

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

ГОРБАТЮК РУСЛАН МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 631.171:621.7

**ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ВІБРОМАШИНИ ДЛЯ ПОВЕРХНЕВОГО ВІДНОВЛЕННЯ
РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ АГРЕГАТІВ**

05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Вінниця – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Вінницькому національному аграрному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент
Цуркан Олег Васильович,
відокремлений структурний підрозділ
«Ладжинський фаховий коледж Вінницького
національного аграрного університету»,
директор.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Барановський Віктор Миколайович,
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя,
професор кафедри інжинірингу
машинобудівних технологій;

доктор технічних наук, доцент
Алфьоров Олексій Ігорович,
Харківський національний технічний
університет сільського господарства
імені Петра Василенка,
професор кафедри експлуатації, надійності,
міцності та будівництва імені В.Я. Аніловича.

Захист відбудеться «15» квітня 2021 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 05.854.02 у Вінницькому національному аграрному університеті за адресою: 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Вінницького національного аграрного університету за адресою: 21008, м. Вінниця, вул. Сонячна, 3.

Автореферат розіслано «12» березня 2021 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

І.В. Твердохліб

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Актуальними для розвитку агропромислового комплексу України є питання збільшення виробничого ресурсу робочих органів ґрунтообробних агрегатів. Питання впровадження нових технологій та обладнання для вирішення цього актуального завдання є перспективним напрямком.

До прогресивних методів відновлення робочих поверхонь ґрунтообробних знарядь відносяться методи вібраційної оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхонь деталей.

Методи вібраційної обробки процесу відновлення зношених поверхонь деталей ґрунтообробних робочих органів забезпечують більш високий ступінь зміцнення та рівень залишкових напружень стиску, що дозволяє підвищити втомну міцність деталей.

Метод поверхневого пластичного деформування із застосуванням механічних коливань обробного інструменту дозволяє значно підвищити довговічність дисків, лап, зубів і інших ґрунтообробних робочих органів за рахунок зміни фізико-механічного стану та властивостей оброблюваної поверхні, що забезпечує підвищення їх ресурсу роботи.

Розробка та впровадження в виробництво способів і засобів інтенсифікації оздоблювально-зміцнювальної обробки забезпечує виготовлення виробів з необхідною якістю за порівняно незначних витрат енергії і коштів, що є актуальним завданням сьогодення, або удосконалення процесів відновлення робочих поверхонь сільськогосподарського знаряддя.

Основою розглянутих у роботі технологічних процесів є: механічні методи оздоблювально-зміцнювальної обробки, які дозволяють видаляти з поверхні деталей та заготовок окалину, нагар, накіп, бруд тощо; здійснювати операції зняття задирів, утворення заокруглень, полірування гострих кромek деталей; здійснювати видалення облою при обробці заготовок; виконувати шліфування, полірування та зміцнення поверхонь деталей ґрунтообробних агрегатів.

Таким чином, наукове обґрунтування інтенсифікації процесу вібраційного зміцнення поверхонь робочих органів ґрунтообробних агрегатів є актуальним і необхідним.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами. Дослідження, які наведено у дисертаційній роботі виконувалися у Вінницькому національному аграрному університеті за тематичним планом науково-дослідної та дослідно-конструкторської роботи на 2017–2020 рр. «Інтенсифікація процесів механічної обробки сільськогосподарської сировини за вібраційного впливу» (державний реєстраційний номер 0117U004700), яка реалізується відповідно до державної програми «Питання Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільськогосподарства», затвердженої Постановою КМ України від 2019 р. за № 838.

Робота також виконувалася відповідно до договорів про творчу співпрацю Вінницького національного аграрного університету із ПрАТ «Калинівське РП «Агромаш» та ТОВ «Агромаш-Калина».

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення технологічної ефективності оброблення поверхонь робочих органів ґрунтообробних знарядь шляхом розробки процесу вібраційного деформування з механічним активатором руху робочого середовища та обґрунтування раціональних параметрів вібраційної машини.

Для вирішення поставленої мети було прийнято **наукову гіпотезу**, згідно з якою ресурс робочих органів ґрунтообробних знарядь, що залежить від твердості їх робочих поверхонь можна підвищити за рахунок інтенсифікації процесу вібраційного зміцнення робочої поверхні з застосуванням відповідного технологічного обладнання.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі задачі:

- на основі аналізу відомих конструкцій вібраційних машин і процесів оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей розробити удосконалену конструкцію вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища;

- розробити математичну модель динаміки руху виконавчих органів вібраційної машини з горизонтальною циліндричною робочою камерою та дебалансним активатором робочого середовища;

- отримати аналітичні залежності, які описують амплітудно-частотні, силові та енергетичні характеристики механічного приводу дебалансного активатора руху робочого середовища залежно від його параметрів;

- спроектувати та виготовити вібраційну машину з механічним дебалансним активатором руху робочого середовища;

- провести експериментальні дослідження показників якості процесу оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей та витрат енергії залежно від технологічних режимів роботи вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища;

- експериментально визначити відповідність і адекватність числової реалізації розробленої математичної моделі;

- провести оцінку економічної ефективності застосування удосконаленого способу відновлення робочих органів ґрунтообробних знарядь і промислову апробацію впровадженого обладнання.

Об'єкт дослідження – технологічний процес оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей ґрунтообробних агрегатів при їх поверхневому пластичному вібраційному деформуванні.

Предмет дослідження – закономірності впливу параметрів і режимів роботи вібраційної машини на показники якості відновлених поверхонь робочих органів ґрунтообробних агрегатів.

Методи дослідження. Диференційні рівняння динаміки руху виконавчих органів вібраційної машини отримано з використанням рівняння Лагранжа II-го роду, а їх розв'язок і аналіз виконано на основі застосування теорії коливань механічних систем. Експериментальні дослідження проводилися в умовах науково-дослідної лабораторії та реального виробничого процесу із використанням математичного методу планування експериментів, натурних спостережень і методів електронно-тензометричних досліджень руху ланок

експериментально-дослідного зразка вібраційної машини за допомогою вимірального комплексу «Robotron». Обробка та аналіз результатів експериментальних досліджень здійснювалася з використанням методик кореляційно-регресійного аналізу з використанням програмного забезпечення для персонального комп'ютера. Показники якості оздоблювально-зміцнювальної обробки робочих органів визначалися шляхом дослідження мікротопографії оброблених поверхонь за допомогою сучасного комп'ютеризованого профілографа-профілометра Talyscan 450. Твердість поверхні оброблених деталей визначалася за допомогою мікротвердомірів ПМТ-3 та НМV-G21. Енерговитрати на виконання оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей визначалися за допомогою ватметрів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

вперше:

отримано математичну модель динаміки руху виконавчих органів вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища, що дозволило обґрунтовувати раціональні режими її роботи;

- розроблені емпіричні моделі, які характеризують енергетичні витрати процесу роботи оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей, висоту мікронерівності та твердості обробленої поверхні залежно від основних параметрів робочих органів;

дістали подальший розвиток:

- отримані залежності, які описують зміну амплітуди коливання робочої камери та дебалансного активатора залежно від їх геометричних і конструктивних параметрів;

- *уточнено* аналітичну залежність для визначення потужності привода з дебалансним активатором руху робочого середовища залежно від жорсткості системи підвісок вібраційної машини та кута розведення дебалансів.

Практичне значення одержаних результатів. Обґрунтовано схему, основні раціональні параметри та розроблено й виготовлено дослідно-промисловий зразок вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища, який впроваджено на ПрАТ «Калинівське РП «Агромаш» та ТОВ «Агромаш-Калина» м. Калинівка Вінницької області для вібраційного зміцнення поверхонь робочих органів ґрунтообробних знарядь.

Це дозволило підвищити твердість відновлених деталей в 1,2...1,5 рази, зменшити витрати часу у 2 рази та питомі витрати енергії у 1,8 рази на їх відновлення, а також зменшити шорсткість поверхні із 6,3 мкм до 0,18 мкм за час обробки 80 хв.

Економічний ефект від впровадження запропонованого методу відновлення робочих органів ґрунтообробних знарядь за рахунок застосування вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища становить 4451,2 грн. на одній секції з шести робочих органів.

Запропоновано рекомендації для застосування розробленої вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища в виробництво.

Конструктивна новизна технічного рішення підтверджена 2 патентами України на корисні моделі.

Особистий внесок здобувача. Основні положення наукових досліджень виконано здобувачем самостійно, постановку завдань, аналіз і трактування отриманих результатів проведено спільно з науковим керівником. Особистий внесок дисертанта полягає в розробленні теоретичних засад вібраційного впливу на процес зміцнення поверхні робочих органів ґрунтообробних знарядь; розроблені дослідно-промислової моделі вібраційної машини для оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхонь робочих органів ґрунтообробних знарядь; проведені експериментальних досліджень та обґрунтуванні параметрів і режимів роботи розробленої машини; впровадженні розробленого обладнання у виробничий процес.

Результати роботи викладено одноосібно автором у 3 друкованих працях [4, 7, 14]. У наукових працях, опублікованих в співавторстві дисертантові належить наступне: проаналізовано розвиток і проведено аналіз конструктивних схем та конструкцій вібраційних машин для оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей [1, 2]; розроблено математичну модель вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища [3]; наведено методика визначення енерговитрат вібраційної машини для оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей ґрунтообробних агрегатів [5]; проаналізовано передумови розробки та перспективи розвитку адаптивних технологічних машин для віброзміцнювальної обробки деталей [9-11].

Особистий внесок здобувача у працях, які опубліковано у співавторстві складає 80 %, а в патентах частка всіх співавторів однакова.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації були оприлюднені та схвалені на конференціях: IV-XV Міжн. наук.-техн. конф. «Вібрації в техніці та технологіях» (м. Вінниця, 2002-2017 рр.); Міжн. наук.-практ. конф. «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв» (м. Харків, 2003 р.); Міжн.наук.-техн. конф. «Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки» (м. Ростов-на-Дону, 2013 р.); XVI Міжн. наук.-практ. конф. «Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних і харчових виробництв» (м. Харків, 2015 р.), 12-й Міжн. симпозиуму українських інженерів-механіків у Львові (м. Львів, 2015 р.); IV, V та VI Міжн. наук.-техн. конф. «Земля України – потенціал продовольчої, енергетичної та екологічної безпеки держави» (м. Вінниця, 2014-2016 рр.); Міжн. наук.-техн. конф. «Розвиток земельних відносин та організаційно-економічне, правове, технологічне забезпечення агропромислового комплексу України» (Київ-Вінниця, 2017 р.); XI Міжн. наук.-практ. Конф. «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (Кропивницький, 1-3 листопада 2017р.), Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК» (м. Вінниця, 2017 р.); наук.-техн. конф. Вінницького національного аграрного університету у 2009-2017 рр.; Всеукраїнській наук.-практ. конф. «Інженерно-технологічне забезпечення аграрного сектору економіки: сучасний стан, проблеми та перспективи» (м. Вінниця, 2020 р.). У повному обсязі робота доповідалася на розширеному науковому семінарі ВНАУ у 2020 р.

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано у 22 наукових працях, серед них 13 статей у фахових виданнях України, 1 стаття – у рецензованих міжнародних виданнях, 3 деклараційних патенти України, 5 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 167 найменувань та 19 додатків. Основна частина роботи викладена на 158 сторінках, налічує 15 таблиць та 61 рисунок. Загальний обсяг роботи складає 212 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і основні завдання досліджень, наведено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, особистий внесок здобувача та апробацію результатів дослідження на наукових конференціях.

У першому розділі «Аналіз засобів та методів відновлення робочих органів ґрунтообробної техніки» проведено аналіз стану відновлення робочих органів ґрунтообробних агрегатів і обґрунтовано напрямок досліджень. Запропоновано спосіб вібраційного зміцнення для обробки поверхні робочих органів ґрунтообробних машин з метою збільшення її твердості, що позитивно впливатиме на ресурс їх роботи.

Ґрунтовним дослідженням з покращення техніко-експлуатаційних показників сільськогосподарської техніки присвячені праці вчених, які зробили значний внесок у розвиток теорії і практики землеробської механіки, вібраційних машин та технологій, зокрема: Василенка П.М., Адамчука В.В., Булгакова В.М., Калетніка Г.М., Артоболовського І.І., Бабічева А.П., Берника П.С., Блехмана І.І., Денісова П.Д., Дуднікова А.А., Заїки П.М., Ісковича-Лотоцького Р.Д., Ковбаси В.П., Барановського В.М., Копилова Ю.Р., Михайлова М.В., Надутого В.П., Повідайло В.А., Потураєва В.М., Сердюка Л.І., Сіліна Р.І., Серги Г.В., Тіщенко Л.М., Алфьорова О.І., Франчука В.П., Цуркана О.В., Членова А.А. та інших науковців.

На основі проведеного аналізу літературних джерел, вивчення практичного досвіду технологій та обладнання для проведення операцій з відновлення робочих органів ґрунтообробних агрегатів, запропонована класифікація машин, що використовуються для здійснення оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей у вільногранульованому середовищі при відсутності жорсткого кінематичного зв'язку між деталями та інструментом.

Для інтенсифікації процесу віброзміцнювальної обробки робочих поверхонь ґрунтообробних агрегатів запропоновано схему вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища.

У другому розділі «Теоретичні дослідження динаміки руху вібраційної машини для поверхневого відновлення робочих органів ґрунтообробних агрегатів» проведені теоретичні дослідження параметрів і режимів роботи технологічної машини для вібраційного зміцнення робочих органів ґрунтообробних агрегатів.

Для математичного обґрунтування принципу роботи складено математичну модель динаміки руху робочих органів вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища.

Робочий орган машини – горизонтальна циліндрична робоча камера 1 (рис. 1) масою m_1 , яка встановлена на рамі на пружних опорах 2. Коливний рух робочої камери забезпечує віброзбуджувач 3 з регульованими дебалансами масою m_3 , який прикріплений до зовнішньої стінки робочої камери.

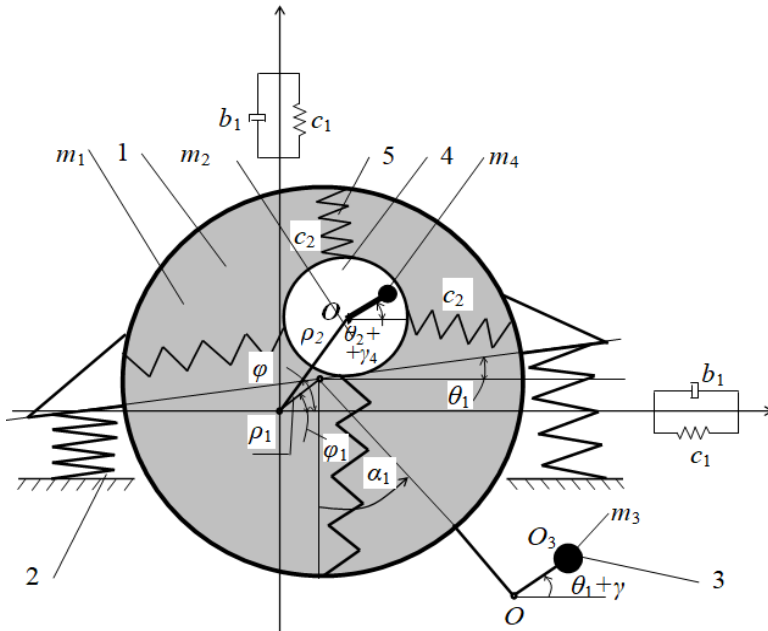


Рис. 1. Розрахункова схема вібраційної машини

робочої камери відносно осі OX . Всі кути відкладаються від горизонтальної прямої паралельній осі OX і додатній напрям відліку кутів проти руху годинникової стрілки.

Кінетична енергія вібраційної машини складається з кінетичної енергії робочої камери, дебалансів робочої камери та активатора:

$$T = \frac{m_1(\dot{\rho}_1^2 + \rho_1^2 \dot{\phi}_1^2)}{2} + \frac{I_1 \cdot \dot{\theta}_1^2}{2} + \frac{m_2(\dot{\rho}_2^2 + \rho_2^2 \dot{\phi}_2^2)}{2} + \frac{I_2 \dot{\theta}_2^2}{2} + \frac{I_3 (\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3)^2}{2} + \frac{m_3}{2} \times$$

$$\times \left[\dot{\rho}_1^2 + \rho_1^2 \dot{\phi}_1^2 + \dot{\theta}_1^2 l_4^2 + (\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3)^2 l_3^2 + 2\dot{\rho}_1 \dot{\theta}_1 l_4 \cos(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) + \right. \\ \left. + 2\dot{\rho}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3) l_3 \sin(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) - 2\dot{\phi}_1 \dot{\theta}_1 \rho_1 l_4 \sin(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) + \right. \\ \left. + 2\dot{\phi}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3) \rho_1 l_3 \cos(\phi_2 - \gamma_3 - \theta_1) - 2\dot{\theta}_1 (\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3) l_3 l_4 \sin(\gamma_3 - \alpha_{14}) \right] + \frac{m_4}{2} \times$$

$$\times \left[\dot{\rho}_2^2 + \rho_2^2 \dot{\phi}_2^2 + (\dot{\theta}_2 + \dot{\gamma}_4)^2 d_2^2 + 2\dot{\rho}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\gamma}_4) d_2 \sin(\phi_2 - \gamma_2 - \theta_2) + \right. \\ \left. + 2\dot{\phi}_2 (\dot{\theta}_2 + \dot{\gamma}_4) \rho_2 d_2 \cos(\phi_2 - \phi_4 - \theta_2) \right] + \frac{I_4 (\dot{\theta}_2 + \dot{\gamma}_4)^2}{2}$$

Для складання рівняння Лагранжа II роду приймаємо припущення: робоча камера та активатор є жорстким, твердим, недеформованим тілом; кутові швидкості обертання дебалансних валів робочої камери та активатора сталі; вплив маси завантаження враховується через коефіцієнт приєднаної маси k_p ; заповнення робочої камери враховується через коефіцієнт заповнення ξ_3 ; жорсткість пружин опорних елементів однакові.

В центральній частині робочої камери, вздовж її осі, закріплений активатор 4 масою m_2 , положення якого в просторі забезпечується пружинами 5, які з'єднані з робочою камерою 1. В активаторі розташований вал з регульованими дебалансами масою m_4 .

Центр мас робочої камери – точка O_1 має полярні координати (ρ_1, ϕ_1) , що визначають її положення відносно нерухомої системи координат OXY . Точка O_2 – центр мас активатора з полярними координатами (ρ_2, ϕ_2) . Кут θ_1 – кут повороту

Складені рівняння Лагранжа II роду записано у вигляді системи рівнянь:

$$(m_1 + m_3)(\ddot{\rho}_1 - \rho_1 \dot{\phi}_1^2) + m_3 \left[\ddot{\theta}_1 l_4 \cos(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\gamma}_3) l_3 \sin(\phi_1 - \theta_1 - \gamma_3) + \right. \\ \left. + \dot{\theta}_1^2 l_4 \sin(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) - (\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3)^2 l_3 \cos(\phi_1 - \theta_1 - \gamma_3) \right] = \\ = -C_{1z} \rho_1 \sin^2 \phi_1 - C_{1x} \rho_1 \cos^2 \phi_1 - b_{1z} (\dot{\rho}_3 \sin \phi_1 + \rho_1 \dot{\phi}_1 \cos \phi_1) \sin \phi_1 - \\ - b_{1x} (\dot{\rho}_1 \cos \phi_1 - \rho_1 \dot{\phi}_1 \sin \phi_1) \cos \phi_1 + F_2 \cos(\beta - \phi_1) \quad ; \quad (2)$$

$$(m_1 + m_3)(\rho_1 \ddot{\phi}_1 + 2\dot{\rho}_1 \dot{\phi}_1) + m_3 \left[-\ddot{\theta}_1 l_4 \sin(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) + (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\gamma}_3) l_3 \cos(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) + \right. \\ \left. + \dot{\theta}_1^2 l_4 \cos(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) + (\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3)^2 l_3 \sin(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) \right] = \\ = -C_{1z} \rho_1 \sin \phi_1 \cos \phi_1 + C_{1x} \rho_1 \sin \phi_1 \cos \phi_1 - b_{1z} (\dot{\rho}_1 \sin \phi_1 + \rho_1 \dot{\phi}_1 \cos \phi_1) \cos \phi_1 + \\ + b_{1x} (\dot{\rho}_1 \cos \phi_1 - \rho_1 \dot{\phi}_1 \sin \phi_1) \sin \phi_1 + F_2 \sin(\phi_1 - \beta) \quad ; \quad (3)$$

$$(I_1 + m_3 l_4^2) \ddot{\theta}_1 + (I_3 + m_3 l_3^2) (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\gamma}_3) + m_3 \left[\ddot{\rho}_1 l_4 \cos(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) + \ddot{\rho}_1 l_3 \sin(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) - \right. \\ \left. - \ddot{\phi}_1 \rho_1 l_4 \sin(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) + \ddot{\phi}_1 \rho_1 l_3 \cos(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) - \right. \\ \left. - (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\gamma}_3) l_3 l_4 \sin(\gamma_3 - \alpha_{14}) - 2\dot{\rho}_1 \dot{\phi}_1 l_4 \sin(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) + \right. \\ \left. + 2\dot{\rho}_1 \dot{\phi}_1 l_3 \cos(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) - \rho_1 \dot{\phi}_1 l_4 \cos(\phi_1 - \theta_1 - \alpha_{14}) - \right. \\ \left. - \dot{\phi}_1^2 \rho_1 l_3 \sin(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) - (2\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3) \dot{\gamma}_3 l_3 l_4 \cos(\gamma_3 - \alpha_{14}) \right] = \\ = -m_3 g (l_4 \sin(\theta_1 + \alpha_{14}) + l_3 \cos(\theta_1 + \gamma_3)) - C_{1\theta} \dot{\theta}_1 - C_{1\theta} \theta_1 + C_{2\theta} (\theta_2 - \theta_1);$$

порядковий номер формули (4);

$$(m_2 + m_4)(\ddot{\rho}_2 - \dot{\phi}_2^2 \rho_2) + m_4 \left[(\ddot{\theta}_1 + \ddot{\gamma}_3) d_3 \sin(\phi_2 - \gamma_4 - \theta_2) - (\dot{\theta}_1 + \dot{\gamma}_3) d_2 \cos(\phi_2 - \gamma_4 - \theta_2) \right] = ; \quad (5) \\ = -F_2 \cos(\beta - \phi_2)$$

$$(m_2 + m_4)(\rho_2 \ddot{\phi}_2 + 2\dot{\rho}_2 \dot{\phi}_2) + m_4 \left[(\ddot{\theta}_2 + \ddot{\gamma}_4) d_2 \cos(\phi_2 - \gamma_4 - \theta_2) + (\dot{\theta}_2 + \dot{\gamma}_4)^2 d_2 \sin(\phi_2 - \gamma_4 - \theta_2) \right] = ; \quad (6) \\ = -F_2 \sin(\phi_2 - \beta)$$

$$I_2 \ddot{\theta}_2 + (I_4 + m_4 d_2^2) (\ddot{\theta}_2 + \ddot{\gamma}_4) + m_4 \left[\ddot{\rho}_2 d_2 \sin(\phi_2 - \gamma_4 - \theta_2) + \ddot{\phi}_2 \rho_2 d_2 \cos(\phi_2 - \gamma_4 - \theta_2) + \right. \\ \left. + 2\dot{\rho}_2 \dot{\phi}_2 d_2 \cos(\phi_2 - \gamma_4 - \theta_2) - \dot{\phi}_2^2 \rho_2 d_2 \sin(\phi_2 - \gamma_4 - \theta_2) \right] = ; \quad (7) \\ = -C_{2\theta} (\theta_2 - \theta_1);$$

$$(I_3 + m_3 l_3^2) (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\gamma}_3) + m_3 \left[\ddot{\rho}_1 l_3 \sin(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) + \ddot{\phi}_1 \rho_1 l_3 \cos(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) - \right. \\ \left. - \ddot{\theta}_1 l_3 l_4 \sin(\gamma_3 - \alpha_{14}) + 2\dot{\rho}_1 \dot{\phi}_1 l_3 \cos(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) - \right. \\ \left. - \dot{\phi}_1^2 \rho_1 l_3 \sin(\phi_1 - \gamma_3 - \theta_1) + \dot{\theta}_1^2 l_3 l_4 \cos(\gamma_3 - \alpha_{14}) \right] = , \quad (8)$$

$$= -m_3 g l_3 \cos(\gamma_3 + \theta_1) + M_{1em} - M_{1on}$$

де $M_{1on} = f_1 N_1 r_1$ – момент опору в підшипниках дебаланса; f_1 – коефіцієнт тертя ковзання; N_1 – нормальна реакція; r_1 – радіус кола в точці O_4 .

Основна мета складання, розв'язку та аналізу диференціальних рівнянь (2)-(8) полягає у визначенні рівнянь руху точок механічної системи вібраційної машини відносно незалежних координат, а також отримання вихідних даних для регулювання параметрів робочих органів і режимів її роботи.

На основі складених диференціальних рівнянь (2)-(8) теоретично визначено потужність, яку необхідно затратити на привод вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища для проведення оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхонь робочих органів ґрунтообробних знарядь

$$N = a^2 \omega \{ [m\omega^2 - f_1(c)] f_2(\theta) \cos(t\omega) + 2\pi g \xi_3 l_k R \rho \}, \quad (9)$$

де $f_1(c)$ – функція, яка залежить від жорсткості системи підвісок вібромашини; $f_2(\theta)$ – функція, яка залежить від кута розведення дебалансів.

Функції $f_1(c)$ та $f_2(\theta)$ будуть визначені за результатами проведених експериментальних досліджень.

Друга складова у фігурних дужках $2\pi g \xi_3 l_k R \rho$ не залежить від технологічних параметрів роботи вібраційної машини (амплітуди та частоти коливання), а тільки характеризує сипке середовище, що знаходиться всередині робочої камери.

На основі аналізу залежності (9) встановлено, що необхідна потужність, яка затрачується на привод вібраційної машини для виконання оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхонь робочих органів ґрунтообробних знарядь залежить від параметрів вібрації (амплітуда та частота коливань) та жорсткості системи підвісок. Параметри вібрації безпосередньо впливають на показники якості виконання технологічного процесу оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей, але варіювати ними можна тільки в обмеженому діапазоні.

У третьому розділі «Програма і методика проведення експериментальних досліджень» описано оснащення та наведено методики проведення, вимірювання та оброблення результатів експериментів.

Згідно з метою дисертаційної роботи та поставлених завдань, а також для перевірки адекватності отриманих результатів теоретичного аналізу, програма проведення експериментальних досліджень дослідно-промислового зразка вібраційної машини для проведення оздоблювально-зміцнювальної обробки поверхонь робочих органів ґрунтообробних знарядь була такою:

- провести лабораторні експериментальні дослідження з метою отримання емпіричних регресійних залежностей, які характеризують функціональну залежність зміни:

- висоти мікронерівностей поверхні після залежно від параметрів і режимів роботи вібраційної машини;

- твердості поверхні робочих органів ґрунтообробних знарядь після проведення оздоблювально-зміцнювальної обробки залежно від параметрів і режимів роботи вібраційної машини;

- визначити показники технологічної ефективності використання вібраційної машини для відновлення поверхні робочих органів ґрунтообробних знарядь на основі проведення порівняльних досліджень.

Вибір рекомендованих технологічних способів відновлення робочих поверхонь ґрунтообробних агрегатів виконаний з урахуванням характеру дефектів та міри зношування їх ріжучих поверхонь, властивостей матеріалу, точності обробки, конструктивних особливостей і економічної доцільності виконання робіт з їх ремонту.

Експериментальні дослідження по відновленню поверхонь деталей ґрунтообробних знарядь шляхом вібраційного зміцнення проводилися на вібраційній машині з дебалансним активатором руху робочого середовища (рис. 2). Оцінка параметрів технологічної обробки поверхонь робочих органів ґрунтообробних агрегатів в процесі їх відновлення, методи відбору зразків, апаратура і порядок проведення випробувань визначалися згідно наступних стандартів: ДСТУ ISO 6507-1:2007 «Матеріали металеві. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 1. Метод випробування», ДСТУ ISO 6507-4:2008 «Металеві матеріали. Визначення твердості за Віккерсом. Частина 4. Таблиця значень твердості».

Зразками для вимірювань мікротвердості служили металографічні шліфи. Мікротвердість покриття визначалися на поздовжніх і поперечних шліфах.

Метою планування експерименту в роботі є розробка теоретичного базису для реалізації оптимального типу експерименту з дослідження дослідно-промислового зразка вібраційної машини з дебалансним активатором руху для обробки деталей ґрунтообробних знарядь. Теоретичний базис узагальнив цілісне використання матеріалів планування експерименту та дисперсійного і регресійного аналізу.

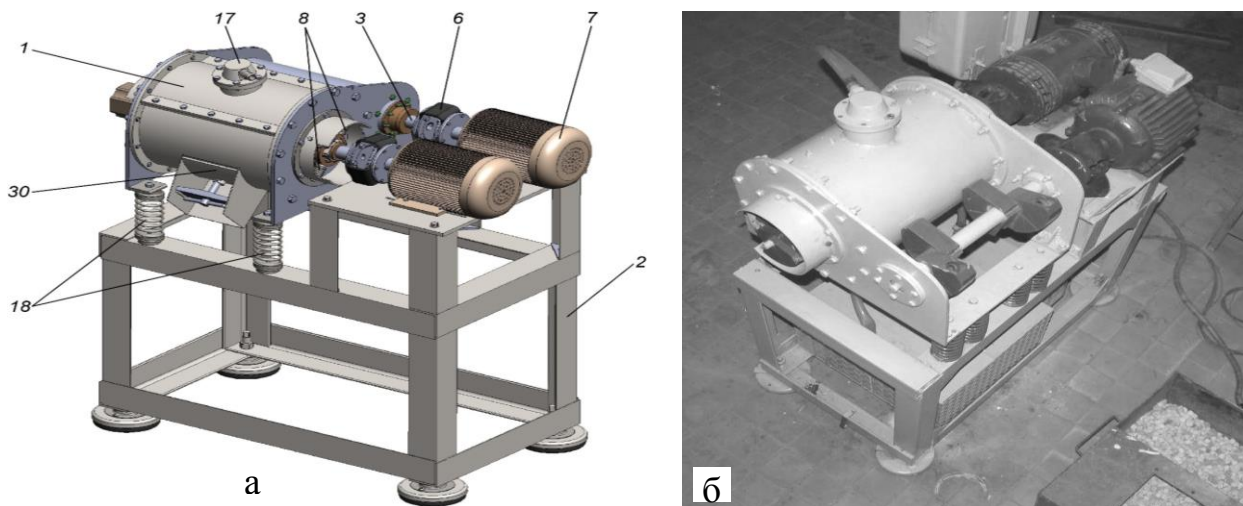


Рис. 2. 3D-модель (а) та дослідно-промисловий зразок (б) вібраційної машини для оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей ґрунтообробних знарядь

Склавши матрицю планованого факторного експерименту типу ПФЕ 2^3 було вибрано математичну залежність для апроксимації експериментальних даних зміни твердості відновленої поверхні деталей ґрунтообробних знарядь залежно від основних параметрів вібраційної машини, або основних факторів, які найбільше впливають на технологічний процес відновлення.

Математичну залежність для апроксимації експериментальних даних зміни твердості M відновленої поверхні деталей вибрано у вигляді лінійної функції, яку записано у вигляді

$$M = f_M(A; n; t), \quad (9)$$

де A – амплітуда коливання робочої камери, мм; n – частота коливання робочої камери, хв^{-1} ; t – час обробки, хв.

Оцінку технологічного стану поверхні робочих органів ґрунтообробних робочих органів (диски борін, стрілочасті та долотоподібні лапи культиваторів, зуби борін) виготовлених зі сталі 65Г після віброзміцнення досліджували для наступних варіантів: нові робочі органи; нові робочі органи з віброзміцненням; бувші в експлуатації робочі органи; робочі органи, які відновлено способом фрезеруванням; бувші в експлуатації робочі органи, які відновлено фрезеруванням та з віброзміцненням.

У четвертому розділі «Результати експериментальних досліджень» наведено результати експериментальних досліджень вібраційно-зміцнювальної та оздоблювальної обробки деталей ґрунтообробних знарядь.

Дослідження поверхонь дисків борін, стрілочастих та долотоподібних лап культиваторів, лап і зуби борін проводили на деталях робочих органів ґрунтообробних знарядь, які виготовлено зі сталі 65Г.

Визначення характеру зміни енерговитрат процесу віброзміцнення, зміни твердості відновленої поверхні робочих органів, зміни шорсткості оброблених деталей проводили згідно з складеною план-матрицею експериментів. При цьому вхідними факторами приймали основні технічні параметри вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища, або: амплітуду та частоту коливання робочої камери та активатора; час обробки.

Витрати потужності процесу віброзміцнення досліджували шляхом порівняння енергозатрат на проведення оздоблювально-зміцнювальної обробки робочих органів ґрунтообробних знарядь в вібраційних машинах без активатора, з інерційним активатором та активатором з окремим дебалансним приводом.

Результати досліджень наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Витрати потужності, яку споживає вібраційна машина, Вт

Амплітуда коливання, мм	Без активатора				З інерційним активатором				З дебалансним активатором			
	0	2	3	4	0	2	3	4	0	2	3	4
КК-6	541	600	720	840	520	540	660	900	517	523	640	870
ПТК-10	540	600	726	870	521	545	665	932	516	525	643	895
ПТК-16	542	596	723	900	520	550	670	960	518	527	658	912
КМ-6	557	624	774	920	553	572	689	982	534	538	680	936

Проаналізувавши отримані результати, можна стверджувати, що енерговитрати вібраційної машини з дебалансним активатором руху середовища під час проведення оздоблювально-зміцнювальної обробки порівняно з базовою вібраційною машиною зменшилися на 13% при амплітуді коливань 3мм.

Більш точне уявлення про характер поверхні оброблених деталей отримано при використанні тривимірної (3D) мікрогеометрії і параметричних характеристик поверхні при стереометричному дослідженні мікротопографій поверхонь.

3D моделі поверхні деталі наведено на рис. 3 і рис. 4.

Робочі органи ґрунтообробних машин при відновленні проходили фрезерування (деталь а, рис. 3а), вібраційну обробку на вібраційних машинах з торовидною робочою камерою (деталь б, рис. 3б) та циліндричною робочою камерою з центральним активатором руху робочого середовища (деталь в, рис. 3в).

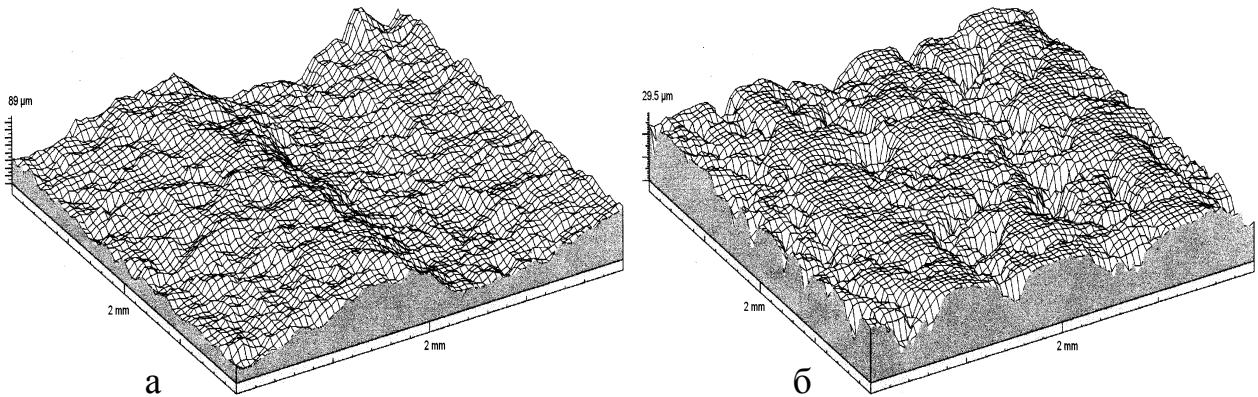


Рис. 3. Аксонометричні зображення поверхні деталей: а – після фрезерування; б – після вібраційної обробки на вібраційних машинах з торовидною робочою камерою

У роботі використовувався метод вимірювання мікротвердості по відновленому відбитку.

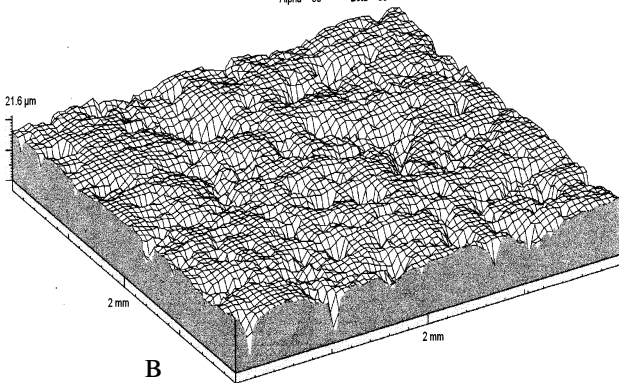


Рис. 4. Аксонометричні зображення поверхні деталей після вібраційної обробки на вібраційних машинах

Для проведення досліджень з вібраційного зміцнення поверхонь робочих органів ґрунтообробних агрегатів використовувалися елементи робочих органів нових та відновлених деталей, причому лапи та долота поміщувалися в робочу камеру в цілому вигляді, а з диска борони було вирізано елементи, які зношуються безпосередньо від контакту з ґрунтом (рис. 5, рис. 6).

Основними критеріями, або



Рис. 5. Загальний вигляд робочих органів після віброзміцнювальної обробки параметрами оптимізації, які характеризують показники процесу віброзміцнювальної обробки робочих поверхонь ґрунтообробних знарядь були: енергетичні витрати N , кВт·год.; висота мікронерівності R , мкм; твердість поверхні T , HV.



Рис. 6. Загальний вигляд робочих органів після віброзміцнювальної обробки

Основними вхідними факторами, які впливають на параметри оптимізації приймали: амплітуду коливання робочої камери a_k , яку змінювали у межах від 0 до 7 мм; амплітуду коливання активатора a_a , яку змінювали у межах від 0 до 4 мм; кутову швидкість приводного вала робочої камери $\omega_{нк}$, яку змінювали у межах від 20 до 220 рад/с; кутову швидкість приводного вала активатора $\omega_{на}$, яку змінювали у межах від 20 до 200 рад/с; час обробки T_o , який змінювали у межах від 0 до 140 хв.

Визначення впливу перерахованих вхідних факторів на параметри досліджуваного процесу проводили за допомогою рототабельного центрально-композиційного плану планованого факторного експерименту.

За результатами проведених експериментів було побудовано гістограму розподілу випадковості якісних показників процесу віброзміцнювальної обробки робочих поверхонь ґрунтообробних знарядь (рис. 7).

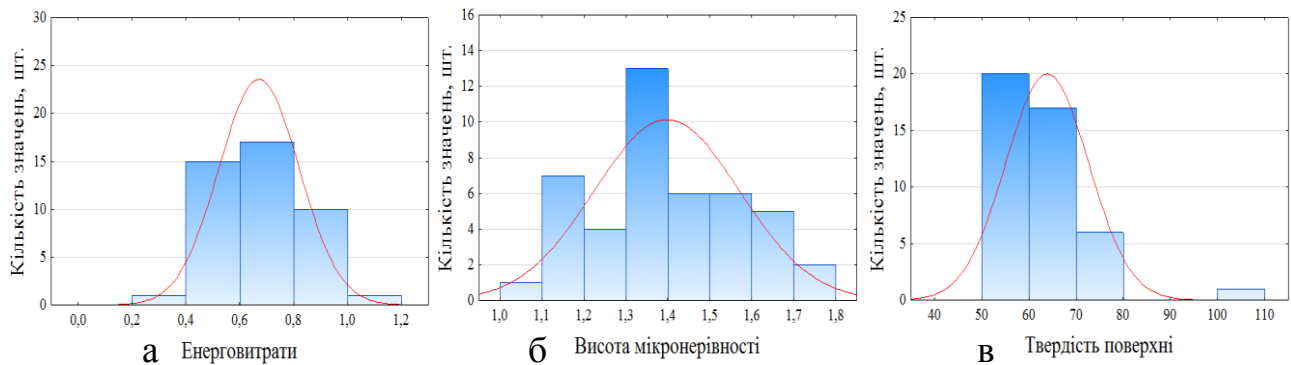


Рис. 7. Гістограма розподілу випадковості якісних показників віброзміцнювальної обробки: а – енерговитрати N , кВт·год.; б – висота мікронерівності R , мкм; в – твердість поверхні T , НВ

Після обробки експериментальних даних у статистичному середовищі Statistica 10.0 було отримано рівняння регресії у натуральних факторах, які описують і характеризують зміну якісних показників віброзміцнювальної обробки залежно від амплітуди коливань робочої камери a_k , амплітуди коливань активатора a_a , кутової швидкості $\omega_{нк}$ приводного вала робочої камери, кутової швидкості $\omega_{на}$ приводного вала активатора, часу обробки T_o :

- зміну висоти мікронерівностей R

$$R = 1,977 - 0,024a_k - 0,061a_a - 0,0003\omega_{нк} - 0,002\omega_{на} - 0,002T_o; \quad (10)$$

- зміну твердості поверхні T

$$T = 32,56 + 1,602a_k + 2,013a_a + 0,044\omega_{нк} + 0,075\omega_{на} + 0,117T_o. \quad (11)$$

Для раціональних параметрів амплітуди ($a = 4 \cdot 10^{-3}$ м) і кутової швидкості ($\omega = 146,5 \text{ с}^{-1}$) залежність необхідної потужності від жорсткості пружної підвіски та кута розведення дебалансів має вигляд

$$N = (3027,9 - 1806,7\theta) \exp(-0,5c). \quad (12)$$

Графічна залежність необхідної потужності від еквівалентної жорсткості системи підвіски і кута розведення дебалансів наведена на рис. 8.

Проведено перевірку адекватності теоретичних та експериментальних досліджень для випадку раціональних значень амплітуди і частоти коливань ($a = 4 \cdot 10^{-3}$ м і $\omega = 146,5$ с $^{-1}$) та кута розведення дебалансів $\theta = 55^\circ = 0,96$ рад. Гіпотеза про адекватність вибірки підтверджується на рівні 5%.

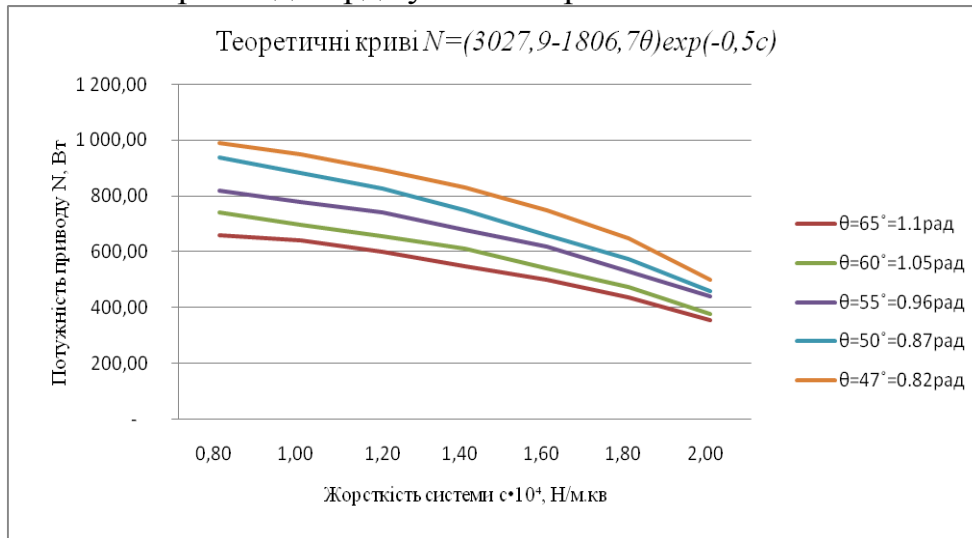


Рис. 8. Залежність необхідної потужності від еквівалентної жорсткості системи підвіски і кута розведення дебалансів

На основі отриманих експериментальних даних побудовано карти Парето ефектів для оцінки функціонального впливу вхідних факторів на споживані енерговитрати розробленої вібраційної машини, на висоту мікронерівностей та твердість поверхні (рис. 9, рис. 10).

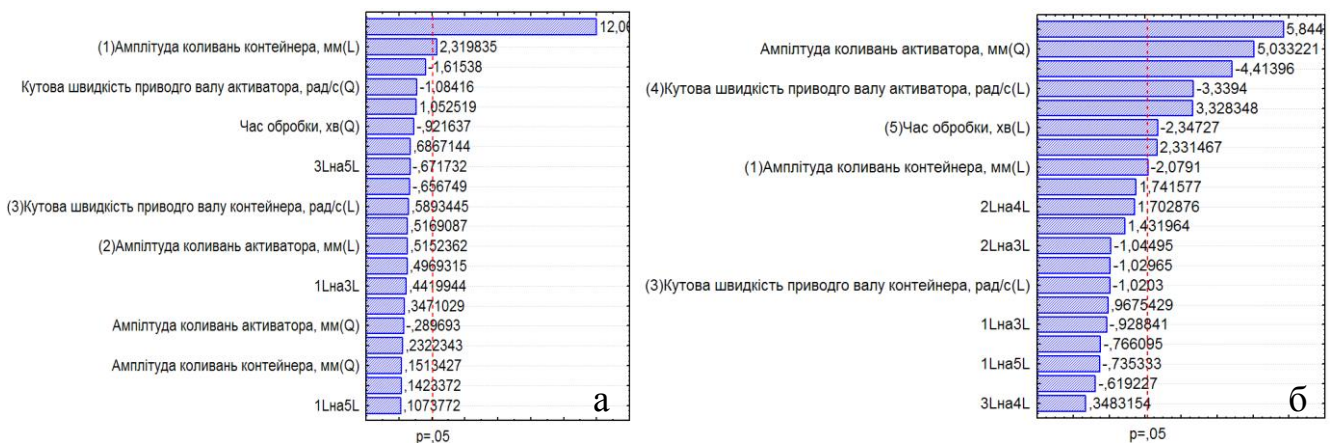


Рис. 9. Карти Парето ефектів для оцінки впливу факторів на: а – енерговитрати вібрмашини; б – на висоту мікронерівностей

Згідно з побудованими картами Парето ефектів (рис. 9, рис. 10) встановлено, що на споживані енерговитрати вібрмашини найбільше впливає амплітуда коливань робочої камери; на висоту мікронерівностей – амплітуда коливань робочої камери, кутлова швидкість приводного валу активатора та час обробки; на твердість поверхні – амплітуда коливань робочої камери та активатора.

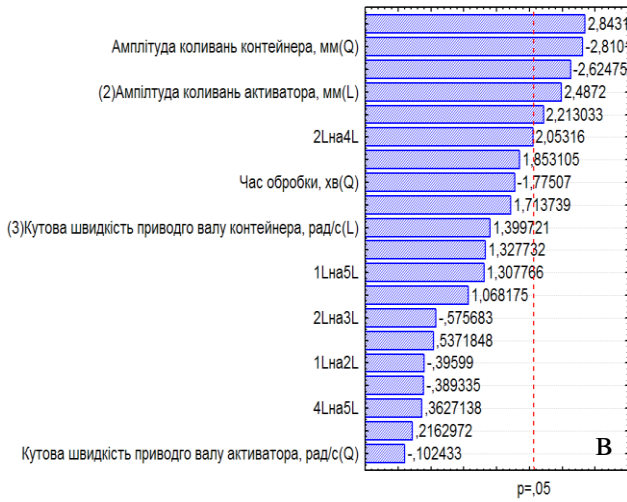


Рис. 10. Карти Парето ефектів для оцінки впливу факторів на твердість поверхні процесів (рис. 11, рис. 12), а також з врахуванням показників виробничих досліджень розробленої вібраційної машини визначено компромісні технологічні параметри її роботи (табл. 2).

Згідно з отриманими рівняннями регресії (10)-(12) побудовано поверхні відгуку функціональної зміни: енергетичних витрат як функція $N = f_N(\omega_{пвк}; \omega_{пва})$, рис. 11а; висоти мікронерівностей як функція $R = f_R(a_k; T_o)$, рис. 11б; твердості поверхні як функція $T = f_T(a_a; T_o)$, рис. 12.

За результатами проведених експериментальних досліджень функціональної зміни показників якості віброзміцнювальної обробки робочих органів ґрунтообробних знарядь і аналізу побудованих поверхонь відгуку досліджуваних

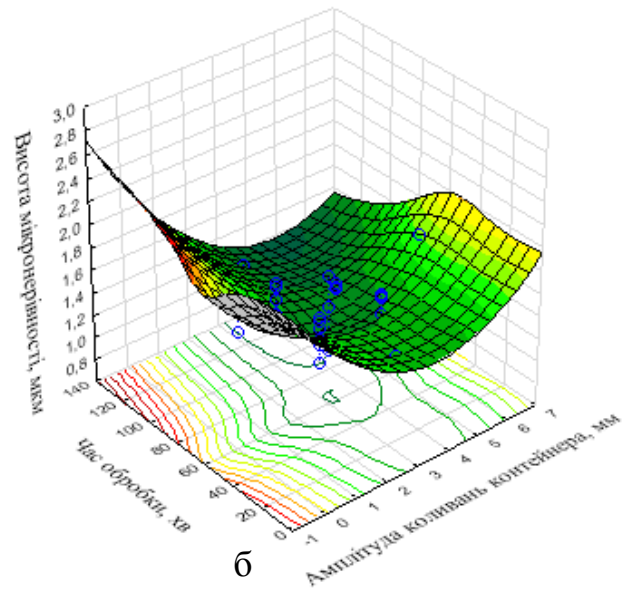
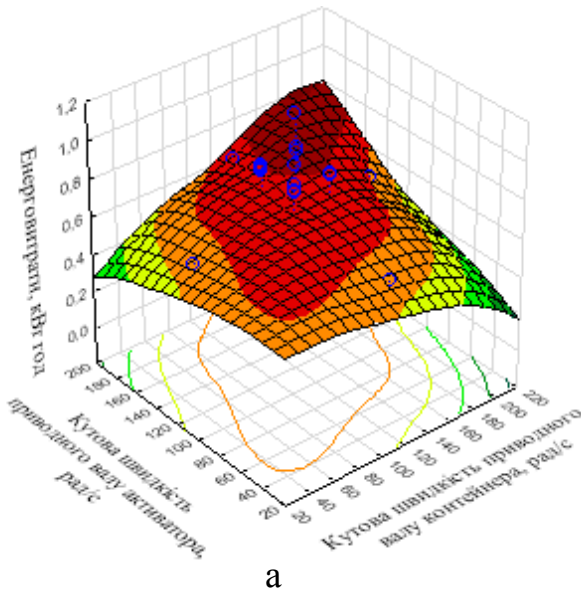


Рис. 11. Поверхня відгуку функціональної зміни: а – споживаних енерговитрат вібраційною машиною як функція $N = f_N(\omega_{пвк}; \omega_{пва})$; б – висоти мікронерівностей як функція $R = f_R(a_k; T_o)$

Таблиця 2

Компромісні технологічні параметри досліджуваного процесу

Технологічний параметр	Раціональне значення
Амплітуда коливань робочої камери, мм	2-4
Амплітуда коливань активатора, мм	1,5-2,5
Кутова швидкість приводного валу робочої камери, рад/с	115-120
Кутова швидкість приводного валу активатора, рад/с	120-150
Час обробки, хв.	80

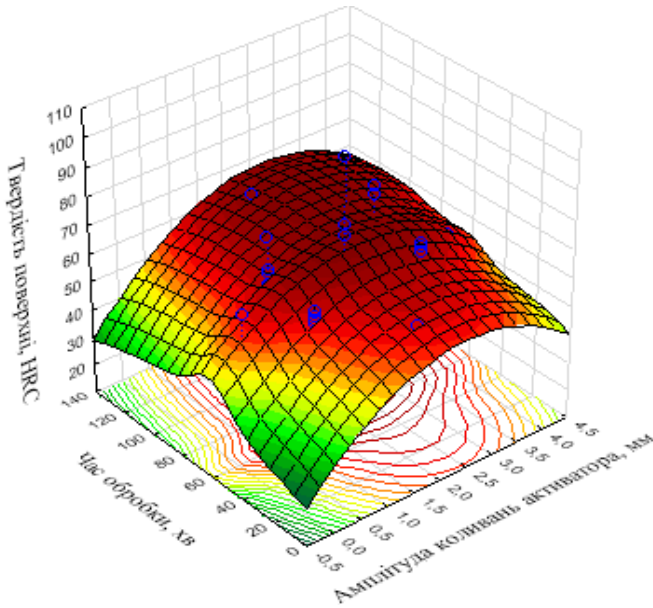


Рис. 12. Поверхня відгуку функціональної зміни твердості поверхні як функція

$$T = f_T(a_a; T_o)$$

одержаний за рахунок підвищення твердості поверхні відновлених деталей в 1,2-1,5 рази, зменшення витрат часу у 2 рази та питомих витрат енергії у 1,8 рази на відновлення деталей. Термін окупності капіталовкладень становить 0,55 року.

Для розширення технологічної можливості віброзміцнювальної обробки деталей розроблено електромеханічну схему керування приводом машини, яка дозволяє у автоматичному режимі забезпечити мінімальні енерговитрати на привод, задані параметри вібрації та програмно визначену зміну послідовностей траєкторій руху робочого середовища у робочій камері вібромашини на протязі заданого циклу обробки (рис. 13).

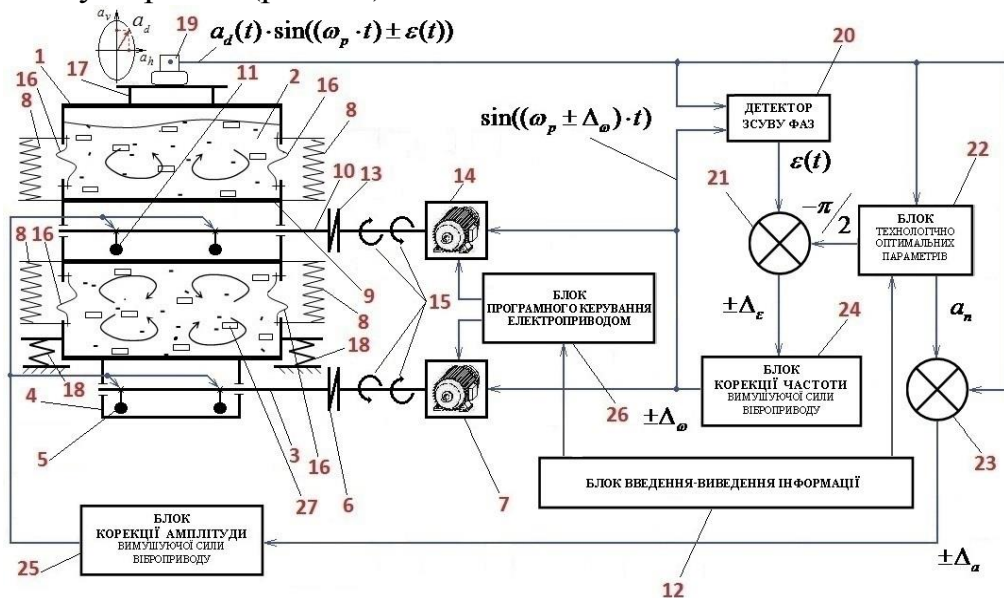


Рис. 13. Електромеханічна схема системи для віброзміцнювальної обробки у автоматичному режимі

Створений дослідно-промисловий зразок вібраційної машини з активатором руху робочого середовища та технологічні рекомендації упроваджено на ПрАТ «Калинівське РП «Агромаш» та ТОВ «Агромаш-Калина» м. Калинівка Вінницької області.

Отримані значення параметрів (табл. 2) забезпечують виконання технологічного процесу розробленою установкою з мінімальними енерговитратами та отримання кінцевої продукції заданої якості.

У п'ятому розділі «Економічна ефективність та упровадження результатів досліджень» проведено розрахунок економічної ефективності відновлення робочих органів ґрунтообробних знарядь на прикладі ремонту дискової борони.

Економічний ефект від впровадження розробленої вібраційної машини для ремонту робочих органів однієї секції (6 шт.) дискової борони складає 4451,2 грн. Він

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі системного аналізу відомих способів та технічних засобів для оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей робочих органів ґрунтообробних машин встановлено, що найбільш ефективним є використання машини з вільним кінематичним зв'язком між деталями та робочим інструментом.

2. Розроблена механіко-математичну модель динаміки руху робочих органів вібраційної машини дозволила встановити істотний взаємозв'язок між параметрами вібраційних коливань і якісними показниками віброзміцнювальної обробки деталей. При цьому збільшення амплітудно-частотних параметрів робочих органів дебалансного активатора робочого середовища на 50 % викликає збільшення твердості поверхні деталей на 60-70 %.

3. Аналітично встановлено, що збільшення еквівалентної системи жорсткості підвіски на 30 % призводить до збільшення необхідної потужності приводу вібраційної машини на 20 %.

4. За результатами експериментальних досліджень встановлено, що споживаних енерговитрат вібраційною машиною знаходиться у діапазоні від 0,2 до 0,8 кВт за зміни кутової швидкості приводного вала активатора від 20 до 200 рад/с і кутової швидкості приводу вала робочої камери від 20 до 220 рад/с. Різниця між теоретичним та експериментальними даними не перевищує 12%.

5. Встановлено, що оптимальні значення показників процесу вібраційного зміцнення деталей отримано за таких раціональних значень параметрів вібраційної машини: амплітуди коливання робочої камери $4 \cdot 10^{-3}$ м; частоти коливання приводного вала активатора та робочої камери 146,5 рад/с; кута розведення дебалансів 0,96 рад.

6. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень вібраційного зміцнення робочих органів ґрунтообробних знарядь встановлено компромісні технологічні параметри процесу: кутова швидкість вала робочої камери – 115...120 рад/с, кутова швидкість вала активатора – 120..150 рад/с, час обробки – 80 хв. При цьому твердість поверхні деталей збільшується у 1,2-1,5 рази, тривалість обробки зменшується у 2 рази, а витрати енергії у 1,8 рази в порівнянні з існуючими машинами.

7. Економічний ефект від упровадження вібраційної машини для ремонту робочих органів складає 4451,2 грн. з однієї секції дискової борони (6 дисків). Термін окупності капіталовкладень становить 0,55 року.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Праці у фахових періодичних виданнях України

1. Берник П.С., Величко Л.Д., Горбатюк Р.М. Розвиток конструктивних схем вібраційних машин більшої продуктивності. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2000. №1(13). С. 21-23. (Здобувачем обґрунтовано схему установки для оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей).

2. Берник П.С. Горбатюк Р.М., Ярошенко Л.В. Аналіз конструкцій вібраційних технологічних полічастотних машин. *Вібрації в техніці та*

технологіях. 2001. №3(Здобувачем проаналізовано розвиток конструктивних схем вібраційних машин для віброабразивної оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей).

3. Берник П.С., Горбатюк Р.М., Величко Л.Д. Побудова математичної моделі двопривідної вібраційної машини з дебалансним активатором руху робочого середовища. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2001. №2(18). С. 7-13. (Здобувачем розроблено математичну модель та проведено її аналіз).

4. Горбатюк Р.М. Побудова математичної моделі вібраційної машини з інерційним активатором руху робочого середовища. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2003. №5(31). С. 18-20. (Здобувачем розроблено математичну модель та проведено її аналіз).

5. Берник П.С., Горбатюк Р.М. Визначення енергоспоживання вібраційних машин для оздоблювально-зачисної обробки деталей сільськогосподарської техніки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2007. № 4 (49). С. 3-5. (Здобувачем визначені енергетичні показники роботи розробленої машини).

6. Берник П.С., Горбатюк Р.М. Дослідження мікротопографії поверхонь деталей сільськогосподарської техніки після віброабразивної обробки у полічастотних вібромашинах. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2008. № 2 (51). (Здобувачем проведені дослідження з визначення параметрів мікротопографії поверхонь оброблених деталей).

7. Горбатюк Р.М. Обґрунтування параметрів роботи вібромашини для абразивної обробки деталей сільськогосподарських машин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2012. № 3 (67). С. 73-76. (Здобувачем проведено аналіз сучасних методів та обладнання для оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей та обґрунтовано параметри розробленої вібромашини).

8. 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. (Здобувачем проведені теоретичні дослідження з розвитку адаптивних систем керування вібромашинами для оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей сільськогосподарських машин).

9. Лисогор В.М., Горбатюк Р.М., Шулле Ю.А. Теорія експерименту дослідної електромеханічної установки для обробки деталей ремонтної сільськогосподарської техніки. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2013. №1(69). С. 108-115. (Здобувачем проведено планування теорії проведення експериментальних досліджень).

10. Лисогор В.М., Горбатюк Р.М., Шулле Ю.А., Чубик Р.В. Визначення степеней вільності електромеханічної установки для віброабразивної обробки деталей при ремонті сільськогосподарської техніки. *Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету*. 2014. №1(84). С. 22-32. (Здобувачем проведено планування багатофакторного експерименту та здійснено статистичну оцінку проведення експериментальних досліджень).

11. Горбатюк Р.М., Килівник М.М., Чубик Р.В., Скварок Ю.Ю. Автомат для віброабразивної обробки деталей. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2014. №3(75). С. 57-64. (Здобувачем запропоновано схему адаптивного автоматичного керування приводом вібромашини з активатором руху робочого середовища).

12. Чубик Р.В., Горбатюк Р.М., Борзов І.Г. Пристрій для автоматизації технологічного процесу віброабразивної обробки деталей. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. №1(93). С. 74-80. (Здобувачем запропонований автоматичний привід вібромашини для оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей).

13. 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. (Здобувачем розроблено матрицю планування експериментальних досліджень та проведено її аналіз).

Праці у наукових періодичних виданнях інших держав

14. 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. pp. 35-42. (Здобувачем обґрунтовано модель вібромашини з активатором руху робочого середовища).

Патенти України на корисні моделі

15. Пат. UA 32159 А Україна. Пристрій для вібраційної обробки деталей. Опубл.15.12.2000. (Здобувач взяв участь у обґрунтуванні конструкції та у складанні формули винаходу).

16. Пат. UA 35946 А Україна. Пристрій для вібраційної обробки деталей. Опубл.16.04.2001. (Здобувач взяв участь у обґрунтуванні конструкції та у складанні формули винаходу).

17. Пат. 76368 А Україна. Адаптивний пристрій для віброабразивної обробки деталей. Опубл.10.01.2013. (Здобувач взяв участь у розробці приводу та у складанні формули винаходу).

Матеріали конференцій і тези

18. 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*. 2013. С. 223-224. (Здобувачем запропонована система керування приводом розробленої вібраційної машини).

19. Скварок Ю.Ю., Горбатюк Р.М. Розвиток керованих вібромашин та технологій для віброабразивної обробки деталей. *Міжнародна науково-технічна конференція «Вібрації в техніці та технологіях в переробних і харчових виробництвах»*. 2013. С. 26-27. (Здобувачем проведені теоретичні дослідження з розвитку систем керування вібромашинами для оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей).

20. 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. (Здобувачем проведені дослідження з розробки адаптивної системи керування вібромашинами для оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей сільськогосподарської техніки при ремонті).

21. 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. С. 203. (Здобувачем проведений аналіз енергоєфективних вібромашин для оздоблювально-зачисної та зміцнювальної обробки деталей).

22. Янович В.П., Цуркан О.В., Горбатюк Р.М. Розробка конструкції вібраційної машини з активатором для поверхневого зміцнення робочих органів ґрунтообробних агрегатів. *Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні проблеми виробництва, переробки сільськогосподарської продукції, машинобудування та енергетичних систем АПК»*. 2017. С. 254-257. (Здобувачем на основі проведеного аналізу обґрунтовано конструкцію вібраційної машини з активатором руху робочого середовища).

АНОТАЦІЇ

Горбатюк Р.М. Обґрунтування конструкційно-технологічних параметрів вібромашини для поверхневого відновлення робочих органів ґрунтообробних агрегатів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2021 р.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної задачі підвищення ефективності віброзміцнювальної обробки робочих органів ґрунтообробних агрегатів шляхом розробки обладнання для виконання процесу зміцнення їх поверхонь вібраційним деформуванням при відновленні, оцінки закономірностей зміни основних параметрів розробленої машини з механічним активатором руху робочого середовища.

На основі аналізу конструкцій вібраційних машин та схем здійснення оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей розроблено нову конструкцію вібраційної машини з активатором руху робочого середовища.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження розробленої вібромашини з активатором руху робочого середовища дозволили отримати аналітичні та емпіричні залежності для її основних характеристик та обґрунтувати раціональні конструкційно-технологічні параметри.

Експериментально досліджено вплив режимних параметрів на показники якості оздоблювально-зміцнювальної обробки деталей ґрунтообробних агрегатів та витрат енергії на різних технологічних режимах розробленої вібраційної машини з активатором руху робочого середовища.

В результаті чого підвищено твердість поверхні у 1,2-1,5 рази, зменшено витрати часу у 2 рази та питомі витрати енергії у 1,8 рази на їх відновлення, також зменшити параметри шорсткості R_z із 6,3 мкм до 0,18 мкм за 80 хв. обробки.

Результати проведених досліджень дозволили отримати компромісні технологічні параметри досліджуваного процесу, які становлять: амплітуда коливань робочої камери – 2-4 мм; амплітуда коливань активатора – 1,5-2,5 мм; кутова швидкість приводного вала робочої камери – 115-120 рад/с; кутова швидкість приводного вала активатора 120-150 рад/с; час обробки – 80 хв.

Створений дослідно-промисловий зразок вібраційної машини з активатором руху робочого середовища впроваджено на ПрАТ «Калинівське РП «Агромаш» та ТОВ «Агромаш-Калина» м. Калинівка Вінницької області для процесу вібраційного зміцнення поверхонь робочих органів ґрунтообробних агрегатів.

Економічний ефект від упровадження розробленої вібраційної машини для ремонту робочих органів (6 шт.) однієї секції дискової борони складає 4451,2 грн. за терміну окупності капіталовкладень 0,55 роки.

Ключові слова: зміцнення, відновлення, робочий орган, ґрунтообробний агрегат, вібрація, диференціальні рівняння, раціональні параметри, продуктивність, енерговитрати, адаптивне керування.

Горбатюк Р.М. Обоснование конструкционно-технологических параметров вибромашины для поверхностного восстановления рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.11 – машины и средства механизации сельскохозяйственного производства. – Винницкий национальный аграрный университет, Винница, 2021 г.

Диссертация посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности виброупрочняющей обработки рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов путем разработки оборудования для выполнения процесса укрепления их поверхностей вибрационным деформированием при восстановлении, оценки закономерностей изменения основных параметров разработанной машины с механическим активатором движения рабочей среды.

На основании анализа известных конструкций вибрационных машин и схем осуществления отделочно-упрочняющей обработки деталей разработана новая конструкция вибрационной машины с активатором движения рабочей среды.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования разработанной вибромашины с активатором движения рабочей среды позволили получить аналитические и эмпирические зависимости для ее основных характеристик и обосновать рациональные конструкционно-технологические параметры.

Экспериментально исследовано влияние режимных параметров на показатели качества отделочно-упрочняющей обработки деталей почвообрабатывающих агрегатов и затрат энергии на различных технологических режимах разработанной вибрационной машины с активатором движения рабочей среды. В результате чего повышена жесткость поверхности в 1,2-1,5 раза, уменьшены затраты времени в 2 раза и удельные расходы энергии в 1,8 раза на их восстановление, также уменьшено параметры шероховатости R_z с 6,3 мкм до 0,18 мкм за 80 минут обработки.

Результаты проведенных исследований позволили получить компромиссные технологические параметры исследуемого процесса, которые составляют: амплитуда колебаний рабочей камеры - 2-4 мм; амплитуда колебаний активатора - 1,5-2,5 мм; угловая скорость приводного вала рабочей камеры - 115-120 рад/с; угловая скорость приводного вала активатора 120-150 рад/с; время обработки - 80 мин.

Созданный опытно-промышленный образец вибрационной машины с активатором движения рабочей среды внедрен на ЗАО «Калиновское РП «Агромаш» и ООО «Агромаш-Калина» г. Калиновка Винницкой области для процесса вибрационного упрочнения поверхностей рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов. Установлено, что экономический эффект от внедрения разработанной вибрационной машины для ремонта рабочих органов одной секции дисковой бороны (6 шт.) составляет 4451,2 грн. при сроке окупаемости капиталовложений 0,55 года.

Ключевые слова: упрочнение, восстановление, рабочий орган, почвообрабатывающий агрегат, вибрация, дифференциальные уравнения, рациональные параметры, производительность, энергозатраты, адаптивное управление.

Gorbatyuk R.M. Substantiation of design and technological parameters of the vibrating machine for surface restoration of working bodies of tillage units. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.05.11 – Machines and means of mechanization of agrarian production. - Vinnytsia National Agrarian University, Vinnytsia, 2021.

The dissertation is devoted to solving the urgent problem of increasing the efficiency of vibration - strengthening treatment of working bodies of tillage units by developing equipment to perform the process of strengthening their surfaces by vibration deformation during restoration, evaluation of patterns of changes in basic parameters of the machine with mechanical activator.

On the basis of the analysis of known designs of vibrating machines and schemes of realization of finishing and strengthening processing of details the new design of the vibrating car with the activator of movement of the working environment is developed.

Theoretical and experimental studies of the developed vibrating machine with the activator of the movement of the working environment allowed to obtain analytical and empirical dependences for its main characteristics and to substantiate the rational design and technological parameters.

The influence of regime parameters on the quality indicators of finishing and strengthening processing of parts of tillage units and energy consumption at different technological modes of the developed vibrating machine with the activator of the working environment is experimentally investigated. As a result, the surface hardness is increased by 1,2-1,5 times, time consumption is reduced by 2 times and specific energy consumption by 1,8 times to restore them, and the roughness parameters R_z are reduced from 6,3 μm to 0,18 μm for 80 minutes of processing.

The results of the research allowed to obtain compromise technological

parameters of the studied process, which are: the amplitude of oscillations of the working chamber - 2-4 mm; amplitude of oscillations of the activator - 1,5-2,5 mm; angular velocity of the drive shaft of the working chamber - 115-120 s⁻¹; the angular velocity of the actuator drive shaft 120-150 s⁻¹; processing time - 80 minutes.

The created experimental-industrial sample of the vibrating machine with the activator of movement of the working environment is introduced on PJSC Kalinivske RP «Agromash» and LTD «Agromash-Kalyna» of Kalinovka of Vinnytsia region for process of vibration strengthening of surfaces of working bodies of tillage units. It is established that the economic effect from the introduction of the developed vibrating machine for the repair of working bodies (6 pcs.) of one section of the disc harrow is 4451,2 UAH with a payback period of 0,55 years.

Key words: strengthening, restoration, working body, tillage unit, vibration, differential equations, rational parameters, productivity, energy consumption, adaptive control.

Підписано до друку 10.03.2021 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк – лазер. Ум. друк. арк. 1,56.
Наклад 100 прим. Зам. № 597

Надруковано у редакційно-видавничому відділі
Вінницького національного аграрного університету
м. Вінниця, вул. Сонячна, 3, 21008.