. Завдяки рівномірному переміщенню деталей уздовж камери забезпечується їх одночасна обробка по всій поверхні [64].

У результаті чисельних пошуків методів підвищення ефективності процесу віброобробки було запропоновано [65–74] технічне рішення вібромашини із адаптивними параметрами віброабразивної дії. Її структурна схема зображена на рис.1.19.

Установка забезпечує мінімальні витрати енергії на вібропривод завдяки постійній підтримці резонансного режиму роботи, при можливості керування віброзбуренням на резонансній частоті вібромашини.

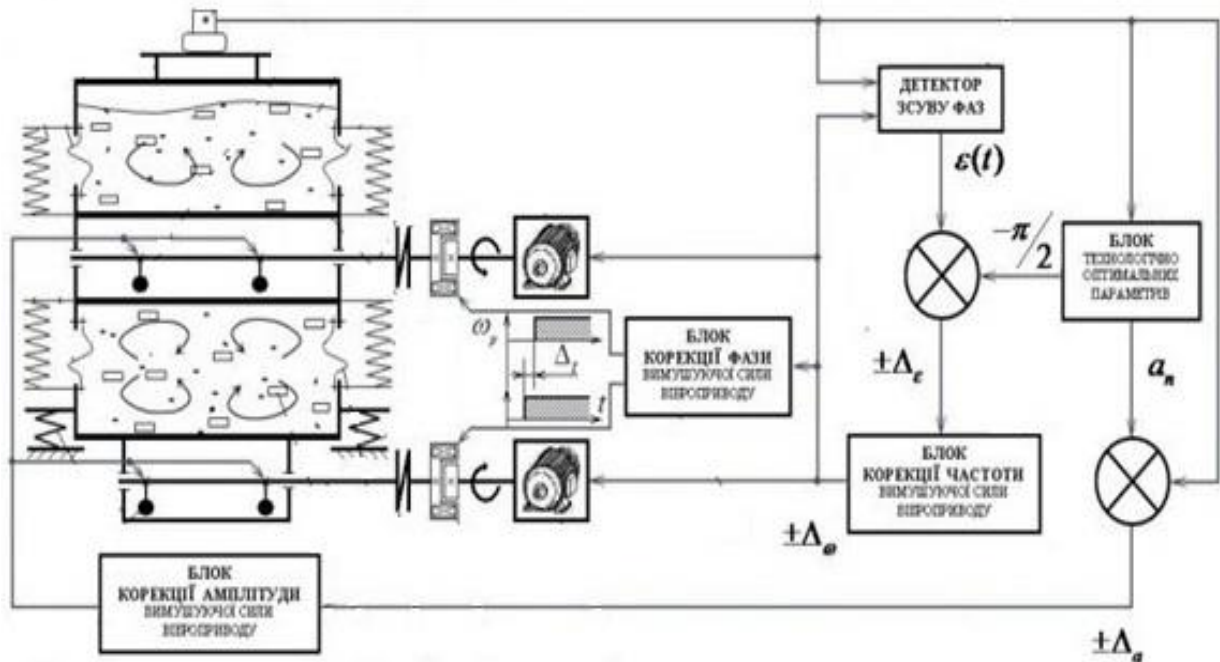


Рисунок 1.19 – Структурна схема адаптивної віброобразивної установки

Це дозволить при різних заповненнях робочої камери оброблюваними деталями досягти заданих параметрів технологічного процесу (величини шорсткості поверхні деталей, заданий обсяг знімання матеріалу, зміцнення поверхні шляхом пластичної деформації тощо) за мінімальних енергетичних витратах.

Особливістю усіх наведених конструкцій віброобладнання є відсутність можливості автоматичного регулювання енергії робочого середовища, внаслідок чого при зміні ступеня завантаження робочої камери змінюється й амплітуда коливань. У такій ситуації можливі такі події: при неконтрольованому зростанні кінетичної енергії робочого середовища виникає ризик деформації чи навіть руйнування виробів, тоді як при її зниженні процес не гарантує досягнення необхідної якості обробки у заданий технологічний час. Водночас суттєвим недоліком подібних конструкцій є неможливість роботи у резонансному режимі, який може забезпечити мінімальні енергетичні витрати при максимальній продуктивності.

1.5 Аналіз методів визначення оптимальних параметрів та умов підвищення ефективності роботи обладнання

Метою оптимізації процесу віброабразивної обробки є визначення раціональних режимів роботи, що дозволяє досягти максимуму продуктивності при мінімальних енерговитратах. На даний час основними методами є такі:

– емпіричний, що ґрунтується на раніше встановлених закономірностях віброабразивного процесу та виробничому досвіду впровадження. Для визначення оптимальних параметрів застосовуються довідкові матеріали та спеціалізовані методики, що містять побудовані на основі експериментальних даних таблиці та графіки. За ними визначають амплітуду й частоту коливань, тривалість обробки та інші параметри з урахуванням характеристик деталей та абразивного середовища [82 –86];

– експериментальний, базується на використанні даних, отриманих у результаті випробувань на певному обладнанні за різних режимів роботи. Подальший аналіз цих даних дає змогу визначити оптимальні значення технологічних параметрів та оцінити ефективність процесу для конкретного обладнання [87];

– математичне моделювання, що полягає в теоретичному обчисленні оптимальних параметрів на основі створених нових моделей процесу на основі фундаментальних фізичних законів та властивостей матеріалів, що обробляються [88];

– метод чисельного моделювання, полягає у відтворенні віброабразивного процесу з можливістю контролю його показників за допомогою таких програмних засобів, як MATLAB, EDEM, ANSYS. При цьому враховуються особливості деталей, абразиву, конструкції обладнання [89 – 90].

Для кожного з вищевказаних методів характерні такі особливості:

– емпіричний метод є простим, але має значні похибки, особливо при використанні нового обладнання та матеріалів абразивних тіл;

- експериментальний метод дає високоточні результати для конкретного обладнання, але є високовартісним та тривалим, так як необхідно провести додаткову експериментальну роботу;

- математичне моделювання дозволяє отримати теоретично обґрунтовані результати, але вони можуть містити значні похибки обчислень, величини яких залежать того наскільки адекватною є використана модель та наявність спрощень в ній;

- математичне моделювання забезпечує отримання теоретично обґрунтованих результатів. Водночас точність цих результатів значною мірою залежить від адекватності обраної моделі та ступеня допущених у ній спрощень, що зумовлюють суттєві похибки обчислень;

- чисельне моделювання є високоточним методом для визначення оптимальних параметрів режимів обробки. Проте його застосування потребує використання спеціалізованого високовартісного програмного забезпечення та значних обчислювальних ресурсів.

Таким чином, найбільш раціональним підходом до визначення оптимальних параметрів є комплексне використання різних методів: спершу застосування найпростішого емпіричного, а за потреби — залучення більш складних методів, зокрема математичного та чисельного моделювання, а також експериментальної перевірки.

Проведений аналіз сучасних наукових досліджень та вивчення особливостей виробничого впровадження віброабразивної обробки засвідчили актуальність подальшого розвитку цього напрямку, зокрема пошук нових способів, а також удосконалення існуючих технологій з метою інтенсифікації та підвищення енергоефективності процесу.

Враховуючи механізм віброабразивної обробки можемо стверджувати, що кінетичну енергію для знімання матеріалу компоненти робочого середовища отримують від стінок робочої камери. Відтак, визначальними факторами впливу на інтенсифікацію обробки та підвищення якості поверхні деталей є параметри руху робочої камери – частота та амплітуда віброколивань, траєкторія її руху.

Також такі параметри як форма, об'єм, ступінь заповнення, гранулометричний склад робочого середовища визначають характер циркуляційного руху, інтенсивність контактних взаємодій, швидкість та прискорення частинок робочого середовища.

Збільшення енергетичного рівня тільки за рахунок збільшення віброзбуджуючої сили є обмеженими максимальною амплітудою та частотою віброколиваний обладнання. До того ж, враховуючи особливості контактної взаємодії частинок, підвищення продуктивності процесу в цьому випадку відбувається зі зменшенням енергоефективності, що свідчить про нерациональність цього підходу.

Враховуємо той факт, що для деталей складної форми особливу актуальність набуває не тільки збільшення швидкостей та прискорень компонентів середовища, а і ускладнення кінематики їх циркуляційного руху, що підвищить якість обробки важкодоступних зон поверхонь.

Варто зазначити, що при інтенсифікації процесу збільшення сили контактної взаємодії не повинно суттєво вплинути на ключові розміри деталей, а також привести до руйнування або деформації, Тому режими віброобробки мають бути встановлені з урахуванням міцнісних характеристик деталей, а конструкція віброобладнання повинна забезпечувати можливість регулювання значень збуджуючих сил в широкому діапазоні.

Враховуючи вищезазначене, визначено можливі основні способи збільшення продуктивності та енергоефективності віброабразивного процесу та наведені на рис. 1.20.

З метою підвищення продуктивності віброобробки шляхом інтенсифікації процесу та збільшення енергії що йде безпосередньо на знімання матеріалу, пропонується комбінований спосіб обробки. Він полягає у поєднанні сумісної дії двох різних типів руху – вібраційних коливань та обертального руху активного органу, яким є роторна робоча камера. Завдяки цьому надається додаткова енергія компонентам робочого середовища в умовах дії вібраційного збурення,

яка спрямована на посилення контактної взаємодії та поліпшення циркуляційного руху.

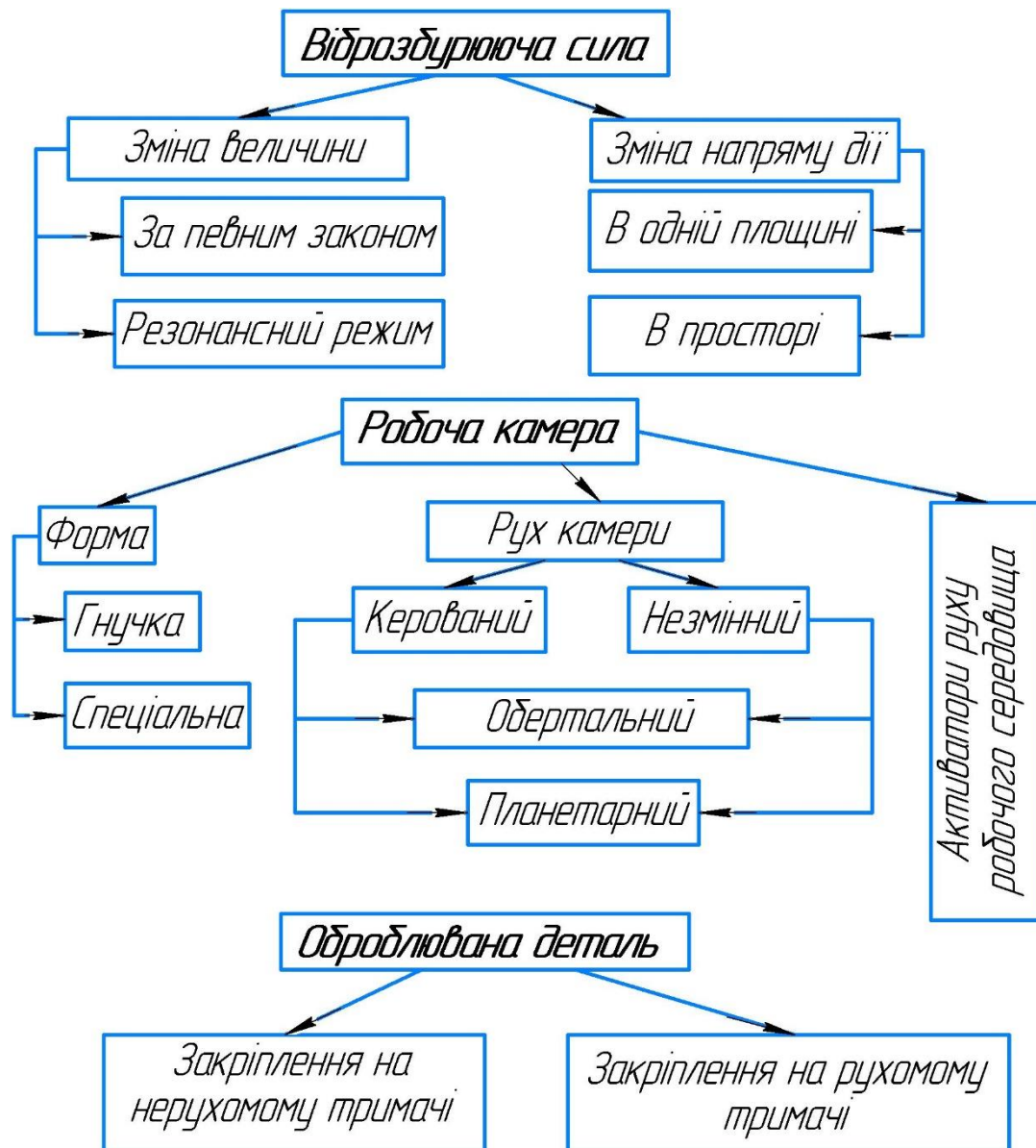


Рисунок 1.20 – Способи збільшення продуктивності віброобробки

При цьому створюються особливі умови механічної взаємодії компонентів в обертійній робочій камері, що інтенсифікують циркуляційний рух абразивних тіл чим збільшується їх ефективна контактна взаємодія з поверхнями оброблюваних деталей. У результаті створюється динамічна взаємодія частинок 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.

Зазначимо основні переваги комбінованого способу:

– підвищення якості віброобробки важкодоступних поверхонь деталей складної форми шляхом ускладнення траєкторії руху компонентів робочого середовища, що досягається поєднанням обертального руху робочої камери та її коливань, створених віброзбуджувачем;

– збільшення енергоефективності процесу за рахунок незалежної зміни дії сил на робоче середовище у широкому діапазоні для встановлення раціонального режиму віброобробки різного типу поверхонь деталей складної форми.

1.6 Висновки по розділу 1. Мета та завдання дослідження

1. Віброабразивна обробка є універсальним методом масової обробки поверхонь деталей складної форми, для яких застосування верстатів із жорсткими кінематичними в'язями є неможливим, зокрема при видаленні задирок і грату, скругленні країв та полірування.

2. Проведеним аналізом наукових досліджень встановлено, що лише від 1 % до 5 % загальної енергії у віброобробці йде на корисну роботу, тоді як при інших способах обробки цей показник становить 20 % – 70 %, що свідчить про її низьку енергоефективність, що зумовлено значними непродуктивними втратами енергії на дисипативні процеси, зокрема на взаємодію абразивних частинок одна з одною та зі стінками робочої камери.

3. Існуючі встановлені закономірності віброобробки не враховують всіх факторів впливу та особливостей процесу і є узагальненими, тому актуальною задачею є подальше дослідження закономірностей впливу параметрів віброобладнання на продуктивність та енергоефективність процесу.

4. На основі проведеного аналізу конструкцій віброобладнання та способів підвищення продуктивності та якості процесу обґрунтований комбінований

спосіб для обробки поверхонь деталей складних форм, який забезпечується активним робочим органом – віброуючою обертовою камерою.

Метою роботи є підвищення продуктивності та енергоефективності віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми на обладнанні з активним робочим органом та обґрунтування раціональних режимів його роботи.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати технічне рішення та виготовити дослідний зразок комбінованої віброустановки, основні параметри якої можна змінювати в широких межах для проведення експериментальних досліджень;

- встановити закономірності продуктивності комбінованої віброобробки від основних параметрів віброустановки з обертовою;

- дослідити режими роботи дослідної віброустановки, її енергетичні показники та встановити закономірності енергоефективності для цих визначених режимів;

- на основі отриманих результатів дослідження розробити узагальнені рекомендації щодо визначення раціональних параметрів віброустановки з активним робочим органом.

РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРОУСТАНОВКИ З АКТИВНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ ОБРОБКИ

Метою даного розділу є обґрунтування раціональних параметрів установки для забезпечення оптимального режиму комбінованої віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми шляхом досліджень закономірностей впливу сумісної дії різних типів руху – вібраційних коливань та обертального руху робочої камери на ефективність процесу. Для цього потрібно вирішити наступні поставлені задачі:

1. Розробити конструкцію віброустановки з активним робочим органом для реалізації запропонованого комбінованого способу віброабразивної обробки.

2. Виконати дослідження розробленої вібраційної установки шляхом математичного моделювання з метою визначення кінетичної енергії та узагальнених сил, скласти рівняння руху активного робочого органу.

3. Обґрунтувати методику моделювання контактної взаємодії компонентів середовища, яка враховує особливості комбінованого процесу з метою прогнозування ефективності.

4. Обґрунтувати раціональні параметри та режим роботи обладнання для комбінованої віброабразивної обробки, що забезпечить максимальну продуктивність та енергоефективність процесу.

2.1 Обґрунтування конструктивної схеми віброустановки з активним робочим органом

Проектування нової дослідної віброустановки комбінованої дії передбачає першочергове розроблення її структурної схеми, з метою обґрунтування загального принципу дії обладнання та взаємозв'язку його основних функціональних елементів. На другому етапі виконаємо компоновку основних вузлів з врахуванням їх параметрів та складемо конструктивну схему.

Структурна схема запропонованої нової комбінованої віброустановки зображена на рис. 2.1 та складається з таких основних елементів:

1. Віброплатформа – основний несучий елемент, який є базою для кріплення рами обертової робочої камери, та передає їй енергію вібраційного збурення.
2. Обертова робоча камера – активний робочий орган, що обертається навколо своєї осі, створюючи додаткові відцентрові сили.
3. Двигун приводу обертової робочої камери з можливістю регулювання швидкості обертання робочої камери.

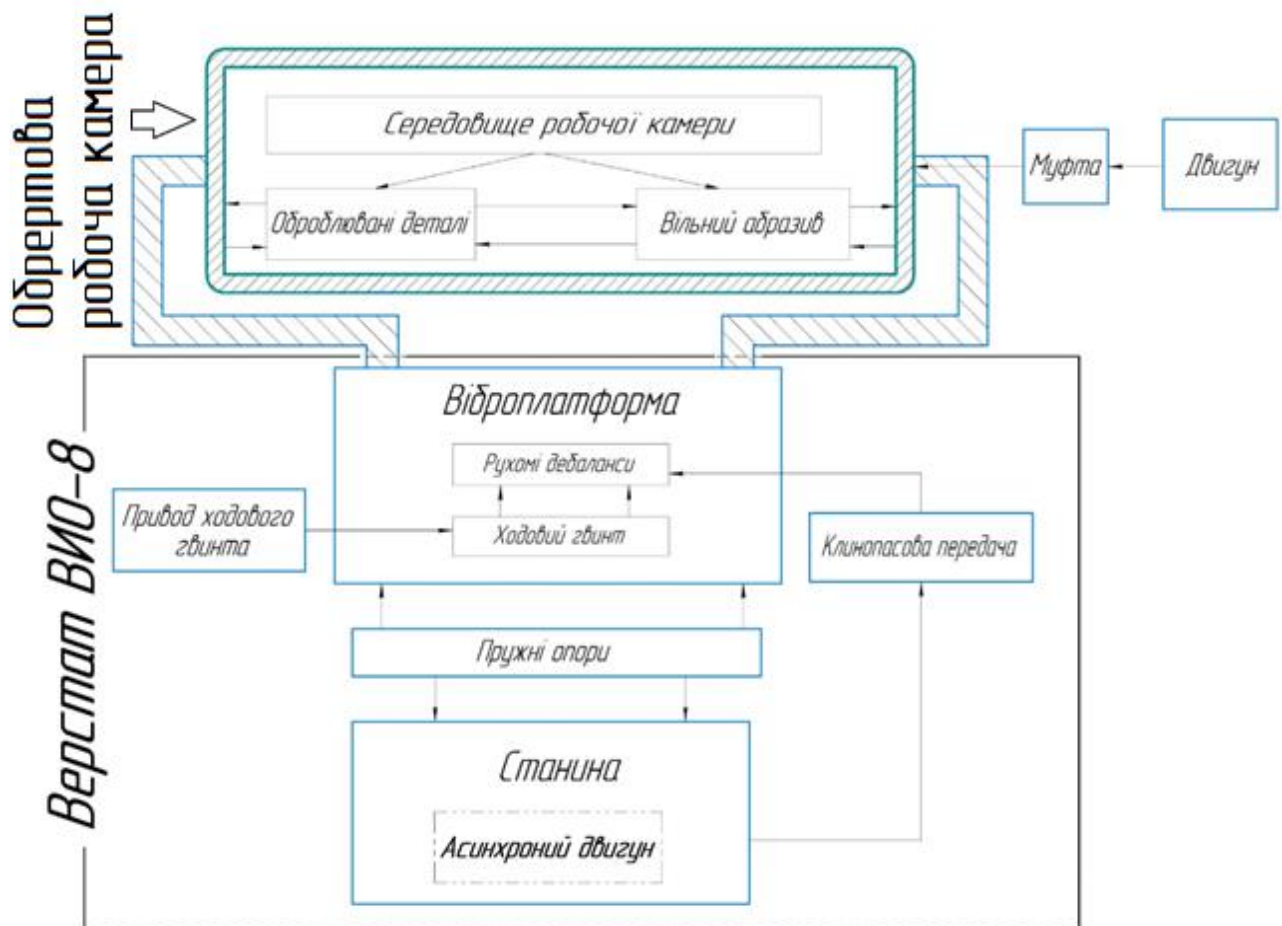


Рисунок 2.1 – Структурна схема комбінованої віброустановки

За джерело вібраційного збурення використано промисловий верстат для об'ємної фінішної обробки ВІО–8, детальний опис якого наведено в розділі 1. Він характеризується технологічною універсальністю, можливістю простого встановлення нових додаткових вузлів та забезпечує створення вібраційних

коливань, параметри яких можна змінювати в широкому діапазоні. В зв'язку з цим спрощується виготовлення дослідної установки.

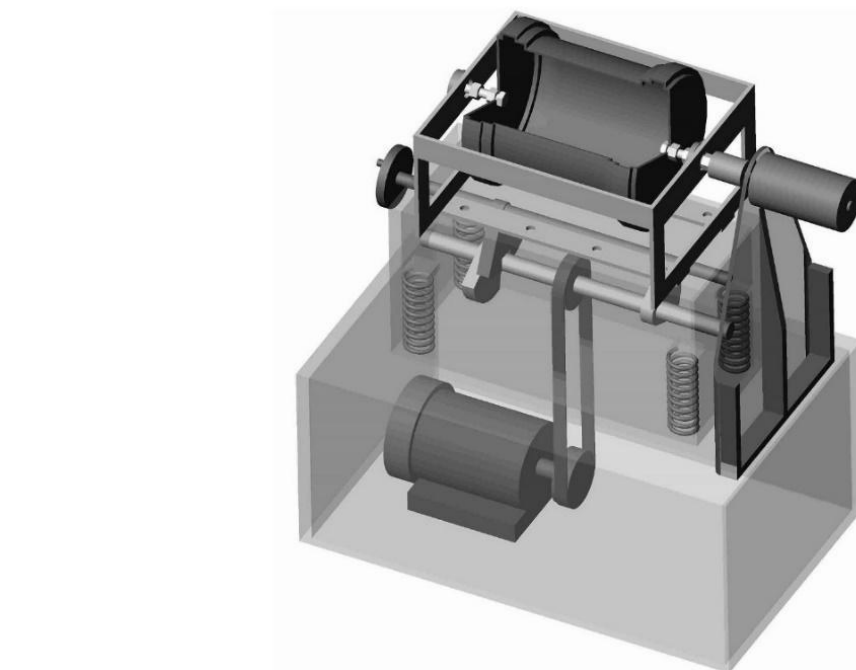
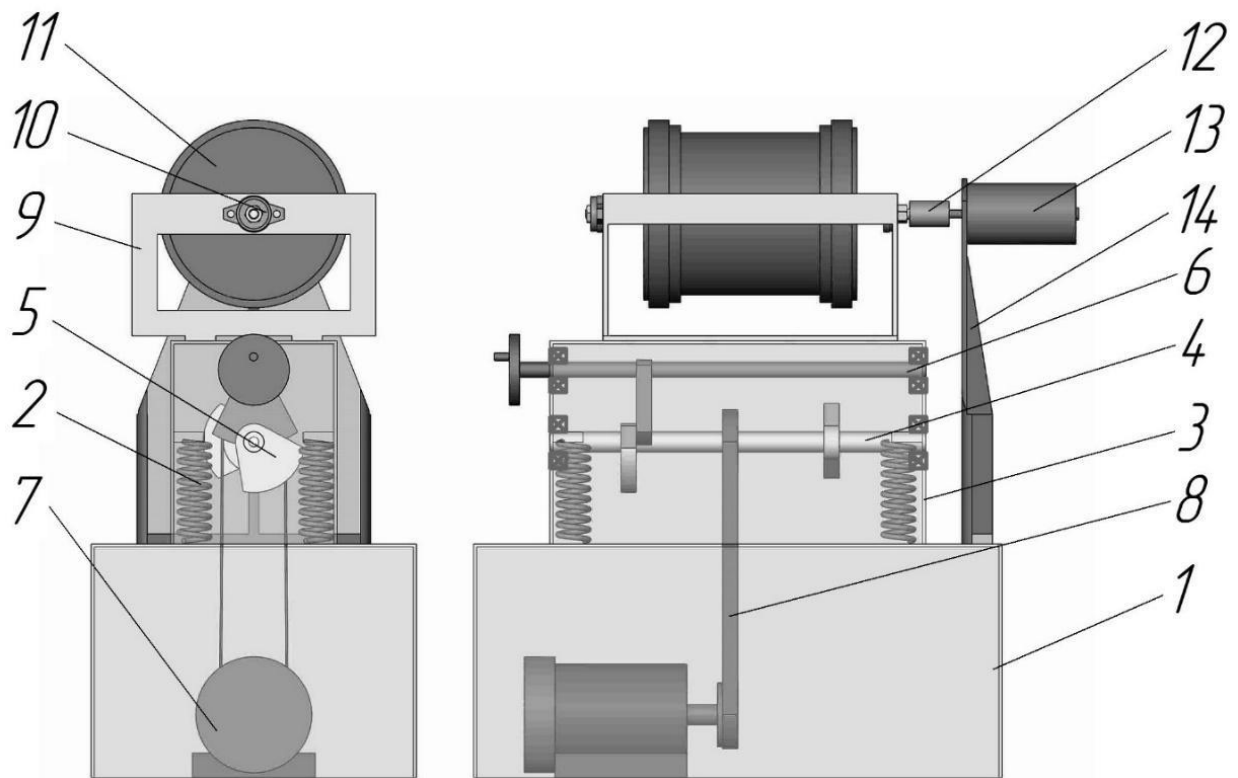
Обертальний рух робочої камери, що встановлена на віброплатформу ВІО–8 у поєднанні з вібраційним впливом створюватиме комбіновану дію на компоненти середовища – вільний абразив та оброблювані деталі, що підвищить інтенсивність їх взаємодії, рівномірність обробки та зменшить утворення «мертвих зон» зон із недостатньою інтенсивністю впливу. Застосування такого методу обробки дозволить керовано змінювати технологічні режими обробки шляхом гнучкої зміни як амплітуди віброколивань, так і швидкості обертання камери робочої камери для дослідження різних режимів комбінованої віброобробки.

У якості приводу для обертання камери пропонується використати окремий електродвигун постійного струму з планетарним редуктором та системою керування його частотою обертання.

Одночасним поєднанням вібраційного збурення та обертання робочої камери створюється комбінований режим руху частинок, зони якого можна умовно поділити на три області:

1. Зона активного перемішування – ближче до центральної частини камери, де компоненти перебувають у хаотичному русі.
2. Зона максимального контакту – ближче до стінок камери, де дія відцентрових сил підвищує контактну взаємодію вільного абразиву та деталей.
3. Зона вільного падіння – коли компоненти, знаходячись у верхній частині камери тимчасово відриваються від маси середовища та знову падаючи занурюються в неї.

На основі вищенаведеної структурної схеми виконаємо компоновання що полягає в раціональному розташуванні основних агрегатів та елементів обладнання в єдиній системі. Конструктивна схема установки наведена на рис 2.2.



1 – станина, 2 – пружини, 3 – корпус, 4 – вал, 5 – дебаланси, 6 – ходовий гвинт,
 7 – електродвигун, 8 – пасова передача, 9 – рама, 10 – підшипники, 11 –
 обертова робоча камера, 12 – муфта, 13 – двигун постійного струму
 Рисунок 2.2 – Конструктивна схема комбінованої віброустановки

Установка складається зі станини 1, на якій через пружини 2 встановлений корпус 3, в якому знаходиться керований дебалансний віброзбудувач, що

складається з валу 4, на якому розміщені дебаланси 5, один з яких є рухомим. Ходовим гвинтом 6 з маховичком здійснюють переміщення рухомого дебаланса 5. Рух керованого дебалансного віброзбуджувача здійснюється електродвигуном 7 через пасову передачу 8. На корпусі 3 жорстко закріплена рама 9, в яку встановлені підшипники 10 за допомогою яких закріплено вал 10 горизонтально розміщеної робочої камери 11.

Вал 10 через еластичну муфту 12 отримує обертовий рух від автономного електродвигуна постійного струму 13 з вбудованим планетарним редуктором, який закріплено на кронштейні 14.

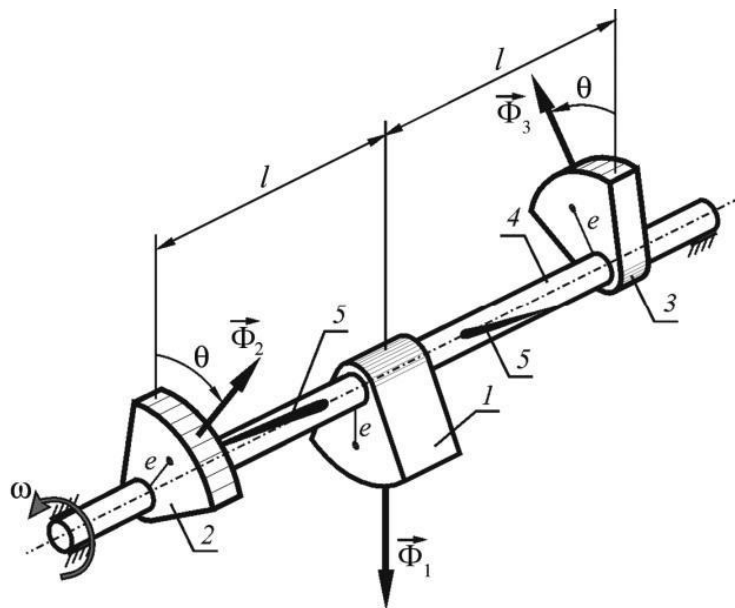
Віброустановка працює наступним чином. Після засипки оброблюваних деталей та абразивного робочого середовища в обертова робочу камеру 11, відбувається запуск в динамічно зрівноваженому стані керованого віброзбуджувача з дебалансами 5 вмиканням електродвигуна 7, який через пасову передачу 8 приводить в рух вал 4. Після встановлення усталеного режиму, відбувається керування рухомими дебалансами 5 шляхом зміни взаємного положення за допомогою ходового гвинта 6, чим забезпечується регулювання інтенсивності вібраційного збурення віброплатформи. В той же час, відбувається подача живлення на електродвигун постійного струму 13, що приводить в обертовий рух робочу камеру 11, частота обертання якого може регулюватись в широкому діапазоні шляхом зміни значення подачі напруги. Цим забезпечується активне комбіноване перемішування компонентів робочого середовища в камері 11 вібраційним впливом та відцентровою силою, створюються складні просторові траєкторії руху компонентів робочого середовища, що дозволяє підвищити якість поверхні оброблюваних деталей складної форми зі зменшенням тривалості процесу.

Таким чином, запропоноване конструктивне рішення нової установки дає можливість реалізувати комбіновану віброобробку поверхонь деталей складної форми в середовищі вільних абразивів. Для проведення експериментальних досліджень та визначення оптимальних режимів роботи обладнання передбачена незалежна зміна значень величин віброзбурення та обертання. Використання

існуючої віброплатформи верстату ВІО – 8 дозволяє суттєво зменшити час на розробку та витрати на виготовлення дослідного обладнання.

2.2 Визначення динамічного впливу керованого вібробудувача

На рис. 2.3 наведена конструктивна схема керованого дебалансного відцентрового вібробудувача що складається з двох дебалансів 2 та 3, які мають можливість змінювати взаємне положення на кут θ , та обертаються на одному валу 4 з кутовою швидкістю ω . Дебаланс 1 не може змінювати свого положення на валу 4.



1 – нерухомий дебаланс, 2, 3 – рухомі дебаланси, 4 – вал, 5 – гвинтові канавки

Рисунок 2.3 – Конструктивна схема керованого вібробудувача

Механізм керування переміщує рухомі дебаланси 2 та 3 вздовж валу 4. При цьому відповідні шарові шпонки, перекочуючись по відповідним гвинтовим канавкам 5, зумовлюють узгоджений поворот рухомих дебалансів відносно нерухомого в протилежні напрямки. Таким чином, рухомі дебаланси 2 та 3 виконують види рухів:

- обертаються на дебалансному валу 4;
- переміщуються механізмом керування вздовж осі валу 4 в протилежні сторони;

– за допомогою шарових шпонок, що перекочуються по канавкам 5, повертаються від своїх початкових положень у взаємно протилежні напрями.

Визначимо їх динамічний вплив у положенні, показаному на схемі рис.2.4, де рухомі дебаланси зміщені від нерухомого на величину l та повернуті від початкових положень на відповідний кут θ .

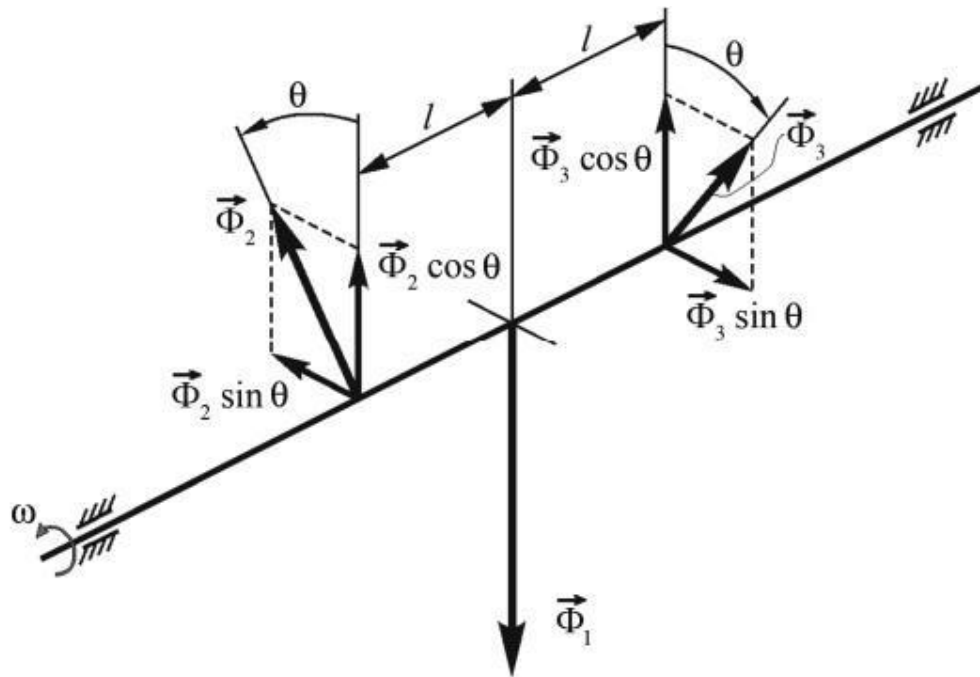


Рисунок – 2.4 Розрахункова схема керованого вібробуджувача

Розклавши сили Φ_2 та Φ_3 на їх ортогональні складові, як це показано на розрахунковій схемі на рис. 2.4, отримаємо еквівалентну вихідній системі сил $\{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}$ нову систему з п'яти сил. У будь-якому положенні обертового дебалансного вала сили Φ_1 , $\Phi_2 \cos \theta$ та $\Phi_3 \cos \theta$ колінеарні, а напрямки сил $\Phi_2 \cos \theta$ та $\Phi_3 \cos \theta$ завжди протилежні напрямку сили Φ_1 . Зі схеми на рис. 2.4 видно, що лінії дії та напрямки векторів Φ і $M(\Phi_2 \sin \theta, \Phi_3 \sin \theta)$ збігаються з відповідними параметрами сили Φ_1 . Тоді отримуємо, що вихідна система сил $\{\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3\}$ еквівалентна сукупності сили Φ та пари сил $\Phi_2 \sin \theta, \Phi_3 \sin \theta$. З цього можна визначити значення головного вектору сил інерції дебалансів

$$\Phi = 2me\omega^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (2.1)$$

та значення головного вектору моменту сил інерції дебалансів

$$M = me\omega^2 \cdot \frac{d}{2\operatorname{tg}\gamma} \sin\theta, \quad (2.2)$$

де m – маса дебаланса;

d – діаметр дебалансного валу;

e – ексцентриситет;

ω – кутова швидкість обертання дебалансів;

θ – кут між дебалансами;

γ – кут нахилу дебалансу до горизонтальної площини.

Вісь обертання віброзбудувача здійснює гвинтовий коливальний рух, траєкторія якого зображена на рис. 2.5 і описується конічною поверхнею другого порядку [91]. З огляду на це можна стверджувати, що амплітуди коливань точок, розташованих уздовж поздовжньої осі дебалансного валу 4, є різними. Зі збільшенням відстані L зростає відцентровий момент інерції дебалансів, що призводить до підвищення віброзбудуючої сили і як наслідок амплітуди коливань віброплатформи.

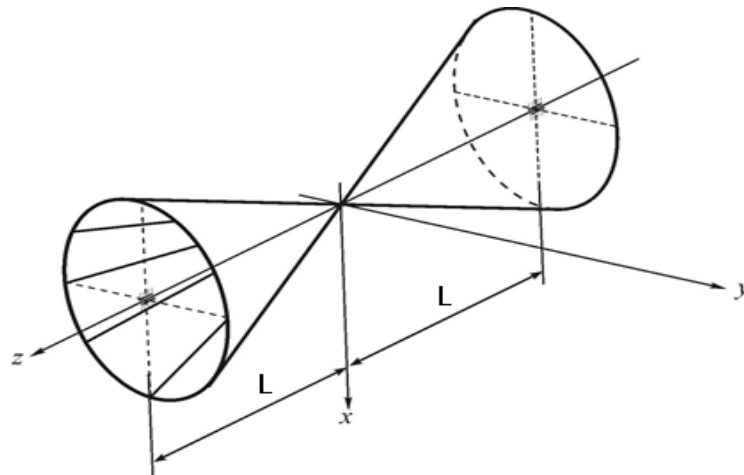


Рисунок 2.5 – Траєкторія руху вісі дебалансного віброзбудувача

Таким чином, створене вібраціне поле від даного керованого віброзбудувача має гвинтову структуру та створює коливання віброплатформи одночасно в поздовжній та поперечній площинах. Обертова робоча камера

жорстко закріплена на віброплатформі буде коливатися по складній просторовій траєкторії та додатково обертатися навколо своєї осі за допомогою окремого електроприводу.

2.3 Визначення кінетичної енергії обертової робочої камери

Для спрощення визначення кінетичної енергії приймаємо такі припущення:

- всі компоненти віброустановки та їх з'єднання є абсолютно жорсткими;
- обертова робоча камера не змінює геометричну форму під час роботи, а її внутрішня поверхня є ідеально гладкою;
- вплив повітря на рух частинок не враховується, оскільки він є незначним у порівнянні з дією інших сил.

Для складання рівнянь руху обертової робочої камери, що є активним робочим органом, визначимо загальну кінетичну енергію установки з врахуванням віброзбурювальної сили та обертального руху. Оскільки маємо складний рух, то для визначення кінетичної енергії скористаємось теоремою Кеніга, яка дозволяє представити повну кінетичну енергію досліджуваного об'єкта у вигляді суми енергії поступального руху центру мас та енергії внутрішніх рухів тіл відносно цього центру мас

$$T = T_{ц.м.} + T_{вн}, \quad (2.3)$$

де $T_{ц.м.}$ – кінетична енергія поступального руху центра мас системи;

$T_{вн}$ – кінетична енергія відносного руху елементів системи щодо центра мас.

Для установки, що розглядається, поступальний рух створюється гармонійними коливаннями віброплатформи, на яку встановлена обертова робоча камера, який можна розкласти по координатним осям x , y , z .

Швидкість руху установки, як одного тіла з масою M

$$\vec{V}_{ц.м.} = (\dot{x}_c + \dot{y}_c + \dot{z}_c). \quad (2.4)$$

Кінетична енергія поступального руху

$$T_{ц.м.} = \frac{1}{2}M(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2), \quad (2.5)$$

де M – загальна маса, що включає віброплатформу, обертову робочу камеру та компоненти середовища.

Кінетична енергія обертового руху робочої камери

$$T_k = \frac{1}{2}J_k\varphi^2, \quad (2.6)$$

де J_k – момент інерції робочої камери відносно осі її обертання.

$$J_k = J_{kn} + m_{сеп}r_{еф}^2, \quad (2.7)$$

де J_{kn} – маса власне обертової робочої камери;

$m_{сеп}$ – маса компонентів робочого середовища;

$r_{еф}$ – координата (радіус) приведенного центра мас компонентів робочого середовища обертової камери.

Нехай дебаланс віброзбуджувача має масу m_{ei} , ексцентриситет e_i та обертається з кутовою швидкістю ω . Тоді його кінетична енергія

$$T_d = \frac{1}{2}m_{ei}e_i^2\omega_i^2. \quad (2.8)$$

У випадку, коли компоненти робочого середовища мають однакову середньоквадратичну швидкість

$$v_{серед} = \sqrt{(a\omega)^2 + (\varphi r_{еф})^2}, \quad (2.9)$$

де a – амплітуда віброколювання;

ω – частота колювань;

φ – швидкість обертання камери.

Тоді

$$T_{серед.} = \frac{1}{2}m_{серед}v_{серед}^2. \quad (2.10)$$

Таким чином, повна кінетична енергія обертової робочої камери

$$T = \frac{1}{2}M(\dot{x}_c^2 + \dot{y}_c^2 + \dot{z}_c^2) + \frac{1}{2}J_k\varphi^2 + \frac{1}{2}m_{ei}e^2\omega_i^2 + \frac{1}{2}m_{серед}v_{серед}^2. \quad (2.11)$$

2.4 Визначення узагальнених сил обертової робочої камери

Для побудови рівнянь Лагранжа другого роду визначимо узагальнені сили, які діють на обертову робочу камеру. Для цього скористаємось загальним принципом, який базується на понятті елементарної роботи та нескінченно малих переміщень.

Кожній узагальненій координаті q_i відповідає певна узагальнена сила Q_i , що дозволяє в загальному випадку охарактеризувати вплив зовнішніх сил через узагальнені координати. Кількість таких сил збігається з числом узагальнених координат, отже, у нашому випадку маємо чотири узагальнені сили: Q_x , Q_y , Q_z , Q_φ , які відповідають координатам x , y , z та куту обертання камери φ .

Ці сили є результатом дії реальних зовнішніх сил, що прикладені до різних точок установки, зокрема сили тяжіння, реакцій опор, а також віброзбуджуючих зусиль.

Для визначення узагальненої сили, яка відповідає певній координаті, наприклад, q_i , застосуємо принцип визначення елементарної роботи. Суть методу полягає в тому, що кожній координаті надається нескінченно малий приріст δq_i . Нескінченно малі переміщення можна подати у вигляді векторів $\delta \vec{s}_j$ для всіх точок прикладання зовнішніх сил P_j .

Обчислимо суму елементарних робіт усіх зовнішніх сил на цих можливих переміщеннях

$$\sum_{j=1}^n (P_j \cdot \delta \vec{s}_j \cdot \cos(\vec{P}_j, \delta \vec{s}_j)) = \delta A_i, \quad (2.12)$$

враховуючи, що

$$\delta A_i = Q_i \cdot \delta q_i. \quad (2.13)$$

Визначимо Q_i

$$Q_i = \frac{\delta A_i}{\delta q_i}. \quad (2.14)$$

Узагальнені сили можуть бути також виражені через компонентну форму елементарної роботи зовнішніх сил. У цьому випадку для кожної узагальненої координати q_j узагальнена сила визначається через елементарну роботу довільної сили P_k

$$Q_j = \sum_j \vec{P}_j \cdot \frac{\partial \vec{r}_j}{\partial q_i} = \sum_j \left(P_{xj} \frac{\partial x_j}{\partial q_i} + P_{yj} \frac{\partial y_j}{\partial q_i} + P_{zj} \frac{\partial z_j}{\partial q_i} \right), \quad (2.15)$$

де P_{jx} , P_{jy} і P_{jz} – проекції цієї довільної сили P_j на відповідні осі;
 q_i – відповідна узагальнена координата.

Для комбінованої установки, що розглядається та яка складається з вібраційної платформи з закріпленою на ній обертовою камерою, визначимо незалежні параметри – узагальнені координати, які однозначно описують положення всієї системи в просторі:

- $x(t)$ – зміщення центру мас робочої камери вздовж осі Ox ;
- $y(t)$ – зміщення центру мас робочої камери вздовж осі Oy ;
- $z(t)$ – зміщення центру мас робочої камери вздовж осі Oz ;
- $\varphi(t)$ – кут повороту робочої камери навколо осі Ox .

Ці координати визначають просторове положення обертової робочої камери в інерційній системі координат та описує комбінований рух від дії та обертання.

Ступінь вільності дорівнює чотирьом, а узагальнені координати можна подати у вигляді

$$q_1 = x(t), \quad q_2 = y(t), \quad q_3 = z(t), \quad q_4 = \varphi(t). \quad (2.16)$$

Відповідні узагальнені швидкості системи задаються як похідні від координат

$$\dot{q}_1 = \dot{x}(t), \quad \dot{q}_2 = \dot{y}(t), \quad \dot{q}_3 = \dot{z}(t), \quad \dot{q}_4 = \dot{\varphi}(t). \quad (2.17)$$

Застосування рівнянь Лагранжа другого роду дозволяє сформулювати динамічну модель як систему диференціальних рівнянь другого порядку.

З метою наочності зобразимо механічну систему віброустановки на кінематичних схемах рис. 2.6 – 2.8 в довільний момент часу t .

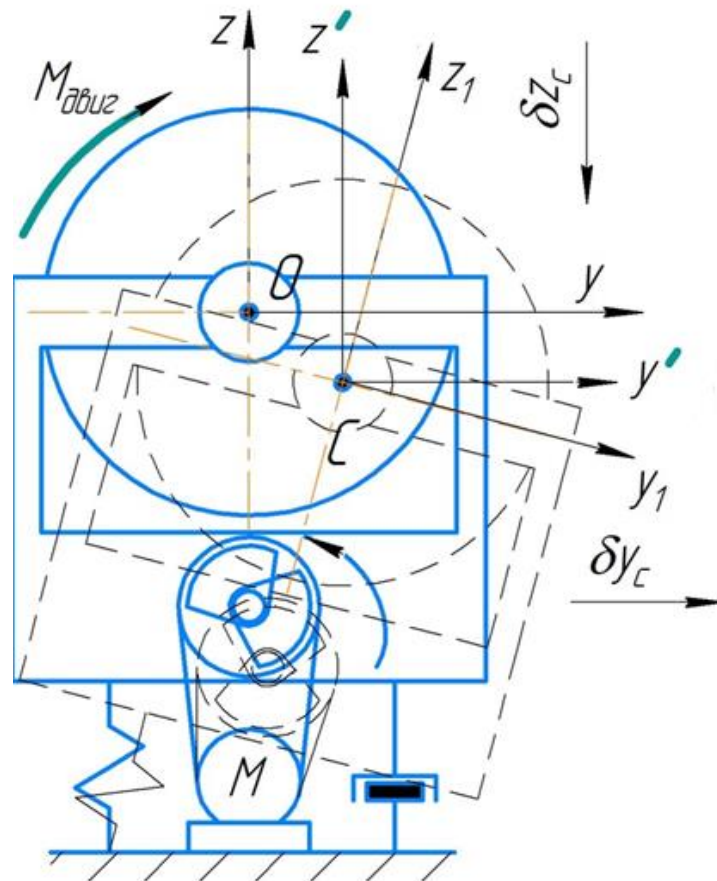


Рисунок 2.6 – Кінематична схема віброустановки в проєкції на площину ZOY

Використовуючи ортогональну систему відліку маємо три системи координат: нерухому $Oxyz$, початком відліку координат є точка O , рухомі $Sx'y'z'$ – рухається поступально, через що її осі лишаються паралельними осям нерухомої системи координат, $Sx_1y_1z_1$ – жорстко пов'язана з робочою камерою. Центр інерції робочої камери позначається точкою C . Початок відліку O нерухомої системи $Oxyz$ пов'яжемо з центром інерції C у положенні статичної рівноваги механічної системи.

Визначимо узагальнені сили Q_i для кожної узагальненої координати системи. Враховуємо, що в системі діють сили гравітації, гвинтового вібраційного збурення, обертального руху камери та дисипативні сили

$$Q_1 = Q_{x_C}, \quad Q_2 = Q_{y_C}, \quad Q_3 = Q_{z_C}, \quad Q_4 = Q_\varphi. \quad (2.18)$$

Визначимо узагальнену силу Q_1 . Розглянемо узагальнену координату $q_1 = x_C$, що описує поступальне переміщення центра мас робочої камери уздовж осі Ox . Надамо їй нескінченно малий приріст

$$\delta q_1 = \delta x_C, \quad (2.19)$$

залишаючи всі інші узагальнені координати незмінними.

Визначимо, які можливі переміщення зазнають точки прикладання зовнішніх сил, діючих на систему, внаслідок приросту δx_C . У цьому випадку всі точки камери зміщуються вздовж осі Ox на величину δx_C .

Обчислимо елементарну роботу δA_1 сил на визначених можливих переміщеннях точок. Сили, що мають складову вздовж осі Ox

- інерційну силу поступального руху камери;
- силу пружності у напрямку вісі Ox та силу демпфування.

Сила збурення від віброзбудувача не має проєкції на вісь Ox , оскільки його дебаланси обертаються навколо цієї ж осі. Гвинтові складові збурення та обертання робочої камери також не створюють складової сили в напрямку x , а тому не враховуються в розрахунку цієї узагальненої сили.

Сумарна елементарна робота зовнішніх сил у напрямку Ox запишеться як

$$\delta A_1 = (-m\ddot{x}_C - c_x x_C - b_x \dot{x}_C) \delta x_C. \quad (2.20)$$

де m – це ефективна маса всієї рухомої частини системи, що складається з маси робочої камери з завантаженим в неї середовищем, маси віброплатформи та кріпильних елементів;

c – коефіцієнт пружності;

b – коефіцієнт демпфування.

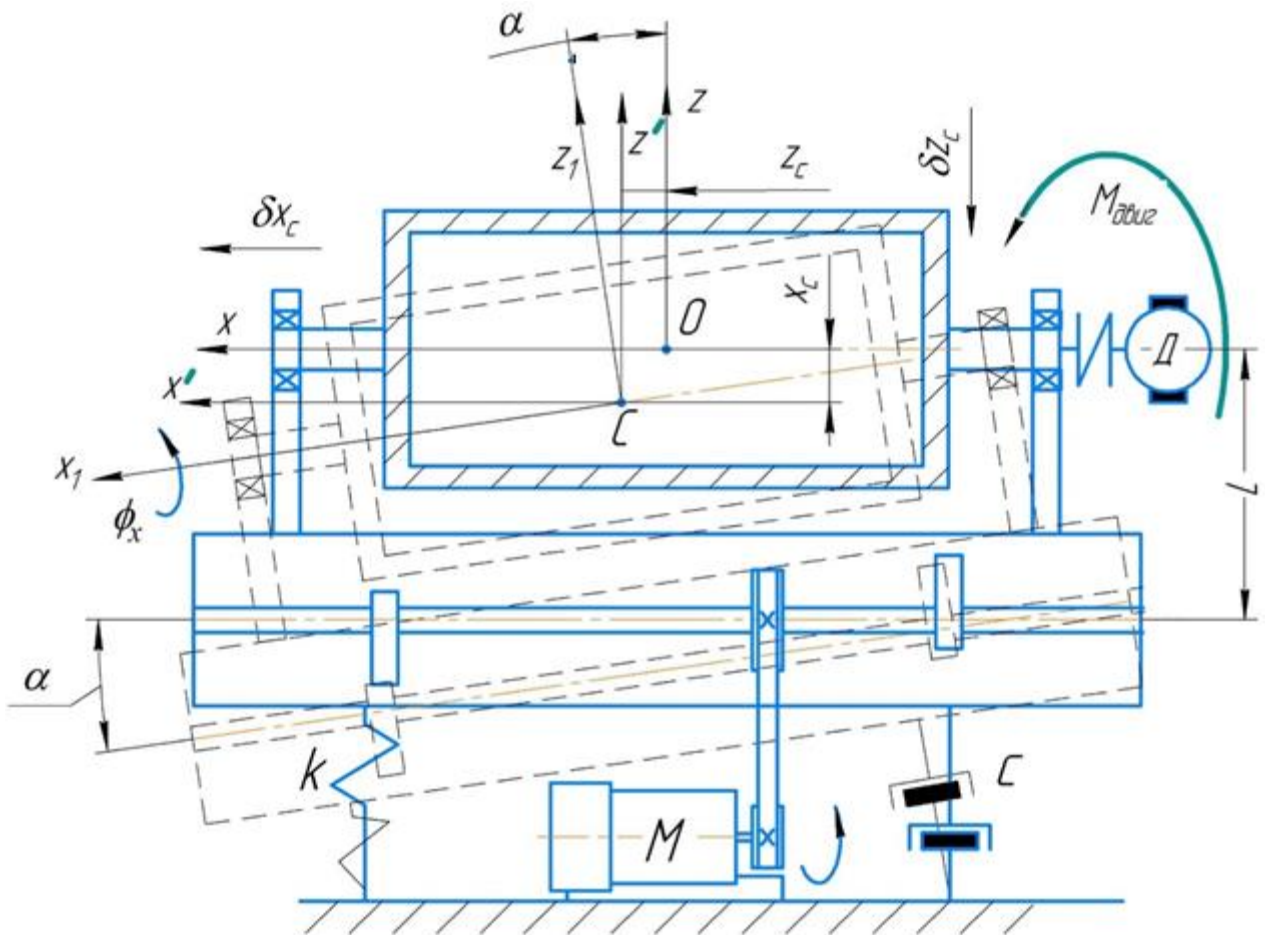


Рисунок 2.7 – Кінематична схема віброустановки в проєкції на площину XOZ

Звідси, за визначенням узагальненої сили, маємо

$$Q_1 = \frac{\partial \delta A_1}{\partial \delta x_C} = -m x_C - c_x x_C - b_x x_C. \quad (2.21)$$

Визначимо узагальнену силу Q_2 . Розглянемо узагальнену координату $q_2 = u_C$, що описує поступальне переміщення центра мас робочої камери уздовж осі Oy . Надаємо їй нескінченно малий приріст

$$\delta q_2 = \delta y_C, \quad (2.22)$$

Обчислимо елементарну роботу δA_2 від сил на визначених можливих переміщеннях точок. Сили, що мають складову вздовж осі Oy :

- інерційна сила маси камери вздовж осі y ;
- сила від пружних елементів у напрямку y ;

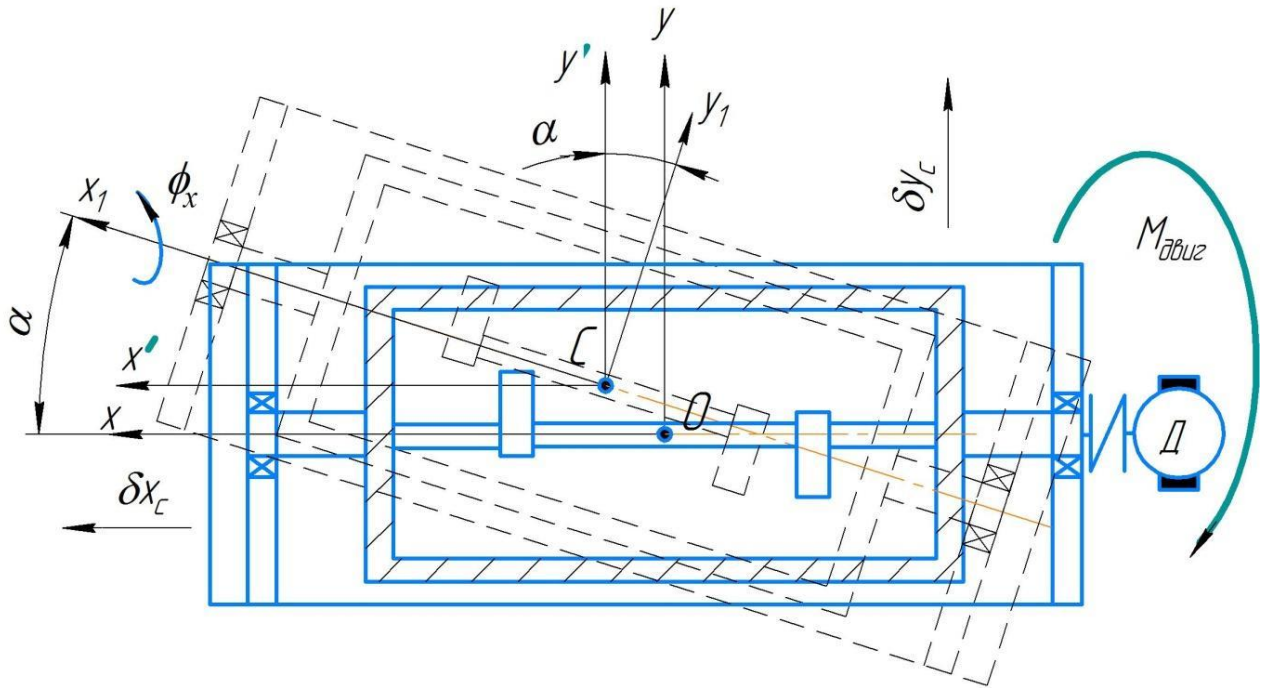


Рисунок 2.8 – Кінематична схема віброустановки в проекції на площину XOY

– сила демпфування у цьому ж напрямку;
 – гвинтова складова збудовальної сили від віброзбудувача, яка виникає через асиметричне розташування дебалансів і створює віброзбудовуючу силу вздовж осі y .

Позначимо віброзбудовуючу силу вздовж осі y як F_{zy}

$$F_{zy} = 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos(\omega t), \quad (2.23)$$

де m_e – маса дебалансів;

e – ексцентриситет;

ω_e – кутова швидкість обертання дебалансів;

θ – кут, що визначає положення кожного рухомого дебалансу відносно свого початкового положення;

ω – кут нахилу гвинтової канавки вала дебалансів.

Сумарна елементарна робота сил у напрямку Oy запишеться як

$$\delta A_2 = (-m\ddot{y}_c - c_y \dot{y}_c - b_y \dot{y}_c + 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos(\omega t)) \delta y_c. \quad (2.24)$$

Звідси, узагальнена сила

$$Q_2 = \frac{\partial \delta A_2}{\partial \delta y_C} = -m\ddot{y}_C - c_y y_C - b_y \dot{y}_C + 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos(\omega t). \quad (2.25)$$

Визначимо узагальнену силу Q_3 . Розглянемо узагальнену координату $q_3 = z_C$, що описує поступальне переміщення центра мас робочої камери уздовж осі Oz . Надаємо їй нескінченно малий приріст

$$\delta q_3 = \delta z_C. \quad (2.26)$$

Обчислимо елементарну роботу δA_3 від сил на визначених можливих переміщеннях точок. Сили, що мають складову вздовж осі Oz :

- сила тяжіння mg ;
- інерційна сила $-mz_C$;
- сила пружності віброізоляційних опор $-c_z z_C$;
- сила демпфування $-b_z \dot{z}_C$;

Сила вібробурення від дебалансів $F_{zC}(t)$, що створюється їх обертанням навколо осі, перпендикулярної до Oz (в нашому випадку, це вертикальна складова сила вібробурення, прикладена до платформи)

$$F_{zC} = 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\omega t). \quad (2.27)$$

Сумарна елементарна робота сил у напрямку Oz запишеться як

$$\delta A_3 = (-m\ddot{z}_C - c_z z_C - b_z \dot{z}_C - mg + F_{zC} + 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\omega t)) \delta z_C. \quad (2.28)$$

Звідси, узагальнена сила Q_3

$$Q_3 = \frac{\partial \delta A_3}{\partial \delta z_C} = -m\ddot{z}_C - c_z z_C - b_z \dot{z}_C - mg + F_{zC} + 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\omega t). \quad (2.29)$$

Розглядаємо узагальнену координату $q_4 = \varphi$, що описує кутове положення робочої камери відносно осі її власного обертання (вісь Ox , згідно з кінематичною схемою).

Надамо їй нескінченно малий приріст

$$\delta q_4 = \delta \varphi. \quad (2.30)$$

При прирості $\delta \varphi$, усі точки робочої камери здійснюють нескінченно малі обертальні рухи навколо її осі. Радіус-вектор переміщення довільної точки r_j

$$\delta \vec{s}_j = \vec{r}_j \times \delta \vec{\varphi}, \quad (2.31)$$

де $\delta \vec{\varphi} = \delta \varphi \cdot \hat{i}_x$, оскільки обертання відбувається навколо осі Ox .

Сили, які створюють протидію обертанню:

- обертовий момент приводного двигуна камери $M_{дв}$;
- момент інерційної сили $J\varphi$;

де $J = J_{кам} + J_{серед}$, тобто складається з моментів інерції обертової робочої камери та завантажених в неї компонентів.

Момент опору $M_{оп}$ враховує всі сили, що протидіють обертанню. Основними є сили тертя компонентів середовища зі стінками камери та між собою. Математично момент опору може бути виражений через функцію швидкості

$$M_{оп} = \alpha \cdot \omega + \beta \cdot \omega^2, \quad (2.32)$$

де ω – кутова швидкість обертання;

α та β – коефіцієнт що враховують опір компонентів середовища;

Коефіцієнти α і β залежать від типу абразиву, заповнення робочої камери та форми оброблюваних деталей.

$$\delta A_4 = (-J\ddot{\varphi} - M_{оп} - b_\varphi \dot{\varphi} + M_{ов}) \delta \varphi. \quad (2.33)$$

Звідси, узагальнена сила Q_4

$$Q_4 = \frac{\partial \delta A_4}{\partial \delta \varphi} = -J\ddot{\varphi} - M_{оп} - b_\varphi \dot{\varphi} + M_{ов}, \quad (2.34)$$

де $b_\varphi \varphi$ – момент від додаткових дисипативних сил.

Складемо систему рівнянь узагальнених сил віброустановки

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_1 = -m\ddot{x}_C - c_x \dot{x}_C - b_x x_C \\ Q_2 = -m\ddot{y}_C - c_y \dot{y}_C - b_y y_C + 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos(\omega t) \\ Q_3 = -m\ddot{z}_C - c_z \dot{z}_C - b_z z_C - mg + 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\omega t) \\ Q_4 = -J\ddot{\varphi} - M_{on} - b_\varphi \dot{\varphi} + M_{\delta\delta} + m_e e \omega_e^2 \cdot \sin \theta \cdot \frac{d}{2 \cdot \tan \gamma} \end{array} \right. \quad (2.35)$$

2.5 Складання диференціальних рівнянь руху обертової робочої камери

Застосовуючи принцип Д'Аламбера-Лагранжа до визначення кінетичної енергії та відповідних узагальнених сил, можна вивести систему диференціальних рівнянь, яка описує рух обертової робочої камери. У загальному випадку рівняння динаміки встановлює зв'язок між узагальненими координатами, силами та кінетичною енергією системи у такому вигляді

$$Q_i = \frac{\partial T}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right), \quad (2.36)$$

де q_i – узагальнені координати;

T – кінетична енергія;

Q_i – узагальнені сили.

Складемо рівняння Лагранжа 2-го роду для кожної координати.

1. Диференціальне рівняння за координатою x_c :

Кінетична енергія за координатою x_c

$$T = \frac{1}{2} m \dot{x}_c^2, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{x}_c} = m \dot{x}_c, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_c} \right) = m \ddot{x}_c. \quad (2.37)$$

Таким чином, отримуємо рівняння

$$m \ddot{x}_c + b_x \dot{x}_c + c_x x_c = 0. \quad (2.38)$$

Права частина дорівнює нулю, тому що у напрямку осі X відсутні сили.

2. Диференціальне рівняння за координатою y_c .

Кінетична енергія за координатою y_c

$$T = \frac{1}{2} m \dot{y}_c^2, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{y}_c} = m \dot{y}_c, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}_c} \right) = m \ddot{y}_c. \quad (2.39)$$

Отже, диференціальне рівняння руху має вигляд

$$m \ddot{y}_c + b_x \dot{y}_c + c_x y_c = 2m_e e \omega^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \sin(\omega t). \quad (2.40)$$

Наведене рівняння описує поперечний рух по осі Y обертової робочої камери.

3. Диференціальне рівняння за координатою z_c

$$T = \frac{1}{2} m \dot{z}_c^2, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{z}_c} = m \dot{z}_c, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{z}_c} \right) = m \ddot{z}_c. \quad (2.41)$$

Отже, диференціальне рівняння руху має вигляд

$$m \ddot{z}_c + b_x \dot{z}_c + c_x z_c = -mg + 2m_e e \omega^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} \right) \sin(\omega t). \quad (2.42)$$

Рівняння описує вертикальні коливання обертової робочої камери.

4. Диференціальне рівняння за φ

$$T = \frac{1}{2} m \dot{\varphi}, \quad \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} = m \dot{\varphi}, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} \right) = m \ddot{\varphi}. \quad (2.43)$$

Диференціальне рівняння

$$J \ddot{\varphi} + b_\varphi \dot{\varphi} + M_{on} = M_{os} + m_e e \omega_e^2 \cdot \sin \theta \cdot \frac{d}{2 \cdot \tan \gamma}. \quad (2.44)$$

Система диференціальних рівнянь руху обертової робочої камери

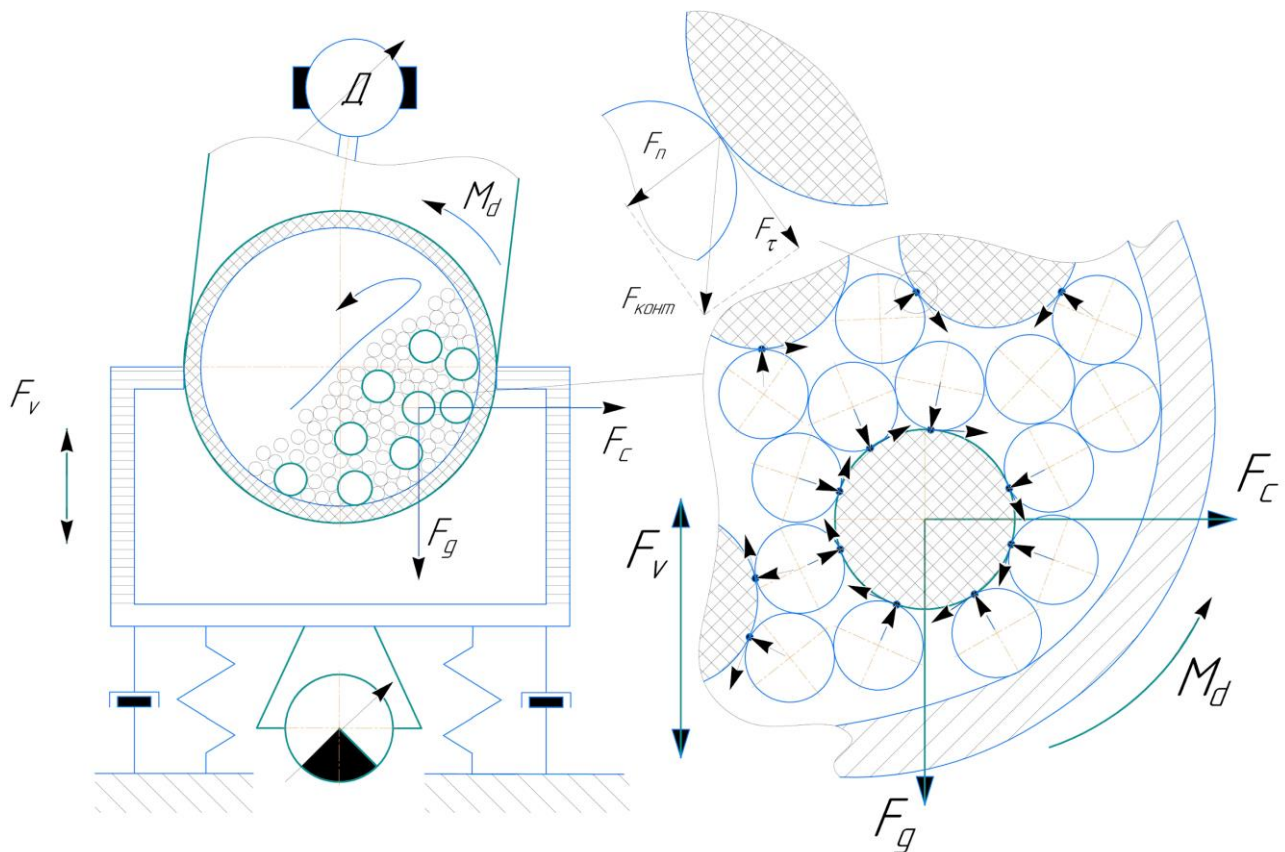
$$\begin{cases} m\ddot{x}_c + b_x\dot{x}_c + c_x x_c = 0 \\ m\ddot{y}_c + b_y\dot{y}_c + c_y y_c = 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\omega t) \\ m\ddot{z}_c + b_z\dot{z}_c + c_z z_c = -mg + 2m_e e \omega_e^2 \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin(\omega t) \\ J\ddot{\phi} + b_\phi\dot{\phi} + M_{on} = M_{os} + m_e e \omega_e^2 \cdot \sin\theta \cdot \frac{d}{2 \cdot \tan\gamma} \end{cases} \quad (2.45)$$

Отримані рівняння показують, що рух робочої камери визначається амплітудою віброколивання, частотою обертання та масою компонентів робочого середовища. При цьому найбільший вплив має частота обертання робочої камери, оскільки її дія додатково зумовлюється масово-інерційним впливом. Наведені параметри можуть бути використані як основні фактори подальших експериментальних досліджень.

2.6 Моделювання контактної взаємодії компонентів середовища робочої камери комбінованої віброустановки

У процесі комбінованої віброабразивної обробки поверхні деталей зазнають впливу ударів та тертя від абразивних частинок, що перебувають під одночасною дією вібраційного впливу та обертального руху камери, сили тяжіння. Основний механізм знімання матеріалу в таких умовах пов'язаний не з постійною дією інструмента, як у класичних методах різання, а з сукупністю багатьох контактів, які динамічно розподілені у просторі. Для того щоб адекватно описати ці мікромеханічні взаємодії необхідна методика моделювання, яка враховує особливості фізики процесу комбінованої віброабразивної обробки.

Водночас, враховуючи складність динамічних умов у робочій камері, застосування чисельного моделювання, яке ґрунтується на методі дискретних елементів (DEM), дозволить детальніше відтворити просторово-часовий розподіл контактних взаємодій та зменшити обсяг дорогих експериментальних



F_v – сила від вібраційного впливу, M_d – момент обертання, F_g – сила тяжіння,
 F_c – відцентрова сила

Рисунок 2.9 – Схема дії сил у віброустановці з роторною камерою

досліджень. Точність такого моделювання безпосередньо залежить від того, наскільки адекватною та фізично достовірною є математична модель, яка використовується як основу для обчислень числовим методом дискретних елементів.

Розглянемо кінематику процесу, що визначає рух вільних абразивних частинок відносно поверхні оброблюваних деталей. Вони рухаються хаотично, мають різну швидкість та напрямок руху, що залежить від режимів процесу. Контакт між абразивною частинкою та поверхнею деталі залежить від її розміру, форми та механічних властивостей матеріалу. Кожна частинка може здійснювати кілька контактів з поверхнею за один цикл обробки, що призводить до поступового видалення матеріалу. Таке переміщення може бути описане двома основними видами руху:

– осциляційний рух, що полягає в переміщенні вгору та вниз від сили віброзбурення;

– обертальний рух частинок вільного абразиву навколо своєї осі, що виникає внаслідок тертя між частинками та впливу сил осциляційного руху

$$r(t) = r_0(t) + A \sin(\omega t), \quad (2.46)$$

де $r(t)$ – траєкторія руху абразивної частинки в часі;

$r_0(t)$ – поступальний рух частинки вздовж поверхні деталі;

A – амплітуда коливань частинки;

ω – частота коливань.

Розглянемо рух окремої частинки вільного абразиву робочого середовища W_m , яка рухається відносно поверхні оброблюваної деталі зі швидкістю V_r , та утворює кут θ відносно нормалі до оброблюваної поверхні. Цей кут визначає напрям і величину тангенціальної складової відносно швидкості V_r . Після контакту абразивна частинка відбивається від деталі з відносною швидкістю V_r' і кутом θ' , як показано на рис. 2.10.

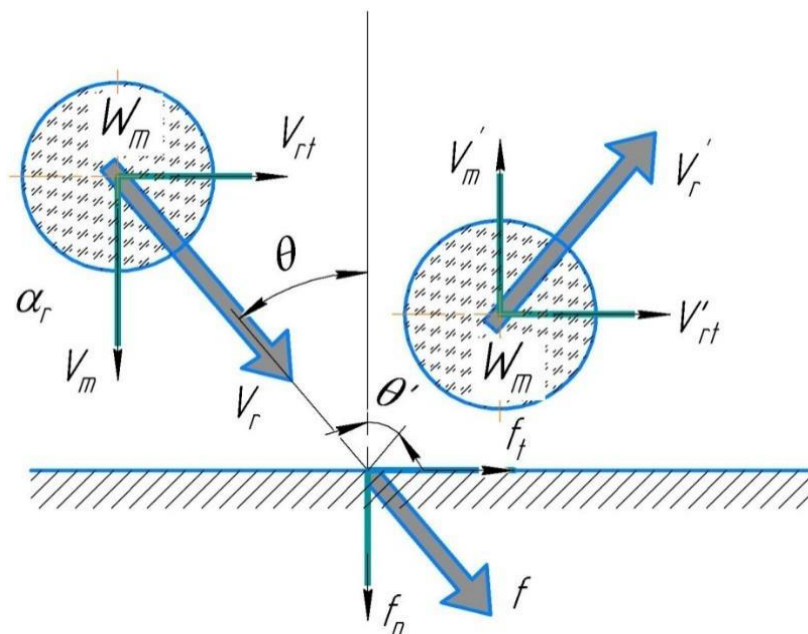


Рисунок 2.10 – Схема руху одиної частинки абразивного середовища

Відносну швидкість V_r можна виразити як функцію амплітуди віброколивання A_r з частотою коливань Ω

$$v_r = A_r \cdot \Omega \cdot \cos(\Omega t + \varphi). \quad (2.47)$$

Середню швидкість \bar{v}_r можна отримати наступним чином

$$\bar{v}_r = (\sqrt{2} / 2) \cdot A_r \cdot \Omega. \quad (2.48)$$

Середня тангенціальна швидкість до контакту \bar{v}_r ідентична середній тангенціальній швидкості після контакту \bar{v}_r' . Однак через поглинання, середні нормальні швидкості відрізняються

$$\bar{v}_{rt} = \bar{v}'_{rt} = (\sqrt{2} / 2) \cdot A_r \cdot \Omega \cdot \sin\theta. \quad (2.49)$$

Відносна середня швидкість $\bar{v}_c = \bar{v}_{rt} + \bar{v}_{sl}$ є сумою середньої тангенціальної швидкості \bar{v}_{rt} і відносної середньої ковзної швидкості між абразивним середовищем і оброблюваною деталлю \bar{v}_{sl} , як зазначено нижче

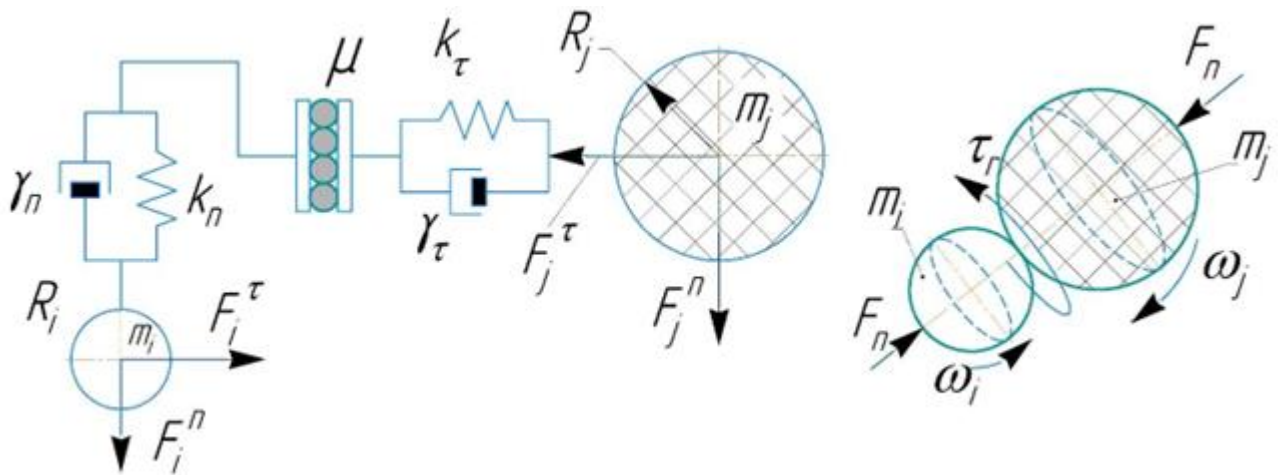
$$\bar{v}_c = \bar{v}_{rt} + \bar{v}_{sl}. \quad (2.50)$$

Збільшення амплітуди віброколивань зменшує кут θ та збільшує нормальну складову швидкості. Зі зростанням частоти коливань збільшується кут θ та тангенціальна швидкість, яка впливає на мікрорізання. Таким чином, зміною параметрів віброобладнання можливо керувати кутом θ для створення оптимального співвідношення між ударною і ковзною дією.

По даним експериментальних трибологічних досліджень оптимальні значення кута θ становлять $30^\circ - 60^\circ$ [82].

Розглянемо динамічні взаємодії у робочому середовищі. Вихідні припущення контактної моделі: частинки абразиву і деталі розглядаються як кулі зі скінченним радіусом R_p і жорсткою поверхнею. Обертова робоча камера рухається з кутовою швидкістю ω , а платформа вібрає з амплітудою A і частотою

f. Для опису контактної взаємодії використаємо теорію Герца-Міндіна з врахуванням моменту пари сил, напрямок якого залишається незмінним.



m_i – маса абразивної частинки, m_j – маса деталі, k_n , γ_n – нормальні коефіцієнти пружності та демпфування, k_τ , γ_τ – тангенціальні коефіцієнти пружності та демпфування, μ – коефіцієнт тертя, F_n , F_τ – нормальні та тангенціальні сили взаємодії

Рисунок 2.11 – Схема моделювання контактної взаємодії компонентів середовища обертovій робovій камері комбiнованої вiброустановки

У робovій обертovій камері вiброустановки дiють:

– сила вiброзбурення

$$F_{v,i} = m_i a_z(t) = -A\omega_v^2 \sin(\omega_v t) \cdot e_z, \quad (2.51)$$

– прискорення

$$a_z(t) = -A\omega_v^2 \sin(\omega_v t), \quad (2.52)$$

– вiдцентрова сила

$$F_{c,i} = m_i \omega_c^2 r_i, \quad (2.53)$$

– корiолісова сила

$$F_{cor,i} = -2m_i(\omega_c \cdot v_{rel,i}). \quad (2.54)$$

Запишемо рівняння, яке враховує поступальний та обертальний рух окремої частинки описується шляхом розв'язання рівняння з врахуванням діючих сил

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{ij}^n + F_{ij}^t) + m_i g - A\omega_v^2 \sin(\omega_v t) \cdot e_z + \\ + m_i \omega_c^2 r_i - 2m_i (\omega_c \cdot v_{rel,i}), \quad (2.55)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_{ij} \cdot F_{ij}^t - \tau_{ij}^r), \quad (2.56)$$

де I_i – момент інерції;

v_i – поступальна швидкість частинки i ;

ω_i – кутова швидкість частинки i ;

F_{ij}^n – нормальна сила;

F_{ij}^t – тангенціальна сила;

τ_{ij}^r – контактний обертальний момент;

R_{ij} – відстань від центру i -ї частинки до точки контакту з j -ю частинки.

Нормальну F_n та тангенціальну F_t сили в точці контакту частинок визначимо за допомогою безковзної лінійної контактної моделі Герца-Міндліна, схема якої зображена на рис. 2.10. Кожна з цих сил у свою чергу складається з пружної та демпфувальної, які позначимо верхніми індексами e та v відповідно та запишемо

$$F_n = F_n^e + F_n^v, \quad (2.57)$$

$$F_t = F_t^e + F_t^v. \quad (2.58)$$

Тангенціальна сила визначається законом тертя Кулона

$$|F_t| \leq \mu |F_n|, \quad (2.59)$$

де μ – коефіцієнт тертя.

Після перевищення граничного значення виникає ковзання між частинками.

Сила демпфування в нормальному напрямку F_n^e визначається класичною теорією Герца при контакті двох тіл сферичної форми. Вона враховує пластичну деформацію контактної поверхні та еліпсоїдальний розподіл контактних напружень. Сила демпфування в тангенціальному напрямку F_t^e можемо описати теорією Міндліна. Вона визначається з врахуванням нормального та тангенціального перекриття, відповідно δ_n і δ_t . Тангенціальне перекриття δ_t виникає внаслідок різних значень тангенціальних швидкостей двох частинок у точці контакту. Враховуючи вищезазначене запишемо

$$F_n^e = -k_n \cdot \delta_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^* \cdot |\delta_n|} \cdot \delta_n + m_i (g + a_{vib} + a_{centr}), \quad (2.60)$$

$$F_t^e = -k_t \cdot \delta_t = 8 \cdot G^* \sqrt{R^* \cdot |\delta_n|} \cdot \delta_t, \quad (2.61)$$

де k_n і k_t – коефіцієнти нормальної і тангенціальної пружності відповідно;

$$R^* = \frac{R_i \cdot R_j}{R_i + R_j} \quad \text{– приведений радіус.}$$

Еквівалентний модуль зсуву

$$G^* = \frac{1}{\frac{2(2-\nu_i) \cdot (2-\nu_i)}{E_i} + \frac{2(2-\nu_j) \cdot (2-\nu_j)}{E_j}}. \quad (2.62)$$

Еквівалентний модуль Юнга

$$E^* = \frac{1}{\frac{1-\nu_i^2}{E_i} + \frac{1-\nu_j^2}{E_j}}, \quad (2.63)$$

де ν_i, ν_j – коефіцієнти Пуассона.

У своєму початковому формулюванні [103] запропоновано вираз для критичного коефіцієнта демпфування β , базуючись на системі з одним ступенем вільності, що складається з пружини, маси та демпфера. У роботі [104] було запропоновано, що критичний коефіцієнт демпфування β визначається за

допомогою коефіцієнта відновлення e , що характеризує втрати енергії під час зіткнень і пластичних деформацій

$$\beta = \frac{-\ln(e)}{\sqrt{\ln(e)^2 + \pi^2}}, \quad (2.64)$$

$$F_n^v = \gamma_n \cdot v_n = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \beta \sqrt{S_n \cdot m^* \cdot v_n}, \quad (2.65)$$

$$F_t^v = \gamma_t \cdot v_t = -2\sqrt{\frac{5}{6}} \cdot \beta \sqrt{S_t \cdot m^* \cdot v_t}, \quad (2.66)$$

де γ_n та γ_t – коефіцієнти нормального та тангенціального демпфування;

v_n та v_t – нормальна та тангенціальна швидкості;

$$m^* = \frac{m_i \cdot m_j}{m_i + m_j} \quad \text{– приведена маса.}$$

S_n та S_t – коефіцієнти нормальної та тангенціальної жорсткості

$$S_n = 2E^* \sqrt{R^* \cdot |\delta_n|}, \quad (2.67)$$

$$S_t = 8G^* \sqrt{R^* \cdot |\delta_n|}. \quad (2.68)$$

Опір коченню являє собою моменти сил, що передаються через зону контакту частинок. Зона контакту, яка формується коли дві частинки стискаються під нормальним навантаженням, може передавати момент завдяки силам тертя, розподіленим по площі контакту [28]. Величина контактного обертального моменту сталого напрямку τ_r пропорційна нормальній силі F_n і

спрямоване у напрямку руху кочення $\frac{\omega_{ij}}{|\omega_{ij}|}$

$$\tau_t = -\mu \cdot R^* |F_n| \frac{\omega_{ij}}{|\omega_{ij}|}, \quad (2.69)$$

де μ_r – коефіцієнт тертя при коченні;

ω_{ij} – відносна кутова швидкість частинки i відносно частинки j .

При значній різниці в розмірах деталі й абразивних частинок змінюється форма та площа контакту. Якщо розмір деталі набагато більший за розмір абразивного тіла, то зона контакту може бути значно розширена.

При цьому деталь взаємодіє з одночасно з множиною абразивних тіл, що впливає на розподіл нормальних і тангенціальних сил. Це можливо інтегруванням впливу.

Коефіцієнт співвідношення розмірів деталі R_d та абразивного тіла R_a

$$\lambda = \frac{R_d}{R_a}. \quad (2.70)$$

При значенні коефіцієнта $\lambda \gg 1$ контакт можна представити як взаємодію частинки сферичної форми з плоскою поверхнею. Тоді контактна площа A визначається

$$A = \pi R_a \delta, \quad (2.71)$$

де a – радіус контактної області;

R_a – радіус абразивної частинки;

δ – глибина проникнення.

Ця формула відрізняється від класичної моделі Герца для двох сфер, де контактна площа залежить від обох радіусів.

Тоді контактна сила визначається як

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R_a} \delta^{3/2}. \quad (2.72)$$

де E^* – приведений модуль Юнга;

Тангенціальні сили залежать від коефіцієнта тертя μ

$$F_t = \mu F_n, \quad (2.73)$$

Коефіцієнт тертя μ залежать від локального контактного тиску p

$$\mu = \mu_0(1 - \alpha p), \quad (2.74)$$

де μ_0 – початковий коефіцієнт тертя;

α – коефіцієнт, що враховує зменшення тертя від впливу віброколивання;

$p = F_n/A$ – контактний тиск.

Основні відмінності від базової моделі контактної взаємодії при великому співвідношенні розмірів $\lambda \gg 1$ є такі:

- Нормальна сила залежить переважно від радіуса абразивної частинки R_a ;
- Контактний тиск зменшується зі збільшенням деталі, збільшуються сили тертя та енергетичні втрати.

Загальна сила F_p , яка діє на поверхню оброблюваної деталі масою m_p

$$F_p = \sum (F_n + F_t) + m_p g. \quad (2.75)$$

Прискорення частинки \ddot{x}_p можна визначити за допомогою другого закону

Ньютона

$$F_p = m_p \cdot \ddot{x}_p \Rightarrow \ddot{x}_p = \frac{F_p}{m_p}. \quad (2.76)$$

Інтегруючи прискорення у часі, можна визначити швидкість і положення частинки

$$x_p = \iint \ddot{x}_p dt. \quad (2.77)$$

Для часового інтегрування рівнянь руху може бути використаний метод Верле [95]. Протягом кожного кроку інтегрування збирається інформація про кількість контактів між абразивом і деталями, їх сумарну енергію, розподіл контактних тисків по поверхні, середню частоту зіткнень.

Враховуючи вищенаведене робимо висновок про те, що обертальний рух робочої камери впливає переважно нормальну складову контактної сили, тоді як вібраційні коливання – на тангенціальну. Тому збільшення швидкості обертання робочої камери головним чином підвищує контактну силу, тоді як віброзбурення – відносний рух компонентів середовища.

2.7 Розробка класифікатора деталей для віброабразивної обробки

Для підвищення ефективності організації виробничого технологічного процесу віброабразивної обробки виділимо основні ідентичні ознаки оброблюваних виробів: матеріал, маса, форма, твердість, ступінь чистоти поверхні. Враховуючи велику кількість та варіативність значень кожного з них виникає потреба в систематизації та уніфікації типових даних для зменшення номенклатури технологічних процесів, що визначають раціональні режими роботи віброобладнання.

Варто зазначити, що за відсутності формалізованої системи класифікації є потреба створювати велику кількість технологічних маршрутів для кожної із позиції різноманітної номенклатури виробів, що ускладнює стандартизацію й автоматизацію виробництва [27]. Для оптимізації організації процесу пропонується універсальний класифікатор, який виокремлює певні ідентичні типи ознак оброблюваних виробів та формує групи певними технологічно-значущими ознаками. Структура класифікатора базується на фасетно-ієрархічній моделі, що поєднує у собі незалежну параметризацію з логічною наочною структурою та наведена в табл.1.1.

Розроблений класифікатор ґрунтується на поєднанні двох концепцій:

1. Фасетна класифікація деталей для віброабразивної обробки базується на принципі опису об'єкта за допомогою сукупності незалежних атрибутів, кожен з яких відображає окрему характеристику, описуючи ключові властивості деталі. Кожна ж них є незалежною від інших, тобто зміна однієї не зумовлює зміни іншої. Для класифікатора деталей віброабразивної обробки доцільно виокремити такі атрибути першого рівня:

2. А – вид технологічної операції;

В – матеріал деталі;

С – маса деталі;

Д – геометрична складність;

Е – Н – додаткові фактори: твердість, стан поверхні тощо.

Наведений спосіб забезпечує однозначне кодування кожної деталі у вигляді структури типу А – В – С – D [–Е – F – G – Н], що створює передумови для використання методів автоматизованого підбору режимів обробки залежно від заданих характеристик.

Таблиця 1.1 – Опис ознак та значень параметрів класифікатора

Познач.	Ознака	Варіанти значень
А	Вид технологічної операції	1 – очищення поверхні; 2 – знімання задирок; 3 – підготовка поверхні під покриття; 4 – шліфування; 5 – полірування
В	Матеріал	1 – чавун; 2 – сталь; 3 – мідь; 4 – алюміній; 5 – полімер
С	Маса, г	$1 \leq 50$; 2 – 50...250; 3 – 250...500; 4 – 500...1000; 5 > 1000
Д	Складність геометричної форми	1 – проста; 2 – середня; 4 – висока
Е	Твердість, НРС	$1 < 20$; 2 – 20...35; 3 – 35...50; 4 > 50
F	Наявність покриття	0 – немає; 1 – м'яке (Zn, Cu); 2 – тверде (Cr, TiN)
G	Стан поверхні	1 – груба мех. обробка, $Ra > 12,5$ мкм (лиття, точіння), 2 – задирки, грат; 3 – забруднення (старе покриття, корозія); 4 – шліфування, $Ra < 1,6$ мкм.

2. Ієрархічна структура — логічна організація класифікаційної інформації у вигляді дерева з основними ознаками та варіантами можливих значень відповідного параметра. Наприклад, атрибут першого рівня В, що позначає матеріал, має другий рівень значення ознаки:

В1 – чавун;

В2 – сталь;

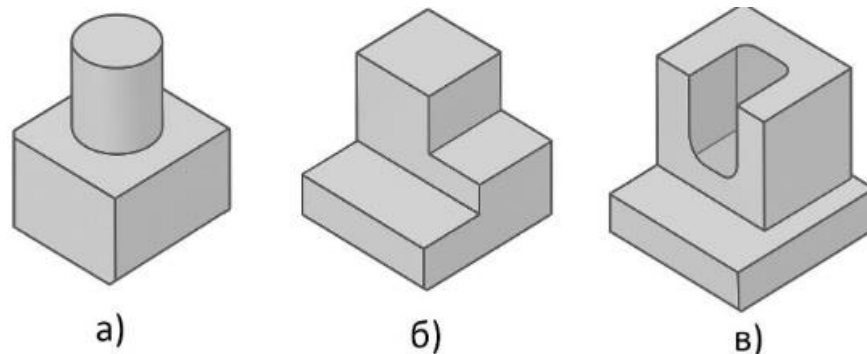
V3 – алюміній;

V4 – мідь.

Класифікація деталей за параметром «Складність геометричної форми» потребує більшого пояснення, наведена в табл. 1.2. На рис. 2.12 наведено приклади деталей різного виду складності геометричних форм.

Таблиця 1.2 – Класифікація деталей за геометричною складністю форми

Позначення	Рівень	Опис геометричних особливостей
D1	Проста	Прості геометричні форми, в тому числі циліндричні або призматичні, без отворів, з відкритими місцями спряження поверхонь.
D2	Середня	Наявність окремих елементів, що частково затінюють інші зони (ребра, виступи, фаски).
D3	Висока	Внутрішні отвори, порожнини, глибокі виїмки або канали, які утруднюють проникнення абразиву та створюють зони зниженої інтенсивності обробки



а – проста, б – середня, в – висока

Рисунок 2.12 – Приклади деталей різного виду складності форм

При встановленні основних закономірностей комбінованої віброабразивної обробки можливо використовувати деталі простої форми, для яких забезпечуються однорідні умови контакту абразивного середовища з усією поверхнею та зменшується вплив факторів, пов'язаних зі зміною орієнтації

деталі у робочій камері. Для поширення отриманих базових закономірностей на деталі середньої та високої складності форм необхідно враховувати вплив укладення форми на умови контактної взаємодії введенням, наприклад, коефіцієнтів. У зв'язку з цим актуальними є додаткові дослідження визначення впливу складності форми на контактну взаємодію та може бути предметом подальших наукових робіт.

2.8 Обґрунтування умов раціонального режиму роботи обладнання для комбінованої віброобробки

У віброустановці середовище робочої камери є сипучим та складається з великої кількості абразивних тіл та деталей. У стані спокою ця система має властивості твердого тіла. Проте, під дією сил віброзбурення абразивні тіла та оброблювані деталі набувають змінних швидкостей та прискорень і середовище набуває властивостей в'язкопружного тіла.

У випадку, коли інерційна сила частинок, зумовлена прискоренням від віброзбурюючої сили, значно перевищує їхню вагу та суттєво зменшуються сили їх взаємодії, сипуче середовище набуває властивостей рідини — спостерігається ефект псевдорозрідження. При цьому, вібраційні коливання як джерело періодичного збурення, призводить до зниження контактного тиску та коефіцієнту тертя, який мав місце у стані спокою.

Тепер розглянемо особливості поведінки сипучого середовища в робочій роторній камері без врахування віброзбурення. Для опису характеру його руху введемо коефіцієнт $K_{від}$

$$K_{від} = \frac{\omega^2 R}{g}, \quad (2.78)$$

де R – внутрішній радіус обертової робочої камери;

ω – частота обертання робочої камери;

g – гравітаційним прискоренням.

Виділимо три основні режими циркуляційного руху середовища обертової камери.

1. Режим повільного пересипання. Він характерний для низької швидкості обертання робочої камери, коли $K_{\text{від}} < 0,1$. При цьому частина абразивних тіл та деталей захоплюються стінкою обертової камери та піднімаються по ній на незначну висоту, оскільки відцентрова сила від обертання є незначною. Цей рухомий шар вільно пересипається у нижню частину камери під дією сили тяжіння та постійно оновлюється. Такий режим характеризується низькою інтенсивністю циркуляційного руху з невеликою кінетичною енергією. Сили контактної взаємодії є короткочасними та мають невеликі значення. Інтенсивність знімання матеріалу є низькою.

2. Основний робочий режим. Характерний при середніх обертах камери, коли $0,1 < K_{\text{від}} < 1$. При цьому компоненти піднімаються на більшу висоту $h_{\text{під}}$ по внутрішній поверхні камери (до $1/3$ – $1/2$ висоти) під дією відцентрової сил та сил тертя, після чого пересипаються вниз під дією сили тяжіння. Утворюється циркулюючий рухомий шар частинок із похилою поверхнею, який постійно оновлюється. За таких умов забезпечується активна циркуляція середовища з достатнім рівнем кінетичної енергії та тривалими контактними взаємодіями між абразивними тілами та деталями, що сприяє інтенсивному зніманню матеріалу.

Швидкість руху компонентів в цьому режимі можна записати таким чином

$$\frac{1}{2}m_c v_c^2 = m_c g h_{\text{під}}, \quad (2.79)$$

$$v_c = \sqrt{2gh_{\text{під}}}. \quad (2.80)$$

3. Режим центрифугування $K_{\text{від}} > 1$. При цьому відцентрова сила від обертання робочої камери суттєво перевищує силу тяжіння. У цьому режимі частинки притискаються до стінок камери та обертаються синхронно з нею без відриву та пересипання. Відцентрова сила стає значно більшою за гравітацію.

Кінетична енергія робочого середовища досягає максимальних значень, проте вона витрачається на підтримання обертального руху частинок разом із

камерою. За відсутності взаємного переміщення компонентів, ковзання та ударні контакти між абразивними тілами і деталями практично не виникають. Унаслідок цього загальна енергія системи майже не трансформується у корисну роботу зі знімання матеріалу, а продуктивність процесу різко знижується.

На підставі вище викладеного можна зробити висновок, що повна кінетична енергія компонентів середовища робочої камери зростає зі збільшенням як інтенсивності віброзбурення, так і швидкості обертання камери. Проте лише певна її частина бере участь у процесі знімання матеріалу. Корисна складова кінетичної енергії, яка реалізується у формі контактних взаємодій та мікрорізання, визначається співвідношенням між енергетичними внесками від кожного виду руху. Це співвідношення залежить від режиму роботи обладнання.

Для кількісної оцінки частки енергії робочого середовища, що безпосередньо витрачається на знімання матеріалу, введемо коефіцієнт ефективної взаємодії K_{ef}

$$K_{ef} = \frac{E_{кор}}{E_{заг}}. \quad (2.81)$$

Корисна енергія $E_{кор}$ визначається силою $F_{конт}$ контактної взаємодії між абразивними тілами та деталями у кількості N та швидкістю їх взаємного руху $v_{відн}$

$$E_{кор} = \int_0^N F_{конт}(N) \cdot v_{відн}(N) dN. \quad (2.82)$$

Загальна енергія середовища $E_{заг}$ визначається через сумарну кінетичну енергію вібраційного та обертального рухів робочого органу

$$E_{заг} = \frac{1}{2} m_{\Sigma} (A^2 \omega^2 + r^2 \Omega^2), \quad (2.83)$$

де m_{Σ} – сумарна маса робочого середовища;

A – амплітуда віброколиваний робочого органу;

ω – частота коливаний робочого органу;

r – ефективний радіус;

Ω – кутова швидкість обертання камери.

У процесі віброабразивної обробки ключовим механізмом знімання матеріалу є ударна взаємодія абразивних частинок з поверхнею деталі з силовою дією, що перевищує межу міцності оброблюваного шару. Знімання матеріалу відбувається лише за умови, що сила від ударної взаємодії перевищує критичне значення $E_{кр}$ яке можна визначити

$$E_{кр} = \sigma_y \cdot V_{мін}, \quad (2.84)$$

де σ_y – межа міцності матеріалу поверхні деталі;

$V_{мін}$ – одиничний об'єм знятого матеріалу.

Якщо створене зусилля є меншим, відбувається пружна взаємодія без знімання матеріалу.

Вважаючи, що кількість ефективних ударів за одиницю часу N_{ef} та середній об'єм матеріалу, що видаляється при кожному ударі ΔV , отримаємо

$$V = N_{ef} \cdot \Delta V = N_{ef} \cdot \frac{E_i - E_{кр}}{\sigma_y}. \quad (2.85)$$

Для підвищення продуктивності комбінованого віброабразивного процесу зі збереженням високої енергоефективності необхідно створити умови збільшення кількості частинок, енергія яких перевищує критичний поріг $E_{кр}$.

Враховуючи вищенаведену методику моделювання контактної взаємодії продуктивність комбінованого віброабразивного процесу зростає зі збільшенням кінетичної енергії робочого середовища, яка визначається сумісною дією вібраційного збурення та обертального руху камери. Підвищення амплітуди та частоти віброколивань збільшує швидкість відносного переміщення абразивних тіл, тоді як зростання швидкості обертання робочої камери підвищує нормальні контактні зусилля за рахунок відцентрової складової.

При недостатній нормальній складовій контактної сили не забезпечується необхідна глибина проникнення абразивного зерна. Разом з тим зростання

нормальної або тангенціальної складових приводить до збільшення дисипативних втрат енергії на взаємне тертя та руйнування абразивних тіл, пластичну деформацію поверхні деталі.

Подальше підвищення енергетичного рівня системи після досягнення граничного значення не приводить до зростання продуктивності та може супроводжуватися її зниженням внаслідок переважного зростання дисипативних втрат, зокрема взаємного тертя та руйнування абразивних тіл, пластичної деформації поверхні деталі.

Ефективність знімання матеріалу визначається умовами контактної взаємодії абразивних тіл з поверхнею деталей. Визначальними факторами є нормальна складова контактної сили, що визначає силу тиску абразивного тіла на поверхню деталі та тангенціальна, від яких, в свою чергу, залежить кут удару. Вони є функціями основних параметрів віброобладнання – амплітуди та частоти віброколивань, швидкості обертання робочої камери, та маси компонентів.

Проведене дослідження з моделювання контактної взаємодії з урахуванням особливостей комбінованого процесу дає підстави стверджувати про існування раціональної області параметрів обладнання. А саме – максимальна енергоефективність досягається за такого поєднання параметрів, при якому забезпечується раціональне співвідношення нормальної та тангенціальної складових контактної взаємодії, що створює умови максимальної продуктивності знімання матеріалу з поверхні оброблюваної деталі з мінімальними непродуктивними втратами. Тобто при цьому найбільша частина енергії обладнання реалізується у корисну роботу знімання матеріалу.

2.9 Висновки по розділу 2

У результаті проведеного дослідження встановлено, що комбінований спосіб створює умови інтенсифікації віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми та підвищення її енергоефективності за рахунок збільшення частки енергії, що витрачається на виконання корисної роботи, при одночасному зменшенні дисипативних втрат.

1. Розроблена нова конструктивна схема віброустановки забезпечує комбіновану віброобробку завдяки обертовому руху робочої камери при сумісній дії віброколивань з можливістю зміни інтенсивності вібраційної дії та частоти обертання в широкому діапазоні.

2. Складено кінематичні схеми для розробленої віброустановки та встановлені основні параметри – амплітуда віброколивань, частота обертання та маса компонентів робочого середовища. Математичним моделюванням встановлено закономірності руху обертової робочої камери від основних параметрів.

3. Розроблено класифікатор деталей для раціональної організації процесу та систематизації оброблюваних виробів за складністю геометричних форм, який може бути використаний для узагальнення базових закономірностей комбінованої віброобробки.

4. Встановлено вплив різних режимів роботи віброобладнання на умови контактної взаємодії абразивних тіл з поверхнею деталей, які визначаються нормальною складовою контактної сили, що визначає силу тиску абразивного тіла на поверхню деталі та тангенціальною, від яких, в свою чергу, залежить кут удару. Вони є функціями амплітуди та частоти віброколивань, швидкості обертання робочої камери, та маси компонентів.

5. Ефективність комбінованої віброабразивної обробки визначається як кількісним показником енергії робочого середовища так і та характером її використання. Раціональні параметри забезпечують інтенсифікацію руху компонентів і збільшення кількості контактних ударів з енергією, достатньою для знімання матеріалу, за мінімальних енерговитрат.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРОУСТАНОВКИ З АКТИВНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ

3.1 Мета та завдання експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є отримання кількісних даних для підтвердження теоретичних положень щодо підвищення ефективності віброабразивної обробки при застосуванні запропонованого комбінованого способу, а також встановлення раціональних параметрів обладнання, що забезпечують максимальну продуктивність та енергоефективність.

Для досягнення визначеної мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Виготовити дослідну віброустановку згідно розробленої конструктивної схеми у розділі 2.1 з можливістю зміни визначених ключових параметрів установки для проведення необхідної кількості експериментів .

2. Здійснити підбір компонентів робочого середовища – оброблюваних деталей та абразиву.

3. Обрати необхідні засоби та методи вимірювання значень параметрів установки при проведенні експерименту.

4. Розробити та обґрунтувати методику проведення планового факторного експерименту.

5. Здійснити серію експериментів за різних значень обраних факторів та зафіксувати отримані результати. Обробити експериментальні дані методами статистичного аналізу.

Дослідження проводились у навчальній лабораторії кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

3.2 Обґрунтування технічного рішення дослідної віброустановки з активним робочим органом

Керуючись розробленою конструктивною схемою у розділі 2.1 була виготовлена нова дослідна віброустановка комбінованої дії. Вона базується на

модульному принципі, який передбачає поєднання двох функціонально незалежних, але взаємодіючих модулів:

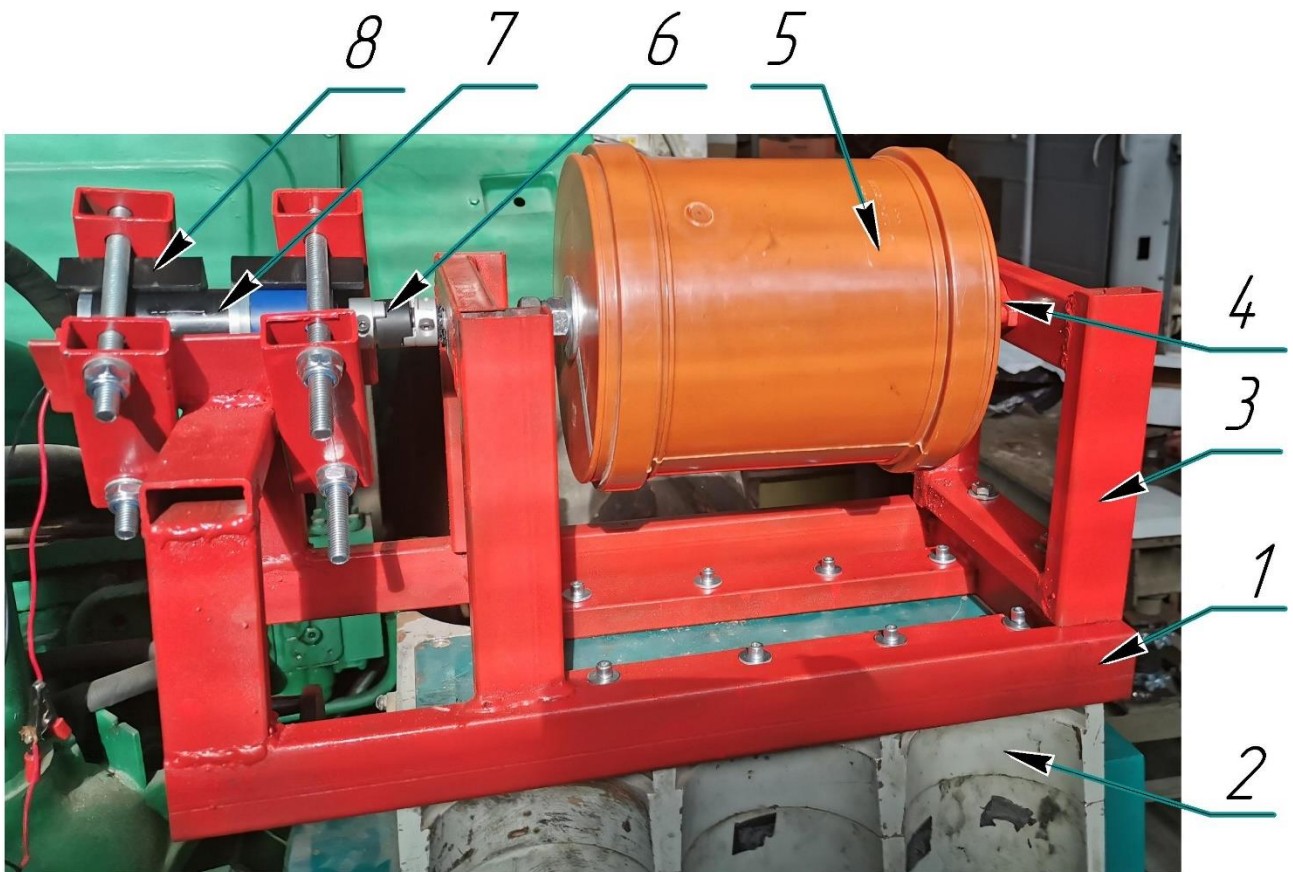
1. Модуль обертової робочої камери – нова конструкція, яка встановлюється на віброплатформі та має власний регульований привод активного робочого органу – обертової робочої камери.

2. Модуль віброплатформи – це промисловий верстат для об’ємної фінішної віброобробки ВІО–8, який у свій час використовувався для наукових досліджень науковцями під керівництвом доктора технічних наук, професора Л.І. Сердюка. Технологічна універсальність та перевірена ефективність дає можливість використовувати його для пошуку нових методів підвищення ефективності віброабразивного процесу, при зменшенні технічних ризиків та скороченні витрат на розробку нової віброзбуджувальної системи. Віброплатформа виконує функцію створення керованих віброколивань, необхідних для впливу на середовище обробки.

Завантаження та вивантаження компонентів середовища робочої камери здійснюється шляхом її зняття з рами спеціальної конструкції зі зйомною стійкою. Такий підхід обрано для збільшення надійності та спрощення конструкції. Це дозволило сфокусуватися на вивченні процесу комбінованої віброобробки, при оптимальних витратах.

Розглянемо конструкцію нової установки, загальний вигляд якої приведений на рис. 3.1. Базовим її елементом є рама 1, яка є жорсткою металевою конструкцією, що забезпечує надійну фіксацію обертової робочої камери та її приводу. Її конструкція дозволяє інтегруватися з існуючим верстатом ВІО – 8, що використовується як віброплатформа. Рама зварена з сталеві труби прямокутного профілю. Її кріплення до віброплатформи здійснено гвинтовими з’єднаннями.

Віброплатформа 2 являється конструктивною частиною верстату ВІО – 8 який детально розглянутий у розділі 1.



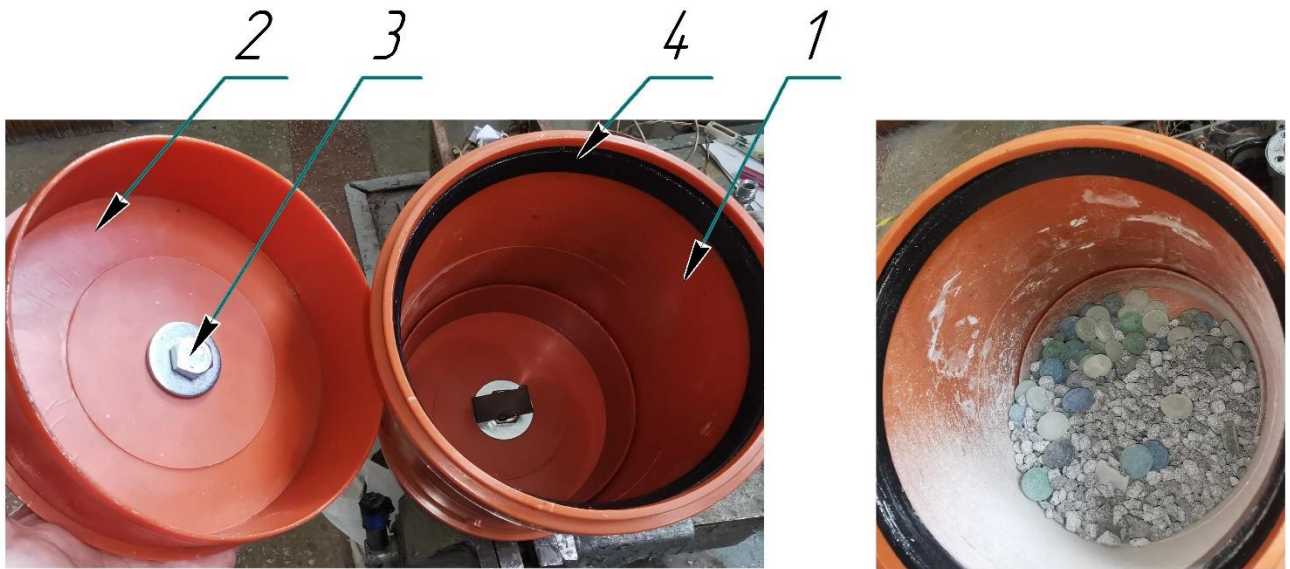
1 – рама, 2 – віброплатформа верстату ВІО – 8, 3 – знімна стійка рами, 4 – підшипник, 5 – обретова робоча камера, 6 – муфта, 7 – привод обретової робочої камери, 8 – кронштейн привода камери

Рисунок 3.1 – Загальний вигляд дослідної комбінованої віброустановки

Бокова стійка рами 3 виготовлена у вигляді зйомної конструкції для можливості монтажу робочої камери 5. Вона кріпиться до поперечини рами 1 двома гвинтами. В боковій стійці закріплено підшипниковий вузол 4, внутрішнє кільце якого має два установних гвинта розміщених радіально для фіксації валу робочої камери 5. Конструкція самої робочої камери 5 зображена на рис. 3.2

Робоча камера складається з корпусу 1, що являє собою поліпропіленову трубу, обидва кінці якої закриті кришками 2. По центру кришок закріплені болти зі шайбами. Вони виконують функцію валів робочої камери 5 та за допомогою них встановлюються на раму 1. Герметичність забезпечують два гумових ущільнювачі 4. Така конструкція дозволяє легко виконувати завантаження та

вивантаження компонентів середовища робочої камери з забезпеченням необхідної міцності при проведенні експериментальних досліджень. Внутрішні розміри камери складають $\varnothing 157$ мм, довжина 200 мм, загальний об'єм становить 3,9 л.



1 – корпус, 2 – кришка, 3 – кріплення валу, 4 – ущільнювач кришки

Рисунок 3.2 – Конструкція обертової робочої камери

З'єднувальна муфта 6 (рис. 3.1) карданної конструкції (рис. 3.3) забезпечує передачу крутного моменту від привода 7 на вал робочої камери та має полімерний пружний елемент що зменшує передачу віброколивань та компенсує неточності монтажу.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд муфти та підшипникового вузла

Електричний привод 7 (рис. 3.1) робочої камери обрано марки Bringsmart (рис. 3.4). Він являє собою конструктивно об'єднані в одному корпусі двигун постійного струму і планетарний редуктор з передаточним числом 71. Таке компактне виконання цього механізму забезпечує необхідний крутний момент при збереженні малих габаритів та невеликої вартості. Керування обертами приводу виконується зміною напруги постійного струму від 5 В до 24 В. Основні технічні характеристики приводу Bringsmart наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики приводу обертової робочої камери

Назва показника	Значення показника
Робоча напруга, В	24
Максимальна споживана потужність, Вт	96
Частота обертів вихідного валу, об/хв	Від 5 до 112
Передаточне число вбудованого планетарного редуктора	71
Максимальний крутний момент, Н·м	5
Маса, кг	0,5



а – габаритні та приєднувальні розміри, б – конструкція планетарної передачі

Рисунок 3.4 – Загальний вигляд приводу Bringsmart

Кріплення привода 7 (рис. 3.1) здійснюється шляхом встановлення його в приварений до рами 2 кутник, який виконує роль призми. Фіксація привода здійснюється гвинтами та двох планок зі сталевий труби прямокутного профілю через пластикові прижими 8 та гумові прокладки.

Живлення електропривода 7 (рис. 3.1) здійснюється від лабораторного блоку живлення RIDEN RD6018–W (рис. 3.5), технічні характеристики якого наведено в табл. 3.2. Це лабораторне програмоване джерело постійного струму, що забезпечує стабільне та точне керування напругою і струмом. Регулювання напруги дозволяє змінювати частоту обертання камери, а обмеження максимального струму запобігає перевантаженню двигуна привода та виходу його з ладу. На дисплеї блоку в реальному часі відображається потужність, що дозволяє фіксувати зміну енергоспоживання в залежності від режимів роботи.



Рисунок 3.5 – Загальний вигляд лабораторного блоку RIDEN RD6018–W

Таблиця 3.2 – Основні технічні характеристики RIDEN RD6018–W

Назва показника	Значення показника
Максимальна вихідна напруга, В	60
Максимальний струм приєднаного навантаження, А	18
Дискретний крок регулювання	
– напруги, В	0,1
– струму, А	0,08
Максимальна допустима приєднана потужність, Вт	700
Точність регулювання, %	±0.5%

У запропонованій дослідній установці операція відокремлення оброблюваних деталей від абразивних тіл виконується вручну, що дає змогу уникнути додаткових витрат на виготовлення сепараційного обладнання. Такий підхід є доцільним з огляду на суттєву різницю у геометричних розмірах між деталями та абразивними елементами, завдяки чому ручне сортування після кожного циклу обробки не становить значних труднощів і не впливає на загальну трудомісткість процесу.

Технічні характеристики дослідної віброустановки наведено в табл. 3.3

Таблиця 3.3 – Основні технічні характеристики комбінованої віброустановки

Назва показника	Значення показника
Максимальна амплітуда вібропереміщення, мм	4
Частота коливань, Гц	Від 20 до 60
Розміри обертової робочої камери, мм	D=157, L= 200
Максимальна маса завантаження, кг	7
Максимальний об'єм завантаження, л	2,5
Максимальна частота обертання робочої камери, об/хв	120
Напруга живлення:	
– двигуна вібропривода	Змінна трифазна, 380 В, 50 Гц
– двигуна обертової камери	Постійна, від 10 В до 24 В
Режим роботи	S3, ТВ – 60%; тривалість циклу не більше 1 год
Максимальна споживана потужність привода	
– вібробуджувача, Вт	550
– обертової робочої камери, Вт	100
Маса установки, кг	26

Таким чином, виготовлена дослідна установка забезпечує реалізацію концепції комбінованої віброабразивної обробки та створює можливості для проведення експериментальних досліджень з метою оцінки впливу ключових параметрів процесу і перевірки наукової гіпотези щодо інтенсифікації обробки шляхом застосування комбінованого способу.

3.3 Обґрунтування компонентів робочого середовища, методів та засобів вимірювання для проведення експерименту

В рамках даного експерименту, з урахуванням технічних можливостей дослідного обладнання, для вивчення базових закономірностей комбінованої віброобработки на основі розробленого класифікатора деталей (розділ 2) використано деталі простої геометричної форми, зокрема скляні декоративні елементи (рис. 3.6), форма яких наближена до сплюсненого еліпсоїда. Це дозволяє мінімізувати вплив геометричних факторів і забезпечить максимально однакові умови контактної взаємодії абразивних тіл з поверхнею деталі, внаслідок чого отримані результати експерименту будуть максимально залежати від параметрів обладнання.



Рисунок 3.6 – Загальний вигляд оброблюваних деталей

В якості вільного абразиву робочого середовища обрано абразивні тіла TR25A 10 CT1 формою керамічний скошений трикутник (рис. 3.7) розмірами 6х6х6 (мм) [76, 77] .

Основними критеріями вибору стали його фізико-механічні властивості, форма та розмір, що забезпечують ефективне шліфування поверхні скла та дозволяють досягти оптимальної швидкості знімання матеріалу в обмежений проміжок часу, щоб зміну маси деталей можна було чітко зафіксувати за допомогою лабораторних ваг, що є необхідною умовою для обґрунтування результатів експерименту [129].

Маркування 10 CT1 (P120) позначає середню зернистість ~ 125 мкм, з помірною абразивною активністю, що забезпечує достатню швидкість знімання матеріалу оброблюваних деталей без ризику їх пошкодження.

Маркування 25A позначає матеріал – електрокорунд (оксид алюмінію), який має середню жорсткість і добре підходить для обробки твердих, але крихких матеріалів, таких як скло [75].



Рисунок 3.7 – Абразивні тіла TR 25A 10 CT1 розміром 6х6х6 (мм)

Процес віброабразивної обробки супроводжується поступовою втратою ріжучих властивостей абразивних тіл внаслідок затуплення та руйнування частинок. Тому важливо забезпечити ефект самозаточування, при якому зношені зерна замінюються свіжими, що підтримує стабільність ріжучої здатності середовища протягом певного часу. Проте такий механізм зношування

призводить до поступової зміни фракційного складу робочого середовища. Це виражається у затупленні ріжучих крайок та зменшення середнього розміру абразивних тіл з накопиченням відпрацьованого матеріалу. В той же час, забезпечення стабільного гранулометричного складу абразивних тіл у робочому середовищі є важливим для забезпечення достовірності отриманих експериментальних даних.

Оптимальне визначення та забезпечення сталості складу, тобто співвідношення кількості оброблюваних деталей та абразивних тіл протягом усього часу експерименту є важливим фактором та визначає рівномірність обробки поверхонь. Якщо вільного абразиву буде недостатньо або надлишок, контакт між компонентами робочого середовища буде нерівномірним, що може призвести до неоднорідного знімання матеріалу.

Тому для контролю стану абразивного середовища передбачено просіювання та видалення надмірно зношених частинок абразивних тіл. Встановлюємо критерій, що абразивні тіла зі втратою початкових розмірів та форми понад 50 % вважаються надмірно зношеними. Перед кожним експериментом фракція, яка проходить через сито з розміром отворів 3 мм, видаляється з робочого середовища та замінюється новими тілами у відповідній кількості для збереження сталого гранулометричного складу та початкового співвідношення компонентів.

За даними попередніх досліджень [115, 124], оптимальне значення співвідношення об'єму деталей до абразиву знаходиться в межах 1:2–1:4 відповідно. Для нашого експерименту обираємо середню величину 1:3. Однак, оскільки об'єм залежить від маси та густини матеріалів, то знаючи ці величини з практичної точки зору зручніше використовувати масові співвідношення.

Оскільки маса середовища є змінним параметром у нашому експерименті, необхідно визначити її граничні значення – мінімальне та максимальне завантаження робочої камери. Для цього слід враховувати, що ефективно заповнення циліндричних обертових робочих камер, згідно з дослідженнями [17, 33, 46] та виробничим досвідом, зазвичай становить 30 %–60 % об'єму камери.

Виходячи з цього, приймаємо що мінімальна маса середовища відповідатиме 30% об'єму робочої камери, а максимальна – 60 % об'єму. В табл. 3.4 наведено розраховану масу компонентів робочого середовища, враховуючи що густина для деталей та абразивних тіл складає $2,5 \text{ г/см}^3$ та $2,8 \text{ г/см}^3$ відповідно.

Таблиця 3.4 – 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

Для експериментальних вимірів значень амплітуди вібропереміщення обрано віброметр Venetech GM63A (рис. 3.8), який безпосередньо вимірює віброприскорення та розраховує віброшвидкість та віброзміщення, параметри якого наведені в табл. 3.5. Віброприскорення може використовуватися для оцінки динамічних характеристик процесу, зокрема силової взаємодії частинок.



Рисунок 3.8 – Загальний вигляд віброметра Venetech GM63A

Таблиця 3.5 – Основні технічні характеристики Venetech GM63A

Назва показника	Значення показника
Діапазон вимірювання віброприскорення, м/с ²	0,1–199,9
Діапазон вимірювання віброшвидкості, мм/с	0,1–199,9
Діапазон вимірювання вібропереміщення, мм	0,001–1,999
Діапазон вимірювання частоти віброприскорення, Гц	10–15000
Похибка вимірювань, %	±5

Лазерний тахометр DT-2234C⁺ (рис. 3.9) дозволяє здійснити безконтактне вимірювання частоти обертання робочої камери комбінованої віброабразивної установки.

Рисунок 3.9 – Загальний вигляд лазерного тахометра DT-2234C⁺Таблиця 3.6 – Основні технічні характеристики тахометра DT-2234C⁺

Назва показника	Значення показника
Діапазон вимірювання, об/хв	2,5–99 999
Роздільна здатність	
– у діапазоні до 999,9 об/хв	0,1
– у діапазоні понад 1 000, об/хв	1
Похибка вимірювань, %	±0,05
Дистанція вимірювання, мм	50–2000

Для проведення вимірювань за допомогою цього приладу необхідно закріпити світловідбиваючу мітку на торцевій поверхні кришки робочої камери в місці, доступному для наведення лазерного променя. Тахометр утримується на відстані 50–500 мм від камери у стабільному положенні для мінімізації похибки. Після витримки протягом декількох секунд на дисплеї відображається значення частоти обертання.

Для вимірювання маси компонентів робочого середовища в нашому експериментальному дослідженні обрано лабораторні ваги ТВЕ–0,5–0,01 (рис. 3.10). Вони будуть застосовуватися на всіх етапах експерименту для вимірювання маси деталей до та після віброобробки. Визначення різниці цих показників дозволить кількісно оцінити кількість знятого матеріалу з поверхні оброблюваних деталей при певних значеннях параметрів комбінованого процесу.



Рисунок 3.10 – Загальний вигляд лабораторних ваг ТВЕ–0,5–0,01

Таблиця 3.7 – Технічні характеристики лабораторних ваг ТВЕ–0,5–0,01

Назва показника	Значення показника
Найбільша границя зважування (НГЗ), г	500
Дискретність відліку (d), г	0,01
Мінімальна границя зважування (НмПВ)	0,5
Клас точності за ДСТУ EN 4550	II
Ступінь захисту	IP40

З метою визначення енергетичних характеристик процесу комбінованої віброабразивної обробки у ході кожної ітерації експерименту передбачено окреме вимірювання енергоспоживання електродвигунами привода обертової камери та вібробуджувача.

Для оцінки енергоспоживання трифазного асинхронного двигуна вібробуджувача застосовується непрямий метод, який базується на вимірюванні струму та напруги в одній фазі мультиметром Hantek 2D75.

Формула для розрахунку активної потужності трифазного двигуна

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi, \quad (3.1)$$

де P – активна потужність Вт;

U – лінійна напруга мережі, В;

I – струм у фазі, А;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

За отриманими значеннями вимірів буде проведено аналіз впливу амплітуди коливань та частоти обертання робочої камери на загальне енергоспоживання установки, дозволять визначити споживану потужність окремо для обертального та вібраційного приводів. В подальшому можна буде розрахувати питомі енерговитрати на одиницю знятого матеріалу, здійснити порівняльний енергетичний аналіз різних режимів віброобробки та сформулювати передумови визначення раціонального режиму роботи.

3.4 Обґрунтування методики планування експерименту дослідження продуктивності віброустановки з активним робочим органом

Для оцінки продуктивності віброабразивної обробки необхідно визначити параметр, що пов'язаний з кількісною величиною результативності процесу [118]. Розглянемо такий параметр як швидкість знімання матеріалу V , який визначається за зміною маси оброблюваних деталей внаслідок механічного впливу абразивного середовища за певний проміжок часу за формулою

$$V = \frac{m_0 - m_t}{t}, \left[\frac{\text{Мг}}{\text{год}} \right], \quad (3.2)$$

де m_0 – початкова маса оброблюваних деталей;

m_t – маса оброблюваних деталей після обробки;

t – тривалість віброобробки, год.

З метою забезпечення об'єктивності порівняння отриманих експериментальних значень ефективності комбінованої віброобробки при різних режимах процесу з урахуванням маси компонентів введемо поняття питомої швидкості знімання матеріалу V_p . Цей показник визначає кількість знятого матеріалу, що припадає на одиницю маси оброблюваних деталей за одиницю часу, і обчислюється за формулою

$$V_p = \frac{m_0 - m_t}{m_0 \cdot t}, \left[\frac{\text{Мг}}{\text{кг} \cdot \text{год}} \right] \quad (3.3)$$

Одиницею вимірювання питомої швидкості V_p обираємо міліграми на кілограм за годину – мг/(кг·год). Такий формат забезпечує зручну масштабованість результатів при роботі з типовими обсягами знімання та масами деталей та дозволяє уникнути надмірно малих чисел у підсумкових розрахунках, що спрощує подання, порівняння та статистичну обробку результатів. Маса оброблюваних деталей до і після обробки є чітко визначеною величиною, яку можна виміряти з високою точністю.

При цьому, необхідно забезпечити наступне:

1. Точність вагових вимірювань. Використання високоточних лабораторних ваг ТВЕ–0,5–0,01 з мінімальною похибкою до 0,01 г дозволяє реєструвати навіть незначну втрату матеріалу.

2. Нормування за часом. Оскільки процес віброабразивної обробки триває визначений проміжок часу t , нормування зміни маси на цей інтервал дозволяє отримати значення швидкості знімання матеріалу, незалежне від тривалості окремого експерименту.

Для точного визначення показників значень маси знятого матеріалу з поверхні оброблюваних деталей за певний час обробки необхідно після кожного проведеного експерименту ретельно очищати поверхні оброблюваних деталей від залишків абразиву галтувальних тіл та мікрочастинок знятого матеріалу деталі, оскільки їх залишки можуть спотворити результати зважування. Очищення проводиться промиванням чистою водою з подальшою сушкою.

Критерієм визначення тривалості віброобробки для експерименту є досягнення заданої якості поверхні оброблюваних деталей. На початковому етапі відбувається припрацьовування деталей та абразивних тіл, стабілізація циркуляційного руху компонентів робочої камери та встановлення характерних шляхів руху частинок у робочій камері. Проведеними дослідженнями встановлено [30, 82], що протягом перших 5–10 хвилин швидкість знімання матеріалу є дещо більшою ніж в усталеному режимі, при якому вона має стабільне значення. Занадто коротка тривалість експерименту може призвести до незначущих змін маси зразків деталей, та унеможливить оцінку продуктивності процесу, тоді як надмірна тривалість обробки внесе похибку при аналізі енергоефективності. Враховуючи початковий стан поверхні оброблюваних деталей та мету обробки обираємо тривалість проведення кожної з ітерацій експерименту 30 хвилин.

З метою визначення енергетичних характеристик процесу комбінованої віброабразивної обробки кожної ітерації експерименту буде виміряне енергоспоживання окремо електродвигуна постійного струму обертової камери

та асинхронного електродвигуна вібробуджувача. Це дозволить встановити енерговитрати на кожен з видів руху, оцінити вплив параметрів процесу на загальне енергоспоживання установки, а також обґрунтувати раціональні режими роботи з урахуванням мінімізації споживання електроенергії.

Отже, запропонований метод кількісної оцінки продуктивності процесу віброабразивної обробки базується на принципі виміру масової втрати, що забезпечується точністю вимірювань та усуває ймовірну суб'єктивність. На відміну від візуального контролю або аналізу мікронерівностей поверхні деталей, визначення швидкості знімання матеріалу через зміну маси дозволяє отримати об'єктивні числові дані для подальшого аналізу і математичної обробки.

Планування експериментів є необхідним інструментом дослідження різних технологічних процесів, в тому числі і комбінованої віброабразивної обробки. Основна мета – визначення функціональної залежності між керованими факторами та вихідними характеристиками процесу, що дозволяє встановити ступінь та характер впливу кожного з факторів на загальний результат. Оптимізувати параметри та підвищити ефективність технології.

Факторні експерименти базуються на систематичній зміні кількох параметрів одночасно, що забезпечує можливість оцінки не тільки їхнього окремого впливу, але й взаємодії між ними. Вони дозволяють скоротити кількість випробувань у порівнянні з повним перебором комбінацій факторів [122, 128].

Центрально-композиційний план (ЦКП) є одним із найпоширеніших методів планування багатфакторного експерименту. Він дозволяє будувати регресійну модель другого порядку, що дає можливість враховувати квадратичні залежності та оптимізувати процеси.

Структура ЦКП включає:

- факторні точки (комбінації максимальних і мінімальних рівнів факторів);

- центральні точки (повторні випробування в середньому значенні факторів для оцінки відтворюваності);
- зіркові точки (додаткові експериментальні умови для врахування нелінійності залежностей).

Для класичного ротабельного ЦКП зіркові точки обчислюються

$$\alpha = 2^{\frac{k}{4}}, \quad (3.4)$$

де k – кількість факторів.

У нашому випадку це не є прийнятним, оскільки обчислені значення можуть виходити за межі фізично можливих чи технологічно допустимих значень.

Як відомо [7, 10, 98], процес комбінованої віброабразивної обробки описується нелінійною залежністю, в якій взаємодія абразивних тіл з оброблюваними деталями визначається сукупністю взаємозалежних динамічних параметрів. У нашому випадку визначеними факторами, що впливають на ефективність процесу, є

- амплітуда віброколивань обертової робочої камери A – визначає рівень кінетичної енергії системи, впливає на силу контактної взаємодії між деталями й абразивом.

- частота обертання робочої камери W – головним чином визначає просторово-циркуляційних рух та створює відцентрову силу, впливає на контактну взаємодію.

- маса компонентів робочого середовища M – визначає рівень заповнення камери, впливає на інтенсивність контактних взаємодій та коефіцієнт тертя між частинками.

Для точного визначення характеру та ступеня впливу цих параметрів необхідна побудова регресійної моделі другого порядку, що передбачає наявність квадратичних членів, які описують ефекти взаємодії факторів.

У загальному вигляді регресійна модель для трифакторного експерименту описується формулою:

$$y_i = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_{ij} x_i^2 + \sum_1^k b_{ij} x_i x_j \quad (3.5)$$

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

У класичному ротабельному центрально-композиційному плані зіркові точки визначаються за формулою

$$X^* = \pm \alpha \cdot X_0, \quad \alpha = 2^{\frac{k}{4}}, \quad (3.6)$$

де $k = 3$ – кількість факторів.

Для нашого випадку розрахунок $\alpha \approx 1,68$.

Проте, використовуючи такий план при розрахунку реальних значень параметрів, значення амплітуди, частоти обертання та маси можуть виходити за межі фізично можливих та бути некоректними. Тому обмежимо значення α та коригуючи зіркові точки таким чином, щоб вони знаходилися в межах технічних параметрів експериментальної установки.

Використання центрально-композиційного плану із скоригованими зірковими точками дозволяє проводити визначення цих коефіцієнтів без виходу за межі допустимого діапазону параметрів.

Цей підхід забезпечує максимальну точність апроксимації процесу, коректність фізичних умов експерименту, мінімізацію похибок, пов'язаних із нелінійним характером взаємодії частинок.

Таким чином, обраний підхід із скоригованими зірковими точками забезпечує найбільш достовірні результати для оптимізації процесу віброобразивної обробки.

Діапазони варіювання значень параметрів встановлено з урахуванням технічних характеристик обладнання. Кожен фактор варіювався на трьох рівнях: мінімальному, середньому та максимальному та наведений в табл. 3.2.

Для спрощення записів і подальших розрахунків виконаємо операцію кодування факторів, що являє собою лінійне перетворення факторного простору: верхній рівень позначимо $+1$, середній рівень -0 , нижній $-(-1)$. Вказаний запис переводить параметри варіювання у новий кодовий масштаб за формулою

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (3.7)$$

де x_i – значення i -го фактору в кодовому масштабі;

X_i – значення i -го фактору в натуральному масштабі;

X_{i0} – основний рівень i -го фактору;

ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактору.

Якщо побудована модель не забезпечить умову адекватності, то можна скористатись планом іншого вигляду. При записі плану проведення експерименту цифру 1 не вказуємо, а кодовий запис рівнів факторів матиме вигляд: «+», «0» та «-».

Таблиця 3.2 – Значення параметрів та їх інтервали варіювання

№	Найменування	Розмір-ність	Позначення	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Нижній рівень (-)	Інтервал варіювання
X ₁	Амплітуда віброколивань	мм	A	3	2	1	1
X ₂	Частота обертання камери	об/хв	W	104	70	36	34
X ₃	Маса компонентів	кг	M	6,4	4,8	3,2	1,4

Центрально-композиційний план включає три групи експериментів:

1. Основний факторний план (2^k , де $k = 3$) – 8 експериментів;
2. Зіркові точки ($2k$) – 6 експериментів;
3. Центральні точки – 3 повторення.

Загальна кількість дослідів розраховується за формулою

$$N = 2^k + 2k + N_0 = 2^3 + 2 \cdot 3 + 3 = 17 \quad (3.8)$$

Розроблена план-матриця експерименту наведена в табл. 2 додатку 3. В ній вказані усі можливі комбінації нижніх та верхніх рівнів по кожному з факторів, в останньому стовпці записано значення вихідного параметра швидкості знімання, що відповідають певним комбінаціям факторів.

При виконанні експериментів відповідно до обраного плану доцільно досліди в нульовій точці рівномірно розподіляти між іншими, дублюючи їх через кожні 2–4 дослідів.

Отримані значення по результатам експериментів наведені в табл. 3.3

Отримані результати експерименту обробляємо з використанням методів математичної статистики та прикладних комп'ютерних програм [128], одержуючи при цьому рівняння регресії, яке відображає функціональну залежність між питомою швидкістю зняття матеріалу та вихідними параметрами (X_1, X_2, X_3).

Залежність питомої швидкості зняття матеріалу Y від ключових параметрів має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (3.9)$$

де Y – питома швидкість знімання матеріалу;

x_1, x_2, x_3 – вихідні фактори;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Коефіцієнти регресії обчислюємо за наступними формулами

$$b_0 = 0,1831[0y] - 0,0704 \sum_1^k [iiy]; \quad (3.10)$$

$$b_i = 0,1[iy]; \quad (3.11)$$

$$b_{ii} = -0,0704[0y] + 0,5[iiy] - 0,1268 \sum_1^k [iiy]; \quad (3.12)$$

$$b_{ij} = 0,125[ijy]. \quad (3.12)$$

Таблиця 3.3 – Експериментальні значення параметрів згідно плану

№ досл.	Код	Амплітуда віброколивань, мм	Код	Швидкість обертання камери, об/хв	Код	Маса компонентів, г	Питома швидкість знімання матеріалу, мг/(кг*год)
–	+1	3	+1	104	+1	6,4	–
	0	2	0	70	0	4,8	
	–1	1	–1	36	–1	3,2	
1	+	3	+	104	+	6,4	320
2	–	1	+	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	320

В результаті обчислень отримано числові значення коефіцієнтів регресії:

$$b_0 = 302; \quad b_{23} = 6,25$$

$$b_{11} = -10,87; \quad b_2 = 53;$$

$$\begin{aligned}
 b_{13} &= -1,25; & b_{33} &= -35,87; \\
 b_1 &= 8; & b_{12} &= 1,25 \\
 b_{22} &= -45,87; & b_3 &= 37;
 \end{aligned}$$

Оцінимо значущість розрахованих коефіцієнтів регресії за допомогою t -критерію Стюдента (табл. 3.4). Коефіцієнт вважають статистично значущим, якщо розраховане значення t_p перевищує критичне значення t_m , визначене за заданим рівнем значущості з врахуванням кількості ступенів свободи. Це означає що відповідний фактор чинить істотний вплив на питому швидкість знімання матеріалу.

Коефіцієнти при квадратичних членах залишаємо навіть за їх статистичної незначущості, оскільки вони забезпечують урахування екстремуму в межах області факторного простору. Оцінюємо значущість коефіцієнтів (рис. 3.9)

Таблиця 3.4 – Оцінка значущості коефіцієнтів регресії

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
Значення b_i	302	8,00	53,00	37,00	-10,87	-45,87	-35,87	1,25	-1,25	6,25
t_p	122,24	4,38	29,03	20,27	-3,08	-13,01	-10,17	0,61	-0,61	3,06
t_m	4,3									
Значущість	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Ні	Ні	Ні

Значущі коефіцієнти регресії підставляємо в формулу (3.9) та отримуємо уточнене рівняння:

$$V_p = 302 + 8x_1 + 53x_2 + 37x_3 - 10,87x_1^2 - 45,87x_2^2 - 35,87x_3^2 \quad (3.13)$$

Одержане рівняння встановлює залежність питомої швидкості знімання матеріалу у віброустановці від зміни амплітуди вібропереміщення, частоти обертання робочої камери, та маси завантажених компонентів у неї. Дане рівняння необхідно перевірити на адекватність за допомогою критерію Фішера.

Якщо розрахункове значення критерію менше, ніж граничне, то можна стверджувати, що розроблена на основі багатofакторного аналізу

функціональна залежність (3.13) адекватно описує вплив конструктивних параметрів та режимів роботи комбінованої віброабразивної установки на величину питомої швидкості знімання матеріалу.

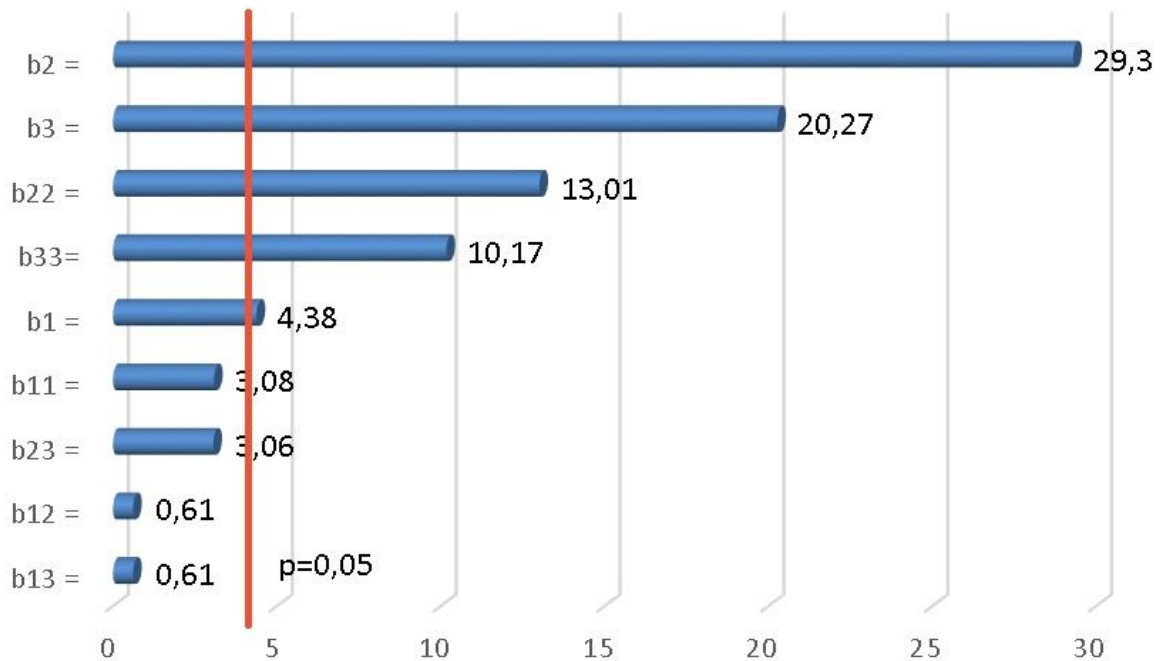


Рисунок 3.9 – Карта Парето оцінки значущості коефіцієнтів

Повний розрахунок отриманих експериментальних даних наведений в додатку 3.

3.5 Обґрунтування методу дослідження енергоефективності експериментальної віброустановки

З метою комплексної оцінки енергоефективності та встановлення її залежності від зміни параметрів запропонованого комбінованого методу віброабразивної обробки було додатково проведено заміри споживаної потужності двигунів віброзбудувача та приводу обертання робочої камери установки під час проведення трьохфакторно експерименту згідно плану табл. 2 додатку 3. Виміри потужностей здійснювались окремо для асинхронного двигуна віброзбудувача P_1 та двигуна постійного струму, що обертає робочу камеру P_2 на наведено в табл. 3.5.

Для кількісної оцінки енергоефективності комбінованого віброабразивного процесу введемо показник енергоефективності η_e , який може бути виражено:

$$\eta_e = \frac{V_p}{P_\Sigma}, \left[\frac{\text{мг}}{\text{кг} \cdot \text{год} \cdot \text{Вт}} \right], \quad (3.14)$$

$$P_\Sigma = P_1 + P_2, \quad (3.15)$$

де P_1 – споживана потужність вібробуджувача, Вт,

P_2 – споживана потужність привода обертання робочої камери, Вт.

Таблиця 3.5 – Значення потужностей двигунів віброустановки

Амплітуда коливань, мм	Маса компонентів, кг	Частота обертання камери, об/хв					
		36		70		104	
		P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт
1	4,8	265	3,2	266	7,8	265	22,5
		274	5,1	278	11,5	279	38,7
		282	8,6	282	15,3	285	52,3
2	4,8	280	3,2	278	7,2	282	21,1
		291	5,0	290	10,5	291	38,2
		303	7,9	303	14,1	304	51,0
3	4,8	337	3,0	339	6,9	338	20,8
		346	4,3	341	10,3	340	36,3
		372	7,0	372	12,1	377	49,2

За однакової тривалості проведення усіх експериментів загальна споживана потужність обладнання може бути використана як показник енергоспоживання.

Залежність швидкості знімання матеріалу визначалась експериментально від трьох незалежних факторів – амплітуди віброколивань A , частоти обертання робочої камери W , маси компонентів середовища M

$$V_p = f(A, W, M) \quad (3.16)$$

Тоді показник енергоефективності можна розглядати як частинну похідну продуктивності від енергії, тобто

$$\Delta\eta_e \approx \frac{f(A_2, W_2, M_2) - f(A_1, W_1, M_1)}{[P_1(A_2, M_2) + P_2(W_2, M_2)] - [P_1(A_1, M_1) + P_2(W_1, M_1)]} \quad (3.17)$$

Для випадку коли відбувається лише зміна W при фіксованих A і M рівняння 3.17 набуває вигляду

$$\Delta\eta_e = \frac{V_{P_{W2}} - V_{P_{W1}}}{P_{W2} - P_{W1}} \quad (3.18)$$

3.6 Дослідження впливу параметрів віброустановки з активним робочим органом на продуктивність комбінованої віброобробки

На основі отриманої функціональної залежності (3.13) для наочної демонстрації характеру зміни питомої швидкості знімання матеріалу від ключових технологічних параметрів: амплітуди вібропереміщення A , швидкості обертання робочої камери W та маси компонентів робочого середовища M побудовані 3D-графіки, що зображені на рис. 3.10–3.12. При цьому по черзі два фактора розглядаються як змінні, а третій буде зафіксований по трьом значенням інтервалів варіювання, які наведено в табл. 3.2

Розглянемо вплив зміни частоти обертання робочої камери та маси компонентів робочого середовища в ній на питому швидкість знімання матеріалу для трьох значень варіювання амплітуди віброколиваль. Побудований графік зображений на рис. 3.10.

Як бачимо, при $A=1$ мм поверхня відгуку розташована найнижче від інших. Збільшення частоти обертання W та маси робочого середовища M призводить до незначного зростання питомої швидкості знімання матеріалу, яка залишається в межах 140–200 мг/(кг·год). Це свідчить про зниження продуктивності при зменшенні амплітуди віброколиваль.

При $A=2$ мм поверхня має виражений максимум в області при W та M між 70–104 об/хв та 4,8–6,4 кг відповідно. Значення V_p досягають 320–330 мг/кг·год.

При $A=3$ мм спостерігається незначне зменшення продуктивності

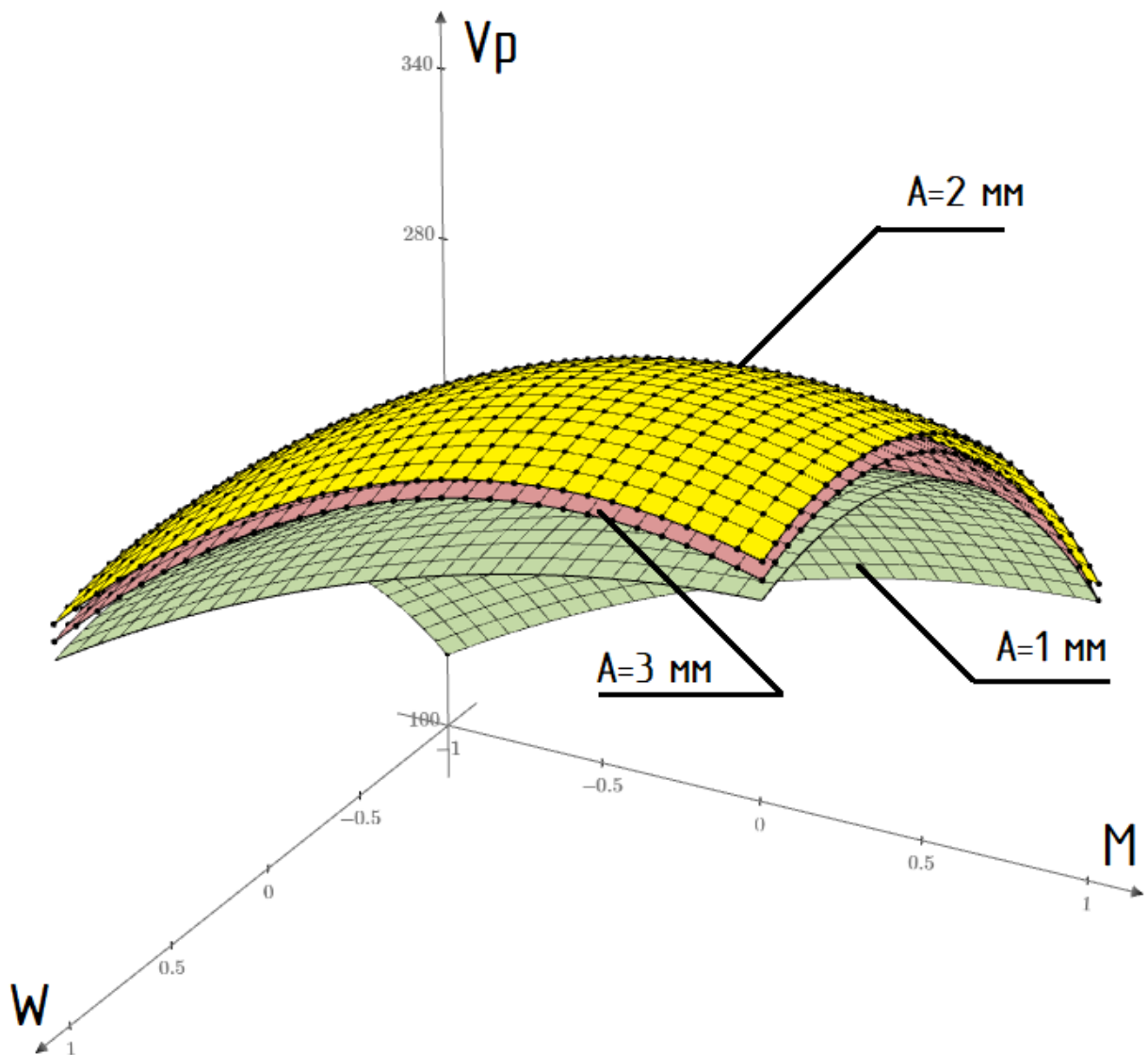


Рисунок 3.10 – Графіки залежності питомої швидкості знімання матеріалу від маси та частоти обертання при варіюванні амплітуди віброколивань

Розглянемо вплив зміни частоти обертання робочої камери та амплітуди віброколивань в ній на питому швидкість знімання матеріалу для трьох значень варіювання маси компонентів середовища робочої камери. Побудований графік зображений на рис. 3.11.

Як бачимо, при масі компонентів робочого середовища $M=4,8$ кг досягається максимальна питома швидкість знімання матеріалу 330 мг/кг·год завдяки раціональному співвідношенню просторового циркуляційного руху та інтенсивності контактної взаємодії. При $M=3,2$ кг та $M=6,4$ кг спостерігається зниження продуктивності процесу.

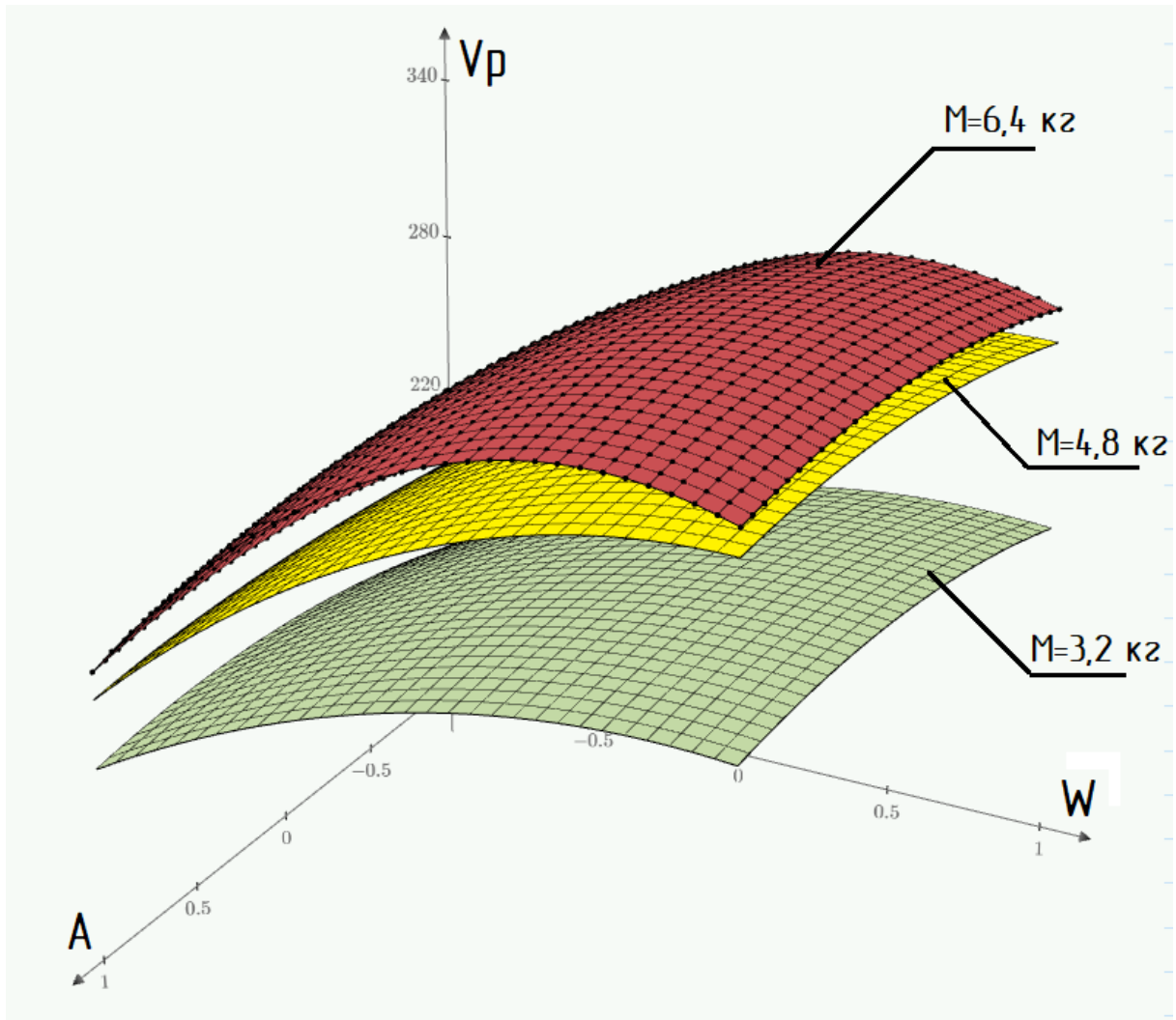


Рисунок 3.11 – Графік залежності питомої швидкості знімання матеріалу від амплітуди коливань та частоти обертання при варіюванні маси середовища

Розглянемо вплив зміни маси компонентів середовища робочої камери та амплітуди віброколивань на питому швидкість знімання матеріалу для трьох значень варіювання частоти обертання робочої камери. Побудований графік зображений на рис. 3.12.

З графіка видно, що максимальне значення питомої швидкості знімання становить 330 мг/кг·год відповідає частоті обертання робочої камери $W=70$ об/хв. При частоті обертання $W=36$ об/хв відповідна поверхня відгуку розміщена найнижче, максимальне значення V_p становить 240 мг/кг·год. При значені частоти обертання $W=104$ об/хв V_p становить 310 мг/кг·год.

Усі побудовані поверхні відгуку мають виражену опуклу параболічну форму, що вказує на квадратичний характер залежності швидкості знімання матеріалу від досліджуваних параметрів. Це підтверджується як числовими експериментальними даними, так і наявністю квадратичних членів у рівнянні регресії. 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.

В той же час, 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.

Опуклий характер побудованих поверхонь свідчить про існування точок екстремуму, що демонструють максимальну продуктивність процесу. При відхиленні параметрів від оптимальних значень у будь-якому напрямку спостерігається зниження продуктивності.

Показник значення питомої швидкості знімання матеріалу V_p змінювався у діапазоні від 120 мг/(кг·год) до 330 мг/(кг·год) залежно від комбінації різних значень амплітуди віброколивачів, частоти обертання камери та маси середовища. Максимум продуктивності досягався при значенні параметрів $A=2$ 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.

Аналіз побудованих графіків рис. 3.10–3.12 при різних значеннях варіювання амплітуди показує, що зі збільшенням значення амплітуди спостерігається збільшення питомої швидкості знімання матеріалу.

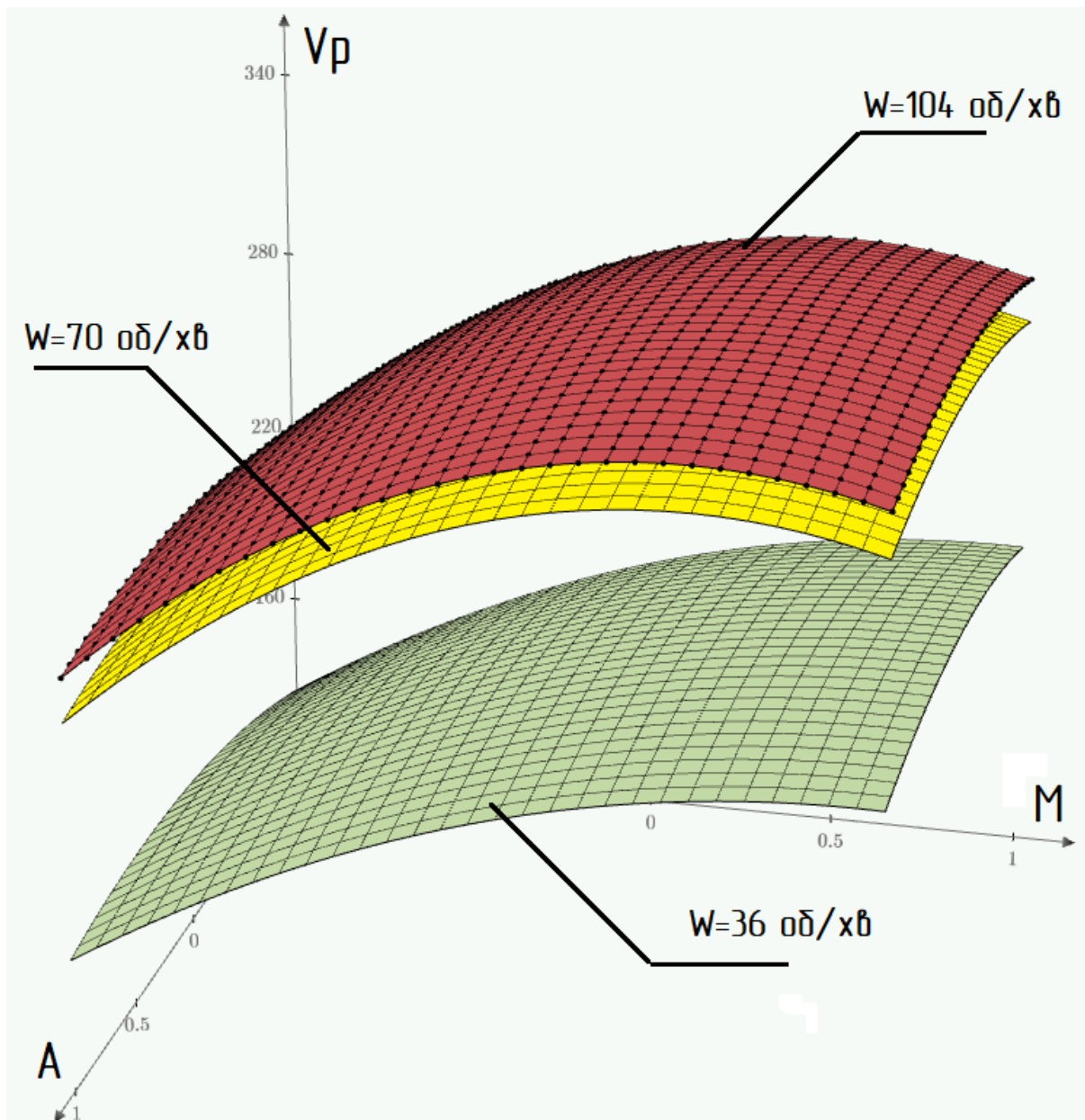


Рисунок 3.12 – Графік залежності питомої швидкості знімання матеріалу від амплітуди та маси при варіюванні частоти обертання робочої камери

Це пояснюється збільшенням кінетичної енергії частинок абразиву, що сприяє інтенсивнішому механічному впливу на поверхню оброблюваних деталей. При цьому, надмірне збільшення амплітуди вище оптимального значення, не збільшує продуктивність процесу внаслідок виникнення явища псевдорозрідження, при якому зменшується контактна сила між абразивними тілами та деталлю.

При зростанні швидкості обертання робочої камери відбувається суттєве збільшення питомої швидкості знімання. Поверхні, які відповідають більшим значенням швидкості обертання, розташовуються відповідно вище але мають більш круті градієнти, що свідчить про вагомий вплив цього параметру.

Збільшення маси компонентів робочого середовища також підвищує показники питомої швидкості знімання головним чином за рахунок збільшення кількості контактних взаємодій між абразивними частинками та деталлю, а також через зростання кількості високоенергетичних ударних взаємодій. Проте поблизу максимальних значень не спостерігається пропорційного збільшення питомої швидкості знімання, що може свідчити про зниження інтенсивності просторової циркуляції компонентів робочого середовища внаслідок зменшення кількості вільного об'єму робочої камери.

3.7 Дослідження енергоефективності віброустановки з активним робочим органом для комбінованої віброобробки

Для комбінованої віброабразивної обробки важливо оцінювати не лише абсолютні показники продуктивності процесу, але й ефективність використання спожитої енергії для досягнення заданого технологічного результату. Для кількісного аналізу розрахуємо показник енергоефективності η_e для різних комбінацій значень ключових параметрів, що наведені в табл. 3.6.

Для розрахунку були використані отримані чисельні експериментальні дані, наведені в табл. 3.5 підрозділу 3.7. Розрахунок показника енергоефективності здійснено за формулами (3.14) та (3.15) при значенні маси компонентів робочого середовища 4,8 кг. На основі розрахованих даних, зведених у таблиці 3.6, побудовано відповідний графік на рис. 3.13, що візуально демонструє залежність енергоефективності процесу від зміни досліджуваних параметрів.

Проаналізувавши розраховані величини значень можемо зробити наступні висновки:

1. Із підвищенням амплітуди вібропереміщення від 1 мм до 3 мм питома швидкість знімання матеріалу зростає, однак ця залежність має нелінійний

характер. Максимальні значення швидкості досягаються в діапазоні амплітуд 2 мм – 3 мм. Подальше збільшення амплітуди призводить до непропорційного росту енергоспоживання, який перевищує приріст продуктивності, що свідчить про зниження енергоефективності процесу.

Таблиця 3.6 – Розраховані значення показника енергоефективності

Амплітуда коливань, мм	Частота обертання камери, об/хв	Показник енергоефективності η_e , мг/(кг*год*Вт)
1	36	0,238
	70	0,358
	104	0,354
2	36	0,256
	70	0,375
	104	0,372
3	36	0,232
	70	0,346
	104	0,346

2. При збільшенні частоти обертання робочої камери з 36 об/хв до 70 об/хв зростання питомої швидкості знімання матеріалу відбувається швидше ніж непродуктивні втрати, що супроводжується збільшенням показника енергоефективності η_e від 0,238 мг/(кг·год·Вт) до 0,375 мг/(кг·год·Вт), що свідчить про поліпшення умов контактої взаємодії.

При збільшенні частоти обертання від 70 об/хв до 104 об/хв відбувається лише незначний приріст продуктивності при значному збільшенні енергоспоживання, максимальне значення показника енергоефективності становить 0,346 мг/(кг·год·Вт).

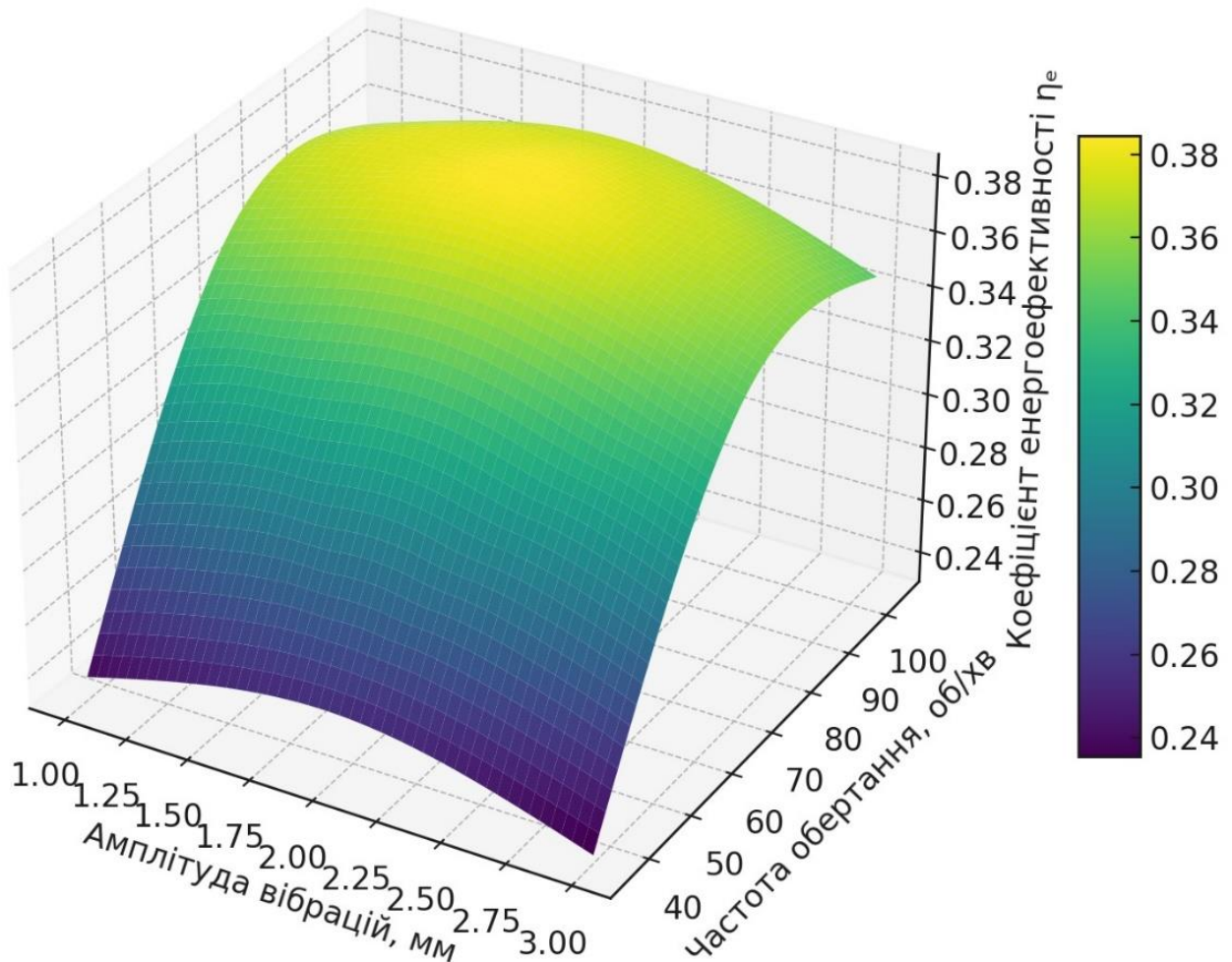


Рисунок 3.13 – Графік залежності енергоефективності від амплітуди коливань та частоти обертання робочої камери

Споживана потужність двигуна приводу обертової робочої камери P_2 зростає зі збільшенням частоти обертання від 3,2 Вт до 52,3 Вт. Найбільш енергоефективним є діапазон швидкостей обертання від 36 об/хв до 70 об/хв, оскільки при зростанні споживаної потужності на 6 Вт питома швидкість знімання матеріалу збільшується на 98,17 мг/(кг·год).

При збільшенні частоти обертання робочої камери з 70 об/хв до 104 об/хв спостерігається зростання споживаної потужності на 27 Вт при прирості питомої швидкості знімання матеріалу на 7,83 мг/(кг·год).

Максимальне значення показника енергоефективності становить $\eta_e = 0,375$ мг/(кг·год·Вт) відповідає амплітуді віброколивань 2 мм та частоті обертання камери 70 об/хв, тому такі параметри є раціональними.

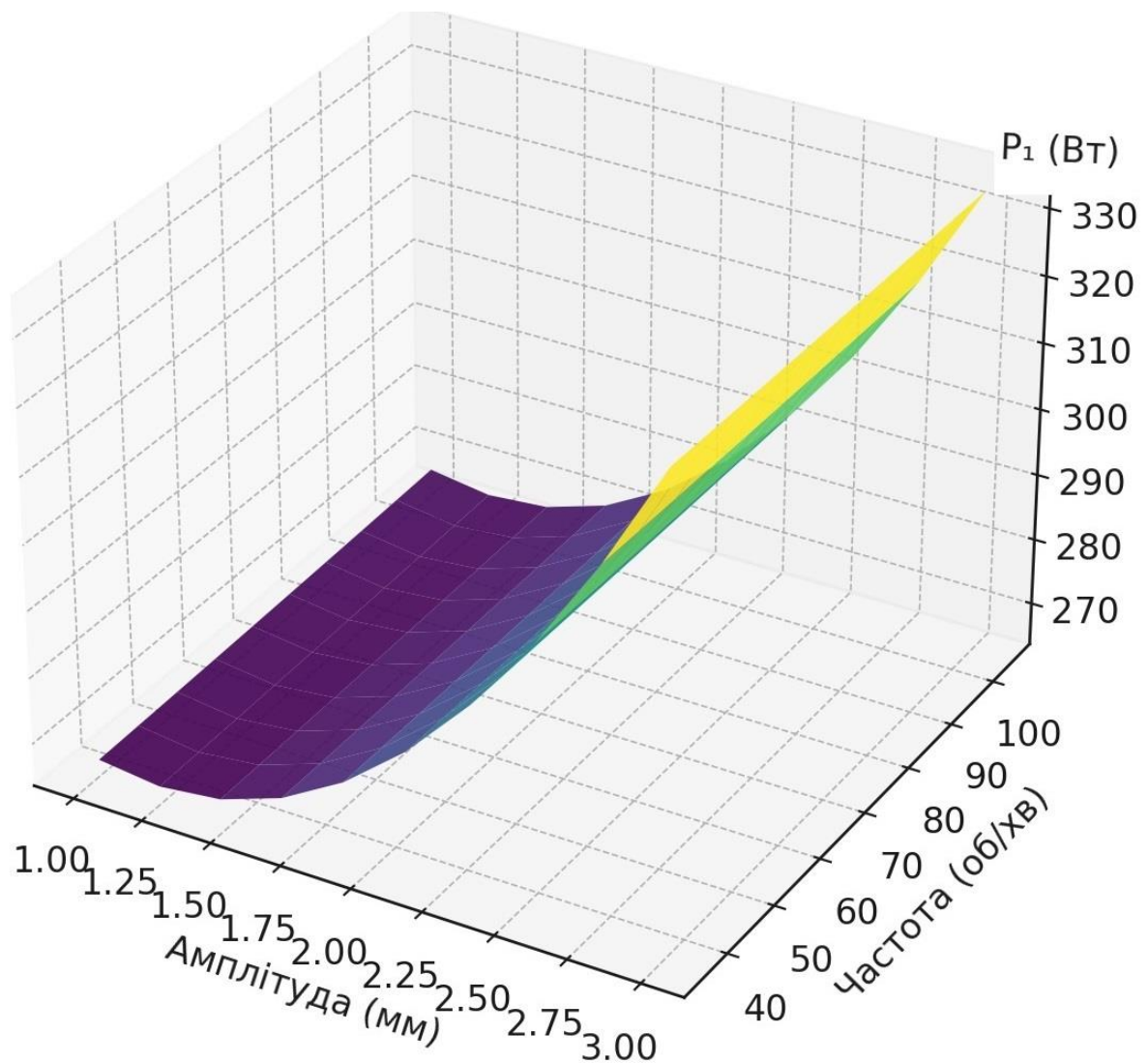


Рисунок 3.14 – Графік споживаної потужності віброприводу P_1 від амплітуди вібропереміщення та частоти обертання робочої камери

Для візуального відображення закономірностей зміни споживаної потужності на рис. 3.14, 3.15 зображено графіки потужностей для віброприводу P_1 та приводу обертання камери P_2 відповідно при масі компонентів робочого середовища 4,8 кг.

Як бачимо, споживана потужність віброприводу P_1 експоненційно зростає зі збільшенням амплітуди коливань, що свідчить про виражену залежність енергоспоживання від інтенсивності вібраційного збурення. Водночас зміна частоти обертання камери не чинить значимого впливу на величину потужності P_1 , що свідчить про відсутність взаємодії між обертальним рухом та вібропереміщенням.

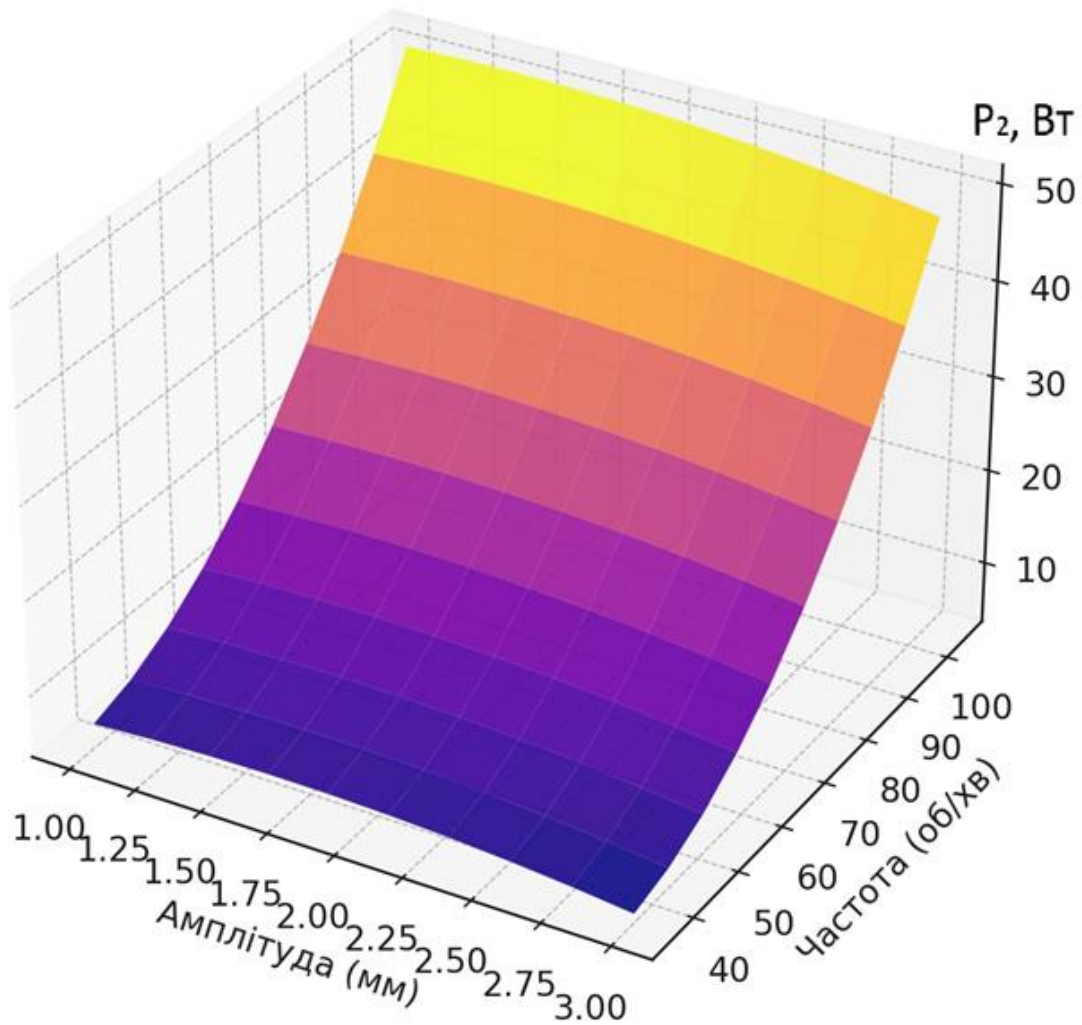


Рисунок 3.15 – Графік залежності споживаної потужності двигуна обертової робочої камери P_2 від амплітуди вібропереміщення та частоти обертання

Загальний приріст споживаної потужності P_1 при зміні від амплітуди віброколивань з 1 мм до 3 мм становить лише 5,5%. Визначений коефіцієнт кореляції Пірсона між P_1 та V_p становить 0,22, що вказує на незначний зв'язок між енергоспоживанням віброприводу та продуктивністю процесу.

Із графіка рис. 3.15 видно, що споживана потужність двигуна обертання P_2 має експоненційну залежність та зростає зі збільшенням частоти обертання камери. При цьому зміна величини амплітуди вібропереміщення не впливає на P_2 . Коефіцієнт кореляції між P_2 та V_p становить 0,68, що є значно більшим, ніж між P_1 та V_p – 0,22, що свідчить про більший вплив P_2 на продуктивність комбінованого процесу.

3.8 Висновки по розділу 3

Оцінкою та аналізом даних, отриманих в ході проведення експериментальних досліджень продуктивності та енергоефективності виготовленого дослідного зразка віброобладнання з активним робочим органом при варіюванні ключових параметрів встановлено наступне:

1. Питома швидкість знімання матеріалу нелінійно залежить від амплітуди віброколивань, частоти обертання та маси компонентів. При цьому результати всіх дослідів мають спільну закономірність, що свідчить про стаціонарний характер процесу, визначений механізмом контактної взаємодії частинок. Наявність екстремуму залежності вказує на існування раціональних параметрів, які забезпечують максимальну продуктивність обробки.

2. Встановлено, що найбільший вплив на питому швидкість знімання мають частота обертання камери та маса компонентів робочого середовища. Зміна амплітуди віброколивань при сталих значеннях інших параметрів найменше вплинула на продуктивність у дослідній установці. Максимум продуктивності досягається при середньому значенні варіювання амплітуди, що обумовлено зниженням інтенсивності контактної взаємодії та зростанням дисипативних втрат при її подальшому збільшенні.

3. Запропоновано методику оцінки енергоефективності комбінованої віброабразивної обробки шляхом визначення кількості затраченої енергії на одиницю величини питомої швидкості знімання матеріалу. На основі отриманих експериментальних даних встановлено, що енергоефективність має максимум при раціональних параметрах обладнання, за яких забезпечуються мінімальні непродуктивні (дисипативні) втрати та умови максимізації контактної взаємодії компонентів.

4. Найбільша частина енергоспоживання дослідної установки йде на вібропривод та становить 88%. Коефіцієнт кореляції між питомою швидкістю знімання матеріалу та потужністю привода обертової робочої камери становить 0,68, тоді як для вібропривода 0,22. Таким чином, застосування активного робочого органу у віброустановках створює новий фактор впливу, який при

незначному збільшенні загальних енерговитрат суттєво підвищує продуктивність та енергоефективність процесу.

5. Встановлено, що раціональний режим роботи дослідної віброустановки досягається за таких параметрів: амплітуда віброколивань $A=2$ мм, частота обертання робочої камери $W=70$ об/хв, маса компонентів робочого середовища $M=4,8$ кг. Питома швидкість знімання при цьому досягає максимального значення 330 мг/(кг·год), що у $2,75$ рази вище мінімального значення 120 мг/(кг·год). При цьому енергоефективність становить $0,375$ мг/(кг·год·Вт), що є у $1,6$ рази вище за найменшу, яка складає $0,232$ мг/(кг·год·Вт).

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБЛАДНАННЯ

4.1 Виробничі випробування дослідної комбінованої віброустановки

Реалізація випробувань запропонованого в даному дослідженні конструкторсько-технологічного рішення комбінованого способу віброабразивної обробки, що спрямоване на підвищення продуктивності процесу та якості поверхонь деталей, були здійснені за участю підприємства ТОВ «УКРНАСОСПРОМ» (<https://ukrnasosprom.com.ua>, м. Полтава), яке спеціалізується на виготовленні насосного обладнання (рис. 4.1) та комплектуючих до них.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд насоса ЦНСк1 – 20

Робоче колесо є основним функціональним елементом відцентрових насосів, визначає його технічні характеристики та ефективність роботи в цілому. У насосах марок ЦНСк використовуються робочі колеса збірної конструкції (рис. 4.2). Воно складається з таких елементів – основний диск, покривний диск та лопаті. Між собою вони з'єднані за допомогою гвинтів та зварювання.

Лопаті виготовляють з нержавіючої сталі марки 12Х18Н10Т методом лазерного різання з листового металу різної товщини (від 3 мм до 6 мм). Попри високу точність різання та швидкість виготовлення у зонах геометрично складних

ділянок контурів та отворів є поодинокі залишкові задирки, грат і гострі краї, які потребують додаткового ручного зняття (рис. 4.3).

Наявність залишкових гострих країв підвищує ризик травмування персоналу під час виконання складальних операцій, а також ускладнює досягнення необхідної точної співвісності між основним та покривним дисками.



Рисунок 4.2 – Будова робочого колеса насоса ЦНСк 1–20

Оскільки номінальна частота обертання робочого колеса насоса може перевищувати 3000 об/хв, наявність залишкових дефектів (задирок, гострих країв, грату) призводить до похибок складання, внаслідок чого виникає неспіввісність елементів і підвищений дисбаланс, що зумовлює додаткове навантаження на підшипникові вузли та призводить до зниження їхнього ресурсу.

Також одним із факторів, що впливають на роботу відцентрових гідравлічних насосів є кавітація. Руйнування від кавітації розвивається у зонах з різкими змінами швидкості потоку та від збільшення гідродинамічного опору елементами які мають гострі краї, грат та задирки. У таких зонах відбувається місцеве зменшення тиску нижче насичення, що призводить до утворення парових порожнин – кавітаційних бульбашок [130]. Після переміщення цих

бульбашок до зони з високим тиском відбувається їх імплізія (внутрішній вибух) що викликає ерозивне руйнування матеріалу та специфічну корозію внаслідок постійного видалення захисної пасивуючої плівки металів.

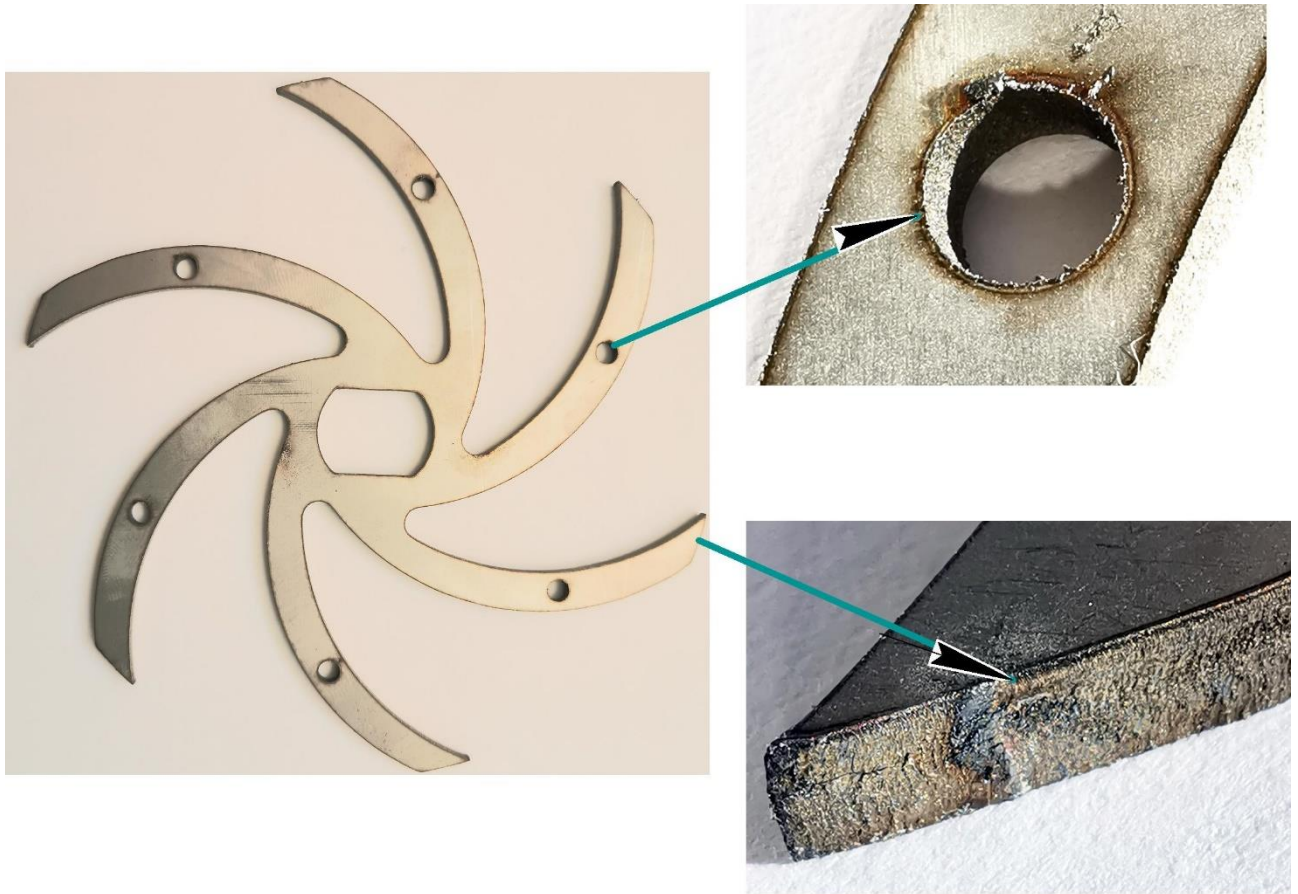


Рисунок 4.3 – Загальний вигляд лопаті робочого колеса та збільшені фрагменти контурів що мають залишкові грати, задирки, гострі краї

З огляду на це, якість фінішної обробки лопатей робочого колеса насосів набуває особливо важливого значення. Висока якість (малі мікронерівності, гладкість) поверхонь зменшує гідравлічний опір та значно знижує ймовірність утворення кавітаційних зон. Це збільшує експлуатаційну надійність та ресурс насосних агрегатів.

Наявність залишкових дефектів рис. 4.3 знижує продуктивність процесу через необхідність додатково візуального контролю зовнішнього вигляду та ручного доопрацювання. Основною причиною зниження якості обробки є неоднорідність контактної взаємодії абразивного середовища з окремими

ділянками поверхні деталі, внаслідок цього спостерігається різна інтенсивність мікрорізання, особливо на ділянках поверхні складної геометричної форми.

Для встановлення ефективності запропонованого комбінованого способу обробки проведено експериментальне випробування на лопатях робочого колеса, зовнішнім діаметром 125 мм, товщина 3 мм.

На підприємстві ТОВ «УКРНАСОСПРОМ» їх фінішна обробка виконується з використанням промислової віброабразивної машини з об'ємом робочої камери 20 л. Обробка деталей виконується партіями по 10 шт. Абразивні тіла робочого середовища марки TR 25A 10 ST1, керамічні, форма скошений трикутник розмірами 6x6x6 (мм) [76–78]. Амплітуда віброколивачів 4 мм, тривалість обробки 40 хв.

Лопаті такого ж типорозміру були оброблені на дослідній комбінованій віброабразивній установці в навчальній лабораторії кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

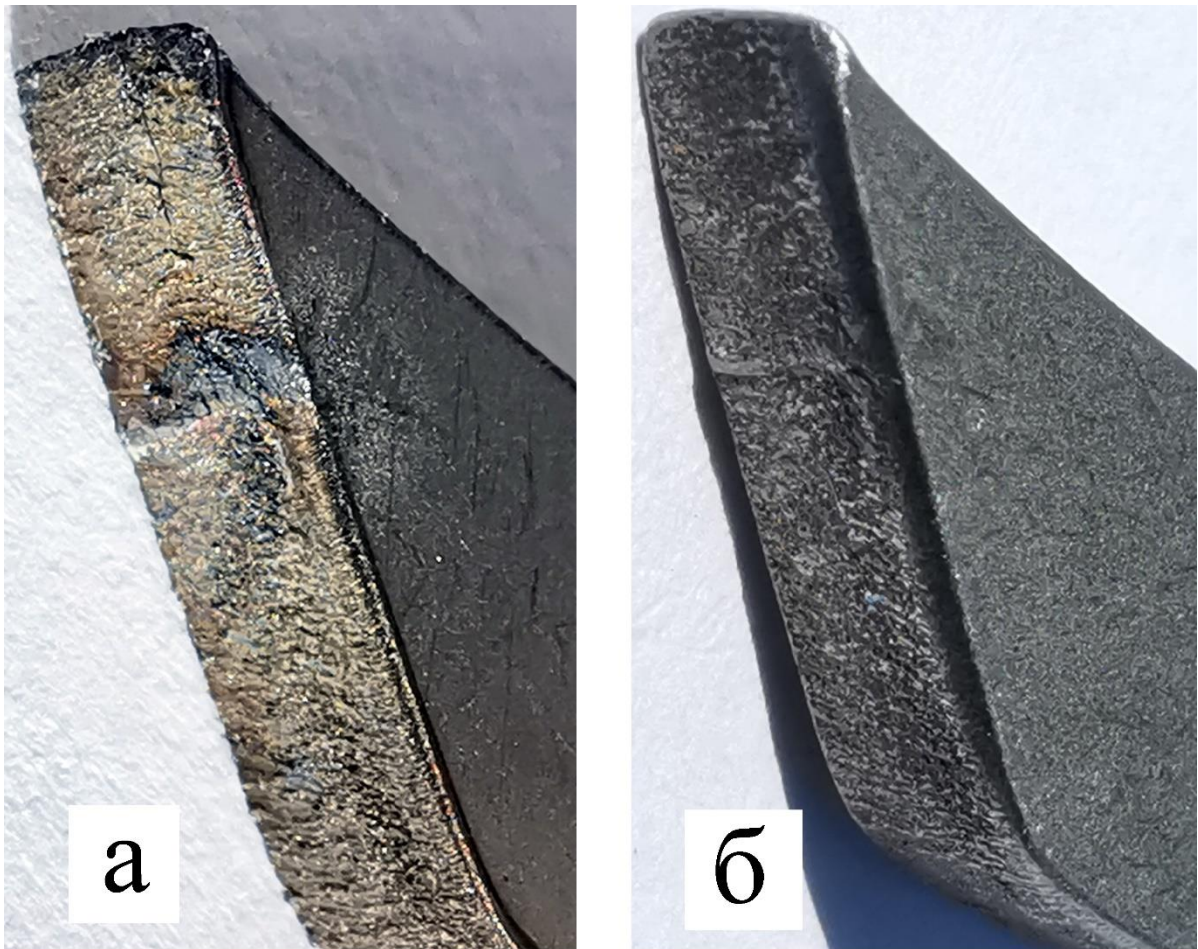
Враховуючи об'єм оберткової робочої камери, що становить 3,9 л, кількість оброблюваних деталей було обмежено до двох для зменшення кількості взаємних зіткнень та, відповідно, знизити ризик виникнення механічних пошкоджень. Основні параметри процесу: амплітуда віброколивачів – 2 мм, частота обертання робочої камери – 70 об/хв.

Для визначення мінімально необхідного часу обробки проведено віброабразивну обробку при різній тривалості процесу від 10 до 40 хвилин. Після кожної обробки з інтервалом 5 хвилин візуально виконувалась оцінка стану поверхні деталей за показниками шорсткості, рівномірності обробки та наявності задирок. Встановлено, що після 35 хвилин обробки поверхня деталей оброблена рівномірно, задирки відсутні.

Після завершення обробки деталі були ретельно промиті для видалення залишків абразивного матеріалу та висушені.

На рис. 4.4–4.6 наведено фото 5-тикратно збільшених фрагментів поверхні деталей, до та після обробки на дослідній віброустановці.

Після обробки деталей на дослідній установці комбінованим способом усі задирки та грат повністю зняті (рис. 4.4–4.6 (б)), гострі краї рівномірно скруглено радіусом приблизно 0,2 мм по всьому периметру профілю. Це виключає необхідність ручного доопрацювання. Поверхня має рівномірне матування, шорсткостість Ra від 1,6 мкм до 2,5 мкм. При цьому зменшився час обробки на 10 % та витрати електроенергії на 15 % у порівнянні зі звичайною віброустановкою на виробничій лінії з робочою камерою тороподібної форми.

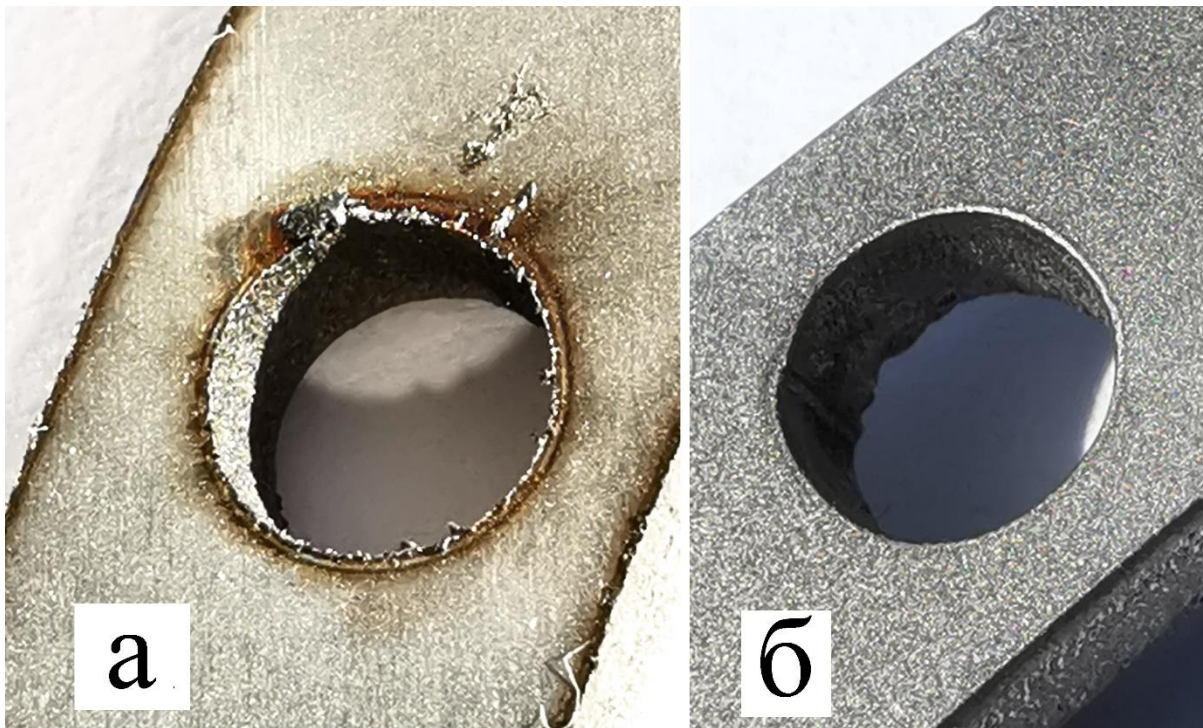


а – необроблена деталь; б – після комбінованої обробки

Рисунок 4.4 – Збільшений фрагмент зовнішнього краю лопаті

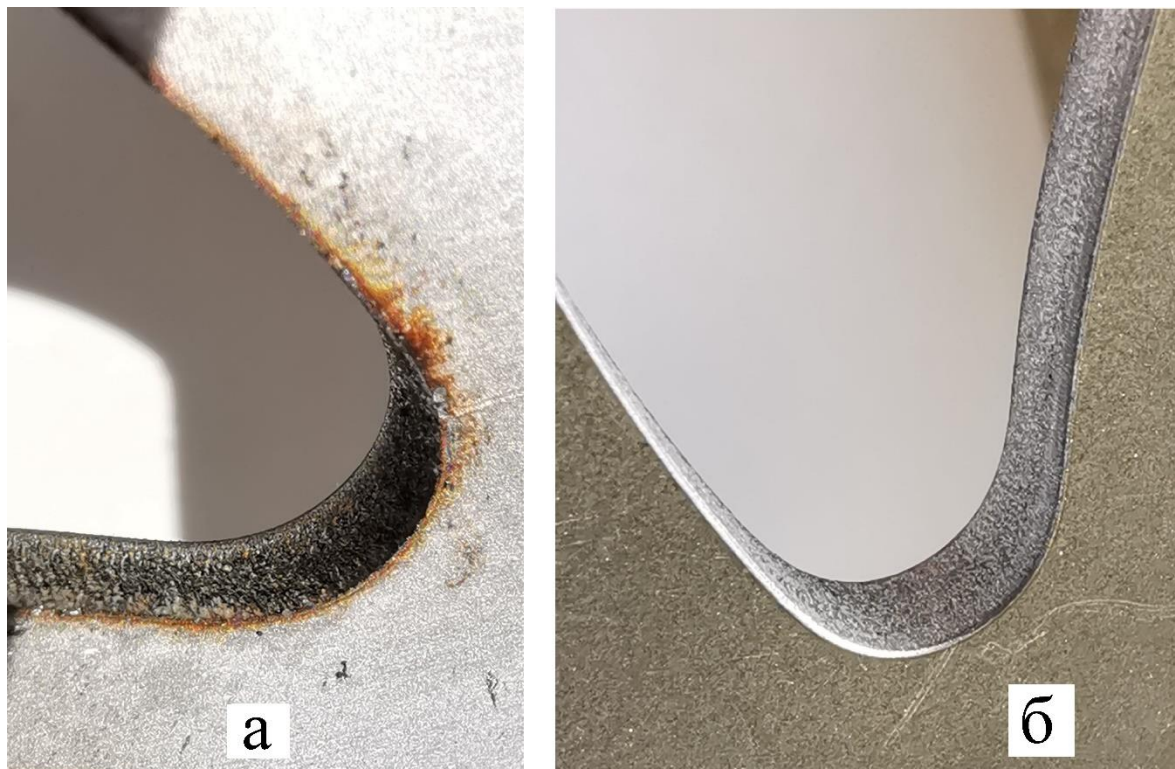
Таким чином, запропонований спосіб комбінованої віброабразивної обробки та конструктивне рішення обладнання для його реалізації рекомендовано до впровадження у виробництво на ТОВ «УКРНАСОСПРОМ» для фінішної обробки деталей, особливо зі складною формою, як більш

ефективний спосіб об'ємної обробки у середовищі вільних абразивів.



а – необроблена деталь; б – після комбінованої обробки

Рисунок 4.5 – Збільшений фрагмент отвору лопаті



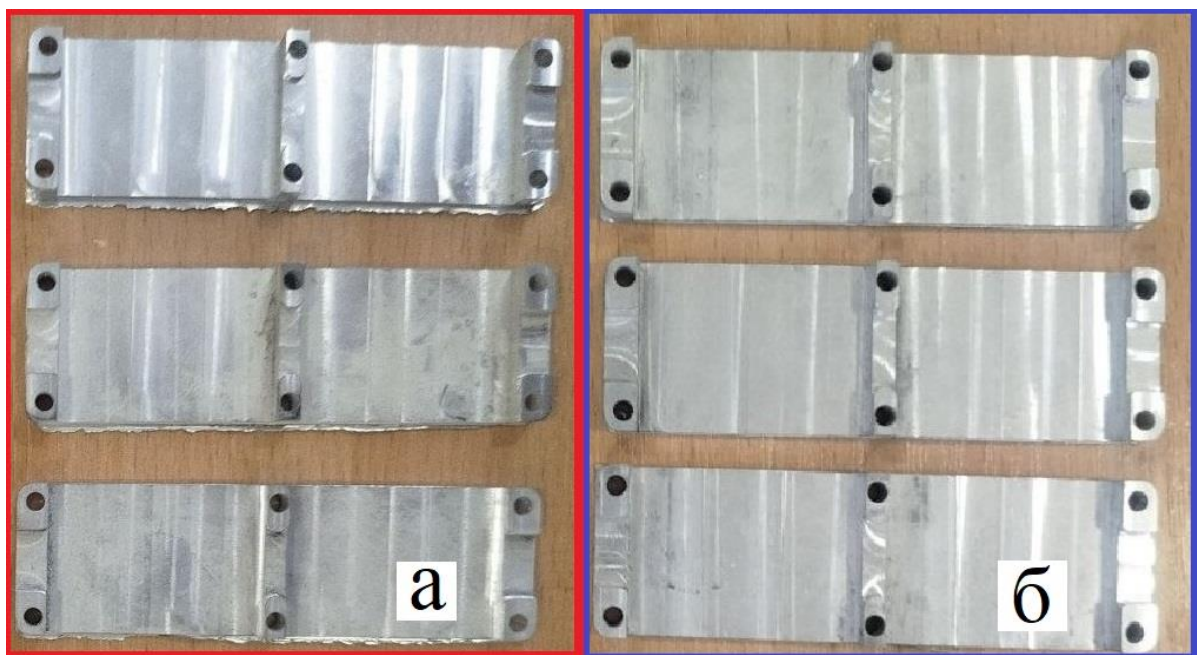
а – необроблена деталь; б – після комбінованої обробки

Рисунок 4.6 – Збільшений фрагмент впадини лопаті

Також додатково була здійснена віброобробка відливок алюмінієвих радіаторів для радіоелектронних пристроїв на дослідній віброустановці, поверхня яких має складну форму та значну величину задирок по периметру (рис.4.7–4.9).



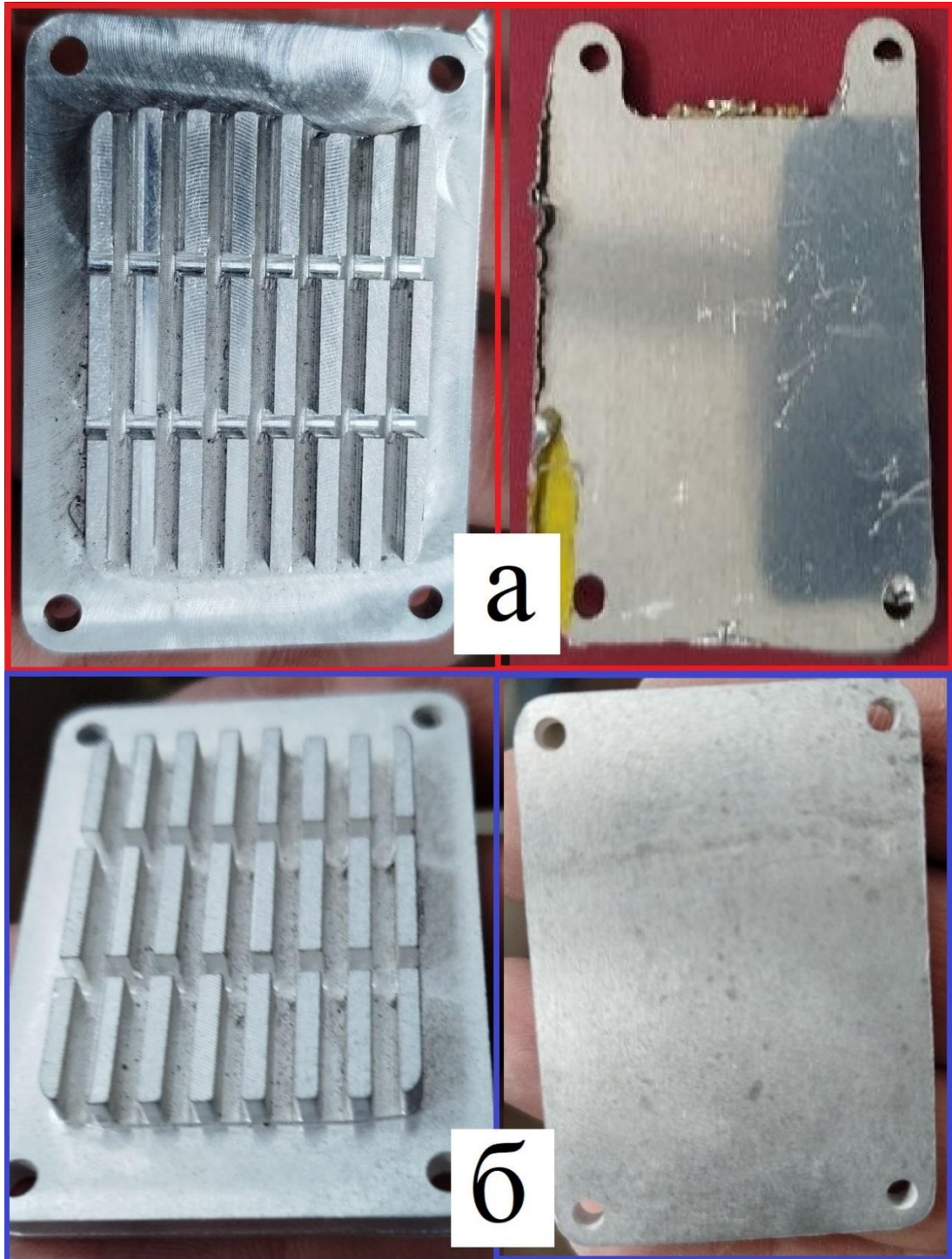
Рисунок 4.7 – Завантаження радіаторів в робочу камеру дослідної установки



а – необроблена деталь; б – після комбінованої обробки

Рисунок 4.8 – Загальний вигляд радіаторів тип 1

Були використані абразивні тіла марки TR 25A 10 СТ1, керамічні, форма скошений трикутник розмірами 6х6х6 (мм). Основні параметри процесу – амплітуда віброколивань 2 мм, частота обертання робочої камери 70 об/хв. Необхідний час віброобробки склав 30 хв.



а – необроблена деталь; б – комбінована обробка

Рисунок 4.9 – Загальний вигляд радіаторів тип 2

4.2 Техніко-технологічне обґрунтування параметрів обладнання комбінованого віброабразивного процесу

Раціональний режим роботи комбінованої віброустановки є необхідною умовою забезпечення енергоефективності технологічного процесу. Він визначається оптимальними значеннями основних параметрів обладнання. Враховуючи особливості сумісної дії двох типів руху – поєднання вібраційного та обертального впливу, доцільно загальні параметри віброабразивного процесу розділити на два види:

1. Технологічні параметри – це змінні параметри процесу обробки, які визначають інтенсивність, продуктивність і якість та змінюються незалежно від конструкції обладнання.

2. Конструктивні параметри – це характеристики, що визначають кінематичні та динамічні властивості процесу і задаються конструкцією обладнання. Вони залежать від будови обладнання та можуть змінюватися на етапі проєктування або модернізації.

Розглянемо технологічні параметри:

– амплітуда вібрацій оберткової робочої камери визначає енергію механічних коливань, що визначає інтенсивність взаємодії абразивних тіл з поверхнею деталі. Зі збільшенням амплітуди зростає відповідно загальна кінетична енергія робочого середовища. Максимальне її значення обмежене міцністю оброблюваних деталей та параметрами обладнання;

– частота обертання робочої камери є основним параметром впливу і визначає інтенсивність та характер циркуляційного руху абразивних тіл та оброблюваних деталей. Надмірна швидкість обертання збільшує сили взаємного притискання настільки, що при цьому обмежується взаємний просторово-циркуляційний рух компонентів та знижується ефективність обробки поверхнь деталей;

– маса робочого середовища (абразивні тіла та деталі) впливає на інерційні властивості системи. Визначається кількістю деталей, яка повинна буди

оброблена за один цикл та обраним типом та кількістю абразивних тіл. Оптимальним вважається об'ємне співвідношення абразивних тіл до оброблюваних деталей у межах 3:1–10:1 відповідно, що вибирають залежно від габаритів, маси, геометрії та вимог до якості обробки.

Менші значення співвідношень 3:1–5:1 доцільно застосовувати для великогабаритних деталей без високих вимог до якості обробленої поверхні.

Співвідношення 7:1–10:1 застосовують для обробки тонкостінних чи складнопрофільних деталей, коли потрібна фінішна обробка з розмірами мікронерівностей поверхні не більше 0,15 мкм або полірування. Висока частка абразивних тіл у цьому випадку забезпечує рівномірну контактну взаємодію, заповнення важкодоступних зон та мінімізацію взаємних зіткнень між деталями;

– необхідна тривалість віброабразивної обробки залежить від технологічних параметрів процесу та повинна забезпечити досягнення цільових показників якісних характеристик поверхні, зокрема шорсткості. Вона визначається не лише початковим станом поверхні деталей та вимогами до кінцевого результату, а й інтенсивністю взаємодії в робочому середовищі, яка, у свою чергу, залежить від амплітуди, частоти вібрацій, швидкості обертання камери. Комбінований режим за рахунок підвищення умов ефективної взаємодії скорочує тривалість обробки у порівнянні з традиційним способом віброобробки.

Розглянемо конструктивні параметри:

1. Віброзбурююча сила, створювана дебалансним віброзбуджувачем, повинна забезпечувати задану амплітуду та частоту коливань з урахуванням маси системи та її демпфувальних властивостей. Використання в комбінованій віброустановці керованого віброзбуджувача кутових коливань дає можливість в широкому діапазоні плавно змінювати під час роботи величину цієї віброзбурюючої сили. За необхідності дотримання стабільної величини амплітуди коливань при зміні, наприклад, маси деталей або абразивних тіл віброзбурююча сила може регулюватись додатковим встановленням систем автоматичного керування.

Також від ефективності роботи вібробуджувача головним чином залежить показник енергоефективності обладнання та процесу вцілому. Як відомо, потужність приводного двигуна залежить насамперед від пускового моменту системи [131]. У разі використання керованого вібробуджувача пуск здійснюється у зрівноваженому стані дебалансів, що дозволяє уникнути значних інерційних навантажень і, відповідно, потреби у потужному двигуні, як це характерно для традиційних конструкцій. Вихід приводного двигуна на робочу зарезонансну частоту відбувається без коливального руху що виключає можливість прояву небажаного ефекту Зоммерфельда-Кононенка. Це дає можливість використання у приводах двигунів меншої потужності, що зменшує габарити та вартість обладнання та його енергоспоживання до 70 %.

2. Об'єм обертової робочої камери віброустановки визначається кількістю деталей, які необхідно обробити за один цикл технологічного процесу. Доцільно передбачати об'єм від 20% до 35% більший за сумарний об'єм деталей і абразиву, щоб забезпечити належний циркуляційний рух.

3. Максимально допустима амплітуда віброколивань та частота обертання обмежуються міцністю конструкції, жорсткістю пружних елементів. Перевищення максималних проєктних значень характеристик обладнання може призвести до небажаних резонансних режимів зі зниженням надійності та довговічності.

4. Потужність приводів вібробуджувача та приводу обертання робочої камери визначають виходячи з режимів роботи обладнання. Доцільно закладати запас потужності від 20% до 30% вище розрахункового, що забезпечить стабільність процесу при змінах номінальної маси завантаження, амплітуди коливань або швидкості обертання.

5. Жорсткість пружинної підвіски віброплатформи визначає амплітудно-частотні та динамічні характеристики системи. При раціональній жорсткості підвіски досягається необхідний енергетичний вплив на робоче середовище, оптимальний баланс між амплітудою коливань та потужністю вібропривода.

Загальний покроковий алгоритм, що описує етапи визначення параметрів процесу наведено на рис. 4.7.

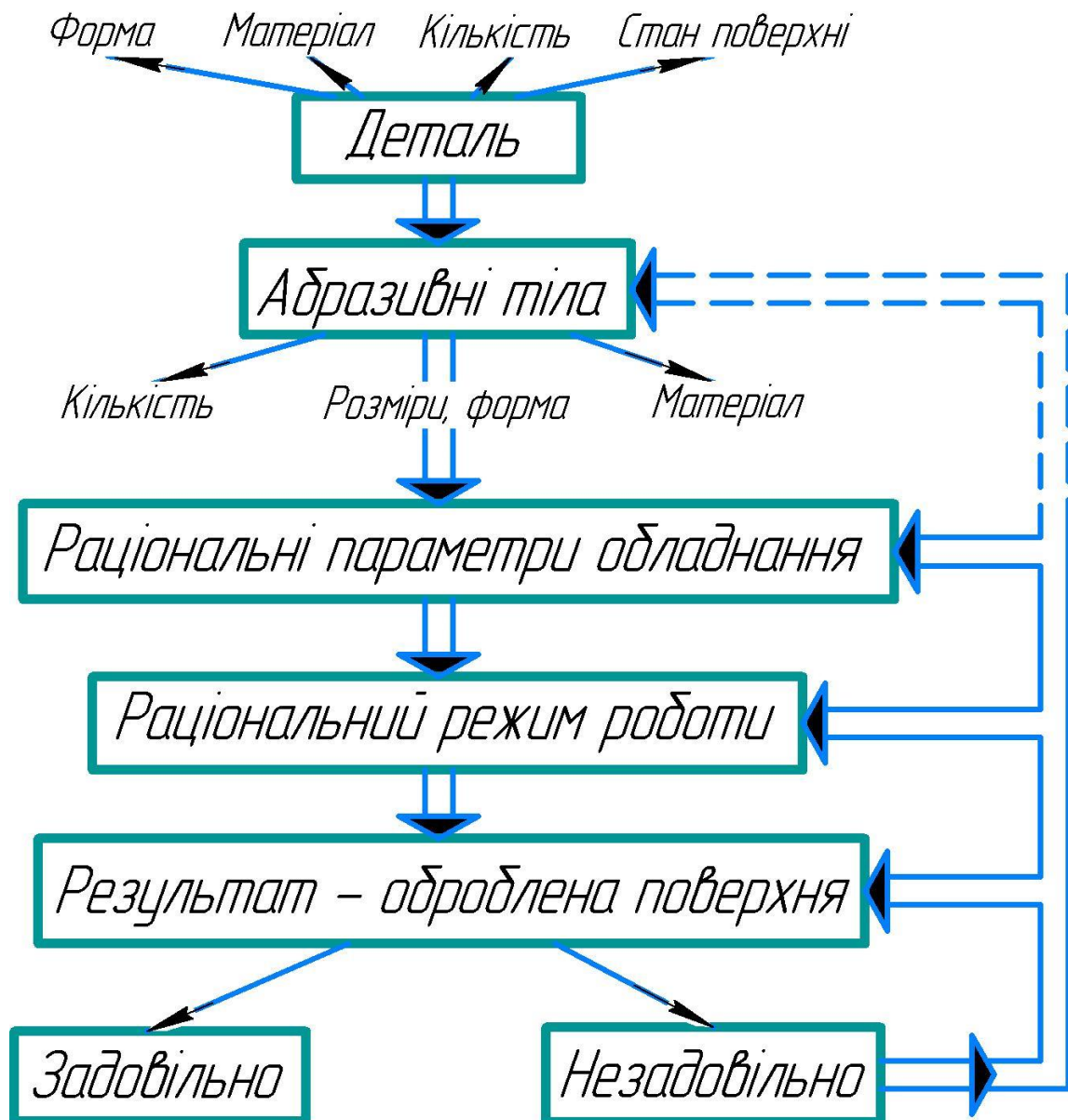


Рисунок 4.7 – Алгоритм визначення параметрів комбінованого віброабразивного процесу

4.3 Рекомендації щодо інженерного розрахунку параметрів комбінованої віброустановки

Геометричні параметри обертової робочої камери головним чином визначаються об'ємом робочого середовища, що обробляється за один цикл, тому є важливою характеристикою віброобладнання.

Враховуючи те, що в нашій віброустановці обертова робоча камера має циліндричну форму та горизонтально розміщена, співвідношення значень її довжини до діаметра рекомендується приймати у межах від 1,2 до 1,7.

Геометричний внутрішній об'єм робочої камери визначається

$$V = \frac{\pi D^2}{4} L, \quad (1)$$

де D – внутрішній діаметр обертової робочої камери;

L – довжина обертової робочої камери.

Для створення умов належного циркуляційного руху абразивних тіл та їх ефективної взаємодії з деталями у обертовій робочій камері необхідно передбачити наявність вільного простору. Тому максимальне її заповнення не повино перевищувати від 50 % до 75 % від її загального об'єму [17, 33, 46]. Значення цього показника залежить від низки факторів, зокрема від форми, розмірів та густини частинок. Для врахування зазначених особливостей вводиться коефіцієнт заповнення φ , який характеризує частку об'єму, фактично зайнятого компонентами робочого середовища. Таким чином

$$V_K = \varphi \cdot \frac{\pi D^2}{4} L. \quad (2)$$

Прийнявши середнє значення співвідношення довжини обертової робочої камери до діаметра 1,5, тобто $L=1,5 \cdot D$ отримаємо

$$V_K = 1,178 \cdot D^3 \cdot \varphi. \quad (3)$$

Діаметр обертової робочої камери обчислюється за формулою

$$D = \sqrt[3]{\frac{V_K}{1,178 \cdot \varphi}}. \quad (4)$$

Одне з головних завдань, яке повинен вирішити інженерний розрахунок параметрів технологічного процесу комбінованої віброобробки є максимально ефективно використання затраченої енергії. Для вирішення цієї задачі потрібно визначити достатню мінімальну потужність двигунів приводів вібробуджувача та обертової робочої камери, яка забезпечить раціональний режим роботи обладнання.

Зазначимо, що теоретичне визначення потужності двигунів пов'язане зі складністю визначення необхідної енергії для реалізації віброобробки, що залежить від комплексу великої кількості взаємопов'язаних факторів процесу. Попередній аналіз літературних джерел [26, 44, 50] дозволив встановити, що на даний час в переважній більшості потужність приводу вібраційних машин визначається емпіричним шляхом.

Разом з тим, використовуючи спрощення можливо дати узагальнені рекомендації по теоретичному розрахунку потужностей двигунів для вібробуджувача та обертання робочої камери. Вони можуть бути використані на етапі проєктування при попередньому виборі конструктивних вузлів, коли необхідно оцінити собівартість та технічну можливість виготовлення обладнання.

Потужність двигуна вібробурювача P_B , для створення необхідного вібраційного впливу

$$P_B = \frac{m_{ЗАГ} \cdot a_B \cdot \nu_B}{\eta_B}, \quad (5)$$

$$a_B = (2\pi f)^2 \cdot A, \quad \nu_B = 2\pi f \cdot A, \quad (6)$$

$$m_{ЗАГ} = m_{ПЛАТФ} + m_{КАМ} + m_C, \quad (7)$$

де a_B – середнє віброприскорення;

ν_B – середня швидкість віброколивань;

η_B – ККД привода (0,7–0,85);

A – амплітуда віброколивань;

f – частота віброколивань;

$m_{ПЛАТФ}$ – маса віброплатформи ;

$m_{КАМ}$ – маса обертової робочої камери;

m_C – маса компонентів середовища.

Тоді можна записати

$$P_B = \frac{1,2 \dots 1,5 \cdot m_{ЗАГ} \cdot (2\pi f)^3 \cdot A^2}{\eta}. \quad (8)$$

Потужність двигуна P_O привода обертання робочої камери

$$P_O = \frac{M \cdot \omega}{\eta_o}, \quad (9)$$

$$M = k \cdot m_C \cdot g \cdot R, \quad (10)$$

$$P_O = \frac{k \cdot m_C \cdot g \cdot R \cdot \omega}{\eta}, \quad (11)$$

де M – крутний момент на обертовій робочій камері;

ω – кутова швидкість обертання робочої камери;

A – амплітуда вібрацій;

f – частота віброколивань;

$m_{ПЛАТФ}$ – маса віброплатформи;

$m_{КАМ}$ – маса обертової робочої камери;

m_C – маса компонентів середовища.

4.4 Висновки по розділу 4

1. По результатам виробничих випробувань на ТОВ «УКРНАСОСПРОМ» при обробці деталей складної форми, а саме лопаті робочого колеса насоса ЦНСк1 – 20 встановлено збільшення якості оброблюваної поверхні деталі, зменшена тривалість обробки 10 %, витрати електроенергії на 15 % у порівнянні з діючою віброустановкою.

2. Обґрунтовані рекомендації для визначення основних технологічних та конструктивних параметрів обладнання для комбінованої віброабразивної обробки.

3. Наведено алгоритм визначення параметрів комбінованого віброабразивного процесу, установки, який враховує характеристики оброблюваних деталей.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що віброабразивна обробка є незамінним методом фінішної обробки поверхонь деталей складної форми, однак має порівняно високу енергоємність. Аналіз досвіду використання активних робочих органів у віброобладнанні засвідчив їх високу ефективність. Для забезпечення максимальної продуктивності та енергоефективності віброобробки необхідно встановити їх закономірності та визначити раціональні параметри обладнання.

2. Розроблено нову конструкцію віброустановки для комбінованого способу обробки та встановлені її основні параметри – амплітуда віброколивань, частота обертання робочої камери, маса середовища та їх вплив на контактну взаємодію абразивних тіл з поверхнею оброблюваних деталей.

3. Встановлено, що зміною параметрів комбінованої віброустановки можна керувати як продуктивністю так і енергоефективністю процесу за рахунок як кількісної зміни загальної енергії так і за рахунок її якісного перерозподілу на виконання корисної роботи – знімання матеріалу.

4. Залежність питомої швидкості знімання матеріалу є нелінійною, та має екстремум при максимальному значенні 330 мг/(кг·год), що у 2,75 рази більше мінімального 120 мг/(кг·год). Отримане регресійне рівняння встановило найбільший вплив частоти обертання камери на продуктивність процесу.

5. Експериментально встановлено, що енергоспоживання дослідної установки має експоненційну залежність, більша частина якої витрачається на вібропривод та становить 88%. Коефіцієнт кореляції між питомою швидкістю знімання матеріалу та потужністю привода обертової робочої камери становить 0,68, тоді як для вібропривода 0,22. Обертова робоча камера створює новий фактор впливу, який суттєво збільшує продуктивність та енергоефективність процесу.

6. При збільшенні значень параметрів енергоефективність зростає до максимального значення 0,375 мг/(кг·год·Вт), а далі зменшується внаслідок різкого зростання дисипативних втрат зі зниженням сил контактної взаємодії

компонентів робочого середовища. Мінімальне значення 0,232 мг/(кг·год·Вт), що в 1,6 рази менше максимального.

7. При виробничому застосуванні дослідної установки для фінішної віброабразивної обробки робочих коліс насосів марки ЦНСк на підприємстві ТОВ «УКРНАСОСПРОМ» (м. Полтава) досягнуто зменшення тривалості обробки на 10 % та енергоефективності на 15 % порівняно з діючим обладнанням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Берник П. С., Чубик Р.В. Методика розрахунку дебалансного приводу резонансної вібраційної технологічної машини. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвід. наук. техн. зб. 2005. № 39. С.12-25.
2. Сердюк Л.І., Давиденко Ю.О., Костенко П.М. Деякі підходи до моделювання середовища, що обробляється вібраційним пристроєм. Ресурсоекономні матер., констр., будівлі та споруди. Рівне : НУВГП, 2005. Вип. 12. С. 69–72.
3. Паламарчук І. П., Янович В. П., Купчук І. М., Соломко І. В. Розробка конструктивно-технологічної схеми віброторної дробарки. Вібрації в техніці та технологіях. 2013. № 1(69). С. 125–129.
4. Сердюк Л.И., Давыденко Ю.А., Осина Л.М. Различные подходы к оценке динамических, энергетических и технологических возможностей вибрационных машин. Вибрации в технике и технологиях. Всеукраїнський науково-технічний журнал. 2004. № 3 (35). С. 113-117.
5. Берник П. С., Чубик Р.В., Таянов С.А. Алгоритм для визначення частоти та амплітуди коливань вібротомашин. Вибрации в технике и технологиях. Всеукраїнський науково-технічний журнал. 2005. № 2 (40). С. 1-6.
6. Паламарчук І.П. Обґрунтування основних етапів інженерного розрахунку та проектування вібраційних технологічних машин. Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. Вип. 20. ВДАУ, 2006. С. 227 – 234.
7. Гевко Б. М., Кондратюк О. М. Особливості технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей. Вісник НУВГП: зб. наук. пр. Рівне: НУВГП, 2012. Вип. 3(59). С. 69–76.
8. Цуркан О.В., Величко Л.Д., Присяжнюк Д.В. Математична модель вібраційної сушарки з маятниковими механізмами вільного ходу. Вібрації в техніці та технологіях. 2017. № 2 (85). С. 103-113.

9. Берник П, С., Чубик Р.В. Методика розрахунку дебалансного приводу резонансної вібраційної технологічної машини. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвід. наук.-техн. зб. 2005. № 39. С. 12-25.
10. Гевко Б. М., Кондратюк О. М., Шаблій О. М., Підгурський М. І. Результати експериментальних досліджень технологічного процесу вібраційно-відцентрової обробки деталей. Науковий журнал Вісник ТНТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль, 2012. Вип. 3(67). С. 190–197.
11. Берник П. С., Чубик Р.В., Таянов С.А. Перехідні процеси у вібраційних технологічних машинах із дебалансним приводом. Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. Вісник НУ "Львівська політехніка". 2005. № 40. С. 25 – 34.
12. Цуркан О.В., Герасимов О.О., Солоня О.В. та ін. Математична модель динаміки руху робочої камери енергоощадної вібраційної сушарки. Вібрації в техніці та технологіях. 2008. №2 (51). С. 52-56.
13. В. А. Богуслаєв, Ф. И. Муравченко, П. Д. Жеманюк. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей ГТД. Лопатки компресора вентилятора : Запоріжжя: ВАТ «Мотор Січ», 2003. 396 с.
14. Кондратюк О. М., Ромейко І. В. Аналіз циркуляції робочого середовища при вібраційно-відцентровій обробці деталей. Вісник НУВГП. Рівне, 2006. С. 253–271.
15. Ярошенко Л.В. Експериментальні дослідження розподілу динамічного напору циркуляційного руху робочого середовища в тороїдальних контейнерах вібраційних машин. Вібрації в техніці та технологіях. 2019. Вип. 3 (94). С. 33 - 44.
16. Кондратюк О.М. Оптимізація параметрів проведення експериментальних досліджень вібраційно-відцентрової обробки. Рівне, 2008. Вип. 1 (41). С. 315–321.
17. Чубик Р. В., Ярошенко Л.В. Керовані вібраційні технологічні машини : монографія. Вінниця: ВНАУ, 2011. 355 с.

18. Чубик Р.В. Розробка енергозберігаючого приводу вібраційних технологічних машин. Збірник матеріалів п'ятої міжвузівської науково-практичної конференції аспірантів "Сучасна аграрна наука: напрями досліджень стан і перспективи". Вінниця: 2005. С. 191-194.

19. Чубик Р. В., Сіденко П. В. Оптимізація частотно-силових параметрів електродинамічного приводу вібраційних технологічних машин. Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава: 2005. № 16. С. 305-312.

20. Hashemnia K., Mohajerani A., Spelt J. K. Development of a laser displacement probe to measure particle impact velocities in vibrationally fluidized granular flows. *Powder Technology*. 2013. Vol. 235. P. 940–952. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.12.001>.

21. Tian Y. B., Zhong Z. W., Tan S. J. Kinematic analysis and experimental investigation on vibratory finishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86. No. 9–12. P. 3113–3121. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8378-x>.

22. Sofronas A., Taraman S. Model development and optimization of vibratory finishing process. *International Journal of Production Research*. 1979. Vol. 17, No. 1. P. 23–31. DOI: 10.1080/00207547908919592.

23. Stephen W., Yuchan L., Keng Soon W., Guan Leong T. A material removal and surface roughness evolution model for loose abrasive polishing of free form surfaces. *International Journal of Abrasive Technology*. 2014. Vol. 6, No. 4. P. 269–285. DOI: 10.1504/IJAT.2014.065828.

24. Бугров Д. Ю. Аналіз досліджень та сучасних методів моделювання процесів віброабразивної обробки деталей. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2024. Вип. 5(148). С. 78–82. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>

25. Uhlmann E., Dethlefs A., Eulitz A. Investigation into a geometry-based model for surface roughness prediction in vibratory finishing processes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 75. P. 815–823.

26. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: Видавництво НУ "Львівська політехніка". 2004. 248 с.
27. Л. М. Лубенська, М. О. Калмиков, С. М. Ясунік. Основи вібраційної технології: навч. пос. Луганськ: Видво СХУ ім. В. Даля, 2009. 284 с.
28. Hashimoto F., Johnson S. P., Chaudhari R. G. Modeling of material removal mechanism in vibratory finishing process. *CIRP Annals*. 2016. Vol. 65. No. 1. P. 325–328. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.011>.
29. Blekhman I. I. *Vibrational Mechanics: Nonlinear Dynamic Effects, General Approach, Applications*. Singapore: World Scientific, 2000. 235 p. <https://doi.org/10.1142/3771>
30. Sangid M., Stori J., Ferriera P. Process characterization of vibrostrengthening and application to fatigue enhancement of aluminum aerospace components. Part II: Process visualization and modeling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 53. P. 561–575.
31. Струтинський В.Б. Математичне моделювання процесів та систем механіки. Житомир: ЖІТІ, 2001. 612 с.
32. Сівко В. Й., Кузьмінець М. П. Оцінка впливу робочого середовища на режими коливань вібраційних машин. *Теорія і практика будівництва*. 2012. № 10. С. 3–5.
33. Капаціла Б. Обґрунтування вибору схеми технологічного процесу обробки віброабразивного оброблення. Збірник тез доповідей XIV наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя "Матеріалознавство та машинобудування", 27-28 жовтня 2010 р. Тернопіль: ТНТУ, 2010. Т. 2. С. 12-17.
34. Іскович-Лотоцький Р.Д., Манжілевський О.Д. Віброабразивна обробка деталей на установках з гідроімпульсним приводом: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 152 с.
35. Wan S., Liu Y. C., Woon K. A simple general process model for vibratory finishing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016. Vol. 86. P. 2393–2400. DOI: 10.1007/s00170-016-8354-0.

36. Wan S., Ang Y. J., Sato T., Lim G. C. Process modeling and CFD simulation of two-way abrasive flow. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014. Vol. 71, No. 5. P. 1077–1086. DOI: 10.1007/s00170-013-5550-4.
37. Johnson K. L. *Contact mechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. 125 p.
38. Kang Y. S., Hashimoto F., Johnson S. P., Rhodes J. P. Discrete element modeling of 3D media motion in vibratory finishing process. *CIRP Annals*. 2017. Vol. 66. No. 1. P. 313–316. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.092>.
40. Hammond Roto-Finish. V-Max® from Hammond Roto-Finish: The latest evolution in Spiratron® deburring technology. *Metal Finishing*. 2013. No. 111 (1), P. 52-53.
41. Davidson J. S., Hammond J. P., Elmlad K. J., Quick S. W. High-speed mass finishing device and method. US Patent Application No. US20140065929 A1, 2014.
42. Jia L., Wang C., Liu Z. Multifrequency controlled synchronization of four inductor motors by the fixed frequency ratio method in a vibration system. *Scientific Reports*. 2023. Vol. 13. P. 2467-2480. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29747-2>.
43. Zou M., Fang P., Hou Y., Wang Y., Hou D., Peng H. Synchronization analysis of two eccentric rotors with double-frequency excitation considering sliding mode control. *Journal of Communication Nonlinear Science and Numerical Simulation*. 2021. Vol. 92. P. 105-158. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.105458>.
44. Liu W., Wang S., Jiang Q., et al. Study on the motion characteristics of abrasive media in vibratory finishing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2198. P. 65-78. DOI: 10.1088/1742-6596/2198/1/012035.
45. Yabuki A., Baghbanan M. R., Spelt J. K. Contact forces and mechanisms in a vibratory finisher. *Wear*. 2002. Vol. 252, No. 1–2. P. 635–641.
46. Hagiuda Y., Naito T., Matsunaga M. Fundamental researches on vibratory barrel finishing. *J. Metal Finishing Soc. Japan*. 1964. Vol. 15, P. 20—27.
47. Rawlinson P. Faster finishing: High speed vibratory mass finishing shorter process times / high material removal. *Metal Finishing News*. 2011. Vol. 12, No. 1. P. 24–26.

48. Domblesky, J., V. Cariapa, and R. Evans, Investigation of vibratory bowl finishing. *International Journal of Production Research*. 2003. 41(16). P. 3943-3953.
49. Kumar P. P., Sathyan S. Simulation of 1D abrasive vibratory finishing process. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 565. P. 290–295.
50. Andrievsky B. R., Blekhman I. I., Blekhman L. I., Boikov V. I., Vasil'kov V. B., Fradkov A. L. Education and research mechatronic complex for studying vibration devices and processes. *Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines*. 2016. No. 4. P. 90–97.
51. Іскович-Лотоцький Р.Д., Обертюх Р.Р., Севостьянов І.В. Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. 2006. 291 с.
52. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Розробка конструкції установки для віброабразивної обробки поверхонь декоративних елементів з активним робочим органом. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. Вип. 1(112). С. 78–82. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-1>.
53. Богуслаєв В. А., Муравченко Ф. І., Жеманюк П. Д. та ін. Технологічне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей ГТД. Лопатки компресора вентилятора. Частина I. Запоріжжя: ТОВ «Мотор Січ», 2003. 396 с.
54. Ланець О.С. Високоєфективні між резонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом. Львів.: Львівська політехніка. 2008. 324 с.
55. Buhrov D., Buhrova T. Calculation of optimal parameters for a vibratory finishing machine for decorative elements with an active working tool. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*. 2023. Vol. 2(61). P. 52–59. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3853>.
56. Van Kleef E. A., Southorn M. Mass finishing apparatus and method. US Patent Application No. US20140227944 A1, 2014.
57. Schroeter G., Velten M., Goertz V. Grinding or polishing apparatus and method for operating it. US Patent Application No. US20120021674 A1, 2012.
58. Sroka G., El-Saeed O., Reeves F. High throughput finishing of metal components. US Patent Application No. US20100288398 A1, 2010.

59. Serdyuk L. The controlled vibromachines. Jubilee scientific conference. University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy. Sofia: UACIG. 2007. P. 43–48.
60. Черенков А.Н. Динаміка блоку керованих дводебалансних віброзбуджувачів. Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава: 2005. № 16. С. 298-304.
61. Жигилій С. М., Дяченко К. С. Динаміка дебалансного вала керованого віброзбуджувача УВВ-02. Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава: ПолтНТУ, 2012. Вип. 1(31). С. 186–193.
62. Лубенська Л. М., Нечай Є. В., Бурлакова Г. Ю. Особливості шпindelної обробки деталей в середовищі вільного абразиву. Вібрації в техніці та технологіях. 2009. № 4(56). С. 97–102.
63. Опірський Б. Я., Денисов П. Д. Нові вібраційні верстати: конструювання та розрахунок. Львів: Світ/ 1991. 160 с.
64. Берник П. С., Ярошенко Л. В. Вібраційні технологічні машини з просторовими коливаннями робочих органів. Вінниця. 1998. 116с.
65. Берник П. С., Чубик Р.В. Алгоритм функціонування адаптивної системи керування приводом вібраційних технологічних машин. Вібрації в техніці і технологіях. Всеукраїнський науково-технічний журнал. 2006. № 1 (43). С. 4- 10.
66. Берник П.С., Величко Л.Д., Горбатюк Р.М. Розвиток конструктивних схем вібраційних машин. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях» Вінниця: №1(13) 2000р. С. 21-23.
67. Пат. 76368 А Україна, В24В31/06. Адаптивний пристрій для віброабразивної обробки деталей. Горбатюк Р.М., Скварок Ю.Ю., Чубик Р.В., Паламарчук І.П. (Україна). - № u201112534; Опубл. 10.01.2013; Бюл. №1, 6 ст.
68. Gorbatiuk R. Model of machine with activator for vibro abrasive treatment of the details of agricultural machinery. MOTROL. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture. 2016.Vol.18. No.8. P. 35-42.

69. Пат. 87776 А Україна, В65G 27/00. Спосіб керування роботою адаптивних вібраційних технологічних машин. Серета Л.П., Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. (Україна). № а200803685; Опубл. 10.08.2009; Бюл. № 15.

70. Чубик Р.В., Ярошенко Л.В. Метод стабілізації технологічно оптимальних параметрів вібраційного поля адаптивних вібраційних технологічних машин. Вібрації в техніці та технологіях. 2008. № 2(51). С. 57- 60.

71. Чубик Р.В., Горбатюк Р.М., Мокрицький Р.Б. Адаптивне керування процесами у вібромашинах для віброабразивної обробки деталей. АВТОМАТИКА / AUTOMATICS-2013: матеріали XX Міжнародної конференції з автоматичного управління, присвяченої 100 – річчю з дня народження академіка О.Г. Івахненка, 25–27 вересня 2013 р. м. Миколаїв: НУК, 2013. С. 223-224.

72. Чубик Р.В., Горбатюк Р.М. Передумови створення та перспективи розвитку адаптивних технологічних машин для віброабразивної обробки деталей. Вібрації в техніці та технологіях. 2013. № 2(70). С. 141-152.

73. Чубик Р.В., Горбатюк Р.М. Розробка адаптивної системи керування вібраційним приводом машини для віброабразивної обробки деталей при ремонті сільськогосподарських машин. Міжнародна науково-технічна конференція «Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах». 2013. С. 29-34.

74. Горбатюк Р.М., Скварок Ю.Ю., Чубик Р.В. Високоєфективні енергоощадні адаптивні вібромашини для віброабразивної обробки деталей. Дванадцятий міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові. 2015. 203 с.

75. Кондращенко О. В. Матеріалознавство : навч. посіб. Харків : ХНАМГ, 2007. 182 с.

76. ДСТУ EN 12413:2019. Вимоги щодо безпечності абразивних виробів. [Чинний від 2019-01-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 34 с.

77. ДСТУ ISO 603-6:2019. Абразиви зі зв'язкою. Розміри. Частина 6. Шліфувальні круги для заточування інструмента й шліфування інструментів і пристосовань. [Чинний від 2019-01-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 22 с.

78. ДСТУ 3273-95. Безпечність промислових підприємств. Загальні положення та вимоги. [Чинний від 1996-01-01]. Київ: Держстандарт України, 1995. 28 с.

79. Miller, J., Gonzalez, A., & Singh, P. Case studies of vibrational cleaning technology implementation in the oil and gas industry. *Oil & Gas Journal*. 2018. No. 116(12), P. 45-52.

80. Smith, A., Brown, J., & Liu, K. Effect of vibration-assisted technology on paraffin deposition removal in oil pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2019. No. 173, P. 340-347.

81. Carter, D., Rodriguez, N., & Thompson, L. Innovations in vibrational pipeline cleaning technologies. *Journal of Pipeline Engineering*. 2020. No. 28(3), P. 220-228.

82. Uhlmann, E., Dethlefs, A., & Eulitz, A. Investigation of material removal and surface topography formation in vibratory finishing. *Procedia CIRP*. 2014. No. 14, P. 25-30.

83. Sangid, M., Stori, J., & Ferriera, P. Process characterization of vibrostrengthening and application to fatigue enhancement of aluminum aerospace components-part I. Experimental study of process parameters. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2011. No. 53 (5-8), P. 545-560.

84. Naeini, S. E., & Spelt, J. K. Development of single-cell bulk circulation in granular media in a vibrating bed. *Powder Technology*. 2011. No. 211. P. 176-186.

85. Hashemnia, K., Mohajerani, A., & Spelt, J. K. Development of a laser displacement probe to measure particle impact velocities in vibrationally fluidized granular flows. *Powder Technology*. 2013. No. 235, P. 940-952.

86. Hashemnia, K., & Spelt, J. K.. Particle impact velocities in a vibrationally fluidized granular flow: Measurements and discrete element predictions. *Chemical Engineering Science*. 2014. No. 108, P. 123-135.

87. Mullany B., Shahinian H., Navare J., Azimi F., Fleischhauer E., Tkacik P. The application of computational fluid dynamics to vibratory finishing processes. *CIRP Annals*. 2017. Vol. 66. No. 1. P. 309–312. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.087>.
88. Tsuji, Y., Tanaka, T. and Ishida, T. (1992) 'Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe', *Powder Technology*. 1992. No. 71(3), P. 239–250. doi: 10.1016/0032-5910(92)88030-L.
89. Cundall, P.A. and Strack, O.D.L. A discrete numerical model for granular assemblies, *Géotechnique*. 1979. No. 29(1), P. 47–65.
90. O'Sullivan, C. (2011) 'Particle-based discrete element modeling: Geomechanics perspective', *International Journal of Geomechanics*. 2011. No. 11(6), P. 449–464. doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000024.
91. Zhyhylii S. M., Kharchenko M. O., Katella J. O. 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*. 2018. Vol. 7, No. 3.2. P. 478–485. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.2.14576.
92. Назаренко І. І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. 2-ге вид. Київ : Слово, 2010. 440 с.
93. Павловський М. А. Теоретична механіка : підручник. Київ : Техніка, 2002. 512 с.
94. Назаренко І.І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії. Навчальний посібник. К.: КНУБА, 2007. 230 с.
95. Hairer E., Lubich C., Wanner G. *Geometric Numerical Integration: Structure-Preserving Algorithms for Ordinary Differential Equations*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2006. 644 p.
96. Сердюк Л.І. Теорія розмірностей, теорія подібності та математичне моделювання: посібник для студентів та аспірантів. Полтава.: ПолтНТУ. 2005. 154 с.

97. Назаренко І. І., Гарнець В. М., Свідерський А. Т., Пентюк Б. М. Системний аналіз технічних об'єктів: навчальний посібник– К.: КНУБА, 2009. 164 с.
98. Бугров Д. Ю. Математичне моделювання процесу віброабразивної обробки з використанням DEM у системах з активним робочим органом. *Modern Engineering and Innovative Technologies*. 2024. Iss. 36, Pt. 2. P. 11–18. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2024-36-00-051>
99. Wensrich, C. and Katterfeld. Rolling friction as a technique for modelling particle shape in DEM, *Powder Technology*. 2012. No. 217, P. 409–417. doi: 10.1016/j.powtec.2011.10.057.
100. Zhou, Y., Wright, B., Yang, R., Xu, B.H. and Yu, A.B. Rolling friction in the dynamic simulation of sandpile formation, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 1999. No. 269 (2–4), P. 536–553.
101. Нестеренко М.П. Класифікація та оцінка споживчих якостей сучасних вібраційних машин для формування залізобетонних виробів // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2007. – Вип. 20. – С. 20–25.
102. Нестеренко М.М. Дослідження робочих параметрів вібраційної установки / М.М. Нестеренко, Т.О. Склярєнко, О.С. Дьяченко // Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : матеріали VI Всеукр. наук.-техн. конф., 11 трав. 2023 р. – Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – С. 99–100
103. Fleischhauer E., Azimi F., Tkacik P., Keanini R., Mullany B. Application of particle image velocimetry (PIV) to vibrational finishing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016. Vol. 229. P. 322–328. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.017>
104. Коробко Б., Бугров Д. Параметри віброабразивного процесу та їхній вплив на ефективність обробки в віброустановках із активним робочим органом. *Техніка будівництва*. 2025. № 42. С. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0507>.

105. Ivanov V.V., Lebedev V.A., Pinahin I. A. Improving Wear Resistance of Surface by Depositing Vibrational Mechanochemical MoS₂ Coating. *Journal of Friction and Wear*. 2014. Vol. 35. No 4. P. 339–342.

106. Нестеренко М.П. Прогресивний розвиток вібраційних установок з просторовими коливаннями для формування залізобетонних виробів // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – 2015. – Вип. 2 (44). – С. 16–23.

107. Ярошенко Л. В. Вібропланетарний змішувач з вертикальними привідним та шнековим валами/ Вібрації в техніці та технологіях. 2007. No 4 (49) С. 92 - 95.

108. Паламарчук І. П., Полевода Ю. А., Янович В. П. Аналіз математичної моделі вібровідцентрової машини для очищення рідкої сировини. Вібрації в техніці та технологіях. 2009. Вип. 4. С. 129 – 136.

109. Полевода Ю. А. Перспективи застосування вібраційних ефектів в рідких технологічних системах харчових і переробних виробництв. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. 2015. Вип. 1. С. 124–130.

110. Гвоздєв В. О. Обґрунтування технологічного процесу та конструктивних параметрів швидкохідного гвинтового змішувача кормів. Глеваха. 2008. 193 с.

111. Солона О.В. Статика взаємодії абсолютно твердих тіл із сипучим середовищем. Вібрації у техніці та технологіях. 2018. No3 (90). С. 105-116.

112. Yanovich V.P., Kupchuk I.M., Kovalchuk O.S. Theoretical studies of energy parameters of vibration-disk crusher starch containing substance. *S World Journal*. 2016. vol. 1. P. 17-25.

113. Цуркан О.В., Горбатюк Р.М., Присяжнюк Д.В. Планування багатофакторного експерименту для визначення раціональних параметрів роботи вібраційної машини. Вібрації в техніці та технологіях. 2020. №2(97). С. 5-14.

114. Віброоброблюючий пристрій резонансного типу з дебалансним віброприводом: UA 10124, МКИ В65ВG27/24 П.С. Берник, Р.В. Чубик, В.А. Пашистий (Україна). № а 2005 02378; Опубл. 15.11.2005; Бюл. № 11, 4 с.

115. Morin D. Introduction to Classical Mechanics: With Problems and Solutions. Cambridge : Cambridge University Press. 2008. 734 p.

116. Горбатюк Р.М. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів вібромашини для поверхневого відновлення робочих органів ґрунтообробних агрегатів: дис. ... канд. техн. наук. Вінниця: ВНАУ, 2019. 180 с.

117. Khalil H. K., Strangas E. G., Jurkovic S. Speed Observer and reduced non-linear model for sensorless control of induction motors. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2009. Vol. 17. No. 2. P. 327–339. <https://doi.org/10.1109/TCST.2008.2006697>.

118. Берник П. С., Чубик Р. В. Аналіз структурних схем пристроїв для керування віброприводом вібраційних технологічних машин. Вибрации в технике и технологиях. Всеукраїнський науково-технічний журнал. 2005. № 3 (41) С. 9- 22.

119. Назаренко І.І. Енергетична концепція до визначення основних параметрів робочого процесу машин будіндустрії. Прогрессивные технологии и машины для производства стройматериалов, изделий и конструкций. Тезисы докладов I Всеукраинской научно-практической конференции. Полтава, 1996. С. 147-149.

120. Спосіб керування роботою машини із коливними рухами робочих органів: UA 10971, МКИ В65ВG27/24 П.С. Берник, Р.В. Чубик, В.А. Пашистий (Україна). № а 2005 02375; Опубл. 15.12.2005; Бюл. № 12, 4 с.

121. Ланець О.С. Розробка динамічно зрівноважених торових вібраційних машин з електромагнітним приводом: дис. ... канд. тех. наук. Львів, 2002. 150 с.

122. Берник П. С., Чубик Р. В. Дослідження енергетичних та амплітудно-частотних характеристик вібраційного поля при резонансному режимі роботи дебалансного приводу вібромашини. Автоматизація виробничих процесів у

машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвід. наук.-техн. зб. 2005. -№ 39 С.26-34.

123. Пристрій для керування електромагнітним віброприводом: UA 10123, МКИ В65ВG27/24 П.С. Берник, Р.В. Чубик, В.А. Пашистий (Україна). – № а 2005 02377; Опубл. 15.11.2005; Бюл. № 11, 4 с.

124. Омельянов О. М., Полевода Ю. А., Замрій М. Перспективи застосування вібрації при різанні матеріалів. Вібрації в техніці та технологіях. 2021. № 1 (100). С. 104–114.

125. Бугров Д., Коробко Б. Дослідження процесу комбінованої віброабразивної обробки у віброзмішувачі з активним робочим органом. Технічні науки та технології. 2025. № 2(40). С. 116–127. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-116-127](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-116-127).

126. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Розробка конструкції установки для віброабразивної обробки поверхонь декоративних елементів з активним робочим органом. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки: матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (25 квітня 2024 р., Полтава). Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2024. С. 28–30.

127. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Моделювання процесу комбінованої віброабразивної обробки методом дискретних елементів. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки: матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (24 квітня 2025 р., Полтава). Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. С. 19–22.

128. Бугров Д. Ю., Коробко Б. О., Бугрова Т. М. Експериментальне дослідження енергоефективності комбінованого віброабразивного процесу. Енергоощадні машини і технології: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції (20–21 травня 2025 р., Київ). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2025. С. 66–69.

129. Коробко Б.О. Особливості режимів роботи обладнання для комбінованої віброабразивної обробки з активним робочим органом / Б.О. Коробко, Т.М. Бугрова, Д.Ю. Бугров // Підвищення ефективності експлуатації, обслуговування і сервісу технологічних машин та обладнання – 2026 : зб. наук. пр. Всеукр. наук. конф., 29 січ. 2026 р. – Х. : ХНАДУ, 2026. – С. 64-67.

130. Савченко О.Г., Крот О.Ю. Лабораторний практикум з вивчення вантажопідіймального та транспортувального обладнання: Навчально - методичний посібник.- Х.: ХНУБА, 2016. 99 с.

131. Пілюшенко В. Л., Шкрабак І. В., Славенко Е. І. Наукове дослідження: організація, методологія, інформаційне забезпечення : навч. посіб. Київ: Лібра, 2004. 344 с.

132. ДСТУ ISO 4287:2001. Технічні вимоги до геометрії виробів. Структура поверхні: профільний метод. Терміни, визначення та параметри структури. Чинний від 2001-01-01. Київ: Держстандарт України, 2001. 28 с.

134. Hairer E., Lubich C., Wanner G. Geometric Numerical Integration: Structure-Preserving Algorithms for Ordinary Differential Equations. 2nd ed. Berlin: Springer, 2006. 644 p.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Патент на корисну модель





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **161214** (13) **U**

(51) МПК

B24B 31/06 (2006.01)**B24B 31/02** (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2025 00686	(72) Винахідник(и): Бугров Дмитро Юрійович (UA), Коробко Богдан Олегович (UA), Бугрова Тетяна Миколаївна (UA)
(22) Дата подання заявки: 17.02.2025	(73) Володілець (володільці): НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА", просп. Віталія Грицаєнка, буд. 24, м. Полтава, 36011 (UA)
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 20.11.2025	(74) Представник: Пашко Марія Юрївна
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 19.11.2025, Бюл.№ 47	

(54) ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ДЕТАЛЕЙ У СЕРЕДОВИЩІ ВІЛЬНИХ АБРАЗИВІВ**(57) Реферат:**

Пристрій для вібраційної обробки деталей у середовищі вільних абразивів містить контейнер та керований дебалансний віброзбуджувач, який приводить контейнер у коливальний рух. Додатково містить керований привод обертання контейнера навколо його осі.

UA 161214 U

ДОДАТОК Б

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»:

1. Buhrov D., Buhrova T. Calculation of optimal parameters for a vibratory finishing machine for decorative elements with an active working tool. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering. 2023. Vol. 2(61). P. 52 – 59. DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3853>.

2. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Розробка конструкції установки для віброабразивної обробки поверхонь декоративних елементів з активним робочим органом. Вібрації в техніці та технологіях. 2024. Вип. 1(112). С. 78 –82. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-1>.

3. Бугров Д. Ю. Аналіз досліджень та сучасних методів моделювання процесів віброабразивної обробки деталей. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2024. Вип. 5(148). С. 78 – 82. DOI: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.11>.

4. Коробко Б. О, Бугров Д. Ю. Параметри віброабразивного процесу та їхній вплив на ефективність обробки в віброустановках із активним робочим органом. Техніка будівництва. 2025. № 42. С. 61 – 69. DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0507>.

5. Бугров Д.Ю., Коробко Б.О. Дослідження процесу комбінованої віброабразивної обробки у віброзмішувачі з активним робочим органом. Технічні науки та технології. 2025. № 2(40). С. 116 – 127. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2\(40\)-116-127](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-2(40)-116-127).

Публікації в наукових іноземних виданнях:

6. Бугров Д. Ю. Математичне моделювання процесу віброабразивної обробки з використанням DEM у системах з активним робочим органом. Modern Engineering and Innovative Technologies. 2024. Iss. 36, Pt. 2. P. 11 – 18. DOI: <https://doi.org/10.30890/2567-5273.2024-36-00-051>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Розробка конструкції установки для віброабразивної обробки поверхонь декоративних елементів з активним робочим органом. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки: матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (25 квітня 2024 р., Полтава). Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2024. С. 28 – 30.

8. Коробко Б. О., Бугров Д. Ю. Моделювання процесу комбінованої віброабразивної обробки методом дискретних елементів. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки: матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції (24 квітня 2025 р., Полтава). Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. С. 19 – 22.

9. Бугров Д. Ю., Коробко Б. О., Бугрова Т. М. Експериментальне дослідження енергоефективності комбінованого віброабразивного процесу. Енергоощадні машини і технології: матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції (20 – 21 травня 2025 р., Київ). Київ: Київський національний університет будівництва і архітектури, 2025. С. 66 – 69.

10. Бугров Д. Ю., Коробко Б. О. Експериментальне дослідження віброабразивної обробки на комбінованій дослідній установці. Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики. Полтава: Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2025. С. 252 – 253.

11. Коробко Б.О. Особливості режимів роботи обладнання для комбінованої віброабразивної обробки з активним робочим органом / Б.О. Коробко, Т.М. Бугрова, Д.Ю. Бугров // Підвищення ефективності експлуатації, обслуговування і сервісу технологічних машин та обладнання – 2026 : зб. наук. пр. Всеукр. наук. конф., 29 січ. 2026 р. – Х. : ХНАДУ, 2026. – С. 64 – 67.

*Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати
дисертації:*

12. Пристрій для вібраційної обробки деталей у середовищі вільних абразивів : пат. на корисну модель № 161214, Україна: МПК В24В 31/02, В24В 31/06 (2025.01)/ Бугров Д. Ю., Коробко Б. О., Бугрова Т. М.; № u202500686; опубл. 19.11.2025, Бюл. № 47.

ДОДАТОК В

ВИЗНАЧЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМОЇ ШВИДКОСТІ ЗНІМАННЯ МАТЕРІАЛУ З ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ СКЛАДНОЇ ФОРМИ ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНОЇ ВІБРОАБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ В УСТАНОВЦІ З АКТИВНИМ РОБОЧИМ ОРГАНОМ НА ОСНОВІ РЕЗУЛЬТАТІВ ТРЬОХФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДРУГОГО ПОРЯДКУ

З попередньо проведених досліджень та експериментальних випробувань встановлено, що основним параметром який характеризує ефективність технологічного процесу комбінованої віброабразивної обробки в установці з активним робочим органом є питома швидкість знімання матеріалу з поверхні оброблюваних деталей. У свою чергу визначені ключові вихідні параметри, які найбільш суттєво впливають на питому швидкість знімання матеріалу. Це амплітуда віброколивань A , частота обертання роторної робочої камери (активний робочий орган) W , маса компонентів середовища робочої камери M , що включає в себе масу оброблюваних деталей та вільні абразивні тіла.

Були визначені діапазони зміни вихідних параметрів та інтервали їх варіювання, в межах яких відбувається процес комбінованої віброабразивної обробки та наведені в таблиці 1. Зокрема, амплітуда коливань A змінюється в межах від 1 до 3 (мм), частота обертання робочої камери W – від 36 до 104 (об/хв), а маса середовища M , що включає деталі та абразив, варіюється від 2,8 до 5,6 (кг). Такі межі були встановлені на основі попереднього досвіду з врахуванням конструктивних особливостей установки.

З метою кількісного оцінювання впливу вище визначених ключових технологічних параметрів на ефективність комбінованої віброабразивної обробки в установці з активним робочим органом, використано методику планування експерименту.

Основною метою дослідження є знаходження функціональної залежності питомої швидкості знімання матеріалу від амплітуди віброколивань, частоти

обертання робочої камери та маси середовища (оброблювані деталі та абразив) у вигляді

$$V_p = f(A, W, M) \quad (1)$$

Таблиця 1 – Значення вихідних параметрів та інтервали їх варіювання

№	Найменування	Розмірність	Позначення	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Нижній рівень (-)	Інтервал варіювання
X ₁	Амплітуда віброколивань	мм	A	3	2	1	1
X ₂	Частота обертання камери	об/хв	W	104	70	36	34
X ₃	Маса компонентів	кг	M	5,6	4,2	2,8	1,4

З метою спрощення аналітичних розрахунків та уніфікації подальших виразів, значення параметрів при проведенні експерименту подаються у вигляді кодованих рівнів: верхній рівень варіювання позначається як (+1), середній – (0), нижній – (-1). Перехід до кодованого масштабу здійснюється за такою формулою

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (2)$$

де x_i – значення i -го фактору в новому кодовому масштабі;

X_i – значення i -го фактору в натуральному масштабі;

X_{i0} – основний рівень i -го фактору;

ΔX_i – інтервал варіювання i -го фактору.

Оскільки в нашому дослідженні залежність питомої швидкості знімання матеріалу від змінних ключових параметрів є нелінійною, тому доцільно застосовувати план другого порядку. У разі, якщо побудована математична модель виявиться неадекватною, буде потреба у використанні плану іншого

виду. У таблиці 2 наведено план експерименту, при цьому числове позначення рівня «1» не вказуємо, а кодовані значення факторів подаються символами «+», «0» та «-» відповідно.

Таблиця 2 – План проведення трифакторного експерименту другого порядку

№ досліду	Матриця планування (x_i)			Квадрати параметрів (x_i^2)			Взаємодія ($x_i x_j$)		
	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
N_1	1	+	+	+	+	+	+	+	+
	2	—	+	+	+	+	—	—	+
	3	+	—	+	+	+	—	+	—
	4	—	—	+	+	+	+	—	—
	5	+	+	—	+	+	+	—	—
	6	—	+	—	+	+	+	—	+
	7	+	—	—	+	+	+	—	—
	8	—	—	—	+	+	+	+	+
N_α	9	+	0	0	+	0	0	0	0
	10	—	0	0	+	0	0	0	0
	11	0	+	0	0	+	0	0	0
	12	0	—	0	0	+	0	0	0
	13	0	0	+	0	0	+	0	0
	14	0	0	—	0	0	+	0	0
n_0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0

Для забезпечення необхідної точності при обробці експериментальних даних досліди в нульовій точці рівномірно розподілимо серед усіх експериментів, повторюючи їх через кожні 3–5 дослідів.

Отримані експериментальні дані обробимо методами математичної статистики, в результаті чого отримаємо алгебраїчне рівняння, що описує залежність питомої швидкості знімання матеріалу від зміни значень вихідних факторів.

У загальному вигляді рівняння для трифакторного експерименту записується так

$$\hat{y}_i = b_0 + \sum_1^k b_i x_i + \sum_1^k b_{ii} x_i^2 + \sum_1^k b_{ij} x_i x_j, \quad (3)$$

де $i, j = 1, 2, \dots, k$ – послідовні номерні фактори;

\hat{y} – питома швидкість знімання матеріалу;

x_1, x_2, \dots, x_k – вихідні фактори;

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_{12}, b_{13}, \dots, b_{ij}, b_{ii}$ – коефіцієнти рівняння.

Коефіцієнти рівняння визначають за формулами

$$b_0 = 0,1831[0y] - 0,0704 \sum_1^k [i iy]; \quad (4)$$

$$b_i = 0,1[iy]; \quad (5)$$

$$b_{ii} = -0,0704[0y] + 0,5[i iy] - 0,1268 \sum_1^k [i iy]; \quad (6)$$

$$b_{ij} = 0,125[ijy]. \quad (7)$$

Результати експериментів і розрахунки коефіцієнтів наведені у таблиці 3.

Виконавши необхідні обчислення, отримаємо рівняння регресії або функціональної залежності питомої швидкості знімання матеріалу від вихідних параметрів

$$\begin{aligned} \hat{y}_i &= b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 = \\ &= 302 + 8x_1 + 53x_2 + 37x_3 - 10,87x_1^2 + \\ &- 45,87x_2^2 - 35,87x_3^2 + 1,25x_1 x_2 - 1,25x_1 x_3 + 6,25x_2 x_3. \end{aligned} \quad (8)$$

Після цього необхідно виконати **перевірку коефіцієнтів b_i від нуля** основі даних із дослідів, що наведені в основних позиціях (№15–17 у таблиці 2). Для подальшого аналізу необхідно виконати розрахунок наступних величин:

1. Середнє арифметичне значення

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_1^{n_0} y_{0u}}{n_0} \quad (9)$$

де y_{0u} – це значення питомої швидкості знімання матеріалу у нульовій точці в u -тому досліді;

n_0 – кількість дослідів у нульовій точці.

2. Обчислити дисперсію у нульовій точці

$$S_{\bar{y}}^2 = S_0^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}. \quad (10)$$

3. Визначити середнє квадратичне відхилення, що характеризує похибку експерименту

$$S_{\bar{y}} = S_0 = \sqrt{S_0^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}} \quad (11)$$

Таблиця 3 – Результати експериментів і значення їх обробки

№	V_p	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$
1	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320
2	300	-300	300	300	300	300	300	-300	-300	300
3	200	200	-200	200	200	200	200	-200	200	-200
4	190	-190	-190	190	190	190	190	190	-190	-190
5	230	230	230	-230	230	230	230	230	-230	-230
6	210	-210	210	-210	210	210	210	-210	210	-210
7	140	140	-140	-140	140	140	140	-140	-140	140
8	120	-120	-120	-120	120	120	120	120	120	120
9	280	280	0	0	280	0	0	0	0	0
10	270	-270	0	0	270	0	0	0	0	0
11	300	0	300	0	0	300	0	0	0	0
12	180	0	-180	0	0	180	0	0	0	0
13	280	0	0	280	0	0	280	0	0	0
14	220	0	0	-220	0	0	220	0	0	0
15	320	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	330	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	320	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ_x	4210	80	530	370	2260	2190	2210	10	-10	50
	302	8	53	37	-10,87	-45,87	-35,87	1,25	-1,25	6,25

4. Середньоквадратична похибка визначається відповідно до кількості прийнятих факторів $k=3$ за такими формулами

$$\begin{aligned}
S^2 \{b_0\} &= 0,1831 S_{\bar{y}}^2; \quad S \{b_0\} = 0,4279 S_{\bar{y}}; \\
S^2 \{b_i\} &= 0,1 S_{\bar{y}}^2; \quad S \{b_i\} = 0,3162 S_{\bar{y}}; \\
S^2 \{b_{ii}\} &= 0,3732 S_{\bar{y}}^2; \quad S \{b_{ii}\} = 0,6109 S_{\bar{y}}; \\
S^2 \{b_{ij}\} &= 0,125 S_{\bar{y}}^2; \quad S \{b_{ij}\} = 0,3536 S_{\bar{y}}.
\end{aligned} \tag{12}$$

Результати розрахунків заносимо до таблиці 4.

Таблиця 4 – Результати розрахунків перевірки відмінності коефіцієнтів b_i від нуля

№ дослідю	Питома швидкість знімання матеріалу y_{0u}	$\bar{y}_0 - y_{0u}$	$(\bar{y}_0 - y_{0u})^2$
15	320	3,33	11,11
16	330	6,67	44,44
17	320	3,33	11,11
\bar{y}_0	5,667	$\sum_1^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2$	66,66
		$S_{\bar{y}}^2 = S_0^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}$	33,33
		$S_{\bar{y}}$	5,77

Обчислимо похибки у визначенні коефіцієнтів

$$S \{b_0\} = 0,4279 S_{\bar{y}} = 0,4279 \cdot 5,77 = 2,4704$$

$$S \{b_1\} = 0,3162 S_{\bar{y}} = 0,3162 \cdot 5,77 = 1,8255$$

$$S \{b_{ii}\} = 0,6109 S_{\bar{y}} = 0,6109 \cdot 5,77 = 3,5270$$

$$S \{b_{ij}\} = 0,3536 S_{\bar{y}} = 0,3536 \cdot 5,77 = 2,0415$$

Обчислимо розрахункове значення t_p -критерію Стюдента за наступною формулою

$$t_p = \frac{|b_i|}{S \{b_i\}}. \tag{13}$$

Порівняємо обчислене значення t_p із табличним для кількості ступенів вільності $f_y = n_0 - 1$. Для нашого експерименту, де кількість вимірів у нульовій точці дорівнює трьом, тоді величина $f_y = 2$. На основі визначимо за таблицею 5 значення критерія Стюдента для 5% рівня значимості, воно становитиме $t_m = 4,3$.

Таблиця 5 – Значення критерія Стюдента t_m для 5% рівня значимості

Кількість ступенів вільності $f_y = n_0 - 1$	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14
Критерій Стюдента t_m	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,37	2,31	2,23	2,18	2,15

Якщо виконується умова $|t_p| < t_m$ то коефіцієнт вважають таким, що дорівнює нулю, та відповідний його член виключають із рівняння, тобто вважають його незначним. Обчислені критерії та їх порівняння наведено в таблиці 6.

Таблиця 6 – Значення розрахункових t_p критеріїв Стюдента та визначення відмінних від нуля коефіцієнтів b_i

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
Значення коефіцієнтів b_i	302	8,00	53,00	37,00	-10,87	-45,87	-35,87	1,25	-1,25	6,25
$S\{b_i\}$	2,47	1,83	1,83	1,83	3,53	3,53	3,53	2,04	2,04	2,04
$t_p = \frac{ b_i }{S\{b_i\}}$	122,24	4,38	29,03	20,27	-3,08	-13,01	-10,17	0,61	-0,61	3,06
Позначка про нульове значення								0	0	0

Коефіцієнти квадратичних членів залишаємо в рівнянні без змін, навіть якщо умова $|t_p| < t_m$ не виконується, тобто їх статистична значущість є незначною.

По результатам виконаних обчислень уточнене рівняння регресії набуває наступного вигляду

$$\begin{aligned}\hat{y}_i &= b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 = \\ &= 302 + 8x_1 + 53x_2 - 37x_3 - 10,87x_1^2 + \\ &\quad -45,87x_2^2 - 35,87x_3^2.\end{aligned}\quad (14)$$

Виконаємо перевірку на адекватність отриманого рівняння фактичним результатам, отриманим на основі експериментів.

Висновок про адекватність отриманого рівняння регресії робимо на основі розрахованого критерію Фішера F_p та порівняння його з допустимим значенням. Отримане рівняння регресії вважається придатним якщо виконується умова $F_p < [F_p]$. Максимальне значення критерію Фішера $[F_p]$ оберемо з таблиці 7 виконавши відповідні розрахунки

$$f_y = n_0 - 1; \quad f_{ad} = N - m - (n_0 - 1), \quad (15)$$

де n_0 – це кількість експериментів на нульовому рівні;

N – загальна кількість проведених експериментів у плані;

m – кількість значимих коефіцієнтів в рівнянні регресії (14)

$$f_y = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2;$$

$$f_{ad} = N - m - (n_0 - 1) = 17 - 6 - 2 = 9;$$

$$[F_p] = 19,3.$$

Таблиця 7 – Значення F– критерію для 5% рівня значимості

f_y	Значення F -критерію при f_{ad}								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5

Визначимо критерій Фішера за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (16)$$

де S_{ad}^2 – остаточно дисперсія;

S_{ad}^2 – дисперсія у точці 0. У нашому випадку $S_{\bar{y}}^2 = 33,33$.

Визначимо остаточно дисперсію за формулою

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_1^N (y_u - \hat{y}_u)^2}{N - m - (n_0 - 1)}, \quad (17)$$

де y_u – значення питомої швидкості знімання матеріалу V_p , яке отримане в u -тому досліді (вказано в таблиці 3);

\hat{y}_u – значення питомої швидкості знімання матеріалу V_p в u -тому експерименті, яке обчислене за уточненим рівнянням регресії (14);

m – кількість значимих коефіцієнтів, з урахуванням b_0 .

Для розрахунку остаточної дисперсії S_{ad}^2 обчислимо за отриманим рівнянням регресії значення питомої швидкості знімання V_p для кожного досліді на основі вихідних значень факторів (таблиця 3).

Результати розрахунків наведено в таблиці 8.

Таблиця 8 – Дані розрахунку перевірки на адекватність отриманої залежності

№	Питома швидкість знімання матеріалу V_p		Абсолютне відхилення		Відносна похибка $\varepsilon = \frac{\Delta y}{y_u} \cdot 100\%$
	Фактичне значення y_u	Розрахункове значення \hat{y}_u	$\Delta y = y_u - \hat{y}_u$	Δy^2	
1	320	307,371	-12,62900	159,49164	-3,947
2	300	291,371	8,62900	74,45964	2,876
3	200	201,371	-1,37100	1,87964	-0,686
4	190	185,371	4,62900	21,42764	2,436
5	230	233,371	-3,37100	11,36364	-1,466
6	210	217,371	-7,37100	54,33164	-3,510
7	140	127,371	12,62900	159,49164	9,021
8	120	111,371	8,62900	74,45964	7,191
9	280	299,115	-19,11500	365,38323	-6,827
10	270	283,115	-13,11500	172,00323	-4,857

№	Питома швидкість знімання матеріалу V_p		Абсолютне відхилення		Відносна похибка $\varepsilon = \frac{\Delta y}{y_u} 100\%$
	Фактичне значення y_u	Розрахункове значення \hat{y}_u	$\Delta y = y_u - \hat{y}_u$	Δy^2	
11	300	309,115	-9,11500	83,08323	-3,038
12	180	203,115	-23,11500	534,30323	-12,842
13	280	303,115	-23,11500	534,30323	-8,255
14	220	229,115	-9,11500	83,08323	-4,143
15	320	301,987	18,01300	324,46817	5,629
16	330	301,987	28,01300	784,72817	8,489
17	320	301,987	18,01300	324,46817	5,629
Сумарне значення $\sum_1^N (y_u - \hat{y}_u)^2$				3762,72898	–

Обрахуємо остаточно дисперсію

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_1^N (y_u - \hat{y}_u)^2}{N - m - (n_0 - 1)} = \frac{3762,73}{9} = 418,1. \quad (18)$$

Обчислимо значення критерію Фішера

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\bar{y}}^2} = \frac{418,1}{33,33} = 12,5 < 19,3 [F_p]. \quad (19)$$

Оскільки розраховане значення критерію Фішера $F_p = 12,5$ є меншим за його граничне значення $[F_p] = 19,3$, можемо стверджувати, що отримане рівняння функціональної залежності (14), побудоване за результатами трифакторного експерименту, є адекватним, тобто достовірно описує вплив визначених ключових параметрів на питому швидкість знімання матеріалу в процесі комбінованої віброобробки на дослідній установці з активним робочим органом.

ДОДАТОК Г

ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ТОВ «УКРНАСОСПРОМ»

Анатолій Переясловець

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на тему «Обґрунтування параметрів обладнання з активним робочим органом для комбінованої віброабразивної обробки поверхонь деталей складної форми»

Даний акт засвідчує те, що в період з 14.07.25 р. по 18.07.2025 р. за участю ТОВ «УКРНАСОСПРОМ» проведено дослідно-промислове випробування установки для комбінованої віброабразивної обробки, яка розроблена та виготовлена по конструктивно-технологічному рішенню Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (виконавець – аспірант Бугров Д.Ю., науковий керівник – д.т.н., професор Коробко Б.О.). Віброустановка має активний робочий орган - роторну камеру, що закріплена на віброплатформі верстату ВІО-8 та має окремі регульовані приводи.

Виконано фінішну віброабразивну обробку партії деталей складної форми у кількості 10 шт. після їх лазерного вирізання з листового прокату, а саме: лопаті робочого колеса насоса ЦНСк 1-20 з метою видалення ґрату, задирок, заокруглення гострих країв.

За результатами випробувань встановлено, що тривалість робочого циклу обробки скорочена на 10%, зменшення витрат електроенергії становить 15% та збільшення якості обробленої поверхні лопатей у зонах геометрично складних ділянок контурів та отворів.

На основі отриманих даних дослідно-промислових випробувань комбінованої установки вважаємо за доцільне рекомендувати її до серійного виробництва та широкого впровадження.

Головний технолог



Богдан ПЕРЕЯСЛОВЕЦЬ

Менеджер з якості



Олена ВЕДЬ