ISSN 2414-3820

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Центральноукраїнський національний технічний університет

КОНСТРУЮВАННЯ, ВИРОБНИЦТВО ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Загальнодержавний міжвідомчий
науково-технічний збірник

Випуск 55

Кропивницький • 2025

ISSN 2414-3820

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
Central Ukrainian National Technical University

DESIGN, PRODUCTION AND EXPLOITATION OF AGRICULTURAL MACHINES

National Interagency Scientific
and Technical Collection of Works

Issue 55

Kropyvnytskyi • 2025

УДК 631.3.001.1 (082)

Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. 2025. Вип. 55. 344

В збірнику викладені питання конструювання, розрахунку, удосконалення, створення і дослідження нових робочих органів сільськогосподарських машин, засобів механізації, електрифікації та автоматизації сільськогосподарського виробництва. Наведені результати досліджень в галузі технологій виробництва і експлуатації машин та забезпечення їх надійності і довговічності. Викладені практичні рекомендації по використанню результатів досліджень і дослідно-конструкторських розробок в сільськогосподарській і інших галузях машинобудування Збірник розрахований на наукових та інженерно-технічних працівників науково-дослідних установ, ВНЗ, конструкторських організацій та промислових підприємств.

Рекомендовано до друку Вченою радою Центральноукраїнського національного технічного університету, протокол від 23 грудня 2025 року № 5

Редакційна колегія:

Черновол М.І., д.т.н., проф. – головний редактор;
Сало В.М., д.т.н., проф. – заст. головного редактора;
Амосов В.В., к.т.н., доц. – відповідальний секретар;
Алієв Е Б., д.т.н., ст. досл.;
Алфьоров О.І., д.т.н., проф.;
Аулін В.В., д.т.н., проф.;
Васильковська К.В., к.т.н., доц.;
Васильковський О.М., к.т.н., проф.
Дідух В.Ф, д.т.н., проф.;
Кірчук Р.В., к.т.н., проф.;
Кириченко А.М., д.т.н., проф.;
Коваленко О.В., д.т.н., проф.;
Кропівний В.М., к.т.н., проф.;
Лещенко С.М., к.т.н., доц.;
Мацуй А.М., д.т.н., проф.;
Мелешко Є.В., д.т.н., проф.;
Мороз М.М., д.т.н., проф.;
Надикто В.Т., д.т.н., проф.;
Осадчий С.І., д.т.н., проф.;
Петренко Д.І., к.т.н., доц.;
Сайчук О.В., д.т.н., проф.;
Степаненко С.В., д.т.н., с.н.с.;
Харченко С.О., д.т.н., доц.;
Шепеленко І.В., д.т.н., проф.;
Anas M. Al-Oraiqat, D.Sc. (Королівство Саудівська Аравія);
Iurie Melnic, Ph.D., Associate Professor (Молдова);
Juozas Padgurskas, Dr., Professor;
Pošta Jozef, Ph.D., Professor (Чехія);
Predrag Dašić, Hon.D.Sc. (Serbia);
Andrii Yatskul, Ph.D., Associate Professor (Франція).

Адреса редакційної колегії: 25030, м. Кропивницький, проспект Університетський, 8, Центральноукраїнський національний технічний університет, тел.: +380 (522) 390-581, +380 (522) 390-472, +380 (522) 55-10-49.

Офіційний сайт: *http://zbirniksgm.kntu.kr.ua*

Автори опублікованих матеріалів несуть відповідальність за підбір і точність наведених фактів, цитат, економіко-статистичних даних, власних імен та інших відомостей, а також за те, що матеріали не містять даних, які не підлягають відкритій публікації. Редакція може публікувати статті в порядку обговорення, не поділяючи точки зору автора.

Заснований у 1971 р.

Включений до переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватись результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук з технічних наук (бюлетень ВАК №5 від 2010р., накази Міністерства освіти і науки України від 21 грудня 2015 року №1328, від 07 листопада 2018 року №1218, від 02 липня 2020 року № 886).

Категорія «Б»

Збірник наукових праць зберігається в загальнодержавній реферативній базі даних «***Україника наукова***» Національної бібліотеки України ім. В.І. Вернадського та представлений у міжнародних наукометричних базах даних ***Index Copernicus, Word Cat, CrossRef, Open Ukrainian Citation Index, ResearchBib, Google Scholar***

Ідентифікатор медіа: **R30-03925** (рішення Національної ради України від 25.04.2024 р. № 1418).
2414-3820 (Print) 2664-9136 (e) DOI: 10.32515/2414-3820

© Центральноукраїнський національний технічний університет, 2025

ЗМІСТ

АГРОІНЖЕНЕРІЯ

К. В. Васильковська, М. М. Ковальов, О. М.Васильковський
Гідропонна установка для вирощування овочевих культур 9

Volodymyr Sviatskyi
Monitoring, Risk Assessment and Safety Assurance in the Use of Pesticides in Agriculture 22

М. Л. Заєць, А. М. Климчук
Оцінка продуктивності комбайна з використанням гібридної моделі та поверхонь відгуку 31

ПРИКЛАДНА МЕХАНІКА

Vitalii Mazhara, Anatolii Artiukhov, Maksym Hodunko, Kyryl Shcherbyna, Svitlana Tenenyka
Structural Design of Robotic Complexes 43

О. Ф. Сіса, В. М. Боков, В. Я. Мірзак, Д.С. Тупаленко, О. С. Довжук
Технологія групового виготовлення квадратних зразків із ливарної високоміцної сталі 110Г13Л для фізико-механічних випробувань 50

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Е. Б. Алієв, О. А. Черній
Аналітичне обґрунтування конструктивних і режимних параметрів спірального віброживильника для дозування поодинокого насіння соняшнику 63

Г.В. Теслюк, О.В. Золотовська, О.М. Кобець, А.І. Ковцун
Моделювання аеродинамічних процесів очищення зернової маси в повітряному потоці 80

К. В. Васильковська, О. Г. Андрейченко, В. О. Малаховська
Вибір сошника для просапної сівалки 91

С.П. Степаненко, А. Я. Кузьмич, В. О. Швидя, В. А. Мельник, В. В. Тіманов
Теоретичне обґрунтування поділу зернового матеріала на конічному решеті 97

Д.І. Петренко, С.М. Лещенко, Д.С. Нєдєльський, І.О. Біліценко
Математична модель роботи пневмогравітаційного сепаратора зернових сумішей 112

Д.Ю. Артеменко, П.Г. Лузан, О.Р. Лузан, В.П. Ковбаса
Обґрунтування конструкції комбінованого наральника сошника просапної сівалки 121

С. В. Попов, О. В. Канівець
Розширення сфери застосування різців із надтвердих матеріалів у механоскладальних цехах машинобудівних заводів та на дільницях підприємств сервісу 134

О.В. Горбенко, Г.О. Лапенко, Т.Г. Лапенко
Метрологічне та технологічне забезпечення відповідності параметрів поверхневого шару при відновленні деталей машин 140

О.Д. Онопрієнко, Е.Б. Алієв, В.Б. Говоруха
Фізико-математична модель щільної випадкової упаковки насіння олійних культур 148

Volodymyr Sviatskyi
Methodology for ensuring occupational safety and health based on the assessment and management of occupational risks 163

С.М. Мельник
Розробка конструкції засобу лабораторного визначення олійної/зернової домішки 173

О.С. Гіззатуллін, О.В. Шаповал
Визначення закономірностей змінення температури паливоподачі двигуна Д-21 на базі Arduino Uno R3 179

В.М. Сало, Б.Г. Вовнянко, С.М. Лещенко
Підвищення функціональної універсальності зернових сівалок 185

І.Є. Цизь, В.Ф. Дідух, С.М. Хомич, Р.А. Хлопецький
Дослідження продуктивності пневмомеханічного засобу для добування сапропелю 192

Б. В. Ступак, С. В. Яхін
Технічне рішення та результати випробувань мобільної лінії за щадною пофракційною технологією підготовки «Сильного насіння» 201

І.В. Шепеленко, А.М. Красота, В.І. Гуцул, М.В. Красота
Теоретичний розрахунок та дослідження напруженого стану антифрикційного покриття, нанесеного на робочу поверхню кулачка розподільного валу 214

С.М. Лещенко, В.М. Сало, Д.І. Петренко, В.А. Мельніченко
Аналітичне обґрунтування основних параметрів комбінованого чизельного глибокорозпушувача 225

О.Р. Лузан, Д.Ю. Артеменко, П.Г. Лузан, Р.В. Кісільов
Теоретичний аналіз роботи сошника прямої сівби з адаптивними вертикальними дисками 238

О.В. Нестеренко, Д.В. Апостолов, В.В. Амосов, В.Ю. Боровик
Напрямки вдосконалення технічних засобів для міжрядного обробітку просапних культур 250

В.І. Ветохін, Т.Ю. Рижкова, О.А. Ребенок, В.О. Заславець, А.О. Коренівський, В.В. Амосов
Розробка модульного ґрунтового міні-каналу для дослідження ротаційних знарядь: особливості конструкції 257

О.В. Іванкова, О.В. Горбенко, Г.О. Лапенко, М.В. Чумак
Підвищення довговічності шестеренних насосів шляхом відновлення втулок методами пластичного деформування 273

Є.М. Кобан, О.М. Васильковський, О.В. Нестеренко
Обґрунтування конструкційної схеми пневматичного зернового сепаратора..... 287

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

Р.М. Минайленко, П.С. Усік, Л.І. Поліщук
Аналіз методів протидії ботнет в системах IoT 298

В.А. Резніченко, А.Я. Клюй
Алгоритми фільтрації контенту в комп'ютерних системах: аналіз ефективності, виклики впровадження та перспективи розвитку 309

І.А. Лисенко, Р.М. Минайленко
Дослідження сучасних методів аналізу даних з використанням квантових алгоритмів 314

Р.М. Минайленко, О.К. Конопліцька-Слободенюк, І.А. Лисенко
Технології розподілених об'єктів в інформаційних системах 323

Інформація про авторів 332

CONTENT

AGROENGINEERING

Kateryna Vasylkovska, Mykola Kovalov, Oleksii Vasylkovskyi
Hydroponic System for Growing Vegetable Crops 9

Volodymyr Sviatskyi
Monitoring, Risk Assessment and Safety Assurance in the Use of Pesticides in Agriculture 22

Maksym Zayets, Anatoliy Klymchuk
Influence of parameters of disc coulters on the transmission capacity of cutting crop residues in the system of zero tillage 31

APPLIED MECHANICS

Vitalii Mazhara, Anatolii Artiukhov, Maksym Hodunko, Kyryl Shcherbyna, Svitlana Tenenyka
Structural Design of Robotic Complexes 43

Oleh Sisa, Victor Bokov, Volodymyr Mirzak, Denys Tupalenko, Olexandr Dovzhuk
Technology of Group Production of Square Samples from High-Strength Casting Steel 110G13L for Physical and Mechanical Tests 50

INDUSTRIAL MECHANICAL ENGINEERING

Elchyn Aliiev, Olexandr Chernii
Analytical Justification of the Design and Operating Parameters of a Spiral Vibrating Feeder for Dosing Single Sunflower Seeds 63

Hennadii Tesliuk, Olena Zolotovska, Oleksandr Kobets, Andrii Kovcun
Modeling of aerodynamic processes in the cleaning of grain mass in an airflow 80

Kateryna Vasylkovska, Olha Andreichenko, Valentyna Malakhovska
Choosing a Coulter for a Row Crop Seeder 91

Serhii Stepanenko, Alvian Kuzmych, Viktor Shvydya, Vitaly Melnyk, Volodymyr Timanov
Theoretical Justification for the Separation of Grain Material on a Conical Sieve 97

Dmytro Petrenko, Sergii Leshchenko, Dmytro Nedelsky, Ihor Bilitsenko
Mathematical Model the Operation of a Pneumogravity Separator for Grain Mixtures 112

Dmytro Artemenko, Petro Luzan, Olena Luzan, Viktor Kovbasa
Justification of the Design of a Combined Coulter of a Row-crop Seeder Opener 121

Stanislav Popov, Oleksandr Kanivets
Expanding the Scope of Application of Super Hard Cutters in Mechanical Assembly Shops of Machine-Building Plants and Service Enterprise Sections 134

Oleksandr Gorbenko, Hryhorii Lapenko, Taras Lapenko
Metrological and Technological Assurance of Surface-Layer Parameter Conformity in the Restoration of Machine Parts 140

Oleg Onopriienko, Elchyn Aliiev, Volodymyr Hovorukha
Physico-mathematical Model of Dense Random Packing of Oilseed Seeds 148

Volodymyr Sviatskyi
Methodology for Ensuring Occupational Safety and Health Based on the Assessment and Management of Occupational Risks 163

Stanislav Melnyk
Development of a Design of Device For a Laboratory Determination of Oil/Grain Impurities 173

Oleksii Hizzatullin, Oleksandr Shapoval
Determining the Patterns of Changes in the Fuel Supply Temperature of the D-21 Engine Based on Arduino Uno R3 179

Vasyl Salo, Bohdan Vovnianko, Serhii Leshchenko
Increasing the Functional Versatility of Grain Planters 185

Igor Tsiz, Volodymyr Didukh, Serhii Khomych, Roman Khlopetscyi
Research the Productivity of a Pneumatic-mechanical Device for Extracting Sapropel 192

Bohdan Stupak, Serhii Yakhin
Technical Solution and Test Results of the Mobile Seed-processing Line Based on the Gentle Fractional Technology “Strong Seed” 201

Ihor Shepelenko, Artem Krasota, Vasiliy Gutsul, Mykhailo Krasota
Theoretical Calculation and Study of the Stress State of an Anti-friction Coating Applied to the Working Surface of a Camshaft Cam 214

Sergii Leshchenko, Vasyl Salo, Dmytro Petrenko, Viktor Melnychenko
Analytical Substantiation of the Main Parameters of a Combined Chisel Deep Ripper 225

Olena Luzan, Dmytro Artemenko, Petro Luzan, Ruslan Kisilov
Theoretical Analysis of the Operation of a Direct Seeding Coulter with Adaptive Vertical Discs 238

Olexandr Nesterenko, Denys Apostolov, Volodymyr Amosov, Vadym Borovyk
Directions for Improving Technical Means for Inter-row Cultivation of Row Crops 250

Volodymyr Vetokhin, Tetiana Ryzhkova, Oleksandr Rebenok, Vladyslav Zaslavets, Andrii Korenivskyi, Volodymyr Amosov
Development of a Modular Soil Mini-channel for Research of Rotary Tools: Design Features 257

Olena Ivankova, Oleksandr Gorbenko, Taras Lapenko, Maryna Chumak
Enhancing the Durability of Gear Pumps by Restoring Bushings Using Plastic Deformation Methods 273

Yevhenii Koban, Oleksii Vasylkovskyi, Olexandr Nesterenko
Justification of the Structural Scheme of a pnEumatic Grain Separator 287

COMPUTER SCIENCE

Roman Minailenko, Pavlo Usik, Liudmyla Polishchuk
Analysis of botnet countermeasures in IoT systems 298

Vitalii Reznychenko, Anastasiia Kliui
Content Filtering Algorithms in Computer Systems: Analysis of Efficiency, Implementation Challenges, and Future Development Prospects..... 309

Iryna Lysenko, Roman Mynailenko
Exploring Contemporary Data Analysis Approaches Employing Quantum Algorithms 314

Roman Minailenko, Oksana Konoplitska-Slobodeniuk, Iryna Lysenko
Distributed object technologies in information systems 323

Information about authors 332

УДК 621.9:621.791:620.178/179 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.140-148

О.В. Горбенко, доц., канд. техн. наук, **Г.О. Лапенко,** доц., канд. техн. наук,
Т.Г. Лапенко, доц., канд. техн. наук.
Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна
e-mail: oleksandr.gorbenko@pdau.edu.ua, grygorii.lapenko@pdau.edu.ua, taras.lapenko@pdau.edu.ua

Метрологічне та технологічне забезпечення відповідності параметрів поверхневого шару при відновленні деталей машин

Стаття присвячена забезпеченню відповідності параметрів поверхневого шару поршневих пальців двигунів внутрішнього згоряння, відновлених до номінального розміру вібраційним роздаванням з подальшою механічною обробкою. Метою роботи є розробка метрологічно трасованої методики оцінювання та керування surface integrity з урахуванням взаємозамінності й трибопрацездатності пари «палець–втулка».

відновлення, шорсткість, зношування, поверхнева цілісність, залишкові напруження, мікротвердість

Постановка проблеми. У сучасній ремонтно-відновній практиці працездатність машин істотно визначається станом поверхневого шару відновлених робочих поверхонь. На відміну від нового виготовлення, процеси відновлення (наплавлення, термічне/лазерне напилення, вібраційне механічне деформування, шліфування, суперфініш, дорнування, ультразвукова обробка тощо) формують поверхню за умов підвищеної варіабельності тепловкладення, структурних перетворень і напружено-деформованих станів [1, 2]. Це зумовлює неоднорідність топографії, градієнтів мікротвердості, залишкових напружень і адгезійно-когезійної міцності шарів, що безпосередньо впливає на зносостійкість, контактну витривалість, герметичність спряжень та, зрештою, на взаємозамінність.

Наявні підходи до контролю якості у відновленні часто зводяться до обмеженого набору показників (переважно Ra/Rz) і не враховують поверхневу цілісність (surface integrity) як інтегральне явище та рідко спираються на метрологічно трасовані (простежувані) процедури. Відсутність повного ланцюга простежуваності до еталонів, формалізованих бюджетів невизначеності, а також систематичних досліджень придатності вимірювальних систем призводить до нерепрезентативності результатів і суперечливих рішень «придатно/непридатно». Додатковою проблемою є невизначені або неуніфіковані критерії приймання, що поєднували б параметри поверхневого шару з допусками форми та розмірів, посадками і функціонально-експлуатаційними вимогами конкретних вузлів.

З технологічного боку, бракує валідованих «вікон процесу» для типових комбінацій відновлення й фінішної обробки, а також мультикритеріальних методів оптимізації, здатних узгодити суперечливі цілі (мінімальна шорсткість, напруження, стабільність геометрії, мінімальний знос). З погляду оцінювання результатів можна говорити про відсутність стандартизованого інтегрального показника відповідності surface integrity, який врахував би топографічні, механічні, напружені та трибологічні характеристики з урахуванням їх вагомості для конкретного призначення.

© О.В. Горбенко, Г.О. Лапенко, Т.Г. Лапенко, 2025

Отже, науково-практична проблема полягає у створенні інтегрованої метрологічно й технологічно обґрунтованої методики: трасованого контролю та прийняття рішень з урахуванням невизначеності; параметричної ідентифікації та оптимізації процесів відновлення/фінішної обробки; встановлення уніфікованих критеріїв приймання, що гарантують відповідність параметрів поверхневого шару вимогам взаємозамінності та експлуатаційної довговічності відновлених деталей машин.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних працях з інженерії поверхневого шару наголос робиться на інтегрованому підході до оцінювання відновлених деталей: поєднанні топографічних параметрів профілю (ISO 21920, ISO 25178) [3], фізико-механічних характеристик (мікротвердість, градієнт твердості) [4], залишкових напружень і трибологічних показників (коефіцієнт тертя, інтенсивність зношування) [5]. Оглядові публікації показують, що поверхнева цілісність визначає витривалість і надійність вузлів не менше, ніж номінальні розміри та допуски, а метрологічна складова (трасованість, бюджети невизначеності, Measurement Systems Analysis) є критичною для відтворюваності результатів [6]. У прикладних роботах, що стосуються вузлів тертя «палець-втулка» двигунів внутрішнього згоряння, домінують дослідження впливу технологічних маршрутів (шліфування, суперфініш, накочування, поверхневе легування, нанесення покриттів) на зносостійкість і контактну витривалість [7, 8]. Зростає інтерес до аналізу areal-параметрів (Sa, Sq, Ssk, Sku, параметрів матеріальної частки/опорної кривої) як предикторів масоперенесення та задирів у режимах граничного чи змішаного мащення [9, 10].

В роботах [11, 12] автори заклали концептуальну основу surface integrity як багатокомпонентної категорії, що поєднує топографію, мікроструктурні зміни, градієнти мікротвердості та залишкові напруження, і прямо пов’язали їх із функціональною надійністю деталей (знос, втомна витривалість, корозійна стійкість). Автори показали, що режими різання й фінішної обробки можуть як формувати корисні компресійні напруження й покращувати параметри поверхні, так і спричиняти дефекти. Водночас ці огляди майже не охоплюють ремонтно-відновні процеси типу вібраційного роздавання та питання уніфікованих правил приймання із мультикритеріальним індексом відповідності.

Автори в роботі [13] сфокусували увагу на експлуатаційному зносі поршневого пальця у ДВЗ, ідентифіковано домінування адгезійного та фретингового зношування у змішаному мащенні, чутливість вузла до шорсткості, циліндричності та точності посадок. Робота підкреслює, що мікрогеометрія і стан поверхневого шару визначають ризик задирання та швидкість зносу. Однак обмежено висвітлено вплив видів обробки та використання змащувально-охолоджуючої рідини (ЗОР) на стабільність параметрів.

Водночас залишається низка нерозкритих питань. По-перше, бракує стандартизованого інтегрального показника відповідності surface integrity, який поєднав би структурні, механічні, напружені та трибологічні характеристики з вагуванням під конкретний функціональний сценарій (знос, контактна витривалість, герметичність). По-друге, не уніфіковано підхід до правил приймання з урахуванням невизначеності вимірювань, що ускладнює однозначне рішення «придатно/непридатно» при близьких до межі значеннях Ra, мікротвердості чи товщини зміцненого шару. По-третє, вплив експлуатації ЗОР на стабільність параметрів поверхні й кореляцію з трибопоказниками досліджено фрагментарно. Недостатньо також моделей, які пов’язують параметри поверхневого шару з реальними режимами мащення у вузлі «палець–втулка» та прогнозом задирів.

З огляду на це, доцільно зосередити подальші дослідження на наступних напрямах: побудова та валідація мультикритеріального індексу відповідності (наприклад, SII), який поєднує нормовані значення шорсткості, циліндричності,

овалоподібності, профілю мікротвердості, рівня залишкових напружень і трибологічних метрик; експериментально-чисельна ідентифікація «вікон процесу» вібраційного роздавання та фінішної обробки з різними ЗОР [14]; розроблення метрологічно трасованих SOP із MSA для ключових вимірювань; довготривалі спостереження за життєвим циклом ЗОР та їхнім впливом на відтворюваність параметрів поверхні; валідація на трибостендах і ресурсних випробуваннях вузлів «палець–втулка». Такі результати дозволять сформувати уніфіковані критерії приймання та підвищити прогнозовану довговічність відновлених деталей за умов промислового виробництва.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка та верифікування інтегрованої метрологічної трасованої методики оцінювання й керування параметрами поверхневого шару поршневих пальців ДВЗ, відновлених вібраційним роздаванням і механічною обробкою, з метою забезпечення взаємозамінності, підвищення трибопрацездатності та довговічності вузла. Для досягнення мети потрібно вирішити наступні завдання:

1. Побудувати метрологічно трасовану схему контролю параметрів поверхневого шару.
2. Розробити факторно-параметричну модель впливу режимів відновлення та фінішної обробки на показники поверхневої цілісності.
3. Запропонувати мультикритеріальний показник відповідності із вагуванням за функціональними пріоритетами.
4. Розробити правила приймання для поршневих пальців, відновлених вібраційним роздаванням і наступною механічною обробкою з урахуванням взаємозамінності.

Виклад основного матеріалу. У межах поставленого завдання створено й упроваджено інтегровану метрологічно трасовану схему контролю параметрів поверхневого шару поршневих пальців, відновлених вібраційним роздаванням і механічною обробкою за різних умов застосування ЗОР. Схема охоплює повний ланцюг простежуваності до одиниць SI, процедури перевірки придатності систем вимірювань (MSA), формування правила прийняття рішень із урахуванням невизначеності (табл. 1).

Ідентифіковано номенклатуру контрольованих величин, релевантних працездатності вузла «палець–втулка»: параметри шорсткості (Ra, Rz, а також площинні Sa, Sq і опорна крива), геометричні похибки форми (овалоподібність, циліндричність), фізико-механічні характеристики поверхневого шару (профіль мікротвердості HV0.05–HV0.2, рівень залишкових напружень). Для їхнього визначення застосовують контактну профілометрію в поєднанні з оптичною 3D-метрологією, координатні вимірювання для похибок форми, індентування за Віккерсом для профілю твердості та рентгенівську дифрактометрію (альтернативно – індентаційні методики) для оцінювання залишкових напружень. Усі вимірювання виконуються за стабілізованих умов (20±1 °C, регламент підготовки поверхні) із фіксацією, базування та параметрів фільтрації згідно з вимогами ISO 21920/4287/4288 (шорсткість), ISO 1101 (геометрія) та ISO 6507 (HV).

Для кожної підсистеми сформовано ланцюг простежуваності від робочого засобу вимірювань до національних і міжнародних еталонів. Сертифікати калібрувань містять методики та розширені невизначеності U(k≈2); встановлено періодичність калібрувань і міжкалібрувальний контроль на робочих еталонах. На основі цих даних розроблено стандартні операційні процедури (SOP): для шорсткості (не менше п’яти трас по колу пальця з довжиною оцінки, кратною λ_c, перевірка стану алмазного щупа на еталоні до та після серії); для форми (багатоперерізні вимірювання з уніфікованим базуванням); для мікротвердості (профілювання по глибині з регламентованим dwell time); для XRD (уточнення геометрії вимірювання (кут, площа плями), корекції текстури та повторюваність на референті).

Таблиця 1 – Метрологічна трасованість та придатність систем вимірювання для ключових параметрів поверхневого шару поршневих пальців

Параметри	Ra, Rz (профіль); Sa, Sq; tp (опорна крива)	Круглість, циліндричність, (хвилястість) W_t	Мікротвердість, HV0.1 (профіль по глибині)	Залишкові напруження, σ_{res}
Засіб вимірювання (норматив)	Профілометр контактний; оптичний 3D (ISO 21920 / ISO 4287, 4288	Кругломір, КВМ (ISO 1101)	Мікротвердомір Віккерса (ISO 6507)	Рентгенівська дифрактометрія (XRD) (EN 15305)
Еталон	Еталон шорсткості (SI)	Артефакт круглості (SI)	Еталонні бруски твердості (SI)	Референтний зразок (XRD)
Калібрування, інтервал	12 міс.; контроль еталоном щозміни	12 міс.; контроль еталоном щозміни	12 міс.; перевірка на еталоні перед серією	24 міс.; повтор на референті за графіком
Узагальнена оцінка U (k≈2)	0,02 мкм	0,15 мкм	±6 HV	±30 МПа
MSA	8,7%	11,4%	9,5%	14–18%
n_{dc}	9	7	10	-
Правило приймання	При допуску Ra ≤ 0,20 мкм: приймати, якщо Ra_meas + U ≤ 0,20 мкм (орієнтир: Ra ≤ 0,18 мкм)	При нормі круглості ≤ 3 мкм: приймати, якщо meas + U ≤ 3,0 мкм (орієнтир: ≤ 2,7 мкм)	Для вимоги HV ≥ HV_min: приймати, якщо HV_meas − U ≥ HV_min	Для вимоги σ_res ≥ σ_min: приймати, якщо σ_meas − U ≥ σ_min

Джерело: розроблено авторами

Придатність систем оцінено за процедурою MSA. Використано перехресний дизайн (десять деталей × три оператори × три повтори) для шорсткості, а також адаптовані схеми для HV і XRD. Отримані показники свідчать, що сумарна варіація вимірювань не перевищує прийнятних меж для прийнятих допусків; MSA частка від поля допуску перебуває в інтервалі, який відповідає статусу «придатно» чи «умовно придатно»; кількість розрізнюваних категорій (n_{dc}) є достатньою для статистично обґрунтованого порівняння варіантів процесу.

Узагальнений рівень розширеної невизначеності для Ra знаходиться на порядку сотих мікрометра в робочому діапазоні шорсткості; для овалоподібності – на порядку десятих мікрометра за типовими нормами IT6–IT7; для HV – у межах кількох одиниць шкали; для XRD-оцінок напружень – у межах десятків мегапаскалів. На основі цих оцінок сформульовано правила прийняття рішень з guard banding. Це дозволяє мінімізувати ризики помилок під час сортування продукції біля межі допуску.

Таким чином, побудована система дала змогу коректно відокремити реальні ефекти технологічних факторів (вібраційне роздавання; механічна обробка; використання спеціальної ЗОР) від варіації, зумовленої вимірюваннями, і слугувала надійною основою для подальшої оптимізації «вікон процесу», побудови інтегрального індексу відповідності та встановлення правил приймання з урахуванням вимог взаємозамінності й ресурсної довговічності.

З метою кількісного опису впливу режимів вібраційного роздавання (P_0) та механічної фінішної обробки (P_1 – без використання ЗОР, P_2 – стандартна ЗОР, P_3 – спеціальна ЗОР із бактерицидною добавкою) на показники surface integrity побудовано факторно-параметричні моделі для ключових характеристик: шорсткості (Ra, Rz, Sa, Sq, опорна крива tp), геометричних (овалоподібність, циліндричність, хвилястість W_t), фізико-механічних (градієнт мікротвердості HV, залишкові напруження σ_{res}) і трибологічних (коефіцієнт тертя μ, інтенсивність зношування). Усі вимірювання здійснювалися в метрологічно трасованій системі з валідацією MSA, що забезпечило відтворюваність і статистичну коректність оцінок.

Для P_0 як керувальні фактори прийнято амплітуду вібрації A, частоту f, різницю діаметра роздавального інструмента Δd та число проходів N. Для P_1–P_3 – швидкість різання v_c, подачу на оберт f_z, глибину різання a_p; для режимів із ЗОР додатково – концентрацію C і температуру T, для P – наявність бактерицидної добавки B. Скринінг виконано за комбінованими повнофакторними експериментами, після чого ідентифіковано квадратичні моделі вигляду:

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ii} x_i^2 + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon , \quad (1)$$

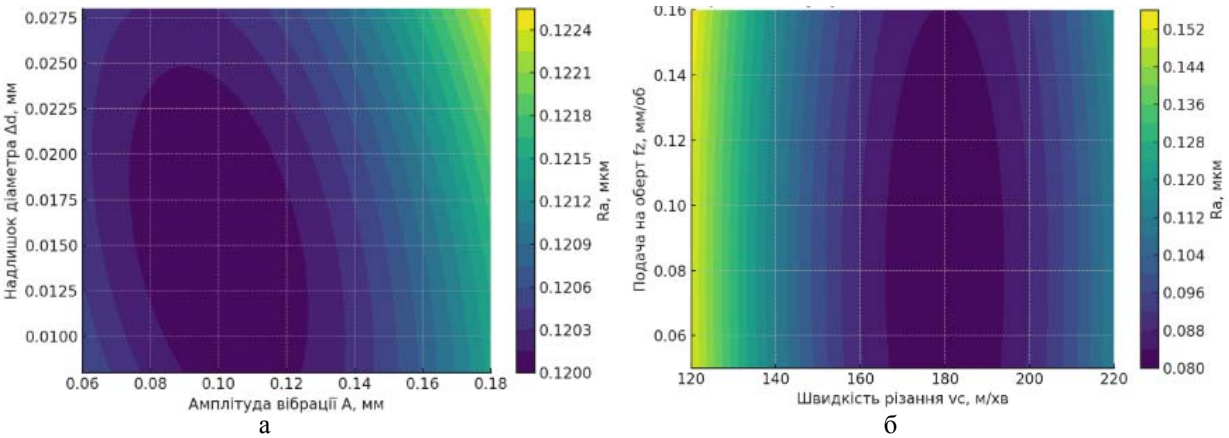
де y – цільовий показник (Ra, tp, HV, σ_{res}, μ, індекс SII);
x_i – нормовані фактори.

Моделі для Ra та tp показали домінування головних ефектів A і Δd із вираженою квадратичною складовою A^2 (наявність оптимуму): зростання A у нижній частині діапазону зменшує Ra та вирівнює tp, однак надмірні значення призводять до зростання хвилястості Wt і погіршення овалоподібності. Підвищення f до середніх значень покращує Ra (ефект «швидкого згладжування»). Для σ_{res} і профілю HV виявлено позитивний вплив A та N (формування корисних напружень і зміцненого шару), тоді як надлишковий Δd погіршує геометричні параметри поверхневого шару, хоча й дещо підвищує рівень σ_{res}.

Для Ra і tp при механічній обробці значущими є v_c (негативний лінійний ефект із помірною кривиною v_c^2) та f_z (позитивний ефект – збільшення подачі погіршує шорсткість); a_p вносить менший, але статистично значущий внесок у tp і Wt. Взаємодія $v_c \times f_z$ підтверджує існування компромісного плато для мінімізації Ra без погіршення овалоподібності. Наявність бактерицидної добавки B (P_3) не лише знижує середні значення μ та інтенсивності зношування, а й помітно зменшує варіативність Ra, що відображено у зростанні індексу SII; значущою виявлена взаємодія B×T (стабілізація властивостей рідини у ширшому температурному інтервалі).

На основі нормованих параметрів для Ra, овалоподібності, σ_{res}, градієнта HV та трибопоказників сформовано індекс SII. Моделі SII підтвердили, наступне: P_0 досягає найвищих значень SII за умов збалансованих A, f, Δd (ефект компресійних σ_{res} + керована топографія при прийнятній геометрії); P_3 може зрівнятися з P_0, якщо v_c підвищено в поєднанні з малою f_z, помірною a_p та оптимальними C і T (перевага – краща стабільність Ra і нижчий знос); P_1 демонструє найнижчі SII через підвищені ризики локальних піків Rz і тангенціальних σ_{res} у зоні різання.

Картограми SII й поверхні відгуку (рис. 1) використані для знаходження діапазонів факторів, у межах яких одночасно виконуються вимоги до шорсткості, геометрії та напружено-деформованого стану з урахуванням взаємозамінності. Для кожного «вікна» визначено чутливість факторів і рекомендовано пріоритетні напрямки регулювання (наприклад, для P_0 – корекція A при відхиленні овалоподібності; для P_3 – корекція C і T).



а б

а – залежність режимів вібраційного роздавання при частоті 140 Гц і кількості проходів N = 3;
б – залежність режимів механічної обробки із ЗОР

Рисунок 1 – Поверхні відгуку з мінімізацією шорсткості за різних режимів обробки
Джерело: розроблено авторами

Дослідження адекватності засвідчило статистичну значущість моделей для всіх цільових показників; квадратичні та перехресні показники істотно поліпшують опис за критеріями, а діагностика залишків не виявила систематичних відхилень. Підтверджувальні експерименти в центрі та на «ребрах» факторного простору показали збіжність прогнозів із емпіричними значеннями в межах розширеної невизначеності вимірювань, що підтверджує придатність моделей для прогнозування та налаштування процесу.

Таким чином, побудовані факторно-параметричні моделі не лише пояснюють механізми впливу режимів P_0–P_3 на складові surface integrity, а й слугують практичним інструментом для оптимізації «вікон процесу» та прийняття технологічних рішень із гарантуванням взаємозамінності, трибопрацездатності та довговічності вузла «палець–втулка».

В статті запропонований мультикритеріальний показник відповідності SII (Surface Integrity Index), мета якого дати єдину кількісну оцінку придатності поверхневого шару з урахуванням різних, іноді суперечливих, критеріїв (шорсткість, овалоподібність, залишкові напруження, зміцнення, трибологія) та функціональних пріоритетів вузла «палець–втулка».

Індекс базується на функціях і зваженому геометричному середньому

$$SII = \prod_{k=1}^{m} \left[d_k \left(y_k^{eff} \right) \right]^{\omega_k}, \sum_{k=1}^{m} \omega_k = 1, \tag{2}$$

де y_k – виміряні показники (наприклад, Ra, Wt, σ_{res}, HV, μ);
$d_k(\cdot)$ – безрозмірні бажаності;
ω_k – пріоритетність (задаємо експертно або регресійно, щоб SII мав найбільшу кореляцію з ресурсними випробуваннями).

Дослідження виявили рекомендовані пороги для консервативної оцінки (SII_{LB}): придатно $SII_{LB} \geq 0{,}80$; умовно придатно $0{,}65 \leq SII_{LB} < 0{,}80$; непридатно $SII_{LB} < 0{,}65$.

Такий SII є прозорим, метрологічно коректним і придатним для налаштування. Він дає не лише фінальний бал, а й карту пріоритетів, що саме покращувати, аби гарантовано досягти взаємозамінності, трибопрацездатності й довговічності вузла.

Висновки:

1. Створено й впроваджено трасовану систему контролю з повним ланцюгом та правилами прийняття рішень із guard banding, при цьому забезпечено відтворюваність і захищеність контролю.

2. MSA підтвердила придатність вимірювань, при цьому частка для ключових параметрів (Ra, овалоподібність, HV, σ_{res}) у межах приблизно 9–18% від поля допуску, $n_{dc} \geq 7–10$, що є достатньо для коректного порівняння процесів.

3. Запропоновано мультикритеріальний показник індекс SII з порогами $SII_{LB} \geq 0{,}80$ – придатно; $0{,}65 \leq SII_{LB} < 0{,}80$ – умовно; $SII_{LB} < 0{,}65$ – непридатно. При цьому у поєднанні з gate-критеріями (посадки, геометрія) індекс забезпечує узгоджене приймання та гарантує взаємозамінність, трибопрацездатність і довговічність вузла «палець–втулка».

Список літератури

1. Dudnikov A., Ivankova O., Gorbenko O., Kelemesh A. Effect of Vibration Treatment on Increasing the Durability of Tillage Equipment Working Bodies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 2. P. 104–108. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.228606 .
2. Лапенко Г. О., Горбенко О. В., Лапенко Т. Г., Ковтун В. А. Оптимізація параметрів шліфування алмазними кругами, виготовленими з алмазних порошків із нікелевим покриттям. *Вісник ПДАА*. 2020. № 4. С. 267–272. DOI: https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.34
3. Qiao Xiang, Yong He, Ting‑hong Hou. An Exploration of Surface Integrity Remanufacturing for Aeroengine Components. *Frontiers of Engineering Management*. 2016. Vol. 3, No. 2. P. 107‑114. DOI: 10.15302/J‑FEM‑2016025.
4. Ge C., Meng W., Feng H., Cui M., Dong L., Miao T., Huo Y., Wu J., Han J. Microstructure and Mechanical Properties of Gradient Nanostructured Q345 Steel Prepared by Ultrasonic Severe Surface Rolling. *Scanning*. 2023. Vol. 2023: 7705844. DOI: 10.1155/2023/7705844.
5. Mohapatra S., Oh M.-S. Evaluating the Tribological Properties and Residual Stress of TiCrN Thin Films Deposited by Cathodic‑Arc Physical Vapor Deposition Technique. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, No. 5. Article 2466. DOI: 10.3390/app15052466.
6. Liu G., Huang C., Zhao B., Wang W., Sun S. Effect of Machined Surface Integrity on Fatigue Performance of Metal Workpiece: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 34: Article 118. DOI: 10.1186/s10033‑021‑00631‑X.
7. Xu, N.; Jiang, X.; Shen, X.; Peng, H. Improving the Surface Integrity and Tribological Behavior of a High-Temperature Friction Surface via the Synergy of Laser Cladding and Ultrasonic Burnishing. *Lubricants.* 2023, Vol. 11, 379. https://doi.org/10.3390/lubricants11090379
8. Summer F., Bergmann P., Grün F. On the Wear Behaviour of Bush Drive Chains: Part II – Performance Screening of Pin Materials and Lubricant Effects. *Lubricants*. 2023. Vol. 11, No. 4. Article 157. DOI: 10.3390/lubricants11040157.
9. Pawlus P., Reizer R., Wieczorowski M., et al. Functional Importance of Surface Texture Parameters. *Materials*. 2021. Vol. 14, Article 3536. DOI: 10.3390/ma14185326.
10. Sedlaček M., Gregorčič P., Podgornik B. Use of the roughness parameters Ssk and Sku to control friction – a method for designing surface texturing. *Tribology Transactions*. 2016. Vol. 60, No. 2. P. (Article) DOI: 10.1080/10402004.2016.1159358
11. Jawahir I. S., Brinksmeier E., M'Saoubi R., Aspinwall D. K., Outeiro J. C., Meyer D., Umbrello D., Jayal A. D. Surface integrity in material removal processes: recent advances. *CIRP Annals*. *Manufacturing Technology*. 2011. Vol. 60, No. 2. P. 603–626. DOI:10.1016/j.cirp.2011.05.002.
12. M'Saoubi R., Outeiro J. C., Chandrasekaran H., Dillon O. W. Jr., Jawahir I. S. A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing*. 2008. Vol. 1, Nos. 1–2. P. 203–236. DOI:10.1504/IJSM.2008.019234.
13. Kowalski S., Cieślikowski B., Barta D., Dižo J., Dittrich A. Analysis of the Operational Wear of the Combustion Engine Piston Pin. *Lubricants*. 2023. Vol. 11, No. 3. Article 100. DOI:10.3390/lubricants11030100.

14. Композиція змащувально-охолоджуючої рідини для обробки металів : пат. 36000 Україна : МПК (2006) C10M 173/02. № u200806102; заявл. 12.05.2008. опубл. 10.10.2008, Бюл. №19. 6 с.

References

1. Dudnikov, A., Ivankova, O., Gorbenko, O., & Kelemesh, A. (2021). Effect of vibration treatment on increasing the durability of tillage equipment working bodies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 104–108. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.228606
2. Lapenko, H. O., Horbenko, O. V., Lapenko, T. H., & Kovtun, V. A. (2020). Optymizatsiia parametriv shlifuvannia almaznymy kruhamy, vyhotovlenymy z almaznykh poroshkiv iz nikelevym pokryttiam [Optimization of grinding parameters using diamond wheels made from nickel-coated diamond powders]. *Visnyk Poltavskoi Derzhavnoi Ahrarnoi Akademii*, (4), 267–272. https://doi.org/10.31210/visnyk2020.04.34
3. Xiang, Q., He, Y., & Hou, T.-H. (2016). An exploration of surface integrity remanufacturing for aeroengine components. *Frontiers of Engineering Management*, 3(2), 107–114. https://doi.org/10.15302/J-FEM-2016025
4. Ge, C., Meng, W., Feng, H., Cui, M., Dong, L., Miao, T., Huo, Y., Wu, J., & Han, J. (2023). Microstructure and mechanical properties of gradient nanostructured Q345 steel prepared by ultrasonic severe surface rolling. *Scanning*, 2023, Article 7705844. https://doi.org/10.1155/2023/7705844
5. Mohapatra, S., & Oh, M.-S. (2025). Evaluating the tribological properties and residual stress of TiCrN thin films deposited by cathodic-arc physical vapor deposition technique. *Applied Sciences*, 15(5), Article 2466. https://doi.org/10.3390/app15052466
6. Liu, G., Huang, C., Zhao, B., Wang, W., & Sun, S. (2021). Effect of machined surface integrity on fatigue performance of metal workpiece: A review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34, Article 118. https://doi.org/10.1186/s10033-021-00631-x
7. Xu, N., Jiang, X., Shen, X., & Peng, H. (2023). Improving the surface integrity and tribological behavior of a high-temperature friction surface via the synergy of laser cladding and ultrasonic burnishing. *Lubricants*, 11, 379. https://doi.org/10.3390/lubricants11090379
8. Summer, F., Bergmann, P., & Grün, F. (2023). On the wear behaviour of bush drive chains: Part II – Performance screening of pin materials and lubricant effects. *Lubricants*, 11(4), 157. https://doi.org/10.3390/lubricants11040157
9. Pawlus, P., Reizer, R., Wieczorowski, M., et al. (2021). Functional importance of surface texture parameters. *Materials*, 14, 3536. https://doi.org/10.3390/ma14185326
10. Sedlaček, M., Gregorčič, P., & Podgornik, B. (2016). Use of the roughness parameters Ssk and Sku to control friction: A method for designing surface texturing. *Tribology Transactions*, 60(2). https://doi.org/10.1080/10402004.2016.1159358
11. Jawahir, I. S., Brinksmeier, E., M'Saoubi, R., Aspinwall, D. K., Outeiro, J. C., Meyer, D., Umbrello, D., & Jayal, A. D. (2011). Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 60(2), 603–626. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.002
12. M'Saoubi, R., Outeiro, J. C., Chandrasekaran, H., Dillon, O. W., Jr., & Jawahir, I. S. (2008). A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 1(1–2), 203–236. https://doi.org/10.1504/IJSM.2008.019234
13. Kowalski, S., Cieślikowski, B., Barta, D., Dižo, J., & Dittrich, A. (2023). Analysis of the operational wear of the combustion engine piston pin. *Lubricants*, 11(3), 100. https://doi.org/10.3390/lubricants11030100
14. *Kompozytsiia zmashchuvalno-okholodzhuiuchoi ridyny dlia obrobky metaliv*. (2008). Patent Ukrainy No. 36000, MPK (2006) C10M 173/02; zaiavka No. u200806102; zaiavl. 12.05.2008; opubl. 10.10.2008, Biul. No. 19). Ukrainskyi instytut intelektualnoi vlasnosti (Ukrpatent). 6 s.

Oleksandr Gorbenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Hryhorii Lapenko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Taras Lapenko,** Assoc. Prof., PhD tech. sci.
Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Metrological and Technological Assurance of Surface-Layer Parameter Conformity in the Restoration of Machine Parts

The article addresses ensuring the conformity of surface-layer parameters of internal combustion engine (ICE) piston pins restored to nominal size by vibratory expanding followed by mechanical finishing. The aim is

to develop a metrologically traceable methodology for assessing and controlling surface integrity with due regard to the interchangeability and tribological performance of the pin–bushing pair.

An integrated approach is proposed: the set of indicators is identified (surface roughness, out-of-roundness, microhardness, compressive residual stresses, friction coefficient, and wear rate), and a complete traceability chain to SI standards is established. Four technological routes are compared: P0 – vibratory expanding; P1 – finishing machining; P2 – machining with a standard cutting fluid (coolant–lubricant); P3 – machining with a special cutting fluid containing a biocidal additive. Using DOE plans, factor–parameter models are built and corresponding process windows are determined.

A multicriteria Surface Integrity Index (SII) is proposed, based on desirability functions and a weighted geometric mean, with explicit allowance for measurement uncertainty; recommended decision thresholds are provided. The results confirm the metrological soundness of comparing the routes, support the justified establishment of acceptance criteria, and enable tuning of restoration processes to ensure interchangeability, reduce wear, and increase the predicted service life of the assembly.

Restoration, surface roughness, wear, surface integrity, residual stresses, microhardness

Одержано (Received) 24.09.2025 *Прорецензовано (Reviewed) 10.11.2025*
Прийнято до друку (Approved) 23.12.2025

УДК 519.6:631.5 DOI: https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.148-162

О.Д. Онопрієнко, доц., д-р філософії, **Е.Б. Алієв,** ст. досл., проф., д-р техн. наук,
В.Б. Говоруха, проф., д-р фіз.-мат. наук
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна
e-mail: aliev@meta.ua

Фізико-математична модель щільної випадкової упаковки насіння олійних культур

У роботі запропоновано чисельну DEM-модель щільного випадкового укладання насіння гірчиці в циліндричному об'ємі. Досліджено процес осідання сферичних частинок під дією сили тяжіння з урахуванням міжчастинкових взаємодій: контактних сил, тертя, прокочування та відскоку. Для опису контактів застосовано нелінійну модель Герца–Міндліна, що забезпечує адекватне відтворення реальних процесів засипання та ущільнення сипких матеріалів.

сипкі матеріали, насіння, олійні культури, гірчиця, випадкова упаковка, фізико-механічні властивості, моделювання, метод дискретних елементів, стиск, пружність, модель Герца-Міндліна

Постановка проблеми. У сільському господарстві важливо розуміти, як насіння дрібнонасіннєвих олійних культур укладається всередині бункерів і ємностей. Від цього залежать точність дозування та рівномірність висіву, втрати під час транспортування, умови зберігання й навантаження на обладнання. Значення має те, наскільки щільно насіння лягає (скільки порожнин у насипі), скільки контактів між насінинами та чи виникають «арки», що можуть зупиняти потік. У циліндричних ємностях додатковий вплив чинять стінки: біля них шар ущільнюється, а щільність може змінюватися по висоті. Тому потрібні прості й надійні моделі, які показують, як поводиться насип під час засипання, вібрації та пресування.

У цій роботі апробовано дискретно-елементну (DEM) модель щільного випадкового укладання «сферизованих» насінини дрібнонасіннєвих культур (на прикладі

© О.Д. Онопрієнко, Е.Б. Алієв, В.Б. Говоруха, 2025