

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопис

БОРАК КОСТЯНТИН ВІКТОРОВИЧ

УДК 631.31

**КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА
ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН**

05.05.11 – машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва

Подається на здобуття наукового ступеня доктора наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

К.В. Борак

Науковий консультант:
Дворук Володимир Іванович,
доктор технічних наук, професор

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Борак К.В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва. – Поліський національний університет.

Дисертація присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин на основі комплексного підходу із застосуванням технологічних і конструктивних методів підвищення зносостійкості й довговічності з урахуванням умов експлуатації та впровадження науково обґрунтованої системи їх експлуатації.

Аналіз стану науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дозволив виділити невирішені питання та сформулювати наукову гіпотезу. На сьогодні розв’язання проблеми довговічності та зносостійкості здебільшого досягається завдяки використанню відомих технологічних методів для певних ґрунтово-кліматичних умов. Такий підхід не забезпечує підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин у разі зміни умов і режимів експлуатації. Вирішення цієї проблеми має базуватися на застосуванні комплексного підходу з використанням усього спектру відомих методів підвищення довговічності та зносостійкості, зважаючи на умови і режими експлуатації ґрунтообробних машин.

Для розв’язання науково-прикладної проблеми вибрані та розроблені методи й методики теоретичних та експериментальних досліджень процесів і явищ, які відбуваються в зоні фрикційного контакту під час взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин з ґрунтом, на поверхні робочих органів у

міжексплуатаційний період і в середовищі ґрунту та їхній вплив на довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

Унаслідок проведених теоретичних досліджень на основі синтезу знань з різних наук розроблено фізико-математичну модель системи «робочий орган – ґрунт», яка дозволила визначити вплив параметрів елементів системи на процеси та явища, які відбуваються в системі, та визначити можливі шляхи вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. На основі молекулярно-механічної теорії тертя, зважаючи на фрикційні особливості середовища ґрунту й усіх видів тертя, які відбуваються на поверхні робочого органу (тертя ковзання, тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням), розроблена математична модель для визначення коефіцієнта тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин. Установлено, що коефіцієнт тертя між поверхнею робочого органу й ґрунтом є випадковою функцією і його значення є миттєвою величиною. Величина коефіцієнта тертя ґрунту по поверхні робочих органів ґрунтообробних машин залежить лише від стану у якому знаходиться ця система, а не від того, як ця система прийшла в цей стан, саме тому даний процес описано марківським випадковим процесом. Для визначення ймовірних значень коефіцієнта тертя між поверхнею робочого органу і середовищем ґрунту побудовано систему рівнянь Колгомова.

Ґрунт, як складна система, здатний до самоорганізації, що в свою чергу призводить до зміни його абразивних властивостей. Шляхом теоретичних і лабораторних досліджень з'ясовано, що в процесі самоорганізації середовища ґрунту переважно відбувається зростання його зношувальної здатності. Наявність зовнішніх чинників (опадів та дії рушіїв сільськогосподарських машин) призводить до зміни інтенсивності процесу самоорганізації. Урахування процесів самоорганізації середовища ґрунту в період експлуатації ґрунтообробних машин дозволить суттєво підвищити їхню довговічність і зносостійкість.

Зважаючи на ґрунтово-кліматичні умови та режими експлуатації на основі теоретичних досліджень й аналізу особливостей зношування робочих органів ґрунтообробних машин отримано умови та критерії досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів і рівностійкості зношування для різних типів робочих органів ґрунтообробних машин (стрілчастої лапи, вирізних сферичних дискових робочих органів та лемешів).

Для впровадження комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин необхідно знати закономірності впливу всіх значущих факторів на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

Унаслідок теоретичних та експериментальних досліджень визначено вплив ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті на механізм, характер та інтенсивність абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Установлено, що із збільшенням ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті істотно зростає ймовірність виникнення негативних явищ, які інтенсифікують процес абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Наявність біологічної фази (кореневої системи) та збільшення значення вологості (до критичного рівня) призводить до зростання ступеня закріплення абразивних частинок в ґрунті.

Встановлено закономірності впливу наявності рослинних решток у середовищі ґрунту на зміну інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Наявність сухих рослинних решток у межах від 3% до 6% призводить до зменшення інтенсивності зношування на 4...5%, наявність вологих рослинних решток спричиняє зростання на 5...9%, а наявність рослинних решток до збирання (фаза колосіння для пшениці або молочно-воскової стиглості для кукурудзи) призводить до зростання на 15,4...18,6%. В експлуатаційних умовах наявність рослинних решток підвищує інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин (у межах 8%).

Для найпоширеніших ґрунтів України визначено: коефіцієнт форми абразивних частинок; закономірність зміни величини коефіцієнта форми від

глибини залягання абразивних частинок у ґрунті; закономірність зміни величини коефіцієнта форми від частоти взаємодії з поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин; вплив коефіцієнта форми абразивних частинок на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунту залежить від типу ґрунту, глибини залягання та розміру абразивних частинок. Залежність зміни коефіцієнта форми абразивних частинок у ґрунті від глибини залягання пов'язана з різною кількістю циклів руйнування абразивних частинок в результаті взаємодії з робочими органами ґрунтообробних машин, що підтверджено відсутністю залежності зміни коефіцієнта форми від глибини залягання в орному шарі та лабораторними дослідженнями. Для абразивних частинок розміром до 0,10 мм коефіцієнт форми абразивних частинок знаходиться в межах 227,89...488,35, для абразивних частинок розміром 0,1...0,25 мм – 183,27...386,24, для абразивних частинок розміром 0,25...0,5 мм – 109,86...222,57, для абразивних частинок розміром 0,5...0,75 мм – 91,53...227,46, для абразивних частинок розміром 0,75...1 мм – 78,90...214,56. Зростання коефіцієнта форми призводить до інтенсифікації процесу абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

Шляхом експериментальних досліджень встановлено вплив матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, його термічної обробки та напрямку нерівностей на статичний і динамічний коефіцієнти тертя в зоні фрикційного контакту між ґрунтом та робочими органами ґрунтообробних машин, а також вплив величини динамічного коефіцієнта на інтенсивність абразивного зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин. Зростання динамічного коефіцієнта тертя між поверхнею робочого органу та ґрунтом призводить до пропорційного зростання інтенсивності зношування. Для зменшення статичного й динамічного коефіцієнтів тертя необхідно зменшити сили міжмолекулярної взаємодії між складовими частинами ґрунту та поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин завдяки пацифікації

поверхневого шару (складна обробка сталі) або зменшити площу фактичного контакту (збільшення шорсткості поверхні).

На основі лабораторних досліджень доведено, що процес тертя між поверхнею робочого органу й ґрунтом не може бути описаний законом Амонтона-Кулона, цей процес доцільно описувати з позиції молекулярно-механічної теорії тертя, оскільки молекулярна складова процесу тертя в цій системні відіграє суттєву роль.

Визначено фізико-механічні, хімічні, триботехнічні та експлуатаційні властивості найбільш поширених матеріалів дискових робочих органів ґрунтообробних машин (сталь 28MnB5 і сталь 65Г). З'ясовано, що якісна борвмісна сталь 28MnB5 має кращі фізико-механічні та хімічні властивості порівняно зі сталю 65Г. Незважаючи на кращі фізико-механічні та хімічні властивості сталі 28MnB5, робочі органи виготовлені зі сталі 65Г мають вищу довговічність та зносостійкість у процесі експлуатації на супіщаних і піщаних ґрунтах, що пояснюється здатністю до «самонаклепу».

Експериментальні дослідження зміни властивостей поверхневих шарів, утворення вторинних структур у зоні фрикційного контакту та інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин дозволили встановити раціональні матеріали для виготовлення серійних лемішно-лапових і дискових робочих органів ґрунтообробних машин з підвищеною довговічністю. Для дискових ґрунтообробних машин, які працюють в умовах піщаних та супіщаних ґрунтів, робочі органи слід виготовляти зі сталі 65Г (вона здатна до самонаклепу в процесі агресивного абразивного та ударно-абразивного зношування, до підвищення початкової твердості на 15%), а для умов глинистих і суглинкових ґрунтів – з борвмісної якісної сталі 28MnB5. Серійні лемішно-лапові робочі органи для всіх типів ґрунтів необхідно виготовляти з високоякісних зносостійких сталей, оскільки в умовах абразивного зношування вони проявляють здатність до підвищення твердості вторинних структур на поверхні тертя і мають вищу зносостійкість.

З'ясовано, що нанесення зносостійкого покриття на робочі органи ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 65Г, дозволяє суттєво підвищити їхню довговічність: для зміцнених дискових робочих органів під час експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,28...1,41 рази, на суглинках – в 1,11...1,24 рази та на глинистих ґрунтах – в 1,07...1,18 рази; для зміцнених стрілочастих лап під час експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,41...1,53 рази, на суглинках – в 1,48 рази та на глинистих ґрунтах – в 1,39...1,44 рази; для зміцнених лемешів під час експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,82...2,13 рази, на суглинках – в 1,5...1,85 рази та на глинистих ґрунтах – в 1,34...1,52 рази.

Нанесення зносостійкого покриття на поверхню робочих органів ґрунтообробних машин більш ефективно на ґрунтах, які мають вищу зношувальну здатність (супіщані та піщані). На цих ґрунтах такі робочі органи мають вищу довговічність порівняно з робочими органами, які виготовлені з якісних зносостійких сталей.

Установлено, що для ґрунтообробних машин неробочий період (машини знаходяться на зберіганні) протягом року становить приблизно 90%. Аграрні підприємства, які експлуатують сільськогосподарську техніку, здебільшого зберігають ґрунтообробні машини на відкритих майданчиках (71%), що сприяє інтенсифікації корозійних процесів, які найбільш інтенсивно протікають на поверхнях робочих органів ґрунтообробних машин, що піддавалися активному абразивному зношуванню через наявність дефектів кристалічної будови на поверхні тертя. Наявність слідів корозії на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин призводить до зменшення їх зносостійкості після відновлення експлуатації, а отже, і до зменшення довговічності. На основі проведених досліджень визначено оптимальні способи зберігання ґрунтообробних машин у міжексплуатаційний період у різних ґрунтово-кліматичних зонах України, які дозволять суттєво сповільнити корозійні

процеси на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин, що зі свого боку забезпечить істотне підвищення їхньої зносостійкості та довговічності.

Зміна вологості ґрунту та швидкості руху ґрунтообробного агрегату призводить не тільки до зміни інтенсивності зношування, а також до зміни характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин. У разі зростання вологості ґрунту його зношувальна здатність зростає до певної межі, яка характерна кожному типові ґрунту, після чого в зоні фрикційного контакту з'являється мастильний матеріал (вільна вода) і зношувальна здатність ґрунту починає зменшуватися. На пухких ґрунтах зміна вологості ґрунту не призводить до зміни характеру зношування. Більш суттєве зростання інтенсивності зношування в разі зростання швидкості руху ґрунтообробного агрегату спостерігається на ґрунтах, які мають більшу зношувальну здатність. Слід зауважити, що для робочих органів, виготовлених із високоякісних сталей (Hardox 500 та 28MnB5), спостерігається менший ріст інтенсивності зношування при збільшенні швидкості руху ґрунтообробного агрегату, порівняно з робочими органами, виготовленими зі сталі 65Г.

Визначені закономірності впливу ґрунтово-кліматичних умов, режимів експлуатації та способів зберігання на довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин дозволили розробити науково обґрунтовану систему експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин.

Сформульовано основні принципи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин на основі комплексного підходу адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації, які дозволяють підвищити довговічність робочих органів ґрунтообробних машин в 1,84...2,51 раза залежно від типу робочих органів та ґрунтово-кліматичних умов.

Економічна оцінка підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості, зважаючи на ґрунтово-кліматичні умови та режими експлуатації, показала

економію затрат у межах 6...18% від вартості нової машини, протягом експлуатації одного комплексу робочих органів.

Ключові слова: ґрунт, ґрунтообробна машина, довговічність, зносостійкість, надійність, комплексний підхід, леміш, стрілчаста лапа, дисковий робочий орган.

ABSTRACT

Borak K. V. Integrated approach to service durability and wear resistance enhancement of the working tools of tillage machines. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.05.11 «Machines and Means of Agricultural Production Mechanization» – Polissia National University.

Model of solving the applied research problem of improving durability and wear resistance of the tilling machine movable operating parts is given herein based upon an integrated approach assuming application of the technological and constructive methods to improve durability and wear resistance in consideration of the operating conditions and implementation of the scientifically substantiated system of operation thereof.

Due to the analysis of the status of the applied research problem of improving durability and wear resistance of the tilling machine movable operating parts, it is now possible to identify the unresolved issues and propose the scientific hypothesis. Today, one can solve the problem of durability and wear resistance basically through the use of known technological methods for certain soil and climatic conditions. This approach does not provide for improvement of the durability and wear resistance of the tilling machine movable operating parts, should the operating conditions or operational mode be changed. The solution to this problem should be based upon the application of an integrated approach using the entire range of known methods to

improve durability and wear resistance, taking into account the conditions and modes of the tilling machine operation.

The appropriate methods and techniques for theoretical and experimental studies of the processes and phenomena occurring in the zone of the frictional contact during interaction of the tilling machine movable operating parts with the soil, on the surface thereof during idle time and in the soil medium, as well as effects they have on durability and wear resistance of the tilling machine movable operating parts, were selected and worked out to solve the applied research problem.

As a result of theoretical studies based upon the synthesis of knowledge from various sciences a physical and mathematical model of the *Movable operating part vs. Soil* system was developed, which allowed us to determine the effects that system element parameters have on processes and phenomena occurring in the system, as well as identify possible solutions to the applied research problems, which would provide for improving durability and wear resistance of the tilling machine movable operating parts. A mathematical model was developed based upon the molecular-mechanical theory of friction in view of the frictional features of the soil medium and all types of friction that might occur on the surface of the movable operating part (sliding (kinetic), rolling, as well as combined rolling and sliding one) to determine the coefficient of friction between the soil and the tilling machine movable operating part surface. It has been found that the coefficient of friction between the surface of the movable operating part and the soil is a random function, which makes up an instantaneous value. The value of the coefficient of soil friction on the surface of the tilling machine movable operating parts depends only on the actual condition of the system, but not on how this system came thereto. Therefore, this process is explained in the framework of the Markov random process.

A system of Kolgomorov equations was set up to determine the probable values of the coefficient of friction between the surface of the movable operating part and the soil medium.

Soil, as a complex system, is capable of self-organization, thus leading to changes in abrasive properties thereof. Through theoretical and laboratory studies, it

has been found that there is an improvement of the wear capacity that mainly takes place during the soil medium self-organization. The availability of external factors (precipitations and the agricultural machine driving gear impact) leads to a change in the intensity of the self-organization process. Considering the processes of the soil medium self-organization during the operation of the tilling machines will significantly improve their durability and wear resistance.

Proper conditions and criteria were determined to achieve the self-sharpening effect by the cutting tools and equistability of wear for various types of the movable operating parts (duckfoot tooth, plow-and-tine spherical and disk-type movable parts, share plows, etc.) of the tilling machines in consideration of the soil and climatic conditions, as well as operational modes based upon theoretical studies and analysis of the specific wear of the tilling machine movable operating parts.

Implementation of an integral approach to improving durability and wear resistance of the tilling machine movable operating parts shall require the knowledge of the patterns of effects that all significant factors might have on the rate of wear of the tilling machine movable operating parts.

As a result of theoretical and experimental studies, the influence of the degree of the abrasive particle consolidation in the soil on the wear mechanism was determined together with the nature and rate of abrasive wear of the tilling machine movable operating parts. It has been found that the probability of negative phenomena intensifying the process of abrasive wear of the tilling machine increases significantly with the increase of the degree of the abrasive particle consolidation in the soil. The presence of a biological phase (root system) and an increase in moisture content (to a threshold level) leads to an increase in the degree of the abrasive particle consolidation in the soil.

The influence patterns were determined with regard to the effects that plant remains available in the soil medium may have on the change of the rate of wear of the tilling machine movable operating parts. The presence of dry plant remains in the range from 3% to 6% (w/w) reduces the rate of wear by 4...5%, wet plant remains present in the soil will cause an increase by 5...9%, while the presence of plant

remains before harvest (earring phase for wheat or milk-wax ripeness for corn) will lead to an increase in wear rate by 15.4...18.6%. Plant remains present in the soil in the field conditions will increase the rate of wear of the tilling machine movable operating parts (about up to 8%).

The following has been determined for the most common soils in Ukraine: abrasive particle shape factor; regularity of the shape factor variation depending upon the depth of the abrasive particle occurrence in the soil; regularity of the shape factor variation depending upon the frequency of contact with the surface of the tilling machine movable operating parts; and the influence of the abrasive particle shape factor on the rate of wear of the tilling machine movable operating parts. The abrasive soil particle shape factor is dependable upon the soil type, occurrence depth, and size of abrasive particles. The dependence of the soil abrasive particle shape factor variation on the occurrence depth is conditioned by the different number of cycles of the abrasive particle destruction as a result of contact with the tilling machine movable operating parts, which is confirmed by no dependence between the shape factor variation and the occurrence depth within the same layer, as well as by results of the laboratory studies. The reference range of shape factor values is 227.89...488.35 - for abrasive particles with size up to 0.10 mm; 183.27...386.24 - for abrasive particles with a size of 0.1...0.25 mm; 109.86...222.57 – for abrasive particles with a size of 0.25...0.5 mm; 91.53...227.46 - for abrasive particles with a size of 0.5...0.75 mm; and 78.90...214.56 – for abrasive particles with a size of 0.75...1 mm. The process of abrasive wear of the tilling machine movable operating parts is intensified, should the shape factor be increased.

It has been found through experimental research that the coefficient of both static and dynamic friction in the zone of frictional contact between the soil and the tilling machine movable operating parts is dependable upon the material, which the tilling machine movable operating parts are made from, its heat treatment and the direction of irregularities; the rate of abrasive wear of the surface of the tilling machine movable operating parts is dependable upon the value of dynamic friction coefficient. The increase in the coefficient of dynamic friction between the surface of

the movable operating parts and the soil leads to a proportional increase in the rate of wear. In order to reduce the static and dynamic friction coefficients, it shall be necessary to reduce the forces of intermolecular interaction between soil components and the surface of the tilling machine movable operating parts through passivation of the surface layer (complex steel treatment) or reduce the actual contact area (increasing surface roughness).

As it follows from and proved based upon laboratory studies, the process of friction between the surface of the movable operating part and the soil cannot be explained by Amontons-Coulomb's law. Therefore, due to the significant role of the molecular component of the friction process in this system, it should be explained from the standpoint of the molecular mechanical friction theory.

Physical and mechanical, chemical, tribotechnical, and operational properties of the most widespread materials of the disk-type movable operating parts of the tilling machines (28MnB5 and 65Г steel) have been determined. It has been found that the high-quality boron steel 28MnB5 has better physical and mechanical, as well as chemical properties compared to 65Г steel. Despite the better physical, mechanical and chemical properties of 28MnB5 steel, movable operating parts made of 65G steel are known for higher durability and wear resistance during operation on sandy-loam and sandy soils, which is conditioned by the self-hardening ability.

Experimental studies of changes in the properties of surface layers, formation of secondary structures in the zone of the frictional contact, and the rate of wear of the tilling machine movable operating parts has allowed us to identify the materials being mostly reasonable for use to manufacture serial heavy-duty plow-and-tine, as well as disk-type movable operating parts for the tilling machines. For disk-type tilling machines operated on sandy and sandy-loam soils, the movable operating parts should be made of 65Г steel (it is capable of self-hardening in the process of the aggressive abrasive and shock-abrasive wear, thus increasing the initial hardness by 15%), while from high-quality 28MnB5 boron steel – for machines operated on clay and loamy soils. Serial plow-and-tine movable operating parts for all types of soils should be made of high-quality wear-resistant steels as they demonstrate the ability to

increase the hardness of the secondary structures on the friction surface and have better wear resistance under abrasive wear conditions.

It has been found that the application of the wear-resistant coating on the tillage machine movable operating parts made of 65G steel can significantly increase their durability, i.e. durability of the reinforced disk-type movable operating parts operated on sandy soils will increase 1.28... 1.41 times, on loams - 1.11...1.24 times, while on clay soils - 1.07...1.18 times; durability of the reinforced duckfoot teeth operated on sandy soils will increase 1.41... 1.53 times, on loams – 1.48 times and on clay soils – 1.39... 1.44 times; durability of the reinforced share plows operated on sandy soils will increase 1.82...2.13 times, on loams - 1.5...1.85 times and on clay soils - 1.34...1.52 times.

Application of the wear-resistant coating on the surface of the tilling machine movable operating parts is considered to be more effective on soils that have a higher wear capacity (sandy and loamy ones). Being used on such soils, the said movable operating parts have higher durability as compared with the same made of high-quality wear-resistant steels.

It has been found that the idle time for the tilling machines (when they are in storage) is about 90% of a year. The agricultural companies operating agricultural machinery typically store tilling machines in open areas (71%), thus providing for intensification of corrosion processes that occur most intensively on the surfaces of the tilling machine movable operating parts subject to active abrasive wear because of defective crystal structure on the friction surface. Traces of corrosion on the surface of the tilling machine movable operating parts might lead to a decrease in their wear resistance after resuming the operation, and therefore their durability is affected in connection therewith. Performed studies have allowed determining the optimal methods for storage of the tilling machines during idle time in different soil-climatic zones of Ukraine, thus providing for significant slowing down the corrosion processes on the surface of the tilling machine movable operating parts, which in turn will significantly improve their wear resistance and durability.

Soil moisture content variations and changing the speed of the tilling machine will lead not only to a change in the rate of wear but also to a change in the nature of wear of the tilling machine movable operating parts. As the soil moisture content increases, its wear capacity increases accordingly to a certain limit, which is characteristic of each type of soil. Then a lubricant (free water) appears in the area of friction contact and the wear capacity of the soil begins to decrease. However, no nature of wear is changed due to the moisture content variations in loose soils. A more significant increase in wear rate is reported in the case of increasing the speed of the tilling machine on soils that have greater wear capacity. It should be noted that for movable operating parts made of high-quality steel (Hardox 500 and 28MnB5) there is a lesser increase in wear rate as compared with the same made of 65G steel.

The influence patterns determined with regard to the effects the soil-climatic conditions, operational modes, and storage methods may have on durability and wear resistance of the tilling machine movable operating parts have made it possible to develop a scientifically substantiated system of operation of the said movable operating parts.

The basic principles of improving the durability of the tilling machine movable operating parts have been formulated based upon an integral approach to adapting their wear resistance in consideration of the soil and climatic conditions, as well as operational modes enabling to improve the durability of the tilling machine movable operating parts, i.e. making it 1.84... 2.51 times higher depending on the type of tools used and actual ambient conditions (both soil and environmental).

Economic assessment of increasing the durability of tillage machines with a comprehensive approach to adapting their wear resistance, taking into account soil and climatic conditions and operating modes, showed cost savings in the range of 6... 18% of the cost of a new machine during operation of one set of working bodies.

As it follows from the economic assessment, the cost savings from improving the durability of the tilling machine movable operating parts through the application of an integral approach to adapting their wear resistance considering the soil-climatic

conditions and operational modes are 6...18% of the cost of a new machine during a time of use of one set of the movable operating parts.

Keywords: soil, tillage machine, service durability, wear resistance, reliability, integrated approach, ploughshare, V-shaped ploughshare, disk working tool of tillage machine.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних

1. Дворук В. І., **Борак К. В.** Методика дослідження впливу способу зберігання на абразивну зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин. Проблеми трибології. 2014. № 1. С. 14–18. *(Здобувачем розроблено методику дослідження впливу способу зберігання матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин на стійкість до абразивного зношування).*

2. Dvoruk V. I., **Borak K. V.**, Dobransky S. S. Effect of doping chromium structural steel at its abrasive wear resistance after heat treatment. Проблеми трибології. 2014. № 2. С. 24–28. *(Здобувачем проаналізовано особливості абразивного зношування).*

3. Дворук В. І., **Борак К. В.** Фізико-математичне моделювання трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Проблеми трибології. 2015. № 3. С. 78–82. *(Здобувачем розроблено фізико-математичну модель системи «робочий орган – ґрунт» та визначено особливості її функціонування).*

4. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Природа сил тертя та закономірності зносостійкості сталі при абразивному зношуванні. Проблеми трибології. 2015. № 4. С. 48–53. *(Здобувачем проаналізовано закономірності зносостійкості сталі при абразивному зношуванні).*

5. Дворук В. І., **Борак К. В.** Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів. 2016. Вип. 10/1 (29). С. 149–152. *(Здобувачем визначено вплив зношування поверхні робочих органів на інтенсивність атмосферної корозії в процесі зберігання ґрунтообробних машин).*

6. **Борак К. В.**, Руденко В. Г., Кравчук А. В., Добранський С. С. Фізичні, хімічні та механічні процеси в трибосистемі «робочий орган – ґрунт». Вісник

Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. 2017. Вип. 181. С. 143–147. *(Здобувачем визначено процеси, які відбуваються під час зношування робочих органів ґрунтообробних машин).*

7. Дворук В. І., **Борак К. В.** Дослідження зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин. Проблеми трибології. 2017. № 3. С. 100–105. *(Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

8. Борак К. В. Методика визначення триботехнічних характеристик ґрунтового середовища. Біоресурси і природокористування. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 135–144.

9. Борак К. В. Зміна поверхневої твердості робочих органів дискових ґрунтообробних машин у процесі експлуатації. Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: технічні науки. 2019. Т. 30 (69). № 2. Ч. 1. С. 24–28.

10. Dvoruk V. I., **Borak K. V.** Research of the degree of fixation of abrasive particle in the soil. Проблеми трибології. 2019. № 1. С. 67–72. *(Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження, здійснено обробку отриманих результатів).*

11. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С., Герасимчук Д. В. Вплив попередньої корозії на інтенсивність зношування сталі. Вісник Причорномор'я. 2019. № 4. С. 106–113. *(Здобувачем розроблено методику проведення досліджень, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

12. Борак К. В. Фрикційна взаємодія ґрунту з поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2019. Vol. 10. No 4. P. 157–162.

13. Борак К. В. Зміна поверхневої твердості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин в процесі експлуатації. Біоресурси і природокористування. 2020. Т. 12. № 1–2. С. 90–96.

14. Borak K. V. Effect of plant remains on abrasive wear rate of the tilling machine movable operating parts. Проблеми трибології. 2020. № 1. С. 57–62.

15. Борак К. В. Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів для забезпечення надійної експлуатації робочих органів. Технічні науки та технології. 2020. № 1 (19). С. 53–64.

16. Борак К. В. Уплив коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2020. № 1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/591/558>.

17. Борак К. В. Вплив ступеня закріплення абразивної частинки на механізм зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. 2020. Vol. 11. No 2. P. 35–40.

18. **Борак К. В.**, Крук І. С. Вплив швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів. Вісник Хмельницького національного університету. Серія: технічні науки. 2020. № 1. С. 30–36. *(Здобувачем розроблено методикку проведення досліджень, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

19. Борак К. В. Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин. Сільськогосподарські машини. 2020. № 1. С. 18–40.

20. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. Проблеми трибології. 2020. № 2. С 34–41.

Статті у наукових виданнях інших держав

21. Rogovskii I. L., **Borak K. V.**, Maksimovich E. Yu., Smelik V. A., Voinash S. A., Maksimovich K. Yu., Sokolova V. A. Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes T-series. Journal of Physics. 2020. Vol. 1679. 042084. *(Здобувачем запропоновано напрями вирішення наукової проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, проведено та проаналізовано результати досліджень).*

22. **Борак К. В.**, Герук С. М., Крук И. С. Повышение долговечности стрелчатых лап паровых культиваторов. *Агропанарама*. 2020. № 2 (138). Р. 10–14. *(Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

23. Borak K. Increasing the longevity and wear resistance of share-shelf operating devices of cultivating machines. *ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 20. № 1. Р. 41–48.

Стаття в іншому науковому виданні України

24. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Руденко В. Г., Добранський С. С., Бучко І. І. Дослідження статичного та динамічного коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та рослинними рештками. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2020. № 1 (83). URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Dopovid/article/view/13797> *(Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

Патенти України на корисну модель

25. Бучко І. О., Дворук В. І., Руденко В. Г., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Установка для дослідження зносостійкості матеріалів. Патент України на корисну модель № 142715 Україна, G01N 3/56. Заявник і патентовласник К. В. Борак. № u2019 11856; заявлено 12.12.2019; опубліковано 25.06.2020. Бюл. № 12/2020. *(Здобувачем здійснено патентний пошук і запропоновано конструкцію установки).*

26. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Руденко В. Г., Герасимчук Д. В., Добранський С. С., Рябчук П. О., Бучко І. О. Спосіб дослідження матеріалів та покриттів на зносостійкість та визначення коефіцієнта тертя ковзання сталь – абразивна маса. Патент України на корисну модель № 142596 Україна, G01N 3/00. Заявник і патентовласник К. В. Борак. № u2019 02358; заявлено 11.03.2019; опубліковано 25.06.2020. Бюл. № 12/2020. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано спосіб).*

27. Бучко І. О., Дворук В. І., Руденко В. Г., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Спосіб зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин. Патент України на корисну модель № 145951 Україна, С21D 1/00. Заявник і патентовласник К. В. Борак. № u2020 00720; заявлено 06.02.2020; опубліковано 13.01.2021. Бюл. № 2/2020. *(Здобувачем здійснено патентний пошук та запропоновано спосіб).*

Тези наукових доповідей

28. **Борак К. В.**, Герасимчук Д. В. Експлуатаційні способи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Підвищення надійності машин і обладнання: VII Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Кіровоград, 16–18 квітня 2014 року: тези доповіді. Кіровоград, 2014. С. 77–78. *(Здобувачем визначено експлуатаційні способи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин).*

29. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Паспортизація робочих органів ґрунтообробних машин. Крамаровські читання: II Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 109-ї річниці від народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 17–18 лютого 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 53–54. *(Здобувачем запропоновано структуру паспорта робочих органів ґрунтообробних машин).*

30. Борак К. В. Перспективи застосування системного підходу для аналізу трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Підвищення надійності машин і обладнання: IX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих учених, м. Кіровоград 15–17 квітня 2015 року: тези доповіді. Кіровоград, 2015. С. 50–51.

31. **Борак К. В.**, Данильчук А. А. Перспективи використання способу вимірювання зносу робочих органів ґрунтообробних машин методом штучних баз. Перші наукові кроки – 2015: IX Всеукраїнська науково-практична конференція студентів та молодих науковців, м. Кам'янець-Подільський, 23–24 квітня 2015 року: тези доповіді. Кам'янець-Подільський, 2015. С. 39.

(Здобувачем запропоновано використання методу штучних баз для дослідження зносу робочих органів ґрунтообробних машин).

32. Borak K. Physical and mathematical model tribosystem «working tool – land». Сучасні проблеми землеробської механіки: XVI Міжнародна наукова конференція, присвячена 115-річчю з дня народження Петра Мефодійовича Василенка, м. Київ, 17–19 жовтня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 106–107.

33. Борак К. В. Вплив попередньої корозії в процесі зберігання на інтенсивність зношування робочих органів. Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: X Міжнародна науково-практична конференція, м. Кіровоград, 5–6 листопада 2015 року: тези доповіді. Кіровоград, 2015. С. 51–52.

34. Борак К. В. Вторинні структури на поверхні тертя робочих органів ґрунтообробних машин. Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: III Міжнародна інтернет-конференція, м. Вінниця, 23 грудня 2015 року: тези доповіді. Вінниця, 2015. Ч. 1. С. 22.

35. Дворук В. І., **Борак К. В.** Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин. Сучасні проблеми землеробської механіки: XVI Міжнародна наукова конференція, м. Суми, 17–18 жовтня 2016 року: тези доповіді. Суми, 2016. С. 161–162. *(Здобувачем визначено вплив зношування поверхні робочих органів на інтенсивність атмосферної корозії в процесі зберігання ґрунтообробних машин).*

36. Дворук В. І., **Борак К. В.** Структурні зміни при функціонуванні трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: IV Міжнародна інтернет-конференція, м. Вінниця, 11 листопада 2016 року: тези доповіді. Вінниця, 2016. С. 8–9. *(Здобувачем розроблено фізико-математичну модель системи «робочий орган – ґрунт» та визначено особливості її функціонування).*

37. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С. Дифузійні процеси під час тертя. Аграрна наука та освіта Поділля: Міжнародна науково-практична

конференція, м. Кам'янець-Подільський, 14–16 березня 2017 року: тези доповіді. Кам'янець-Подільський, 2017. Ч. 2. С. 27–28. *(Здобувачем розглянуто дифузійні процеси на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин під час взаємодії з ґрунтом).*

38. Дворук В. І., **Борак К. В.** Процеси в зоні фрикційного контакту трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Науково-практична конференція викладачів, аспірантів та студентів Сумського національного аграрного університету, м. Суми, 19–21 квітня 2017 року: тези доповіді. Суми, 2017. С. 60. *(Здобувачем розроблено фізико-математичну модель системи «робочий орган – ґрунт» та визначено особливості її функціонування).*

39. Борак К. В. Утворення поверхневих плівок в зоні фрикційного контакту. Підвищення надійності машин і обладнання: XI Всеукраїнська наукова конференція студентів, аспірантів та молодих учених, м. Кропивницький, 20–21 квітня 2017 року: тези доповіді. Кропивницький, 2017. С. 12–13.

40. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Когут О. В. Зміна властивостей поверхневого шару кристалічного тіла при взаємодії з ґрунтом. Рациональне використання енергії в техніці: XIII Міжнародна наукова конференція з нагоди 86-ї річниці від дня народження Момотенка Миколи Петровича, м. Київ, 17–19 травня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 121–122. *(Здобувачем розглянуто зміни в поверхневому шарі робочих органів ґрунтообробних машин при взаємодії з ґрунтом).*

41. **Борак К. В.**, Добранський С. С. Вплив абразивного зношування на швидкість протікання атмосферної корозії. Інноваційні технології в АПК: Всеукраїнська науково-практична конференція, м. Луцьк, травень 2017 року: тези доповіді. Луцьк, 2017. С. 6–7. *(Здобувачем визначено вплив зношування поверхні робочих органів на інтенсивність атмосферної корозії в процесі зберігання ґрунтообробних машин).*

42. Борак К. В. Механізм та природа абразивного зношування робочих органів посівних та ґрунтообробних машин. Проблеми конструювання,

виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки: XI Міжнародна науково-практична конференція, м. Кропивницький, 1–3 листопада 2017 року: тези доповіді. Кропивницький, 2017. С. 85–87.

43. Борак К. В. Методика визначення ступеня закріпленості абразивних частинок в ґрунті. Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві: I науково-практична конференція факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроекологічного університету, м. Житомир, 16–17 листопада 2017 року: тези доповіді. Житомир, 2017. С. 63–65.

44. Дворук В. І., **Борак К. В.** Особливості руйнування поверхні матеріалів при зношуванні в ґрунтовому середовищі. Інноваційні розробки в аграрній сфері: Науково-практична конференція, м. Харків, 30 листопада 2017 року: тези доповіді. Х., 2017. С. 16. *(Здобувачем розглянуто етапи руйнування поверхні металу при абразивному зношуванні).*

45. **Борак К. В.**, Герук С. М., Руденко В. Г. Экспериментальные исследования почвообрабатывающих дисков фирмы Bellota. Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве: Международная научно-практическая конференция, г. Минск, Республика Беларусь, 22–24 ноября 2017 года: тезисы доклада. Минск, 2017. С. 39–46. *(Здобувачем розроблено методику, проведено дослідження та здійснено обробку отриманих результатів).*

46. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Марчук І. В. Класифікація абразивного зношування. Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій: V Міжнародна інтернет-конференція, м. Вінниця, 1–2 грудня 2017 року: тези доповіді. Вінниця, 2017. Ч. 1. С. 20–21. *(Здобувачем проведено аналіз класифікації абразивного зношування).*

47. Борак К. В. Визначення ступеня закріпленості абразивних частинок в ґрунті. Крамаровські читання: V Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 111-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова

Володимира Савовича, м. Київ, 22–23 лютого 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 93–96.

48. Дворук В. І., **Борак К. В.** Механізм та природа абразивного зношування робочих органів посівних та ґрунтообробних машин. Крамаровські читання: V Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 111-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 22–23 лютого 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 57–60. *(Здобувачем проаналізовано механізм та природу абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин).*

49. Дворук В. І., **Борак К. В.** Методика визначення коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту. Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції: Міжнародна науково-практична конференція, м. Кам'янець-Подільський, 20–22 березня 2018 року: тези доповіді. Кам'янець-Подільський, 2018. Ч. 2. С. 119–120. *(Здобувачем розроблено методику визначення коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунтів).*

50. Дворук В. І., **Борак К. В.** Методика визначення триботехнічних характеристик ґрунтового середовища. Підвищення надійності машин і обладнання: XII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих науковців, м. Кропивницький, 18–20 квітня 2018 року: тези доповіді. Кропивницький, 2018. С. 151–153. *(Здобувачем розроблено методику визначення триботехнічних характеристик ґрунтів).*

51. Дворук В. І., **Борак К. В.** Напрямки підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних та посівних машин. Цілі сталого розвитку третього тисячоліття: Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 23–25 травня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. Т. 5. С. 147–148. *(Здобувачем визначено напрями вирішення наукової проблеми підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин).*

52. Дворук В. І., **Борак К. В.** Аналіз моделей ґрунту, як елемента трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Проблеми довговічності матеріалів,

покриттів та конструкцій: VI Міжнародна конференція, м. Вінниця, 13–15 вересня 2018 року: тези доповіді. Вінниця, 2018. Ч. 1. С. 25–26. *(Здобувачем проведено аналіз існуючих моделей ґрунту).*

53. Борак К. В. Вплив розміру абразиву на інтенсивність зношування. Крамаровські читання: VI Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 112-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 21–22 лютого 2019 року: тези доповіді. К., 2019. С. 268–272.

54. Дворук В. І., **Борак К. В.** Забезпеченість ґрунтообробною та посівною технікою агропромислового комплексу України. Молодь і технічний прогрес в АПК: Міжнародна науково-практична конференція, м. Харків, 4 квітня 2019 року: тези доповіді. Х., 2019. Т. 2. С. 122–123. *(Здобувачем визначено забезпеченість ґрунтообробною та посівною технікою агропромислового комплексу України).*

55. Дворук В. І., **Борак К. В.** Методи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів посівних та ґрунтообробних машин. Підвищення надійності машин і обладнання: I Міжнародна науково-практична конференція, м. Кропивницький, 17–19 квітня 2019 року: тези доповіді. Кропивницький, 2019. С. 64–65. *(Здобувачем запропоновано напрями вирішення наукової проблеми підвищення довговічності зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин).*

56. Борак К. В. Технологічні методи підвищення довговічності та зносостійкості. Імпортозамінні технології вирощування, зберігання і переробки продукції садівництва та рослинництва: V Міжнародна науково-практична конференція, м. Умань, 23–24 травня 2019 року: тези доповіді. Умань, 2019. С. 113–115.

57. Дворук В. І., **Борак К. В.**, Добранський С. С., Герасимчук Д. В. Вплив попередньої корозії на інтенсивність зношування сталі. Сучасні проблеми землеробської механіки: XX Міжнародна наукова конференція, присвячена 119-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка, м.

Миколаїв, 17–19 жовтня 2019 року: тези доповіді. Миколаїв, 2019. С. 28–30. *(Здобувачем визначено вплив попередньої корозії робочих органів ґрунтообробних машин в процесі зберігання на інтенсивність зношування).*

58. Борак К. В. Визначення впливу вологості та рослинних решток на значення коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунту та питомого зчеплення абразивних частинок. Крамаровські читання: VII Міжнародна науково-технічна конференція з нагоди 113-ї річниці від дня народження доктора технічних наук, професора, члена-кореспондента ВАСГНІЛ, віце-президента УАСГН Крамарова Володимира Савовича, м. Київ, 20–21 лютого 2020 року: тези доповіді. К., 2020. С. 42–45.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	33
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН.....	40
1.1. Забезпеченість ґрунтообробною технікою агропромислового комплексу та конструктивні особливості робочих органів ґрунтообробних машин.....	40
1.2. Аналіз зношування робочих органів ґрунтообробних машин та процесів, які протікають у зоні фрикційного контакту.....	44
1.3. Аналіз факторів, які впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин	55
1.4. Сучасні методи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.....	79
1.4.1. Аналіз технологічних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.....	81
1.4.2. Аналіз конструкційних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин	84
1.4.3. Аналіз експлуатаційних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.....	85
1.5. Стан проблеми досягнення ефекту самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин.....	86
Висновки. Мета і завдання дослідження.....	92
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН КОМПЛЕКСНИМ ПІДХОДОМ АДАПТАЦІЇ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ.....	96
2.1. Методологічні основи та програма досліджень.....	96
2.2. Методи теоретичного розв'язання науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.....	98

2.3. Обладнання, методи та методики дослідження абразивних властивостей ґрунтів.....	99
2.3.1. Основні завдання дослідження абразивних властивостей ґрунту....	99
2.3.2 Лабораторна установка та методика визначення ступеня закріпленості абразивних частинок у ґрунті.....	100
2.3.3. Методика визначення коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту.....	107
2.3.4. Імітаційна лабораторна установка для визначення зношувальної здатності ґрунтів та інших абразивних середовищ і випробовування зразків на зносостійкість.....	111
2.3.5. Методика дослідження впливу рослинних решток на інтенсивність абразивного зношування.....	113
2.3.6. Устаткування та методика визначення коефіцієнта тертя складових частин середовища ґрунту по сталі.....	115
2.4. Методика дослідження впливу способу зберігання на абразивну зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.....	117
2.5. Устаткування та методика дослідження фізичних, механічних, хімічних і триботехнічних властивостей матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин.....	119
2.6. Структура, методи та методики експлуатаційних досліджень.....	121
2.6.1. Методика дослідження впливу умов і режимів експлуатації на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин.....	121
2.6.2 Дослідження впливу геометричної форми та хімічного складу зносостійкого шару на зносостійкість і довговічність робочих органів ґрунтообробних машин.....	123
Висновки по розділу 2.....	126
РОЗДІЛ 3. ТЕОРЕТИЧНО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН КОМПЛЕКСНИМ ПІДХОДОМ АДАПТАЦІЇ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ.....	128

3.1. Математична модель підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням умов та режимів експлуатації.....	128
3.2. Фізико-математична модель системи «робочий орган – ґрунт».....	135
3.3. Теоретичні основи фрикційної взаємодії ґрунту з поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин.....	142
3.4. Вплив ступеня закріплення абразивної частинки на механізм та характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин.....	151
3.5. Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів для забезпечення надійної експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин.....	157
3.6. Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин.....	173
Висновки по розділу 3.....	184
РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ СЕРЕДОВИЩА ҐРУНТУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН.....	186
4.1. Визначення ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті та коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунту.....	186
4.2. Коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунтів України та його вплив на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин.....	192
4.3. Установлення статичного і динамічного коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та складових частин середовища ґрунту.....	199
4.4. Вплив рослинних решток на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин.....	210
Висновки по розділу 4.....	213
РОЗДІЛ 5. ВПЛИВ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ КОНСТРУКТИВНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ	

ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН НА ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ.....	215
5.1. Зміна властивостей поверхневих шарів робочих органів залежно від умов експлуатації.....	215
5.1.1. Зміна поверхневої твердості робочих органів дискових ґрунтообробних машин у процесі експлуатації.....	217
5.1.2. Зміна поверхневої твердості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин у процесі експлуатації.....	223
5.2. Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин.....	227
5.3. Дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів і зносостійкості серійних дискових робочих органів ґрунтообробних машин.....	233
5.4. Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.....	241
5.4.1. Підвищення довговічності та зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин.....	242
5.4.2. Підвищення довговічності та зносостійкості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин.....	249
5.4.2.1. Підвищення довговічності та зносостійкості стрілчастих лап...	249
5.4.2.2. Підвищення довговічності та зносостійкості лемешів плугів....	258
Висновки по розділу 5.....	265
РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНЬОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ.....	268
6.1. Закономірності впливу вологості на інтенсивність та характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин.....	268
6.2. Вплив швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин	272

6.3. Обґрунтування способу зберігання робочих органів ґрунтообробних машин у міжексплуатаційний період у різних ґрунтово-кліматичних зонах України.....	280
6.4. Науково обґрунтована система експлуатації ґрунтообробних машин.....	287
Висновки по розділу 6.....	291
РОЗДІЛ 7. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ АДАПТАЦІЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ.....	292
7.1. Виробнича перевірка та впровадження результатів дослідження у виробництво.....	292
7.2. Техніко-економічний аналіз комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.....	299
Висновки по розділу 7.....	302
ВИСНОВКИ.....	304
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	309
ДОДАТКИ.....	345

ВСТУП

Актуальність теми. У розвинутих країнах утрати, зумовлені тільки наслідками абразивного зношування, становлять від 1 до 4 % національного валового продукту [1]. В агропромисловому комплексі найбільше абразивному зношуванню піддаються робочі органи ґрунтообробних машин, які взаємодіють із середовищем ґрунту.

Ґрунтообробні машини займають одне з провідних місць у структурі машинно-тракторного парку сучасних аграрних підприємств. Утрата їх працездатного стану під час проведення польових робіт може суттєво вплинути на урожайність сільськогосподарських культур. У ґрунтообробних машинах елементом, який переважно лімітує довговічність машин, є робочий орган.

Відповідно пошук шляхів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин має важливе значення для агропромислового комплексу України. Цю проблему необхідно вирішувати зусиллями конструкторів, технологів, дослідників і працівників аграрних підприємств.

Сьогодні підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин переважно зводиться до покращення зносостійких характеристик поверхні та геометричної форми робочих органів без урахування умов і режимів експлуатації.

Водночас залишаються без належної уваги експлуатаційні способи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів, а саме: організація зберігання (80–90 % часу ґрунтообробні машини знаходяться на зберіганні, де піддаються корозії, яка суттєво інтенсифікує процес зношування поверхні); оптимізація режимів роботи машин (експлуатація при певній вологості ґрунту з певною швидкістю в період, коли ґрунт має найнижчу абразивну здатність, що забезпечить мінімальну швидкість зношування); своєчасна очистка від поживних решток (у соках рослин наявні амінокислоти, що здатні викликати

процеси на поверхні робочих органів, які інтенсифікують процес зношування); постійний нагляд за робочими органами та ін.

Вирішення проблеми підвищення довговічності й зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин на основі комплексного підходу із застосуванням технологічних і конструктивних методів підвищення зносостійкості та довговічності з урахуванням умов експлуатації та впровадження науково обґрунтованої системи їх експлуатації є, безумовно, актуальним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано згідно з пріоритетними тематичними напрямками наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2020 року, а саме – фундаментальні проблеми сучасного матеріалознавства та перспективні технології агропромислового комплексу та переробної промисловості. Дослідження за темою дисертації є частиною комплексної наукової роботи кафедр машино-використання та сервісу технологічних систем Поліського національного університету, за консультативної складової кафедри теоретичної та прикладної фізики Національного авіаційного університету «Забезпечення працездатності трибомеханічних систем в умовах абразивного зношування» (номер державної реєстрації 0112U003405).

Мета та завдання дослідження. Мета дисертаційного дослідження – підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин шляхом використання комплексного підходу адаптації їх зносостійкості до ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації.

Для реалізації поставленої мети вирішено такі основні завдання: – з'ясувати закономірності протікання процесів у зоні фрикційного контакту «робочий орган – ґрунт» та установити фактори, які істотно впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів та визначити перспективні напрями підвищення їх довговічності й зносостійкості; – розробити методологічні основи вирішення проблеми підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх

зносостійкості до ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації; – розробити теоретичні основи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості; – шляхом експериментальних досліджень з’ясувати вплив ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації на підвищення довговічності і зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин; – виявити закономірності зміни конструктивних і технологічних параметрів та їхній вплив на підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин; – обґрунтувати й розробити систему експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин із необхідним рівнем їх надійності; – дати техніко-економічне обґрунтування запропонованого підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості; – на основі проведених досліджень розробити рекомендації виробникам та сільськогосподарським підприємствам щодо підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин.

Об’єкт дослідження – процеси зміни конструктивних і технологічних параметрів робочих органів ґрунтообробних машин.

Предмет дослідження – розроблення комплексного підходу підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням закономірностей впливу ґрунтово-кліматичних умов, конструктивних та технологічних параметрів, режимів експлуатації, а також умов зберігання.

Методи дослідження. Методологічною основою дисертації є сукупність теоретичних та емпіричних методів пізнання, які базуються на системі основних наукових понять, теорій, принципів і законів. Теоретичні дослідження ґрунтуються на використанні методів теорії ймовірності та математичної статистики, синергетики, надійності машин, фізики твердого тіла, системного та комплексного підходів вирішення проблеми підвищення довговічності.

Лабораторні, стендові й експлуатаційні дослідження проведено із застосування стандартних та розроблених методик. Обробку й аналіз результатів експериментальних досліджень виконано із застосування методів

математичного аналізу, теорії ймовірності, математичної статистики та планування експерименту із застосуванням прикладних комп'ютерних програм.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в обґрунтуванні, подальшому розвитку та вирішенні науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, яка, на відміну від відомих раніше, враховує комплексний підхід адаптації їх зносостійкості на різних етапах їх життєвого циклу.

Вперше запропоновано комплексний підхід адаптації зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації, що дозволяє підвищити їхню довговічність конструктивними, технологічними та експлуатаційними методами до необхідного рівня.

Вперше встановлено закономірності впливу властивостей середовища ґрунту, з урахуванням складових його елементів, процесів самоорганізації та режимів експлуатації на закономірність зміни геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, що дає змогу обґрунтувати та розробити систему експлуатації для підвищення їх зносостійкості та довговічності.

Вперше визначено значення критеріїв досягнення рівності зношування лемішно-лапових та дискових робочих органів з урахуванням сукупності значимих факторів, які використовуються при оптимізації параметрів зміцнення.

Вперше отримано теоретичну залежність коефіцієнта тертя між середовищем ґрунту і поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та виявлено закономірності процесу зношування від ступеня закріплення абразивних частинок ґрунту, які дозволяють прогнозувати вплив середовища ґрунту на інтенсивність зміни геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин.

Удосконалено умови досягнення ефекту самозагострювання лемішно-лапових та дискових робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням

грунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації, що дозволяють проектувати робочі органи ґрунтообробних машин із підвищеною зносостійкістю та довговічністю.

Удосконалено методи дослідження абразивних властивостей середовища ґрунту та визначення впливу атмосферної корозії на закономірність зміни геометричних параметрів та фізико-механічних властивостей матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, що обумовлює визначення ступеня адаптації робочих органів ґрунтообробних машин до ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації.

Одержали подальший розвиток закономірності протікання процесів у зоні фрикційного контакту між середовищем ґрунту та робочим органом ґрунтообробних машин, що дає можливість визначити оптимальні режими експлуатації при даних умовах.⁴

Одержали подальший розвиток закономірності фрикційної взаємодії між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та рослинними рештками, що дозволяє виявити вплив рослинних решток на інтенсивність зношування.

Практичне значення одержаних результатів. На основі проведених експериментальних досліджень вирішено проблему підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості: визначено геометричні та фізико-механічні параметри матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин та зносостійкого шару; запропоновано режими експлуатації ґрунтообробних машин, які сприятимуть зменшенню інтенсивності зношування їхніх робочих органів; визначено способи зберігання ґрунтообробних машин, які дозволять підвищити довговічність їхніх робочих органів; описано умови досягнення ефекту самозагострювання для лемішно-лапових і дискових робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням умов та режимів експлуатації.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у виробництво в СФГ «Шар» Козятинського району Вінницької області, ТОВ «ВП Полісся» Овруцького району Житомирської області, ТОВ «Аграрні системні технології»

Попільнянського району Житомирської області, а також в освітній процес у Поліському національному університеті та Житомирському агротехнічному коледжі для підготовки фахівців за освітньо-професійною програмою «Агроінженерія» спеціальності 208 «Агроінженерія» освітнього ступеня «Бакалавр».

Особистий внесок здобувача. Теоретичні положення та експериментальні результати дисертації, які виносяться на захист, одержано здобувачем особисто.

Із наукових праць, опублікованих у співавторстві, використано результати, отримані здобувачем особисто.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертації було обговорено та схвалено на: міжнародних наукових конференціях «Сучасні проблеми землеробської механіки» (м. Київ, 2015 р., м. Суми, 2016 р., м. Миколаїв, 2019 р.); міжнародних науково-технічних конференціях «Крамаровські читання» (м. Київ, 2015 р., 2018–2020 рр.); міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (м. Кропивницький, 2015 р., 2017 р.); міжнародних інтернет-конференціях «Проблеми довговічності матеріалів, покриттів та конструкцій» (м. Вінниця, 2015–2018 рр.); Міжнародній науково-практичній конференції «Аграрна наука та освіта Поділля» (м. Кам'янець-Подільський, 2017 р.); Міжнародній науковій конференції «Раціональне використання енергії в техніці» (м. Київ, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Техническое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» (м. Мінськ, Республіка Білорусь, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Аграрна наука та освіта в умовах євроінтеграції» (м. Кам'янець-Подільський, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні розробки в аграрній сфері» (м. Харків, 2017 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Цілі сталого розвитку третього тисячоліття» (м. Київ, 2018 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Молодь в технічний прогрес

в АПК» (м. Харків, 2019 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Підвищення надійності машин і обладнання» (м. Кропивницький, 2019 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні технології в АПК» (м. Луцьк, 2017 р.); всеукраїнських науково-практичних конференціях студентів, аспірантів та молодих учених «Підвищення надійності машин і обладнання» (м. Кропивницький, 2014–2018 рр.); Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів та молодих науковців «Перші наукові кроки – 2015» (м. Кам'янець-Подільський, 2015 р.); науково-практичній конференції факультету інженерії та енергетики Житомирського національного агроекологічного університету «Біоенергетичні системи в агропромисловому виробництві» (м. Житомир, 2017 р.); науково-практичній конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського національного аграрного університету (м. Суми, 2017 р.).

Публікації. Основні результати досліджень опубліковано в 58 наукових працях, з яких 20 статей у наукових фахових виданнях України, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз даних, 3 статті у наукових виданнях інших держав, стаття в іншому науковому виданні України, 3 патенти України на корисну модель, 31 теза наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з анотацій, вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

Загальний обсяг роботи становить 380 сторінок. Дисертація містить 125 рисунків та 64 таблиці. Список використаних джерел налічує 350 найменування.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТА ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН

1.1. Забезпеченість ґрунтообробною технікою агропромислового комплексу та конструктивні особливості робочих органів ґрунтообробних машин

На початку 2018 року в Україні налічувалося більше 300 тисяч ґрунтообробних машин (табл. 1.1). Протягом останніх років спостерігається збільшення кількості таких машин у сільськогосподарських виробників. Машинобудівна галузь України повною мірою спроможна забезпечити виробництво ґрунтообробних машин для агропромислового комплексу України [2]. За даними сайту державної фіскальної служби [3], за останні 3 роки спостерігається зменшення імпорту ґрунтообробної техніки та збільшення її експорту, основні країни експортери – Російська Федерація, Молдова, Німеччина, Казахстан (табл. 1.2).

Таблиця 1.1.

Наявність сільськогосподарської техніки в сільськогосподарських підприємствах на кінець 2017 року [4]

Найменування	Усього	У % до наявності на початок року
Плуги	49072	103,4
Культиватори	70100	102,0
Борони	181386	98,7
зокрема дискові	31707	106,5

Лідерами з виробництва ґрунтообробних машин в Україні є такі компанії як: ПАТ «Ельворті» [5], ТОВ «Завод «Оптикон» [6], ВАТ «Лозівський ковальсько-механічний завод» [7], ВАТ «Велес-Агро ЛТД» [8], ТОВ НВП «БілоцерківМАЗ» [9], ВАТ «Галещина машзавод» [10], ВАТ «Уманьферммаш» [11], ВАТ «Хмільниксільмаш» [12], Корпорація «Агро-Союз» [13], ВАТ ВО

«ВОСХОД» [14], ВАТ «Завод «Фрегат» [15], ТОВ АК «Фаворит» [16], та інші [17].

Таблиця 1.2

Виробництво промислової продукції за видами за 2017 рік [18]

Найменування	Кількість виробленої продукції
Плуги	2917
Розпушувачі та культиватори	3967
Борони (крім дискових)	7267
Борони дискові	3261

Незважаючи на такі позитивні статистичні дані, слід відмітити, що більшість підприємств закуповує закордоном робочі органи, які взаємодіють із середовищем ґрунту або матеріали для їх виготовлення (переважно борвмісну сталь). Деякі підприємства виготовляють робочі органи зі сталі вітчизняного виробництва. Найчастіше для цих потреб використовують сталь 65Г.

За даними сайту державної фіскальної служби [3], найбільші імпортери ґрунтообробної техніки: США, Німеччина, Швеція, Франція. Світовими лідерами з виробництва ґрунтообробних машин і робочих органів для них є: Lemken [19], Weaving Machinery [20], Great Plains [21], John Deere [22], Case [23], Amazone [24], Vederstad [25], Kverneland [26], Kuhn [27], Kleine [28], Bellota [29] та інші.

Існує велике різноманіття типів і видів робочих органів ґрунтообробних машин, які класифікують за багатьма ознаками (геометричною формою, глибиною обробітку, впливом на ґрунт, наявністю або відсутністю приводу тощо [30–41]. При вивченні процесу зношування робочих органів ґрунтообробних машин і пошуку шляхів підвищення їх довговічності та зносостійкості доцільно поділити на такі типи: лемішно-лапові та дискові. Варто зауважити, що процес зношування активних робочих органів істотно відрізняється від зношування неактивних робочих органів, тому пошукові шляхи підвищення довговічності та зносостійкості активних робочих органів

необхідно присвятити окреме дослідження. У пропонованій праці основну увагу зосереджено на трьох робочих органах ґрунтообробних машин (два з них належать до лемішно-лапових і один до дискових): леміш, стрілчаста лапа та вирізний дисковий робочий орган (рис. 1.1).

Співвідношення між геометричними параметрами робочих органів визначають їх тип і сферу застосування. До основних геометричних параметрів лемішно-лапових робочих органів, які не представлено на рис. 1.1, слід також зарахувати товщину та кут загострення (рис. 1.2).

Під час виконання технологічної операції обробітку ґрунту внаслідок абразивного зношування робочі органи змінюють свої геометричні параметри (рис. 1.3), що призводить до погіршення якості виконання технологічної операції та зростання тягового опору агрегату.

У процесі зношування, окрім геометричних параметрів, змінюються й фізико-механічні властивості матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин.

За останні 50–60 років навантаження на робочі органи ґрунтообробних і посівних машин збільшилося приблизно в 4 рази (у зв'язку із збільшенням швидкості їх роботи та ущільненням ґрунту важкою сільськогосподарською технікою) [42, 43]. Усе це призводить до постійного зростання інтенсивності зношування робочих органів і зменшення їх надійності, саме тому гостро постає питання вирішення науково-практичної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

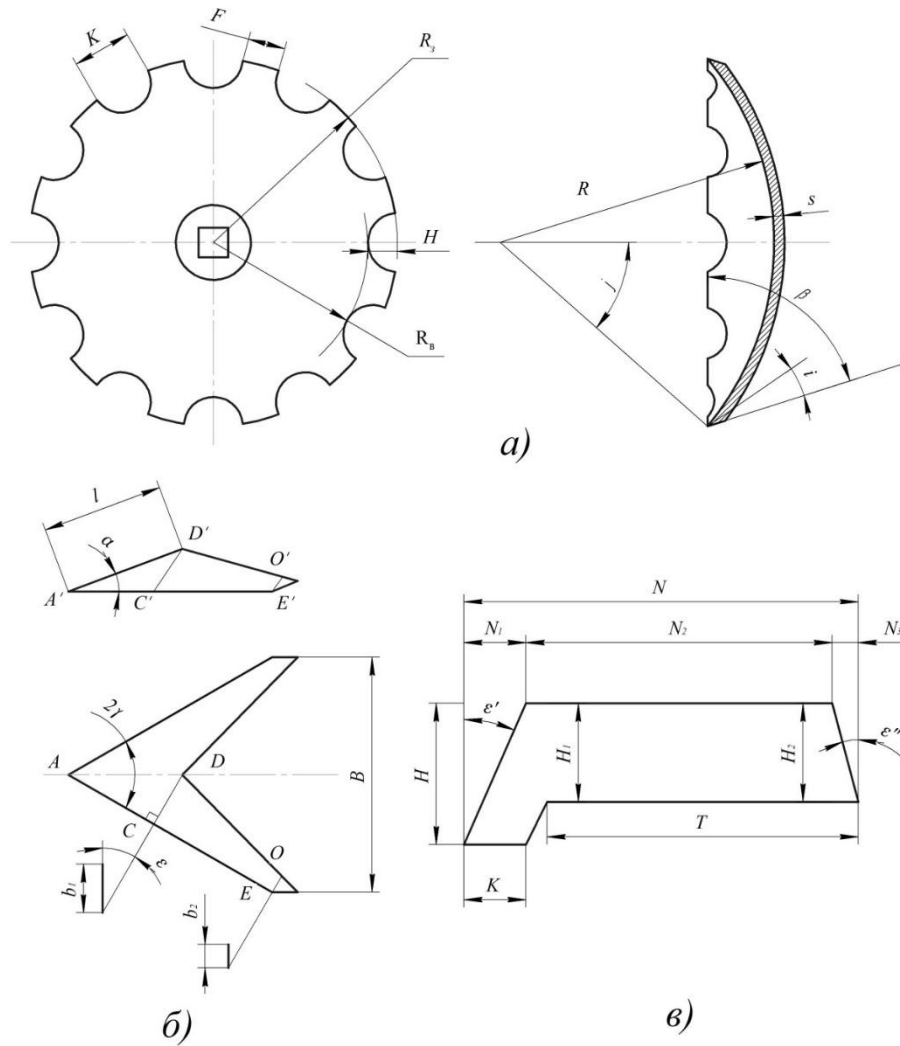


Рис. 1.1. Загальний вигляд та основні геометричні параметри робочих органів ґрунтообробних машин [30–41, 44], які використовували під час досліджень: а) – дисковий вирізний робочий орган; б) – стрілочаста лапа; в) – леміш; R_z – зовнішній діаметр диска; R_b – внутрішній діаметр диска; K – ширина впадини; F – ширина зуба; H – глибина впадини; s – товщина диска; i – кут загострення; j – кут, що визначає залежність між діаметром диска та радіусом кривини; R – радіус кривини диска; α – кут піднімання грудей лапи; ε – кут кришення; 2γ – кут між лезами; b_1, b_2 – ширина крила; B – ширина захвату лапи; l – довжина носка; N – довжина лемеша; H – ширина польового обрізу; H_1 – ширина лезової частини; H_2 – ширина обрізу з боку борозни; ε' – кут нахилу носка; ε'' – кут нахилу обрізу з боку борозни; T – довжина леза

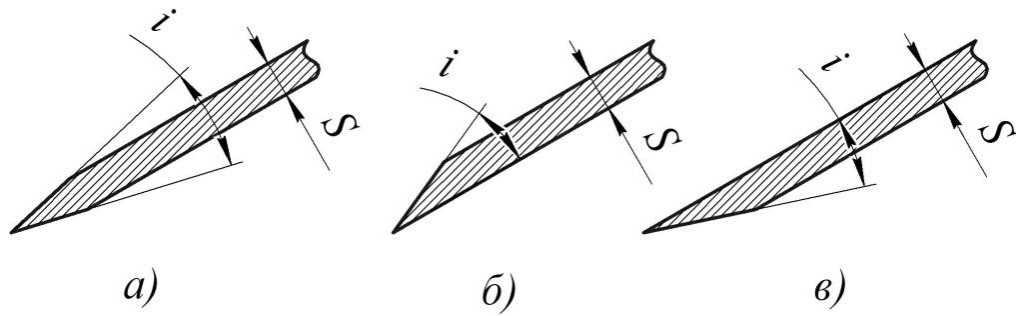


Рис. 1.2. Схема способів загострення: а), б), в) – відповідно двостороннє, верхнє та нижнє загострення; S – товщина робочих органів

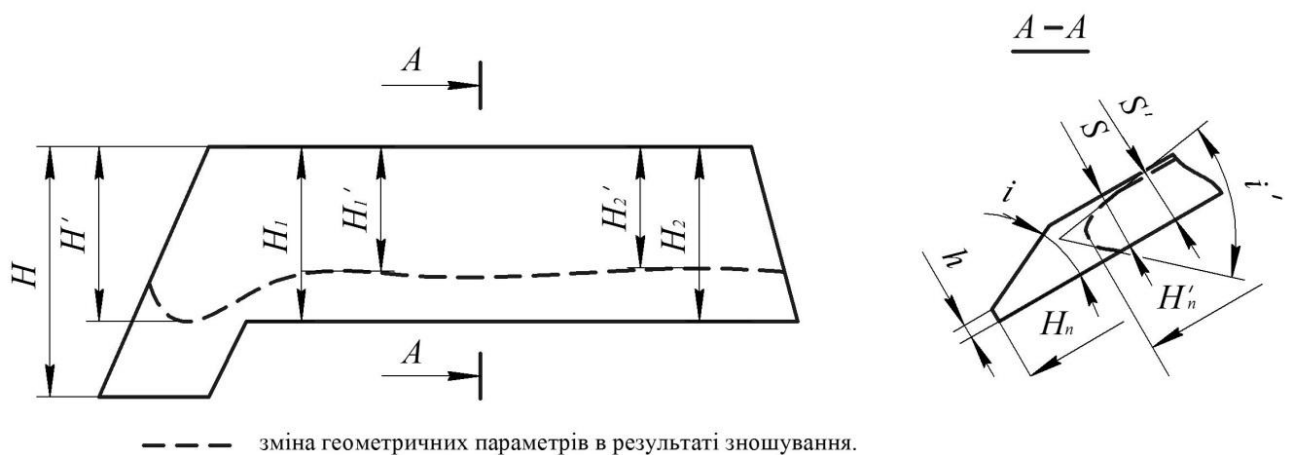


Рис. 1.3. Зміна форми лемеша в процесі виконання технологічної операції обробки ґрунту: H, H_1, H_2, S, i, h – геометричні параметри нового лемеша, H', H_1', H_2', S', i' – геометричні параметри зношеного лемеша

1.2. Аналіз зношування робочих органів ґрунтообробних машин та процесів, які протікають у зоні фрикційного контакту

Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин можливе тільки за умови всебічного розуміння процесу їхнього зношування. Під час експлуатації ґрунтообробних машин робочі органи піддаються інтенсивному зношуванню в агресивній абразивній масі (ґрунті), унаслідок чого в зоні контакту одночасно протікають механічні, фізичні та хімічні процеси. Співвідношення між інтенсивністю протікання цих процесів визначають механізм і характер абразивного зношування.

Зрозуміти механізми зношування будь-якого елемента трибосистеми неможливо без розуміння механізмів тертя. Перші спроби пояснення механізмів тертя зробив Леонардо да Вінчі [45] у подальшому процеси, що відбуваються під час тертя, вивчали Г. Амонтон, Дж. Т. Деагюльє, Б. Томсон, Дж. П. Джоуль, У. Хардлі, Я. І. Френкель, Л. Прандтль, Дж. Томлінсон, Б. В. Дерягін, Г. Тейлор, Ф. Боуден, Д. Тейбор, І. В. Крагельський, Б. І. Костецький, Дж. Персон та ін. На сьогодні домінантною в усьому світі стала «адгезійно-деформаційна» або «молекулярно-механічна» теорія, Базована на працях Ф. Боудена, Д. Тейбора, І.В. Крагельського та ін. На думку автора [46] дана теорія розглядає тільки макроскопічні аспекти механізмів тертя і не спроможна відповісти на фундаментальні питання трибології. Основним її недоліком є неврахування атомних зв'язків як в елементі трибосистеми так і взаємодія атомів різних елементів трибосистеми. В умовах абразивного зношування переважною складовою механізмів тертя і зношування буде саме механічна та молекулярна складова, тому взаємодією між атомами можна знехтувати.

У сучасному розумінні абразивне зношування (abrasive wear) – це механічне зношування внаслідок різальної або дряпальної дії твердих тіл або частинок, які знаходяться в закріпленому або вільному стані [47]. У сільськогосподарській техніці абразивному зношуванню найбільше піддаються робочі органи посівних і ґрунтообробних машин. Тому забезпечення зносостійкості зазначених деталей на стадії проектування – актуальне завдання сільськогосподарського машинобудування, вирішення якої можливе лише на основі адекватних уявлень про механізм абразивного зношування.

Стандартно абразивне зношування поділяють на зношування закріпленими частинками (two-body abrasive wear) та зношування незакріпленими частинками (three-body abrasive wear) [47, 48]. Перший процес відбувається, коли абразив ковзає вздовж поверхні (grooving abrasion), другий – коли тверда частинка вільно перекачується між двома поверхнями, що знаходяться у відносному русі (rolling abrasion). Це так зване закрите абразивне

зношування (closed abrasion), на відміну від відкритого процесу (open abrasion), коли потік незакріплених абразивних частинок переміщується по твердій поверхні [48, 49].

На мою думку [50] та думку деяких авторів [51, 52, 53] такий поділ абразивного зношування можна вважати неповним. Зокрема у праці Добровольського А. Г. [53] зазначено, що тертя робочих органів у ґрунті є результатом взаємодії поверхні робочих органів із твердими частинками «зчепленими в нежорстку масу». Тобто абразивні частинки можуть знаходитися в закріпленому та вільному стані, але в процесі тертя можуть змінювати свою зв'язаність, як у напрямку збільшення, так і зменшення. У дослідженнях В. М. Бобрицького [44] та В. В. Ауліна [51] такий стан абразивної маси названий «напівзакріплений абразив». У дослідженнях А. Г. Добровольський [53], посилаючись на ГОСТ 23.002-78 [54] дав таке визначення абразивного зношування – це механічне зношування матеріалу внаслідок загалом різальної або дряпальної дії на нього твердих частинок, що знаходяться у вільному, напівзакріпленому або закріпленому стані. У ГОСТ 23.002-78 [54] слово «напівзакріпленому» відсутнє, але в третьому розділі праці [53] А. Г. Добровольський розглядається «Стійкість матеріалів у процесі зношування нежорстко закріпленими абразивними частинками». Піддаються такому виду абразивного зношування ґрунтообробний інструмент, інструмент дорожніх та будівельних машин, ковші екскаваторів і канавокопачів. Механізм зношування напівзакріпленим абразивом відбувається переважно завдяки пластичному відтискуванню і меншою мірою шляхом мікрорізання [53]. Підтвердженням можливості одночасного протікання двох видів абразивного зношування є наявність на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин слідів мікрорізання та полірованої поверхні (рис. 1.4).

В праці К. Хокірігави та К Като зазначається, що існують три різні режими абразивного зношування (рис. 1.5) [55].



Рис. 1.4. Типова поверхня тертя робочих органів ґрунтообробних машин (робочі органи фірми «Bednar FMT», напрацювання агрегату 130 га, Попільнянський район Житомирська область)

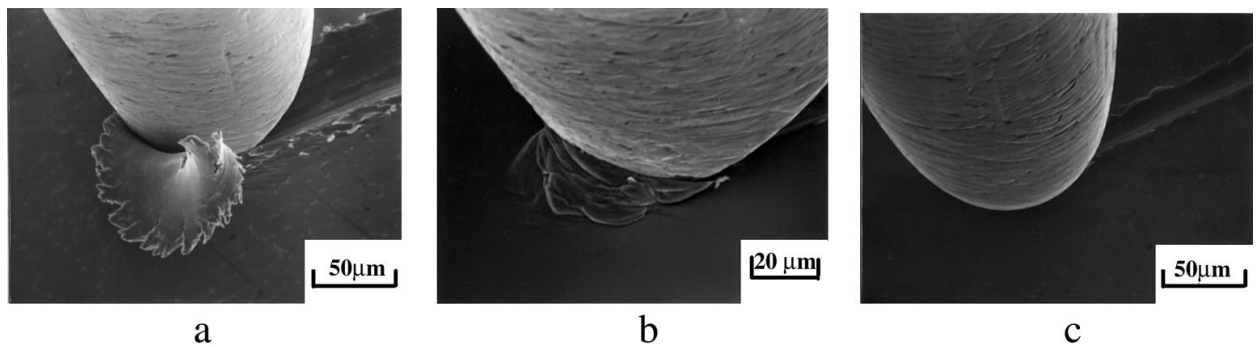


Рис. 1.5. Три різні режими абразивного зносу, що спостерігаються за допомогою SEM: режим різання (а), сталевий штифт на латунній пластині; клиноутворювальний режим (б), сталевий штифт на пластині з нержавійної сталі; режим оранки (с), сталевий штифт на латунній пластині [62].

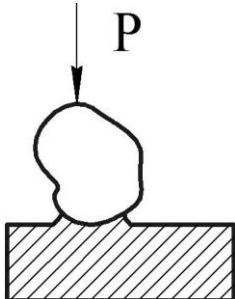
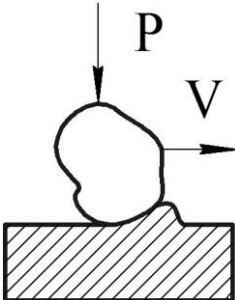
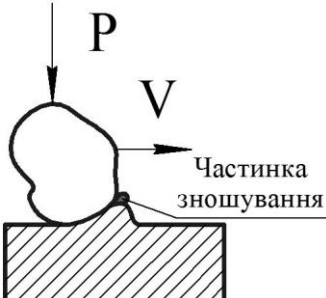
Режими зношування, представлені на рис. 1.5, належать до зношування закріпленими абразивними частинками й не можуть повною мірою описати складні механізми абразивного зношування, що відбуваються під час зношування сталюї поверхні в ґрунті. Абразивна частинка в ґрунті, яка взаємодіє з поверхнею робочого органу, може бути закріплена з одного, двох або трьох боків, тобто мати різні ступені свободи, що істотно впливає на механізми, які протікають на поверхні тертя.

Характеристика зв'язаного стану частинок – це як відомо ступінь закріпленості абразиву, що в низці випадків є провідним фактором зношування [56]. Наприклад, у важких дискових боронах передній ряд дисків зношується в 1,5...2 рази швидше, ніж задній, що, найімовірніше, пов'язане зі зменшенням ступеня закріпленості абразивних частинок у ґрунті, який обробляється заднім рядом дисків, оскільки інші фактори зношування для обох рядів дисків однакові [50]. Для визначення ступеня закріпленості абразиву необхідна відповідна шкала, яка на сьогодні не розроблена.

Відповідно до «молекулярно-механічної» теорії механізм абразивного зношування складається з 3 етапів [57, 58], представлених у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Принципова схема руйнування матеріалів у процесі абразивного зношування [58]

Етапи руйнування поверхні		Процеси
1. Проникнення абразивної частинки		1. Взаємодія абразивної частинки з поверхнею. 2. Локальне пружно-пластичне відтискування поверхневого шару металу з утворенням навалок.
2. Переміщення абразивної частинки		1. Зародження і збільшення мікротріщин. 2. Зародження і збільшення мікротріщин. 3. Відрив поверхневого шару від основної частини металу.
3. Відокремлення частинки зносу		1. Утворення валика з деформованого матеріалу. 2. Пластичне відтискування валика абразивною частинкою. 3. Зріз металу й утворення частинки зносу.

Викликає сумнів окреме протікання першого та другого етапів руйнування матеріалів у процесі абразивного зношування робочих органів у ґрунті. Більш імовірним під час зношування робочих органів, які працюють у ґрунті, є одночасне протікання першого та другого етапів, де процес проникнення і переміщення відбувається одночасно, про що може свідчити зміна ширини й глибини одиничної канавки на поверхні робочих органів.

У процесі абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин перед виникненням першого етапу можливе протікання й інших етапів, які можуть як зміцнювати робочу поверхню (наклеп частинками, що не проникають у поверхню через різні фактори), так і знижувати абразивну зносостійкість (взаємодія з патокою коріння, яка містить гліцин та аспірин, які сприяють окислювальному розчиненню сталі [59, 60]). Тому цю схему руйнування матеріалів під час процесу абразивного зношування робочих органів у ґрунті (табл. 1.3) можна зарахувати тільки до одного окремого випадку.

Механізм зношування робочих органів ґрунтообробних машин прямо залежить від розміру абразивних частинок у ґрунті та ступеня їхнього закріплення, на що яскраво вказує зміна шорсткості поверхні лемеша плуга в процесі експлуатації на ґрунтах із різним середнім розміром абразивних частинок. Зокрема, під час експлуатації лемешів на ґрунтах які містять більше дрібних абразивних частинок, показники шорсткості становили $R_a=0,8$ мкм, $R_t=6,86$ мкм, $R_v=4,78$ мкм, $R_p=2,32$ мкм, а при збільшенні відсотка крупних фракцій абразивних частинок $R_a=1,13$ мкм, $R_t=10,50$ мкм, $R_v=7,60$ мкм і $R_p=2,74$ мкм [61].

Під час експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин у ґрунті шорсткість металевої поверхні змінюється й прагне до певного стабільного значення. Інколи поверхня робочого органу буде вигладжуватися, а інколи вихідна гладка поверхня ставатиме шорсткою, що зі свого боку буде залежати від переважальних механізмів зношування (полідеформаційного руйнування чи зняття мікростружки). У процесі експлуатації робочих органів у ґрунті

зношування їхньої поверхні відбувається за наявності двох механізмів зношування поверхні, наведених вище. Переважання одного з двох механізмів зношування залежить від характеристик абразивної маси (розмір абразивних частинок, коефіцієнт форми абразивних частинок, ступінь закріплення абразивних частинок, вологість тощо), з якою взаємодіє кристалічне тіло, від умов експлуатації (швидкість відносного переміщення та тиск на поверхні тертя) та фізико-механічних властивостей кристалічного тіла. Абразивна маса так само змінює геометричні параметри абразивних частинок, зокрема після циклічної взаємодії абразивних частинок із поверхнею кристалічного тіла частинки округлюються, що призводить до зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок.

Кількість вакансій (точкових дефектів) під час тертя в тонкому приповерхневому шарі (кристалічного тіла) доходить до $2,5 \times 10^{21}$ атомів/см³. У звичайних умовах не більше 10^{18} - 10^{19} атомів/см³ [62]. Вплив наявності вакансій на процес зношування залишається не вивченим до цього часу, адже більшість дослідників приділяють увагу аналізу впливу лінійних та об'ємних дефектів на процеси тертя і зношування. Виникнення лінійних дефектів (дислокацій) суттєво впливає на механізм зношування. У процесі тертя в поверхневому шарі наявність дислокацій невелика, основне їх скупчення відбувається на певній глибині від поверхні. Велике їх скупчення призводить до утворення тріщин, які розміщені паралельно до поверхні зношування. Коли тріщини досягають критичного значення, відбувається відокремлення продуктів зношування [62].

Експериментальні дослідження Б. І. Костецького засвідчили, що в зоні тертя металевих сплавів утворюються структури, відмінні від структури основного елемента трибосистеми як за фізико-механічними властивостями, так і за хімічним складом [63]. Такі поверхневі шари зі зміненою структурою елементів трибосистеми прийнято називати вторинними структурами (дисипативними структурами, які формуються під час тертя). Поверхневий шар, який бере участь у терті, на думку Л. М. Рибаківа – це новий стан речовини, віддалений від рівноваги і нестійкий, що породжено потоком вільної

енергії і призводить до нових типів організації матерії за точкою нестійкості; він виникає внаслідок обміну енергією і речовиною з навколишнім середовищем [64].

Стальний лист для виготовлення робочих органів дискових ґрунтообробних та посівних машин, які виробляють світові лідери («Bellota», «Case»), прокатується у двох перпендикулярних напрямках, а диски підлягають складній термо- та дробоструминній обробці. Термообробка робочих органів спрямована на усунення внутрішніх напружень як у внутрішніх шарах, так і на поверхні металу. Хоча деякі дослідники експериментально підтвердили, що наявність напружень стискання позитивно впливає на зносостійкість сталей. Незважаючи на досить складну обробку, поверхневий шар робочих органів знаходиться далеко від аморфного стану (шару Бейльбі). Після виготовлення робочий орган (переважно) покривають захисним покриттям для недопущення окиснення та утворення поверхневих плівок, але вже в перші хвилини експлуатації цей шар зникає і на поверхні робочих органів починають утворюватися поверхневі плівки. Такі плівки мають відмінні від основного металу властивості, що підтверджено багатьма дослідженнями. Зокрема, проаналізувавши велику кількість праць В. М. Кащєєв зробив наступний висновок «...ослаблений шар, на думку дослідників – природно утворюваний на будь-якій поверхні твердого тіла шар, що має менший опір пластичній деформації і більш низьку межу пружності, ніж шари, які лежать глибше кількох розмірів кристалів того самого складу. Той факт, що поверхня металу має особливі властивості, беззаперечний» [65]. У процесі взаємодії поверхні металу з ґрунтом, унаслідок взаємодії робочої поверхні з абразивною масою відбувається постійне руйнування (мікрорізання, полідеформаційне руйнування), видалення та утворення нових поверхневих плівок. Особливість утворення нових поверхневих плівок – їх суттєва відмінність за фізико-механічними та хімічними властивостями від попередніх та за площею поверхні робочого органу. Це зі свого боку зумовлено відмінними зовнішніми чинниками, які діють на різні зони поверхні робочого органу (тиск, швидкість,

хімічний, фізичний і механічний склад абразивної маси та ін.). Механізм утворення таких плівок досі залишається не вивченим, оскільки він є складним, а самі плівки нестабільні. Установлення закономірностей утворення поверхневих плівок, визначення їхніх фізико-механічних та хімічних властивостей залежно від зовнішніх чинників дозволить з іншого боку подивитися на проблему підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних і посівних машин.

Під час тертя внаслідок зовнішніх дій на поверхні металу виникають певні зміни в кристалічній решітці, що зрештою призводить до зміни властивостей поверхневого шару. Унаслідок таких змін виникають усім відомі дефекти кристалічної решітки (точкові, лінійні, групи лінійних дефектів, їхні кластери), які спричиняють прискорення процесів дифузії.

Першим хто математично описав процес дифузії був відомий німецький вчений А. Фік [66], виходячи з гіпотези, що в ізотропному середовищі кількість дифузійної речовини Q , що переходить за одиницю часу через одиницю площі поперечного перерізу, пропорційна градієнту концентрації, який вимірюється по нормалі до цього перерізу (перший закон Фіка):

$$Q = -D \partial c / \partial x, \quad (1.1)$$

де D – коефіцієнт дифузії;

c – концентрація дифузійної речовини;

x – координата.

Описуючи дифузію в багатокомпонентних металевих системах, доцільно використовувати узагальнений закон Фіка: дифузійний потік кожного компонента – це лінійна функція всіх концентрованих градієнтів, тобто [66]:

$$I_i = - \sum_k D'_{ik} \partial c_k / \partial x \quad (i=1, 2, \dots), \quad (1.2)$$

де D'_{ik} – коефіцієнт дифузії, є функцією c_k .

Дифузійні процеси в стаціонарних системах добре вивчені, чого не можна сказати про дифузійні процеси в динамічних системах тертя, дослідження яких пов'язані зі значними експериментальними й теоретичними складнощами. Такі труднощі зумовлені тим, що структура металевих систем формується внаслідок складної сукупності процесів, які відбуваються під час тертя і викликані високим рівнем напружень, впливу навколишнього середовища, значними об'ємними та поверхневими температурами й температурними градієнтами.

Здебільше процеси поверхневої дифузії в металевих сплавах експериментально досліджені під час тертя двох металевих сплавів з мастильним матеріалом та без нього (особливу увагу дослідники приділяли дифузії в мідних сплавах і сплавах Fe-Fe₃C). Процес дифузії в металевих сплавах, які працюють в абразивній масі (один з елементів трибосистеми – абразивна маса) узагалі залишається не вивченим. Установлення закономірностей цього процесу ускладнюється гетерогенною структурою ґрунту, відмінним хімічним складом різних типів ґрунтів та динамічністю процесу дифузії на поверхні металевого сплаву. Дифузію в поверхневі шари металевого сплаву речовин з ґрунту в процесі тертя досить складно дослідити, оскільки після утворення локальний дифузійний шар швидко видаляється з поверхні тертя внаслідок механічної складової процесу абразивного зношування. Видалення шару, що утворився в процесі дифузії, пов'язане із зменшенням зносостійкості утворених вторинних структур порівняно із зносостійкістю основного металевого сплаву [67].

Тертя об ґрунт поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин характеризується малими питомими тисками частинок ґрунту на них та їхньою сприятливою геометричною формою з відсутністю різальних кромek. Завдяки цьому створюються умови, за яких не може відбуватися механічне руйнування поверхні тертя відбуватись не може.

У таких умовах дія абразивних частинок викликає інтенсивну мікропластичну деформацію поверхневих шарів, що сприяє виникненню окиснювального зношування. Однак останнє при цьому характеризується

виключно високою інтенсивністю, яка набагато перевищує інтенсивність звичайного окиснювального зношування, що виникає під час роботи трибоспряжень [63].

Огляд показує, що на поверхні тертя робочих органів ґрунтообробних машин зношується не основний метал, а окисна плівка. Такий високий темп розвитку й протікання окиснювального зношування пояснюється тим, що поверхня тертя працює в хімічно активному середовищі, взаємодія з яким за одночасного протікання мікропластичних деформацій сприяє інтенсивному утворенню окисних плівок, які мають невисоку механічну міцність і легко руйнуються абразивними частинками.

У процесі експлуатації температура поверхні робочих органів ґрунтообробних машин значно підвищується. Зокрема, у праці П. Костецькі та П. Боровяк встановлено, що температура збільшується до 42,6–47,3 °С [68]. Вона не є критичною і не може суттєво впливати на механізм і природу зношування.

Властивості фрикційного контакту істотно впливають на процеси тертя та зношування, оскільки внаслідок дискретності контакту торкання виступів відбувається тільки на окремих ділянках, які утворюють фактичну зону контакту. Фрикційну взаємодію двох твердих тіл вивчали: Ф. П. Боуден, Д. Тейбор, Д. М. Демкін, Д. Баклі, А. В. Бєлий, І. В. Крагельський, І. Г. Горячева та ін., саме тому це питання якісно розкрито в сучасній літературі. В той же час питання взаємодії твердого тіла з дисперсним середовищем, а особливо з реальною ґрунтовою масою залишається не розкритим.

Коефіцієнт тертя важлива характеристика фрикційного контакту двох тіл. В класичних та більшості сучасних роботах [69–75] коефіцієнт тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів розглядають тільки з механічної точки зору. Такий однобічний підхід не дозволяє об'єктивно описувати процеси, що протікають на поверхні тертя. Урахування всіх факторів під час визначення

коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин дасть змогу більш якісно проводити проектування сільськогосподарських машин.

Розглядаючи фрикційну взаємодію двох тіл, необхідно спочатку розглянути фрикційні властивості елементів трибосистеми. У нашому випадку це ґрунт і поверхня робочого органу ґрунтообробних машин. Особливістю цієї трибосистеми є те, що для робочого органу ми розглядаємо тільки поверхню, а для ґрунту – весь об'єм, оскільки в процесі функціонування системи «робочий орган – ґрунт» відбувається постійне перемішування ґрунту і взаємодіяти з поверхнею робочого органу можуть об'єми ґрунту, які на початку функціонування трибосистеми знаходилися на певній відстані від поверхні робочого органу.

Фрикційні властивості ґрунту виявляються в дії сили опору ковзанню тіла (робочого органу, опорної поверхні тощо) щодо поверхні ґрунту – сили зовнішнього тертя та в дії сили опору ковзанню однієї частини ґрунту щодо іншої – сили внутрішнього тертя. У класичних працях для визначення сили зовнішнього тертя ґрунту запропоновано використовувати формулу Амонтона-Кулона:

$$F_T = fN = Ntg\varphi \quad (1.3)$$

Як відомо, ця залежність не враховує молекулярної складової процесу тертя, яку обов'язково необхідно враховувати під час проектування робочих органів ґрунтообробних машин, оскільки молекулярна складова займає значне місце в процесі тертя ґрунтової маси й робочої поверхні ґрунтообробних машин [76–77]. Саме тому математичне моделювання процесів, що відбуваються у фрикційному контакті твердого тіла та ґрунту з урахуванням всіх явищ і процесів у зоні контакту, становить інтерес для сільськогосподарського машинобудування.

Протягом року робочі органи ґрунтообробних машин експлуатують доволі короткий термін, неробочий період становить близько 90% (за даними

корпорації «Сварог Вест Груп»). У сільськогосподарському виробництві використовуються такі способи зберігання ґрунтообробних машин: на відкритих майданчиках (з асфальтованим, гравійним, бетонним, ґрунтовим та трав'яним покриттям); під навісом (з бетонним, асфальтованим та гравійним покриттям); у закритих приміщеннях (опалювальні та неопалювальні з бетонним та асфальтованим покриттям). Останній спосіб не набув широкого розповсюдження, оскільки потребує додаткових капіталовкладень. У процесі зберігання робочі органи ґрунтообробних машин піддаються атмосферній корозії і після відновлення експлуатації таких органів інтенсивність їхнього зношування зростає. У зв'язку з цим захист від корозії необхідно розглядати як важливий фактор підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

1.3. Аналіз факторів, які впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин

Попередні дослідження констатують, що основною причиною втрати працездатного стану робочих органів ґрунтообробних машин є лінійний і масовий знос [42, 50, 78-87]. Саме тому основними чинниками, які впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів є ті, що визначають інтенсивність абразивного зношування.

Для визначення факторів, які впливають на інтенсивність зношування необхідно розглянути властивості складових трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Матеріал робочих органів ґрунтообробних машин – це сталь (рідко і тільки в дослідних масштабах чавун або інші сплави). Для виробництва робочих органів ґрунтообробних машин використовують сталі, представлені в табл. 1.4.

У більшості розвинутих та розвиваючих країнах в останні десятиріччя активно використовують низьколеговані сталі, загалом борвмісні та вуглецеві сталі з умістом вуглецю від 0,4 % до 0,7 % для виробництва робочих органів

грунтообробних машин. У працях [42, 50, 79, 84, 96, 98, 108] зауважено, що такі сталі не мають необхідної зносостійкості і необхідно продовжувати пошук методів підвищення довговічності та зносостійкості.

Таблиця 1.4

**Матеріали використовувані для виробництва робочих органів
грунтообробних машин**

Матеріал	Країна
Сталь 65Г, 70Г, 45, Л53, [30, 87–95], борвмісна сталь 28MnB5 та 30MnB5 [50], Hardox 500	Україна, Росія, Білорусія
Сталь EN C75S та EN 30MnB5 [96]	Швеція
Сталь AISI 15B30 [97]	Колумбія
Сталь 27MnB5 [98]	Німеччина
Сталі Hardox 500, B 27 і Raex 500 [99]	Польща
Сталь AISI 1085 та 10B30 [100]	США
Найбільш поширена сталь SAE 2955, також використовують SAE 1070, SS10/200, SAE 2955, SAE 1080, SS10/84, SS10/83, 10/44 [101]	ПАР
Сталь AISI 1070 [102] Сталь SAE 1080 [103]	Канада
Вуглецеві та низьколеговані сталі [104]	Хорватія
Сірий чавун, високо- та середньовуглецева сталь [105]	Греція
Сталь En-47 [106]	Індія
Сталь EN 10 083 (30 MnB5) [102, 103]	Туреччина
Сталі API 52, K110 і M238 [109]	Єгипет

Незважаючи на те що ґрунт є агресивним абразивним середовищем, як елемент трибо системи, його розглядають доволі рідко. Вплив характеристик ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин розкрито не повною мірою. Характеристики, які впливають на інтенсивність

зношування, представлено на рис. 1.6. Найбільший внесок у вивчення ґрунтового середовища як елемента трибосистеми зробив М. М. Северньов [80, 81]. Висока абразивна здатність ґрунтового середовища пояснюється наявністю в ньому частинок (кварц, слюда та ін.) з високою міцністю та високою енергією їх руйнування. Зокрема, за даними А. В. Чічінадзе енергія розриву для ковалентних зв'язків (якими володіють абразивні частинки кварцу та слюди) становить $E_{nom\ min}=9...7,5$ эВ, а для металевих зв'язків цей показник становить $E_{nom\ min}=3...2$ эВ [110].

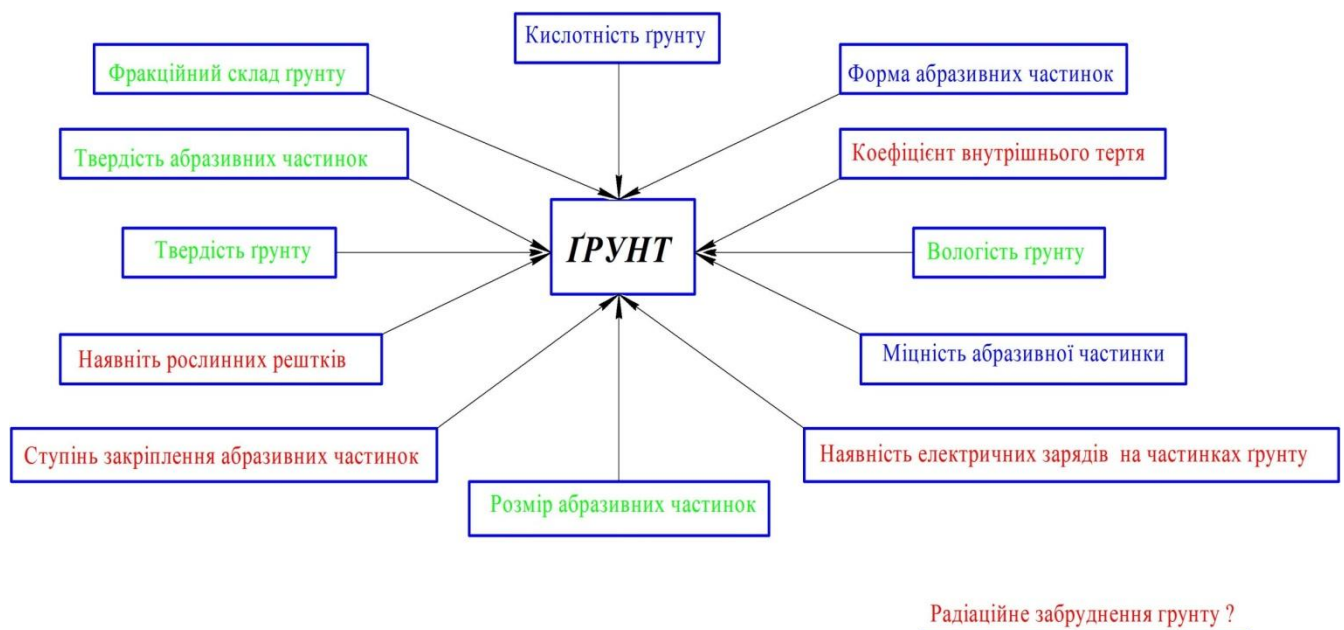
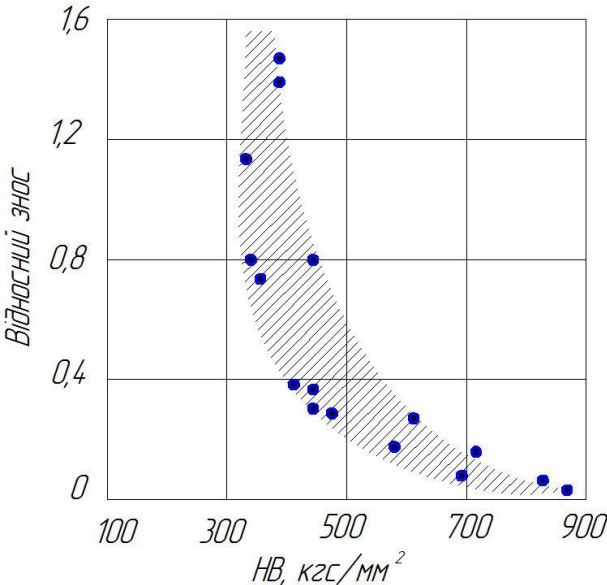


Рис. 1.6. Характеристики середовища ґрунту

Інтенсивність зношування залежить як від характеристик робочих поверхонь елементів трибо системи, так і від умов експлуатації. В табл. 1.5 зібрані характеристики елементів трибосистеми «робочий орган – ґрунт», які суттєво впливають на протікання процесу зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

**Фактори, які впливають на інтенсивність зношування робочих органів
грунтообробних машин, що працюють в умовах абразивного зношування в
напівзакріпленому абразивному середовищі (нежорстко закріплені
абразивні частинки)**

Характеристика	Вплив на процес зношування
Робочий орган	
Твердість	<p>1. Висока твердість основна передумова для ефективного металевого матеріалу, спроможного чинити опір абразивному зносу, але немає лінійної залежності між твердістю і зносостійкістю. Коли твердість досягає певного значення, підвищення зносостійкості можна досягнути тільки завдяки раціональному узгодженню твердості і в'язкості з поліпшенням ударної в'язкості [111].</p> <p>2. З рис. 1.7 видно, що більшу зносостійкість мають матеріали з більшою твердістю. Криві, які описують залежність відносного зносу від твердості матеріалу, мають форму, близьку до гіперболи.</p>  <p>Рис. 1.7 Залежність відносного зносу від твердості матеріалу при постійній твердості абразивних частинок [112]</p>

2. У праці Е. Здравецької зазначено, що очікування функції збільшення зносостійкості із збільшенням твердості під час досліджень не спостережено [113] рис. 1.8.

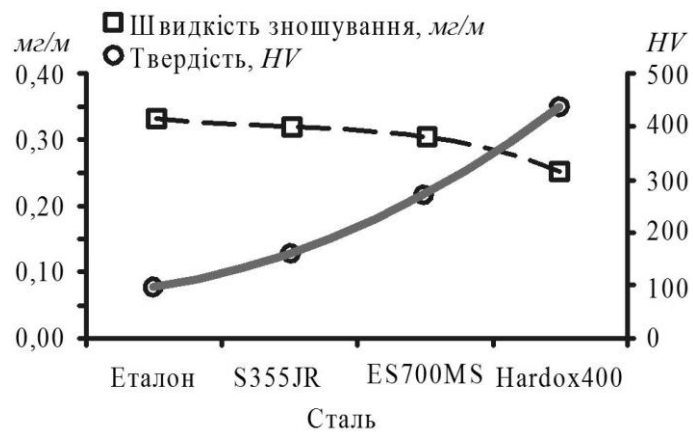


Рис. 1.8. Відносна зносостійкість і твердість сталі

Наявна концепція основана на гіпотезі про те, що стійкість до стирання має пропорційну залежність із твердістю. Однак різні експериментальні спостереження припускають, що висока твердість мартенситу не гарантує високу стійкість до абразивного зношування, якщо порівнювати зі сталями з меншою відносною твердістю, але з кращою пластичністю/в'язкістю.

Твердість – важлива властивість первинної структури, яка визначає величину зносостійкості матеріалу. Однак в екстремальних умовах тертя твердість мікрооб'ємів може змінювати своє значення, порівнюючи з твердістю первинної структури. Унаслідок пластичної деформації, що протікає в процесі тертя і за умови переважання тим часом над тепловою дією, поверхневий шар полікристалічного тіла наклепується, підвищується межа текучості та міцності й твердість. Дослідним шляхом встановлено, що за одних і тих самих умов тертя (навантаження, швидкості, температури,

	<p>тривалості навантаження та інших чинників), коли швидкість деформації переважає над термічними процесами, метал на поверхні тертя додатково наклепується та підвищує свою зносостійкість. Попереднє зміцнення поверхневих шарів металу механічною обробкою може сприяти підвищенню його зносостійкості, а за інших умов може не тільки бути марним, але й прискорювати процес зношування [83].</p>
Хімічний склад	<p>Зносостійкість нелегованих сталей має найбільшу стійкість до абразивного зношування при вмісті вуглецю 0,6...0,7%. У легуваних сталях уміст вуглецю не є визначальним фактором, який впливає на стійкість до абразивного зношування. Суттєво зменшує інтенсивність абразивного зношування залізовуглецевих сплавів легування їх хромом, марганцем, вольфрамом, бором та ніобієм [114–119].</p> <p>Численні експериментальні дані підтверджують, що зносостійкість сплавів на залізній основі загалом зростає зі збільшенням умісту вуглецю (рис. 1.9) [48, 120]. Це пояснюється зміцненням аустеніту, підвищенням твердості мартенситу, збільшенням об'єму карбідів у високовуглецевих сталях і чавунах, збільшенням об'єму перліту або мартенситу в доєвтектоїдних сталях зі збільшенням умісту вуглецю. З'ясовано, що знос прямо залежить від умісту вуглецю тільки в межах від 0 до 0,8% [120]</p>

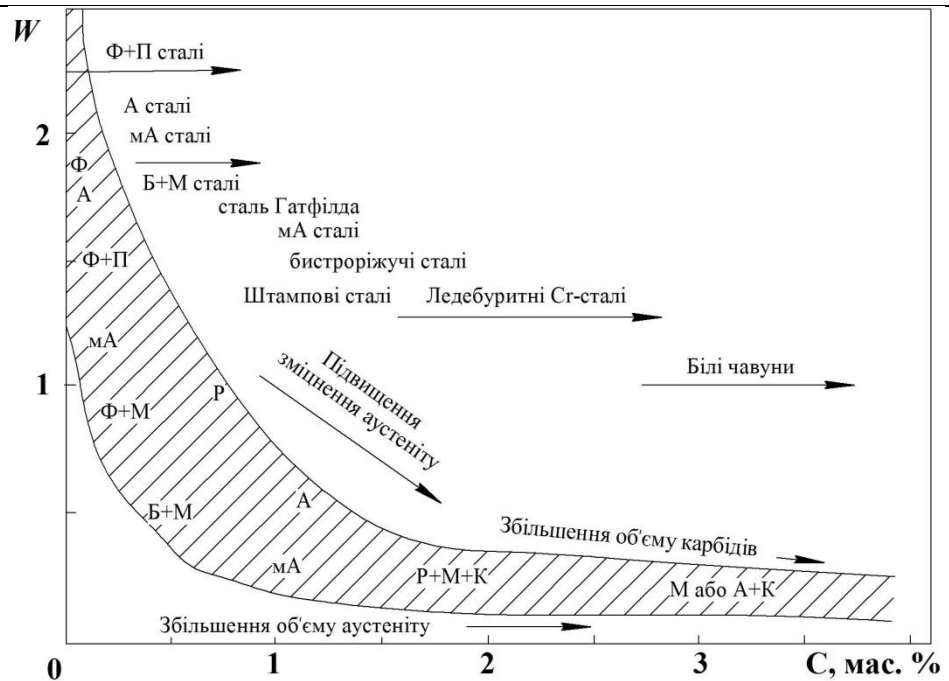


Рис. 1.9. Залежність відносної величини зносу W різноманітних сплавів на залізній основі від умісту вуглецю C : А – аустеніт; мА – метастабільний аустеніт; Б – бейніт; К – карбіди; М – мартенсит; П – перліт; Φ – ферит [48]

Параметри
мікроструктури

Твердість і хімічний склад не завжди вирішальні фактори зносостійкості сталей, тому можливо зменшити знос на 20–30%, а у деяких випадках у 2-3 рази тільки завдяки зміні параметрів мікроструктури [114]. На основі аналізу досліджень можна зробити висновок, що вони вивчали вплив конкретної складової мікроструктури (величина зерна, щільність дефектів, довжина меж зерен, форма та розмір карбідів, кількість аустеніту або фериту тощо [121–133] на інтенсивність зношування, проте не враховано всього комплексу, що впливає на утворення мікроструктури [114].

У роботі М. М. Брикова стверджується, що для умов абразивного зношування без нагріву порівняльний ряд зносостійкості можливих фаз металевої основи нелегованих залізовуглецевих сплавів виглядає таким чином: ферит –

мартенсит – аустеніт (в порядку збільшення зносостійкості). Висока зносостійкість аустеніту зумовлена спільними процесами фазових перетворень у поверхневому шарі й механічного наклепу до гранично можливого стану [130].

Загалом абразивна стійкість збільшується в напрямку: ферит \rightarrow ферит + сфероподібний цементит \rightarrow ферит + пластинчастий перліт \rightarrow перліт \rightarrow мартенсит + цементит \rightarrow мартенсит [120]. При однаковій твердості аустеніт має кращий опір зношуванню, порівняно з ферито-перлітом, а бейніт кращий, ніж мартенсит-цементит (опущений мартенсит). На рис. 1.10 показано вплив мікроструктури та твердості сталей на зношування у високонавантаженому абразивному процесі [120].

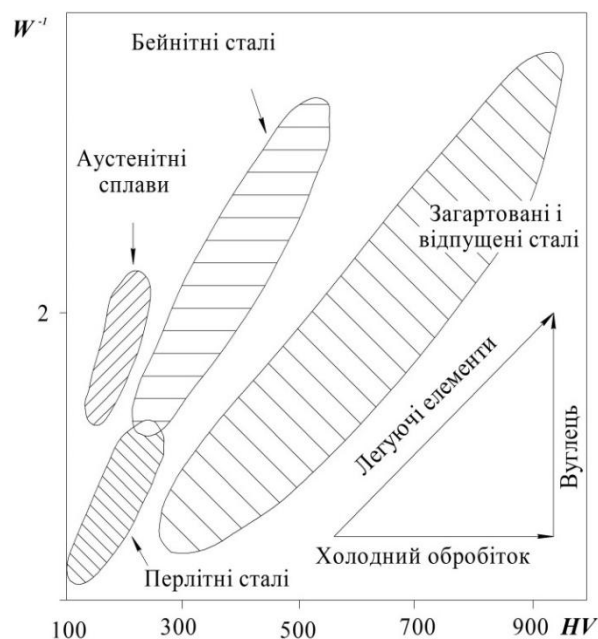


Рис. 1.10. Залежність відносної зносостійкості W^{-1} від мікроструктури й твердості HV сталей [134]

Попередня
корозія

Фундаментальні дослідження впливу попередньої атмосферної корозії на інтенсивність абразивного зношування сталі проведені М. М. Северньовим. Експерименти, проведені на сталях (Ст. 3, сталь 45 та сталь

	65Г), показали суттєве зменшення зносостійкості сталей унаслідок атмосферної корозії. Результати досліджень інтенсивності зношування сталей після 20 місяців атмосферної корозії дозволили зробити висновки, що за умови закритого зберігання знос збільшується у 2,1...2,3 раза, на відкритому майданчику над ґрунтом – у 3,8...5,3 раза і на поверхні ґрунту – у 3,2...6,8 раз [81].
Ґрунт	
Механічний склад ґрунту	<p>1. В працях [135, 136] зауважено, що чим більше в ґрунті часточок піску розміром 0,25...1,0 мм, тим більше абразивне зношування металу, що взаємодіє з ґрунтом. У цьому процесі велику роль відіграють тверді мінерали – кварц, твердість якого вища за твердість лемішної сталі й досягає 8...11 Гпа.</p> <p>2. Визначальним показником, який впливає на зношувальну здатність ґрунтів, є процентний уміст у ґрунті кварцових частинок (>0,01 мм) фізичного піску. Чим більше їх у ґрунті, тим сильніше він зношує леміш. Для ґрунтів Лісостепу України встановлена математична залежність впливу вмісту кварцових частинок фракції 0,25...1,00 на знос лемеша:</p> $u = 99,5 + 24,39k \quad (1.4)$ <p>де k – процентний уміст у ґрунті кварцових частинок фракції 0,25...1,00 мм, u – знос.</p>
Вологість ґрунту	<p>1. У роботах [135, 136, 137] наголошено на тому, що вологість суттєво впливає на інтенсивність зношування. За оптимальної вологості ґрунту, коли питомий опір під час його обробітку мінімальний, спостерігається найменше абразивне зношування металу. У піщаних та супіщаних</p>

грунтах, де мало глинистих часточок, основну сполучну роль відіграє волога. Для цих ґрунтів існує «пори́г» вологості, за якого вони мають максимальну абразивність. За межами «порога» вологості ґрунту абразивність його зменшується. Дослідні дані засвідчують, що глинисті та суглинкові ґрунти мають найменшу абразивну здатність за абсолютної вологості 14...18%. Супіщані ґрунти виявляють максимальну абразивну здатність за абсолютної вологості 14 %. У разі збільшення чи зменшення вологості абразивна здатність ґрунту послаблюється. За абсолютної вологості ґрунтів 9...10 % їхня абразивна здатність найменша..

2. Фундаментальні дослідження впливу вологості на зношувальну здатність ґрунтів провели С. П. Васильєв і Л. С. Єрмолов в 1960 році [112]. У наслідок чого отримана графічна залежність, представлену на рис. 1.11.

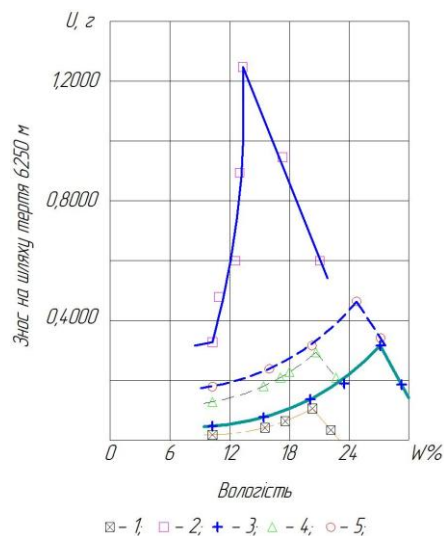


Рис. 1.11. Залежність зношувальної здатності ґрунтів від вологості: 1 – темно-сірий слабоопідзолений, середньоглинковий на лісному суглинці; 2 – чорнозем звичайний супіщаний на глинистому піску; 3 – чорнозем легколиняний на карбонатному лісовидному суглинці; 4 – темно-сірий

У всіх випадках із підвищенням вологості спостерігалось підвищення зношувальної здатності до певних меж, характерних для кожного з видів ґрунту, після чого зношувальна здатність починала різко зменшуватися внаслідок переходу ґрунту в консистентний стан.

3. М. М. Северньов у лабораторних умовах визначив вплив вологості ґрунту на інтенсивність зношування сталених зразків (рис. 1.12) [80, 81].

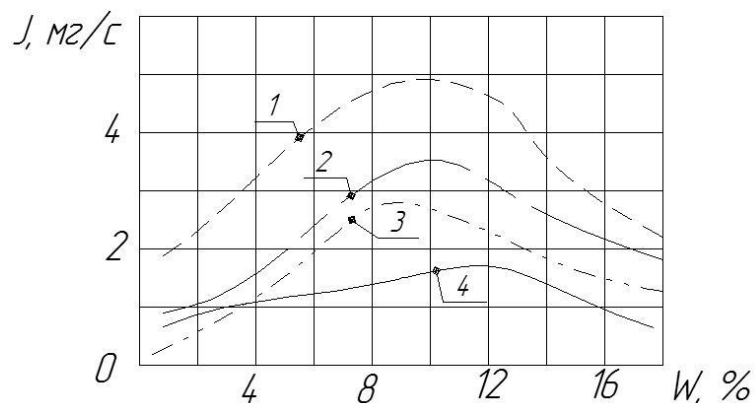


Рис. 1.12. Залежність інтенсивності зношування від вологості ґрунту: 1 – піщаний; 2 – супіщаний; 3 – суглинок легкий; 4 – глиняний

У глиняних ґрунтах волога відіграє роль мастила на поверхні тертя. Якщо врахувати, що зношування тут – процес, за якого руйнування і знос матеріалу, що утворює фрикційний зв'язок, відбувається внаслідок багаторазового його руйнування, то стане очевидним, що із збільшенням вологості сили фрикційних зав'язків зменшуються, відповідно, зменшується знос найменших об'ємів металу з поверхні тертя. Цим пояснюється поступово змінюваний характер кривих залежності зношування від вологи зі зміною їх механічного складу [80, 81].

4. Е. Рабінович стверджує, що підвищення вологості

грунту призводить до підвищення інтенсивності зношування сталі на 10...20 % [138].

5. Автори роботи «The Influence of Soil Type, Soil Water and Share Sharpness of a Mouldboard Plough on Energy Consumption, Rate of Work and Tillage Quality» виявили, що зміна вологості ґрунту має різний вплив на інтенсивність зношування робочих органів плуга залежно від типу ґрунту [139] (рис. 1.13).

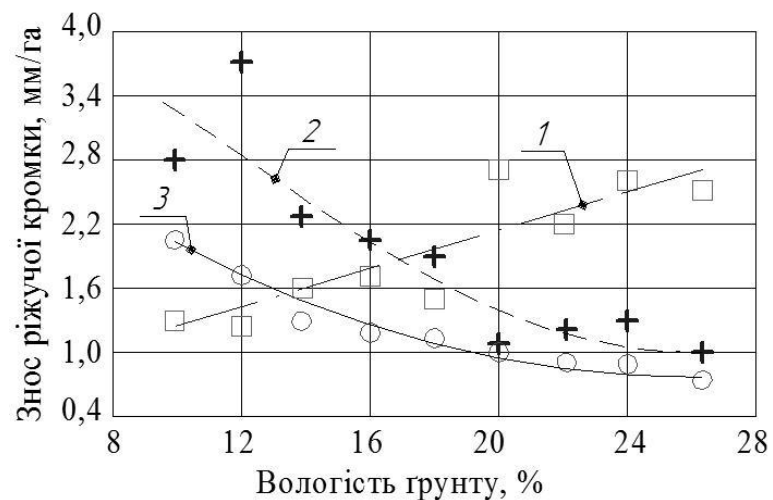
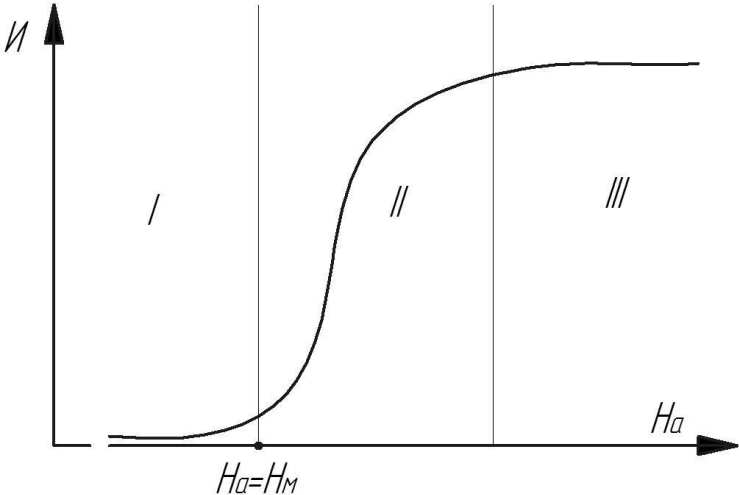
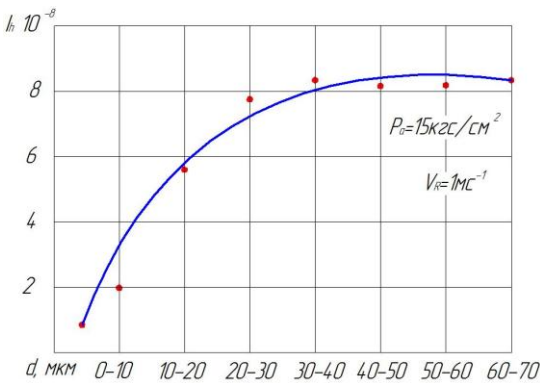


Рис. 1.13. Вплив вологості ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин

У процесі експлуатації робочих органів плуга на суглинкових і глиняних ґрунтах спостерігалось зменшення інтенсивності зношування на відміну від експлуатації на піщаних ґрунтах. Таке явище можна пояснити можливістю суглинкових ґрунтів більшою мірою поглинати вологу, яка потім діє як мастило [139].

6. У праці Дж. Сінгха, Чаза С. С. та Б. С. Сідху встановлено, що на глинистих і суглинкових ґрунтах зі зростання вологості інтенсивність зношування зменшується, а на піщаних і супіщаних навпаки – зростає [140].

Кам'янистість ґрунту	<p>1. При вмісті кам'янистих включень у ґрунті від 5,17% до 7,25% знос у 3,1 раза вищий порівняно із чистими від кам'янистих включень ґрунтами [141].</p> <p>2. Ґрунти із включеннями валунів і гальки кристалічних порід за наявності достатньої кількості зв'язуючих елементів (фізичної глини) і підвищеної вологості володіють самою високою зношувальною здатністю [142].</p>
Твердість абразивних частинок	<p>1. Вплив твердості абразивних частинок H_a на зношування матеріалу H_m зображено на рис. 1, де можна виділити 3 зони. У зоні I що відповідає умові $H_a/H_m < F_1$, $0,7 < F_1 < 1,1$ абразивне зношування не відбувається, хоча знос матеріалу можливий. У цій області здійснюється інше зношування, наприклад утомлювальне, яке зазвичай характеризується значно меншою інтенсивністю. У зоні II, що відповідає умові $F_1 < H_a/H_m < F_2$, $1,3 < F_2 < 5,5$, відбувається абразивне зношування, величина зносу при якому залежить від співвідношення H_a/H_m. У зоні III, де $F_2 < H_a/H_m$, знос буде великим і стабільним, що не залежить від H_a/H_m [53].</p>  <p>Рис. 1.14. Залежність зношування матеріалу від твердості абразивних зерен за Ваалем [143]</p> <p>2. М. М. Тененбаум підкреслював, що твердість</p>

	абразивних частинок визначає їхню здатність проникати в поверхневий шар металу й оцінюється співвідношенням значення мікротвердості дослідного матеріалу H_m і абразиву H_a [144, 145].
Твердість ґрунту	<p>1. Із збільшенням твердості ґрунту його зношувальна здатність повинна підвищуватися внаслідок збільшення тиску в зоні контакту абразивної частинки та мікроділянки поверхні робочого органу [42].</p> <p>2. Збільшення твердості ґрунту призводить до інтенсифікації абразивного зношування [136].</p>
Ступінь закріплення абразивних частинок	В працях [135, 136] підкреслено, що велике значення для величини абразивності ґрунту має міцність фіксування (закріплення) зерен піску в ґрунтовій масі. У сухому ґрунті піщинки міцно закріплені, тут відбувається найінтенсивніше абразивне зношування металу.
Розмір абразивних частинок	<p>1. Ще в 1950 році К. Веллінгер опублікував результати досліджень впливу розміру абразиву на інтенсивність зношування (рис. 1.15) [146]. В ролі абразиву використано кварцовий пісок, дослідження проводили на установці Келя-Зибеля.</p>  <p>Рис. 1.15. Залежність інтенсивності зношування від величини зерна абразиву [146].</p> <p>За результатами дослідження встановлено, що після</p>

досягнення так званого критичного розміру абразивних частинок знос металу майже не залежить від величини абразивних частинок.

2. За отриманими в роботі І. С. Гончара даними ваговий знос зразків піщаними частинками величиною 0,45...0,75 мм у 2–3 рази більший, ніж знос зразків за тих самих умов піщаними частинками діаметром 1,0–1,5 мм [147].

3. В праці Дж. Дж. Коронадо проаналізовано проведені у світі дослідження впливу розміру абразивних частинок на інтенсивність зношування [148].

Для невеликих абразивів швидкість зношування збільшується пропорційно збільшенню розміру частинок абразиву до досягнення критичного розміру частинок (CPS). Після досягнення критичного розміру швидкість зносу змінюється. Рис. 1.16 підсумовує три типи поведінки, описані в літературних джерелах.

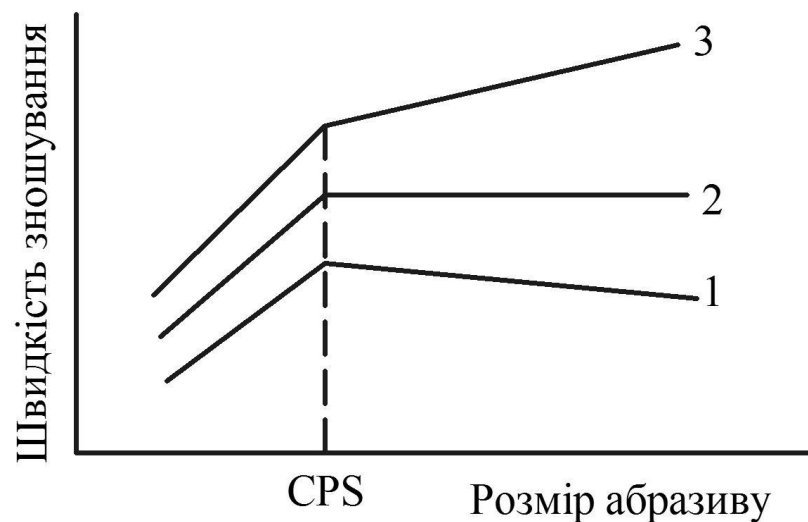


Рис. 1.16. Схематичне зображення залежності швидкості зношування від розміру абразивного зерна

Після CPS [148] можуть виникнути три явища:

швидкість зношування може збільшуватися з меншою швидкістю (крива 1), може стати постійною незалежно від подальшого збільшення розміру абразиву (крива 2), може демонструвати зниження швидкості (крива 3). Є багато гіпотез для пояснення цього явища, однак все ще немає жодного пояснення, яке було б загальноприйнятим серед усієї наукової спільноти.

Явище CPS відбувається під час зношування закріпленим абразивом, незакріпленим абразивом, у процесі ерозії та обробки.

На думку Дж. Дж. Коронадо невеликі абразиви мають менш округлу форму й можуть призводити до процесів мікроплавлення та мікрорізання. Водночас під час зношування великими частинками на перший план виходить пластична деформація. Підкреслено, що дослідження впливу розміру абразиву переважно проводили під час абразивного зношування закріпленим абразивом і ці результати не можна повною мірою використовувати в описуванні процесу зношування незакріпленим абразивом [148].

2. В дослідженнях І. Севіма [149] отримані результати підтверджують думку про зменшення зростання швидкості зношування після досягнення критичного розміру абразивних частинок (рис 1.17 та формула 1.4).

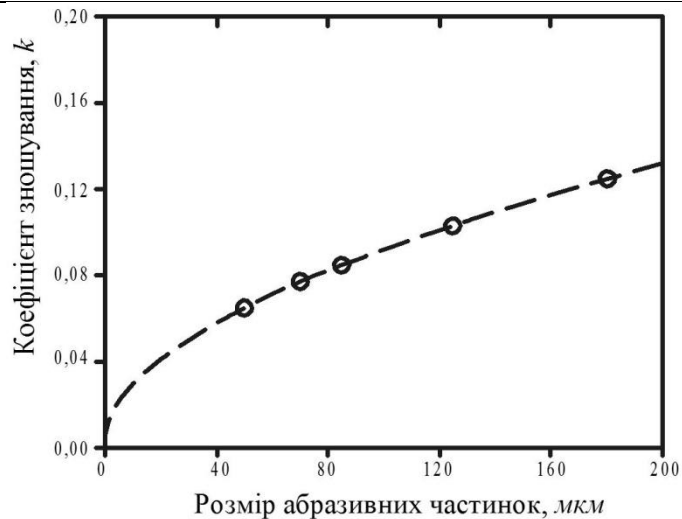


Рис. 1.17. Залежність коефіцієнта зношування k від розміру абразивних частинок d

$$k = 9,2 \times 10^{-3} \sqrt{d} \quad (1.5)$$

3. У роботі В. Є. Марчука проведено дослідження для визначення впливу розміру абразиву на інтенсивність зношування. Експерименти проводили в умовах нежорстко закріпленого абразиву (кварцовий пісок), з розмірами 50–70 мкм, 150–170 мкм та 315–500 мкм. Мінімальну абразивну здатність мав абразив розміром 315–500 мм, максимальну 50–70 мм (рис. 1.18) [150].

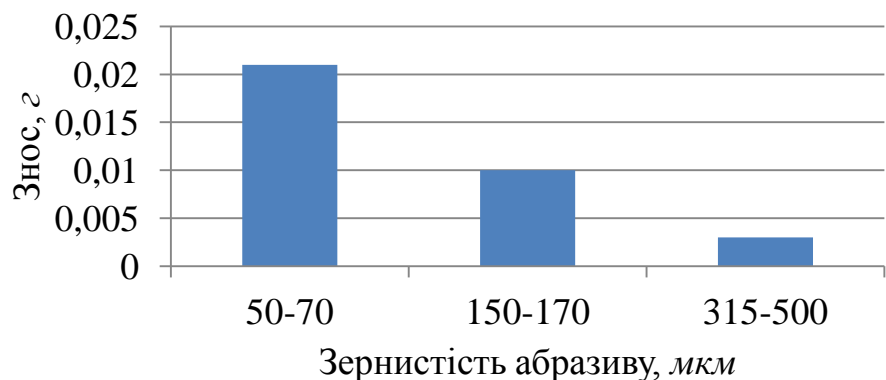


Рис. 1.18. Залежність зношування дискретних поверхонь в умовах абразивного зношування від зернистості абразиву [150]

<p>Форма абразивних частинок</p>	<p>1. Ю. А. Тадольдер у 1966 році запропонував оцінювати коефіцієнт форми абразивних частинок за математичною залежністю [151]:</p> $K_{\phi} = \frac{n_{cp}}{R_{cp}}, \quad (1.6)$ <p>де n_{cp} – середня кількість виступів, R_{cp} – середній радіус заокруглення вершини кута.</p> <p>2. Для оцінки впливу форми абразивних частинок приблизно однієї фракції М. М. Тененбаум запропонував критерій, названий коефіцієнтом форми [56]:</p> $K_{\phi} = \frac{M(n_i)M(D_i - d_i)}{M(R_i)}, \quad (1.7)$ <p>де $M(n_i)$, $M(R_i)$ і $M(D_i - d_i)$ – математичне очікування відповідно для числа вершин, їх радіусів і різниці діаметрів кіл, описаного навколо контуру та вписаного в контур зерна. Значення K_{ϕ} може змінюватися від 11 для округлих частинок і до 10 для гострокутних частинок розмірами 0,2...2 мм. Дослідження коефіцієнта форми різних матеріалів засвідчило що найбільш поширений у ґрунті абразив (кварц) має невеликий коефіцієнт форми: при розмірі фракцій 0,2...0,315 мм – K_{ϕ} буде становити 14,4; при 0,315...0,4 мм – $K_{\phi} = 9,9$; при 0,4...0,63 мм – $K_{\phi} = 8,4$; при 0,63...0,8 мм – $K_{\phi} = 6,85$; при 1,0...2,0 мм – $K_{\phi} = 1,97$ (результати представлені для кварцового піску з Люберецького кар'єру). Дослідним шляхом встановлено [56], що при $K_{\phi} = 11,25$ прямого руйнування матеріалу не відбувається незалежно від інших</p>
----------------------------------	---

характеристик абразивної маси.

3. Д. Б. Берштейн в праці «Макрогиометрия и изнашивающая способность почвенных абразивных частиц», формулу для визначення коефіцієнта форми абразивних частинок для зношування в ґрунтовій масі запропонував [152]:

$$K_{\phi} = \frac{M(N)}{M(r) \times M(B/L)} \quad (1.8)$$

де N – кількість виступів; r – радіуси виступів; L – найбільше значення поздовжнього розміру; B – найбільше значення поперечного розміру. В результаті досліджень з'ясовано, що з ростом коефіцієнта форми абразивних частинок (K_{ϕ}) зростає інтенсивність зношування (I_a) (рис. 1.19).

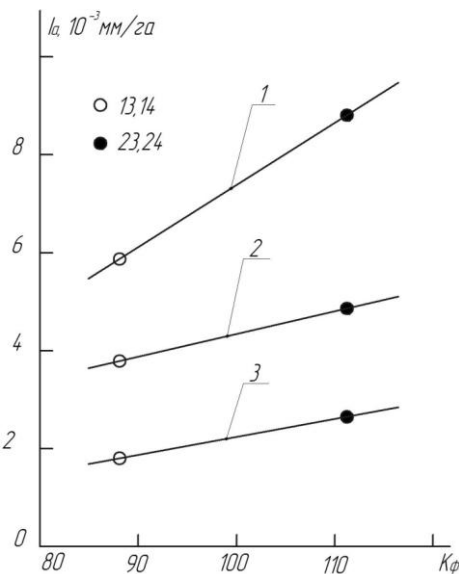
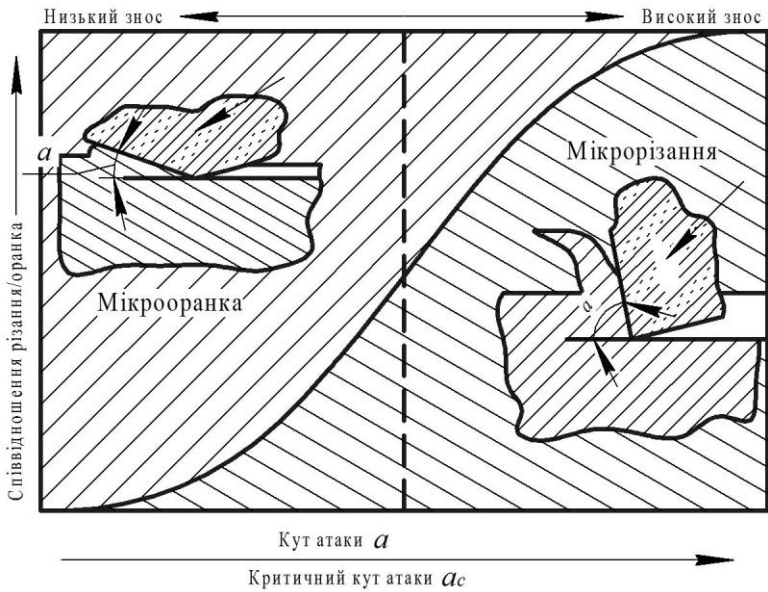


Рис. 1.19. Залежність інтенсивності зношування I_a лемешів плугів від коефіцієнта форми ґрунтових абразивних частинок K_{ϕ} . Матеріал лемеша – сталь Л-53: 1 – твердість 35–40 HRC, 2 – 45–50 HRC; 3 – лезо лемеша, наплавлене твердим сплавом ПГ-УС 25

4. У роботі [135] відзначено, що важливу роль на

	<p>інтенсивність зношування деталей, які працюють у ґрунті, відіграє форма якої набувають зерна кварцу в процесі природного утворення піску. Чим гостріші грані кварцових часточок у ґрунті, тим інтенсивніше абразивне зношування металу.</p> <p>5. Різна зношувальна здатність різних за величиною піщаних частинок пояснюється різною формою, різними різальними властивостями [149].</p> <p>6. В дослідженнях Г. Хормазді та ін. стверджується, що під час зношування в ґрунті основним чинником, який визначає інтенсивність абразивного зношування є відхилення від сферичної форми абразивної частинки[153] .</p>
Кислотність ґрунту	<p>У ґрунті завжди наявний невеликий процент кислот і солей (поварена сіль, хлористі солі кальцію, магнію, фосфати тощо), які розчиняючись у воді, значно підвищують активність адсорбційного середовища й полегшують процес диспергування матеріалу. Оцінка кислотності ґрунту числом рН недостатня, тому що здатність впливати на знос сталі залежить від природи речовин [81].</p>
Наявність електричних зарядів на частинках ґрунту	<p>Наявність електричного струму в зоні контакту двох контактних тіл призводить до зростання інтенсивності зношування [154, 155]. Такі дослідження були проведені під час тертя двох твердих тіл і не можуть повною мірою застосовуватися для робочих органів ґрунтообробних машин, які піддаються зношуванню в абразивній масі.</p>
Коефіцієнт тертя ґрунт-сталь	<p>Дослідження впливу коефіцієнта тертя ґрунт-сталь не проводилися, але виходячи із залежності коефіцієнта тертя від механічного складу, можна зробити висновок: чим більший опір ґрунту переміщенню робочого органу при</p>

	інших рівних умовах, тим менший знос останнього, тобто чим більший коефіцієнт тертя, тим менше абразивність ґрунту [42].
Наявність рослинних рештків	В праці [111] досліджено зрошувальну здатність різних сільськогосподарських культур (пшениця, кукурудза та люцерна), унаслідок чого встановлено, що абразивне зношування має «м'який» характер. Домінантним механізмом зношування для пшениці та кукурудзи є полірування, а для люцерни – мікрорізання.
Умови експлуатації	
Швидкість переміщення	<p>1. При зміні швидкості з 1,25 м/с до 3,33 м/с інтенсивність зношування лемеша зростає в 1,5...1,9 раза. Слід зауважити, що сучасні ґрунтообробні машини не працюють на маленьких швидкостях (1,25 м/с, 1,55 м/с та 2,22 м/с), тому результати випробувань на перших трьох швидкостях не потрібно враховувати. Виходячи з реальних умов експлуатації, зростання інтенсивності зношування знаходиться в межах 6...6,5%. Зміна швидкості призводить до зміни характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин, а саме до інтенсифікації зношування частин робочих органів, які першими взаємодіють із середовищем ґрунту [80, 81].</p> <p>2. У сучасних дослідженнях впливу швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів відсутні результати експлуатаційних досліджень, а автори обмежуються теоретичними [84, 86], лабораторними або стендовими дослідженнями [156]. Результати таких робіт не можна використовувати під час прогнозування інтенсивності зношування робочих органів</p>

	грунтообробних машин у реальних умовах експлуатації.
Питомий тиск (навантаження)	Дослідження засвідчили, що в межах питомого тиску $0,2 \dots 10,3 \text{ кг/см}^2$ інтенсивність зношування пропорційна тискові. Ріст інтенсивності зношування проходить повільніше, ніж тиску [80, 81].
Кут атаки абразиву до матеріалу	<p>1. У роботі «Effect of Abrasive Size on Wear» відзначено, що матеріал може бути відірваний від поверхні шляхом мікрорізання, коли кут атаки абразивних частинок вищий, ніж критичний кут атаки [148]. Поступовий перехід від мікроплавлення до мікророзрізання відбувається, коли кут атаки збільшується (рис. 1.20) [48]. Кут атаки (α) задається кутом, утвореним між поверхнею абразиву та поверхнею матеріалу.</p>  <p>Рис. 1.20. Коефіцієнт мікрорізання до мікрооранки як функція відношення кута атаки до критичного кута атаки (α)_c.</p> <p>2. Досліди з кварцовим піском показали, що кількість абразивних частинок, які попадають у контакт і знос поверхні тертя не збільшуються зі зменшенням кута входу α,</p>

	як цього можна було очікувати з аналізу зовнішніх сил. Інтенсивність зношування зростає зі збільшенням кута входу α від 30 до 60°, а потім знижується [157].
Умови зберігання	Зберігаючи ґрунтообробні машини, в умовах які сприяють інтенсифікації процесу поверхневої корозії, буде прискорюватися інтенсивність зношування їхніх робочих органів [80, 81].

Питанню дослідження чинників, які впливають на інтенсивність абразивного зношування, присвячено велику кількість праць. Як зауважено в роботі [49] абразивне зношування (особливо в його традиційних уявленнях) представлене в американській пресі незрівнянно менше, ніж усі інші види зношування. Така сама тенденція спостерігається й для країн Західної Європи. Усі західні дослідники абразивного зношування у своїх роботах посилаються на праці радянських учених, особливо це стосується ранніх праць М. М. Хрущова [158–160]. Слід зазначити, що в роботах американських вчених якісно досліджено вплив твердості матеріалу на інтенсивність зношування. Унаслідок дослідники прийшли до висновку, що твердість не може бути універсальним індикатором зносостійкості матеріалу й необхідно досліджувати структуру матеріалу [161, 162].

У багатьох дослідженнях, як вітчизняних так і зарубіжних учених, вивчено вплив твердості абразивних частинок [56, 134, 158, 159], розміру абразивних частинок [50, 81, 163, 164] та форми абразивних частинок [144, 145, 152, 165, 166] на інтенсивність зношування. У всіх цих працях у ролі абразиву використано «ідеальний» абразивний матеріал, який за своїми властивостями істотно відрізняється від реальних умов експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин. Результати таких досліджень дають тільки порівняльні характеристики й не описують реальні процеси в зоні тертя під час абразивного зношування.

Проведений аналіз вітчизняних і закордонних праць свідчить про недостатнє дослідження чинників, які впливають на інтенсивність зношування деталей у процесі абразивного зношування. Переважна більшість дослідників не розглядає впливу хімічних факторів під час взаємодії абразивної маси з поверхнею деталей машин, що піддаються абразивному зношуванню. Для робочих органів ґрунтообробних машин це неприпустима помилка, оскільки складові ґрунту (рослинні рештки, живі організми, кислоти, органічні сполуки та інше) можуть призводити до хімічних процесів, які інтенсифікують або вповільнюють процес абразивного зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

1.4. Сучасні методи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин — одне із основних завдань сучасного машинобудування та підприємств з їх експлуатації. Актуальність цієї проблеми зумовлена не тільки необхідністю скорочення витрат матеріалів, але й зменшенням затрат на технічне обслуговування і скорочення простоїв техніки внаслідок необхідності заміни зношених робочих органів.

Як відомо з багатьох робіт, підвищити довговічність і зносостійкість деталей та робочих органів машин можна трьома методами: технологічним, конструкційним та експлуатаційним [44, 50, 167, 168]. В праці Н. К. Мишкіна наголошено, що здобуті за 50 років знання в галузі трибології реалізуються в промисловості в такому співвідношенні 80% конструювання та 20 % експлуатація [169]. Автор роботи посилається на доповідь П. Джоста на конференції в Лондоні 2016 року, де під конструюванням розуміють використання конструкційних і технологічних методів підвищення зносостійкості [169]. Стосовно такого розподілу для робочих органів ґрунтообробних машин роль експлуатаційних методів буде ще меншою. Наявні

методи підвищення довговічності та зносостійкості деталей і робочих органів ґрунтообробних машин представлено на рис. 1.21 [44, 50, 167, 168].



Рис. 1.21. Методи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Великий внесок у вирішення проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів, які працюють у ґрунтовому середовищі, пояснення механізму абразивного зношування робочих органів в ґрунті зробили: Б. І. Костецький [63, 82, 83], М. М. Северньов [80, 81], В. Н. Ткачов [167, 168], М. М. Хрущов [158–160], R. C. D. Richardson [170–172], М. А. Moore [173–176], М. М. Тененбаум [56, 144, 145, 177], А. Ш. Рабінович [178, 179], В. В. Аулін [78, 84, 85], А. М. Михальченков [180–185], С. А. Сидоров [186–

191] та ін. Незважаючи на велику кількість праць у цьому напрямку, багато питань залишаються не розкритими. Насамперед це пов'язано з розв'язанням проблеми підвищення довговічності та зносостійкості конкретним методом без урахування всіх наявних методів. На нашу думку такий, спосіб вирішення проблеми неприпустимий, оскільки суттєво підвищити довговічність та зносостійкість робочих органів можна завдяки впровадженню комплексного підходу з використанням конструктивних, технологічних та експлуатаційних методів.

1.4.1. Аналіз технологічних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Технологічним методам підвищення зносостійкості деталей і робочих органів машин, що працюють в умовах абразивного зношування, приділили найбільше уваги конструктори та науковці. Усі дослідження здебільшого зводяться до вибору режимів обробки матеріалу деталей або вибору способів і матеріалів зміцнення поверхні, що взаємодіє з абразивним середовищем [167, 192–195].

У відомих працях вибір матеріалу для зміцнення та способу зміцнення здійснюється для конкретної деталі й конкретних умов роботи, проте не має системного характеру, що унеможливорює їхнє застосування для інших ґрунтово-кліматичних умов і режимів роботи. Нижче наведемо перелік запропонованих способів зміцнення для підвищення зносостійкості робочих органів, які працюють у середовищі ґрунту:

- у роботі М. І. Денисенка, В. І. Рубльова запропоновано проводити точкове зміцнення лемешів порошковим дротом ПП-АН170 (підвищення зносостійкості лемеша в 1,5...2.8 рази) [196];

- у працях А. В. Колпакова та В. Е. Китргизова запропоновано проводити науглецевування робочих поверхонь лемешів (підвищення зносостійкості лемеша в 2 рази) [197, 198];

- в роботі Н. В. Титова запропоновано для підвищення зносостійкості використовувати нанокристалічні керамічні матеріали, які наносяться вібродугове наплавлення (підвищення зносостійкості деталей, що працюють в абразивному середовищі у 2...2,5 рази) [199];

- у дослідженні В. П. Лялякіна проведено комбіноване зміцнення доліт анкерних сошників: передню поверхню запропоновано зміцнювати електровібродуговим зміцненням металокерамікою, бокову поверхню – електроіскровим легуванням сплавом Т15К6, і СВЧ-гартуванням долота в зоні потовщення [200];

- у праці В. Ю. Щиціна запропоновано проводити зміцнення долота культиватора ИМПАГ-6 металокерамічним порошком ПГ-10Н-01 (зменшення зносу на 35%) [201];

- у роботах Ч. В. Пульки та В. С. Сенчишина запропоновано проводити зміцнення деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин індукційним методом сплавом ПГ-С1 з накладанням механічної вібрації під час розплавлення наплавленого металу (підвищення зносостійкості в 2,2...3,4 рази) [202, 203];

- у праці «The Possibility of Increasing the Wearing Resistance of Mulcher Tools» запропоновано підвищувати зносостійкість робочих органів лісового мульчувача шляхом термічної обробки (на першому етапі виготовлення) і приварюванням зносостійкого наконечника (другий етап) [204];

- у дослідженнях М. Н. Єрохіна та В. С. Новікова запропоновано підвищувати зносостійкість лемешів завдяки використанню в якості матеріалу сталь 40Х та зміцненню носової частини пластиною зі сталі Х12. Спостерігалось зростання зносостійкості в 3 рази [87];

- у роботі «Технологические способы повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин» для підвищення довговічності та зносостійкості стрічастих лап запропоновано використовувати сталь 45 з наплавленням сормайтотом і вібраційним зміцнення. Зносостійкість збільшилася приблизно у 2,5 рази порівняно із серійними [87];

- у дослідженнях С. М. Волощенка та ін. запропоновано технологія виготовлення литих робочих органів ґрунтообробних машин з високоміцного бейнітного чавуну, що дозволяє підвищити їх зносостійкість в 2...5 рази [205];

- у праці «Research of overlays influence on ploughshare lifetime» досліджено вплив зміцнення трубчатими електродами (OK Tubrodur 14.70, OK Tubrodur 15.82 та FILARC PZ 6159) поверхні лемеша на його зносостійкість. Установлено, що таке нанесення підвищує зносостійкість на початку експлуатації, але є недоцільним зважаючи на термін експлуатації плуга [206];

- у роботі А. Лебєдєва та ін. зазначено, що леміш фірми «VOGEL&NOOT» має більшу зносостійкість порівняно з різними варіантами зміцнення серійного лемеша Р-702. Незважаючи на це, автор рекомендує використовувати серійний леміш із нанесеним порошком на основі чавуна легованим марганцем і бором, керуючись економічною доцільністю [195];

- у праці «Studies in coatings for working bodies of deep-rippers recovered by plasma surfacing» запропоновано відновлювати та зміцнювати долото глибокорозпушувача сумішню порошоків (50% tungsten carbide + 50% PG-S27), унаслідок чого отримують поверхню твердістю 70 HRC, що дозволяє підвищити зносостійкість у 5 разів [207];

- у дослідженнях С. Стребкова та ін. проведено порівняльні випробовування зміцнення стрілочастих лап культиватора трьома матеріалами: R5M6, T-590 та T15K6, найкраще себе зарекомендувала технологія зміцнення електродом T-590 [208];

- для підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин запропоновано використовувати сталь Гатфільда (110Г12Л) [209];

- в умовах Канади було запропоновано для зміцнення стрілочастих лап використовувати порошок Al-1236, який наноситься лазерними технологіями [210].

У світі проведено багато подібних досліджень [91–96, 104, 107–109, 180–191, 211–213], але всі вони спрямовані на вирішення локальних завдань

підвищення зносостійкості й довговічності конкретного робочого органу ґрунтообробних машин для певних умов експлуатації.

Як бачимо, існують різноманітні технологічні способи підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів ґрунтообробних машин. Здебільшого вони запропоновані для певного робочого органу, який експлуатується в конкретних умовах. Використання таких способів у разі зміни умов і режимів експлуатації є сумнівним. Необхідно провести аналіз та синтез наявних робіт і систематизувати такі способи за умовами та режимами експлуатації, після чого провести дослідження й розробити узагальнені рекомендації для різних типів робочих органів з урахуванням умов та режимів експлуатації, що дозволять суттєво підвищити їхню довговічність та зносостійкість.

1.4.2. Аналіз конструкційних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Вибір матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин повинен не тільки враховувати стійкість до абразивного зношування, а й забезпечувати найменші економічні витрати. Для виробництва робочих органів ґрунтообробних машин найчастіше застосовують сталі з вмістом вуглецю 0,6..0,7% та борвмісні сталі (табл. 1.4).

Як уже зазначалося раніше, величина тиску на різальній кромці істотно впливає на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин, саме тому один з основних конструктивних методів підвищення довговічності та зносостійкості – проектування робочих органів з формою, яка буде сприяти зменшенню опору руху в ґрунті та буде близькою до форми природного зношування.

Дослідники доволі часто намагаються оптимізувати геометричні параметри для зменшення тягового опору, що зі свого боку сприятиме підвищенню зносостійкості. Зокрема в роботі «Theoretical justification of the type

of a flat-cutting working body of a ploughshare» обґрунтована форма плоскорізного робочого органу, яка дозволить зменшити його тяговий опір і забезпечить підвищену зносостійкість [214].

У праці Д. А. Миронова запропоновано підвищити ресурс лемеша шляхом створення криволінійної поверхні зовнішнього боку остова лемеша. Кут установлення лемеша до дна борозни (кут різання) становить 43° у перерізі, перпендикулярно спинці і проходить у першому отворі, а на п'ятці – 23° . Середнє напрацювання дослідних лемешів у 3...3,5 раза більше за серійні при більшій вартості у 2,13 раза (через зміну матеріалу) [215].

У багатьох працях [186, 214, 215] запропоновано змінювати геометричні параметри робочих органів ґрунтообробних машин, або їх несучі стійки [216, 217] для забезпечення підвищеної довговічності. Пропозиції щодо зміни геометричних параметрів переважно не впроваджують у серійне виробництво, саме тому, розробляючи заходи з підвищення довговічності та зносостійкості, необхідно враховувати геометричні параметри серійних робочих органів. Слід зауважити, що це твердження не стосується кута загострювання робочих органів, який можна змінювати в умовах сільськогосподарських підприємств.

Забезпечення процесу самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин дозволяє суттєво підвищити їхню довговічність. Розробці самозагострювальних робочих органів присвячена велика кількість робіт [43, 50, 81, 84, 85, 89, 102, 167, 178, 179, 218–222]. Стан проблеми досягнення ефекту самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин розкрито в підрозділі 1.5.

1.4.3. Аналіз експлуатаційних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Серед експлуатаційних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин найбільшого поширення набув вибір режимів експлуатації. Зокрема, досліджено вплив

швидкості [81, 84, 86, 156] та вологості ґрунту [80, 81, 112, 135–140] на інтенсивність зношування. Усі ці дослідження проведено для певного робочого органу й конкретних ґрунтово-кліматичних умов. Не вивченим залишається вплив агрегатного стану ґрунту зважаючи на можливі процеси самоорганізації.

Вибір способу зберігання робочих органів ґрунтообробних машин має суттєвий вплив на забезпечення їх надійної роботи, оскільки 90% часу ґрунтообробні машини знаходяться на зберіганні. У процесі зберігання поверхня робочих органів ґрунтообробних машин піддається інтенсивній атмосферній корозії, що призводить до підвищення інтенсивності зношування після зняття агрегату зі зберігання [81]. На сьогодні сільськогосподарські підприємства не забезпечують якісних умов зберігання через відсутність спеціальних приміщень і матеріальних ресурсів. Враховуючи факти вище зазначені, необхідно обґрунтувати комплекс заходів для забезпечення зберігання з мінімальними наслідками корозії та мінімальними економічними затратами.

Для забезпечення підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин потрібно розробити систему експлуатації на основі застосовування комплексного підходу зважаючи на всі вагомі чинники

1.5. Стан проблеми досягнення ефекту самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин

У ґрунтообробних машинах різальні елементи робочих органів, від яких залежить якість та ефективність виконання технологічного процесу обробітку ґрунту, мають найменшу надійність. Утрата працездатного стану робочих органів ґрунтообробних машин призводить до простою, що негативно впливає на валовий збір сільськогосподарської продукції. Основними причинами втрати працездатного стану робочих органів є знос і зміна геометричних параметрів різальних елементів (затуплення).

Затуплення різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин призводить до збільшення витрат пального внаслідок збільшення тягового опору агрегату та погіршення якості виконання технологічних операцій: зменшення глибини обробітку; зменшення відсотка підрізання бур'янів; погіршення подрібнення рослинних решток та ін. Для забезпечення працездатного стану робочих органів ґрунтообробних машин необхідно, щоб протягом усього терміну експлуатації їхні різальні елементи зберігали форму, яка дозволить якісно виконувати технологічні операції.

Сутність ефекту самозагострювання полягає у вибіркового зношуванню неоднорідного по перерізу леза, при якому зберігається його необхідна форма і різальні властивості робочих органів [167]. Дещо інше визначення принципу самозагострювання дав А. Ш. Рабінович: «самозагострювальним називається лезо, яке в процесі зношування зберігає достатню за міцністю та зносостійкістю товщину різальної кромки й оптимальний профіль, допустимі для виконання технологічних операцій» [178, 179].

Питання реалізації ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин завжди ставало гостро перед дослідниками та практиками, які досліджували проблему підвищенням їх довговічності та зносостійкості [43, 50, 81, 84, 85, 89, 102, 167, 178, 179, 218–221].

Перші самозагострювальні робочі органи ґрунтообробних машин були розроблені в США ще в середині XIX століття [223, 224]. В нашій країні перші фундаментальні дослідження та розробка самозагострювальних різальних елементів робочих органів були проведені А. Ш. Рабіновичем [178, 179].

На думку А. Ш. Рабіновича, для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів необхідно, щоб нижня фаска лемеша була твердішою, ніж верхня в декілька разів. Відповідно до здійснених досліджень уведено критерій самозагострювання [178, 179]:

$$\omega = \frac{\varepsilon_2 h_2}{\varepsilon_1 h_1}, \quad (1.9)$$

де ε_1 , h_1 – зносостійкість і товщина наплавленого металу; ε_2 , h_2 – зносостійкість і товщина основного металу.

У процесі обробки більшості ґрунтів для лемешів критерій самозагострювання становив $\omega=1,5$. Товщина наплавленого шару зазвичай не повинна перевищувати 2,5 мм, а твердість має бути 50...58 HRC [225]. Це твердження не актуальне на сьогодні, оскільки твердість різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин може становити приблизно 60 HRC, тому необхідно уточнити зазначені раніше умови [226].

В. М. Ткачов визначив 4 умови самозагострювання лемішно-лапових робочих органів:

1. Радіус затуплення R_k різальної крайки в процесі роботи леза не повинен перевищувати допустимого $R_{k, \partial}$, обумовленого нормальним протіканням технологічного процесу різання робочої маси.

2. Товщина несучого шару h_n повинна бути мінімально можливою для забезпечення необхідної міцності твердого шару:

$$h_n = h_m K_n, \quad (1.10)$$

де K_n – коефіцієнт міцності твердого шару, який може залежно від властивостей ґрунту й твердого шару, змінюватися в широкому діапазоні (для лез, наплавлених сормайттом $K_n=1,0 \dots 1,8$).

3. Твердість зносостійкого шару H_m повинна бути у відповідному співвідношенні з твердістю несучого шару:

$$H_m = K H_n, \quad (1.11)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від абразивних властивостей ґрунту ($K=1,2\dots2,8$).

4. Зміцненню зазвичай повинна підлягати та грань леза, яка піддається найменшому зношуванню. Якщо ця умова не буде виконуватися, то інтенсивність зношування твердого й м'якого шару вирівнюється, що неминуче призведе до затуплення леза [167].

Нами висловлено сумніви щодо коректності формулювання 4-ої умови самозагострювання. При зміцненні поверхні, яка піддається найменшому зношуванню, несучий шар доволі швидко зношуватися, що призведе до виступу твердого шару. Взаємодіючи з твердими включеннями в ґрунті такий шар буде обломлюватися. Вибір боку зміцнення повинен ґрунтуватися на фізико-механічних властивостях ґрунтів та на умовах експлуатації, про що можуть свідчити рекомендації різних дослідників щодо вибору боку зміцнення стрілочастих лап культиватора для досягнення ефекту самозагострювання їх різальних елементів. Зокрема у роботах [167, 180, 227, 228, 229] рекомендують наплавляти внутрішній бік стрілчастої лапи, а в роботах [44, 84, 230–233] навпаки зовнішній.

У дослідженнях В. С. Новікова та Д. І. Петровського наголошено, що нанесення шару на внутрішній бік сприяє самозагострюванню і підвищує ресурс стрілчастої лапи на 18 %, якщо порівнювати з нанесенням зносостійкого шару на зовнішній бік [234]. Проте такі міркування потребують експериментальних підтверджень, оскільки базуються на результатах досліджень, проведених в умовах одного типу ґрунту

Моделювання процесу самозагострювання різальних елементів дозволило встановити, що наявність ефекту самозагострювання можна оцінити кількісно за допомогою безрозмірного критерію самозагострювання [235]:

$$K_c = v_{uk} \sin \beta / \left(v_{un} \cos \beta + v_{uf} \right), \quad (1.12)$$

де v_{un} , v_{uf} , v_{uk} – відповідні швидкості лінійного зношування по зміцненій поверхні (покритті), по фасці та країці різального елемента; β – кут загострення.

Проведена оцінка засвідчує, що: при $K_C=1$ спостерігається самозагострювання різальних елементів; при $K_C>1$ – його затуплення; при $K_C<1$ – його перезагострювання. Останній випадок є небажаним, оскільки оголюється різальний шар, що призводить до обламування різального елемента [235].

У праці «Упрочнение лезвийного инструмента с созданием эффекта самозатачивания» зауважено, що явище самозагострювання різальних елементів можливе тільки для визначеного діапазону співвідношень твердості шарів: $H_1/H_2=2,6\dots2,9$. Якщо співвідношення твердості несучого та зміцненого шарів менше за оптимальне, то відбувається затуплення [236]. Такі твердження не зовсім точні, оскільки твердість не є об'єктивною характеристикою зносостійкості металевих сплавів.

Слід також зазначити, що наявні роботи де досягнення ефекту самозагострювання відбувається одночасно з утворенням «пилоподібного» різального елемента робочих органів [237–240]. Така форма дозволяє більш якісно проводити технологічну операцію і зменшити тяговий опір робочих органів. Зважаючи на точковий спосіб нанесення зносостійкого матеріалу, такі робочі органи мають меншу зносостійкість порівняно з нанесеним суцільним шаром.

Один із сучасних підходів до проблеми досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів та самоорганізації поверхні робочих органів ґрунтообробних машин використання під час їхнього проектування біологічного прототипу [241–243]. Сьогодні створена ціла наука – біоніка (Bionics), яка використовує біологічні принципи для побудови технологічних систем [244]. У праці Н. Р. Богатирьова підкреслено, що ідеальним кінцевим результатом біоніки є створення «живої» машини («Living» Machine) [245]. Виникнення біоніки дозволило людству перейти від «узяття від природи» до «навчання від природи» [246]. Зокрема, під час проектування

самозагострювального інструмента для фінішної токарної обробки за прототип було взято будову зубів морського їжака та акули [247]. Унаслідок було досягнуто ефекту самозагострювання з набуттям зубчастої поверхні різальної крайки. Автори роботи «Теоретическое обоснование эффекта самозатачивания» стверджують, що самозагострювання різального інструмента досягається в тому разі, коли створені умови сприяють однаковому по величині зношуванню всієї поверхні інструмента, механізм «зуба білки» [248].

Л. Ф. Бабицкий, І. В. Москалевич, І. В. Соболевський рекомендують для моделювання робочих органів ґрунтообробних машин використовувати в ролі біологічного прототипу рийні кінцівки землерийних комах і тварин, а також мешканців водного середовища [241]. Уважають, що параметри робочих органів ґрунтообробних машин необхідно отримувати на основі моделювання з біологічного прототипу, який функціонує в певній системі [241]. Для розроблення самозагострювальних робочих органів ґрунтообробних машин не потрібно буквально копіювати біологічні прототипи, оскільки в живій природі відсутні прототипи, які працюють в ідентичних умовах та режимах і мають такі ж цілі. Розробляючи самозагострювальні різальні елементи робочих органів ґрунтообробних машин, необхідно частково використати принципи із живої природи та врахувати досягнення інженерної науки.

Найсучаснішим рішенням, яке дозволяє досягати самозагострювання різальних елементів робочих органів машин або інструментів є використання «самозагострювальних» («Self-sharpening») матеріалів [222]. На жаль, у сучасних реаліях використовувати самозагострювальні матеріали (на основі вольфраму) у виробництві робочих органів ґрунтообробних машин економічно недоцільно у зв'язку з їхньою високою вартістю.

У процесі аналізу робіт для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин встановлено:

- більшість праць присвячено вивченню ефекту самозагострювання різальних елементів лемішно-лапових робочих органів;

- у розробці самозагострювальних різальних елементів робочих органів ураховано тільки зношувальну здатність ґрунту в одному з його станів і не враховано можливості самоорганізації середовища ґрунту та зміну режимів експлуатації;

- рекомендації досягнення ефекту самозагострювання мають локальний характер, тобто можуть бути використані тільки для певних умов експлуатації;

- відсутній комплексний теоретичний підхід до розв'язання проблеми забезпечення ефекту самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин.

Ураховуючи недоліки попередніх досліджень, необхідно створити теоретичні основи та розробити науково обґрунтовані умови для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням умов та режимів їх експлуатації. Для вирішення цієї проблеми необхідно розв'язати наступні завдання: розробка теоретичних моделей самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин; побудова цільових функцій, пропонування критеріїв оптимальності й розробка методики оптимізації фізико-механічних властивостей матеріалів та геометричних параметрів різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин; запропонування технологічних і конструктивних методів для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин; експериментальне підтвердження прийнятих теоретичних положень.

Висновки. Мета і завдання дослідження

Аналіз стану науково-технічної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дозволяє зробити такі висновки:

1. Ґрунтообробні машини займають провідне місце в структурі машино-тракторних парків сучасних сільськогосподарських підприємств. Надійність

грунтообробних машин і якість виконання обробітку ґрунту безпосередньо залежать від довговічності та зносостійкості робочих органів.

2. При проектуванні та виробництві серійних робочих органів ґрунтообробних машин не враховуються ґрунтово-кліматичні умови, у яких вони будуть експлуатуватися, що призводить до нераціонального використання потенційного ресурсу матеріалу робочого органу та зростання затрат на експлуатацію.

3. Зважаючи на механізм і характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин доцільно поділити їх на три типи: лемішно-лапові, дискові та активні (у нашій роботі розглянуто тільки два перших типи).

4. Незважаючи на проведену спеціалістами кропітку роботу з теоретичного та експериментального дослідження процесів фрикційної взаємодії ґрунту з робочими органами, зношування та формоутворення робочих органів під час експлуатації ґрунтообробних машин, низка питань залишається не розкритою:

- відсутня фізико-математична модель функціонування системи «робочий орган – ґрунт»;
- не визначений коефіцієнт тертя між поверхнею робочого органу і ґрунтом з урахуванням усіх видів тертя, які протікають на поверхні робочих органів у процесі експлуатації ґрунтообробних машин;
- не досліджений процес самоорганізації ґрунту та його вплив на зміну абразивних властивостей;
- відомі умови досягнення ефекту самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин не достатньо точні.

5. До нинішнього часу не встановлено впливу ґрунтово-кліматичних умов, режимів експлуатації та умов зберігання на довговічність та зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

6. Відсутні рекомендації сільськогосподарським підприємствам щодо раціональних режимів експлуатації та способів і методів зберігання

грунтообробних машин, які дозволять підвищити довговічність і зносостійкість робочих органів.

7. Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин у 90% випадках досягається завдяки технологічним та конструктивним методам. Експлуатаційним методам підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин не приділено належної уваги. Упровадження комплексного підходу із застосування всіх трьох груп методів та використання науково-обґрунтованої системи експлуатації дозволить суттєво підвищити довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин шляхом використання комплексного підходу адаптації їх зносостійкості до ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації.

Для реалізації поставленої мети вирішено такі основні завдання:

- з'ясувати закономірності протікання процесів у зоні фрикційного контакту «робочий орган – ґрунт» та установити фактори, які істотно впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів та визначити перспективні напрямки підвищення їх довговічності й зносостійкості;
- розробити методологічні основи розв'язання проблеми підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості до ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації;
- розробити теоретичні основи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості;
- шляхом експериментальних досліджень з'ясувати вплив ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації на підвищення довговічності і зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин;

- виявити закономірності зміни конструктивних і технологічних параметрів та їхній вплив на підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин;
- обґрунтувати й розробити систему експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин із необхідним рівнем їх надійності;
- дати техніко-економічне обґрунтування запропонованого підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості;
- на основі проведених досліджень розробити рекомендації виробникам та сільськогосподарським підприємствам щодо підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДОЛОГІЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН КОМПЛЕКСНИМ ПІДХОДОМ АДАПТАЦІЇ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

2.1. Методологічні основи та програма досліджень

На цьому етапі розвитку ґрунтообробної техніки накопичений великий обсяг наукових і практичних знань у галузі підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів. Здебільшого розробка робочих органів із підвищеними показниками надійності базуються на технологічних та конструктивних методах для певного типу робочих органів, які спрямовані на вирішення проблеми для конкретних умов експлуатації. Виявлено, що такі методи не набули широкого застосування в практиці, оскільки не можуть бути використані на інших типах робочих органів і вразі зміни ґрунтово-кліматичних умов і режимів експлуатації.

Унаслідок загострення об'єктивного протиріччя між досягненням рівнем наукових знань з питань підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин і потребою виробництва виникає необхідність вирішення нових наукових і практичних завдань. Розв'язання цієї проблеми повинно ґрунтуватися на основі комплексного підходу із застосуванням технологічних і конструктивних методів з урахуванням умов експлуатації та впровадження науково обґрунтованої системи їх експлуатації. Процес розв'язання цієї проблеми відбувався поетапно відповідно до розробленої схеми, представленої на рис. 2.1.

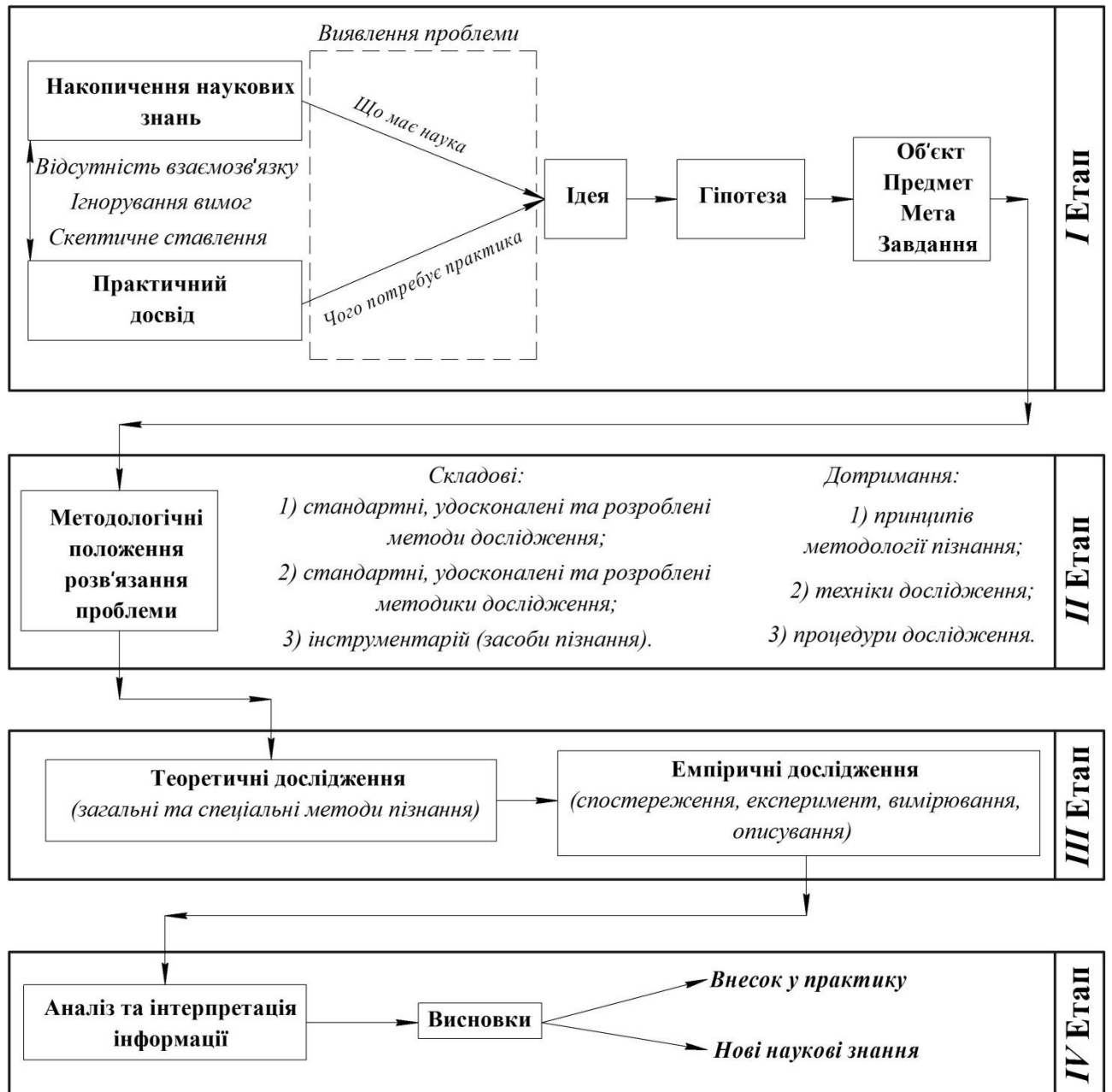


Рис. 2.1. Етапи розв'язання проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Відповідно до сформованих завдань дослідження (розділ 1) та розроблених етапів розв'язання проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин програма досліджень містить такі етапи:

- дослідити в лабораторних умовах: механічні, фізико-хімічні та триботехнічні властивості матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин;

коефіцієнт тертя «рослинні рештки – поверхня робочого органу» і «грунт – поверхня робочого органу»; процес самоорганізації ґрунтового середовища;

- визначити в лабораторно-польових умовах: вплив рослинних решток на зношувальну здатність ґрунтового середовища; коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунту; ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті та його вплив на абразивну здатність ґрунту; вплив попередньої корозії на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин; вплив абразивного зношування на інтенсивність корозії робочих органів ґрунтообробних машин;

- в експлуатаційних умовах з'ясувати : вплив умов та режимів експлуатації на зносостійкість та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин; умови самозагострювання та рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

Основними методами обробки отриманих результатів досліджень були аналітичний, графічний та графоаналітичний. Планування досліджень та обробку отриманих результатів проводили відповідно до загальновідомих методик [249–259].

2.2. Методи теоретичного розв'язання науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Теоретичні дослідження нашої роботі ґрунтуються на використанні методів теорії ймовірності та випадкових процесів, землеробської механіки, трибології, синергетики, математичної статистики, надійності машин, фізики твердого тіла й системного та комплексного підходів розв'язання проблеми підвищення довговічності.

Теоретичні дослідження спрямовані на вирішення таких завдань:

- з'ясування явищ, процесів і субпроцесів, які відбуваються в трибологічній системі «робочий орган – ґрунт», математичне описання

переходу системи з одного стану в інший, визначення критеріїв для зменшення негативних явищ абразивного зношування;

- виявлення особливостей функціонування та еволюції системи «робочий орган – ґрунт» з погляду системного та комплексного підходів;

- з'ясування механізму та природи абразивного зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин залежно від ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті;

- з'ясування критичних умов, які призводять до виникнення негативних явищ (процесу мікрорізання) на поверхні робочих органів під час взаємодії з ґрунтом;

- виявлення умов досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів та рівностійкості зношування для різних типів робочих органів ґрунтообробних машин;

- отримання алгоритму розробки самозагострювальних різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин;

- отримання рівняння для визначення коефіцієнта тертя між поверхнею робочого органу та ґрунтом, зважаючи на всі процеси, які протікають у фрикційному контакті;

- з'ясування закономірностей процесів самоорганізації ґрунтового середовища та їхнього впливу на зміну абразивної здатності такого середовища.

2.3. Обладнання, методи та методики дослідження абразивних властивостей ґрунтів

2.3.1. Основні завдання дослідження абразивних властивостей ґрунту

Для встановлення або уточнення факторів, які суттєво впливають на абразивні властивості ґрунтів, з'ясування закономірностей самоорганізації середовища ґрунту та підтвердження теоретичних досліджень передбачено розв'язання таких експериментальних завдань:

- визначення ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті залежно від наявності рослинних решток та стану ґрунту;
- визначення коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунтів України залежно від глибини їх залягання;
- з'ясування впливу взаємодії поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин з абразивними частинками ґрунту на коефіцієнт їх форми;
- з'ясування закономірностей самоорганізації середовища ґрунту;
- визначення коефіцієнта тертя складових частин середовища ґрунту;
- визначення абразивних властивостей ґрунту залежно від його складу та стану.

2.3.2. Лабораторна установка та методика визначення ступеня закріпленості абразивних частинок у ґрунті

На сьогодні в математичному моделюванні процесу зношування робочих органів ґрунтообробних машин не враховано один із найсуттєвіших показників абразивності ґрунтової маси – ступінь закріплення абразивних частинок. Для оцінки ступеня закріплення абразивної частинки в ґрунті ми запропонували використовувати інтегральний показник τ – опір ґрунту здвигу.

Опір ґрунту здвигу складається зі зчеплення, зумовленого молекулярними й капілярними силами та сил внутрішнього тертя [260]. Для реальних ґрунтів опір ґрунту зсуву можна визначити за залежністю:

$$\tau = c + \sigma \times f, \quad (2.1)$$

де f – коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту; σ – нормальні напруження, Па; c – питоме зчеплення, Па.

У польових умовах опір ґрунту здвигу визначали на пристосуванні схема якого представлена на рис. 2.2.

Для проведення дослідження на дослідному полі вирізали зразок ґрунту (довжина 150 мм, ширина 150, а висота залежить від місця визначення опору здвигу ґрунту (табл. 2.1) [261].

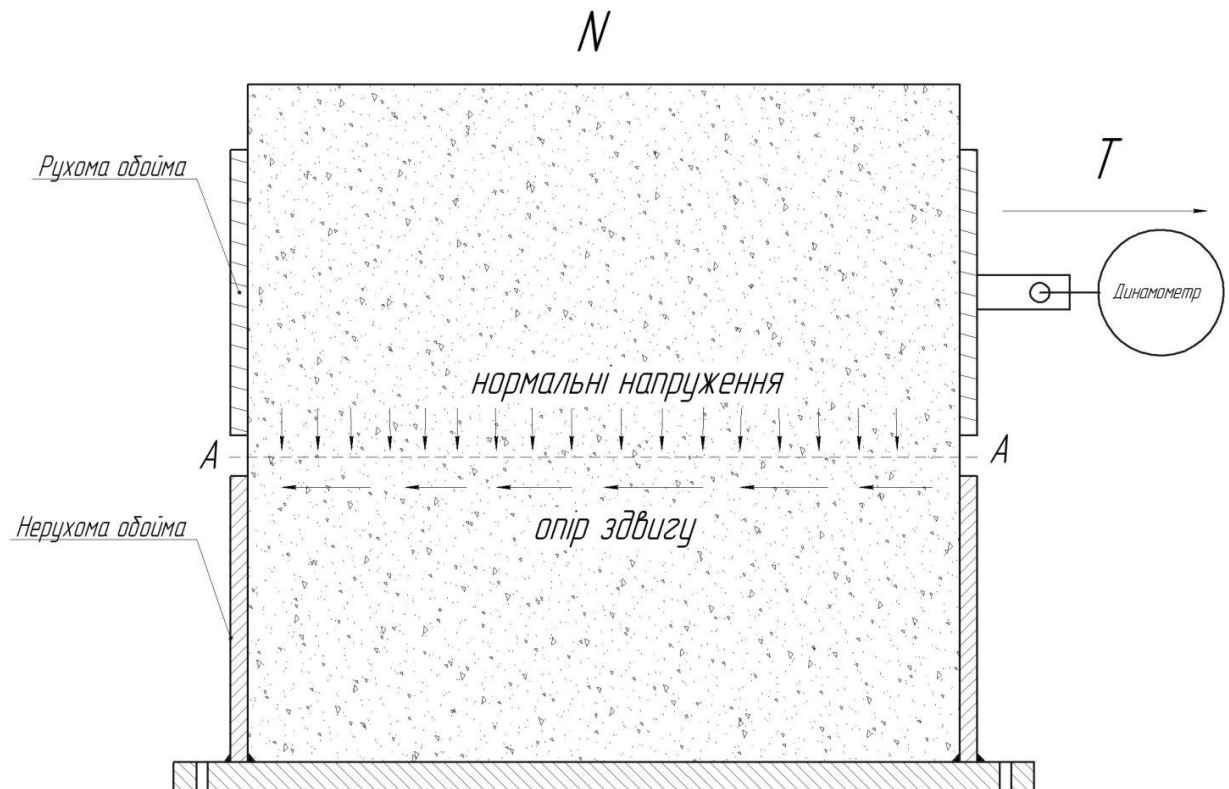


Рис. 2.2. Схема пристосування для визначення опору ґрунту здвигу: T – горизонтальна сила здвигу, Н; N – вертикальна сила або нормальне навантаження (залежить від ваги ґрунту та додаткових навантажень), Н.

Таблиця 2.1

Висота дослідних зразків

№	Глибина визначення опору здвигу ґрунту, мм	Висота зразка, мм
1	100	200
2	200	300
3	300	400
4	400	500

Зразок ґрунту розміщали в прилад (рис. 2.3) із площею поперечного перерізу $A = 0,0225\text{м}^2$ і поступово прикладали силу T . У наслідок чого в площині $A-A$ виникають напруження здвигу τ . При $\tau = \tau_{\text{гран}}$ відбувається здви́г ґрунту в площині $A-A$ ($\tau_{\text{гран}}$ називається опором ґрунту здвигу). За результатами дослідження визначаємо:

$$\tau_{\text{гран}} = T/A, \quad (2.2)$$

де T – горизонтальна сила здвигу, при якій почався рух верхнього шару відносно до нижнього.



Рис. 2.3. Установка для дослідження ступеня закріплення абразивної частинки в ґрунті та коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунту (дата проведення досліджень – 23.09.2018 р., фон – поле після озимої пшениці, Житомирський район Житомирської області) [262]

Для визначення впливу вологості та рослинних решток на значення коефіцієнта внутрішнього тертя f та питомого зчеплення c на різних типах ґрунтів були проведені аналогічні дослідження відповідно до табл. 2.2.

Таблиця 2.2

План проведення дослідження для визначення ступеня закріпленості абразивних частинок у ґрунті

№	Місце проведення	Тип ґрунту (за механічним складом)	Наявність кореневої системи	Глибина від поверхні
1	Овруцький район	Піщаний	Без кореневої системи	100
				200
			З кореневою системою кукурудзи	100
2	Овруцький район	Піщаний	Без кореневої системи	100
				200
3	Коростенський район	Супіщаний	Коренева система багаторічних трав	100
				200
4	Коростенський район	Супіщаний	Коренева система багаторічних трав	100
				200
5	Козятинський район	Глинистий	Коренева система сої	100
				200
6	Козятинський район	Глинистий	Коренева система сої	100
				200
7	Житомирський район	Глинистий	Коренева система озимої пшениці	100
				200
8	Житомирський район	Глинистий	Коренева система озимої пшениці	100
				200
			Без кореневої системи	100

Нормальні напруження визначаємо відповідно до залежності:

$$\sigma = \frac{N}{A}. \quad (2.3)$$

Коефіцієнт внутрішнього тертя f та питоме зчеплення c визначаємо графічно (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Графік для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя f та питомого зчеплення c

У процесі функціонування ґрунту як системи спостерігається процес зміни абразивних властивостей (процес самоорганізації). Для прогнозування абразивних властивостей ґрунту на основі експериментального методу в лабораторних умовах досліджено зміну ступеня закріплення абразивних частинок. Лабораторні дослідження проводили в закритому приміщенні з постійною температурою. Імітацію опадів та дії рушіїв сільськогосподарських машин здійснювали через 24 години від початку дослідження [261].

Для визначення впливу тривалості самоорганізації та наявності перешкод були проведені дослідження відповідно до плану, представленого в табл. 2.3–2.5.

План лабораторних досліджень впливу перешкод (опадів і дії рушіїв сільськогосподарських машин) та тривалості самоорганізації ґрунтового середовища на зміну величини питомого зчеплення

Тип ґрунту	Фактори, які впливають на процес самоорганізації (перешкоди S)	Питоме зчеплення c у різні періоди проведення досліджень після механічного руйнування структури ґрунту, Па			
		$t_1=0$ год	$t_2=168$ год	$t_3=336$ год	$t_4=504$ год
Піщаний	Без перешкод	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією опадів (20 мм)		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Супіщаний	Без перешкод	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією опадів (20 мм)		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Глинистий	Без перешкод	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією опадів (20 мм)		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	3 імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}

**План лабораторних досліджень впливу величини тиску та часу
прикладання навантаження на величину питомого зчеплення ґрунту**

Тип ґрунту	Величина тиску, кПа	Час прикладання статичного навантаження, хв	Питоме зчеплення c у різні періоди проведення досліджень після механічного руйнування структури ґрунту, Па			
			$t_1=0$ год	$t_2=168$ год	$t_3=336$ год	$t_4=504$ год
1	2	3	4	5	6	7
Піщаний	100	2	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	100	4		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	100	8		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	150	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	200	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	250	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Супіщаний	100	2	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	150	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	200	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	250	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Глинистий	100	2	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	150	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	200	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	250	2		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}

**План лабораторних досліджень впливу кількості опадів на зміну величини
питомого зчеплення**

Тип ґрунту	Кількість опадів, мм	Питоме зчеплення c у різні періоди проведення досліджень після механічного руйнування структури ґрунту, Па			
		$t_1=0$	$t_2=168$ год	$t_3=336$ год	$t_4=504$ год
Піщаний	10	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	20		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	30		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	40		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Супіщаний	10	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	20		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	30		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	40		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
Глинистий	10	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	20		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	30		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}
	40		\bar{x}	\bar{x}	\bar{x}

Умовно точність вважають високою, якщо значення $S_{\bar{x}}\%$ не перевищує 3%, середньою – коли воно становить 3–6% і низькою – коли перевищує 7%. Проте в дослідях, проведених на ґрунтах, значення відносної похибки буває й більшим [263].

2.3.3. Методика визначення коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту

Для визначення коефіцієнта форми абразивних частинок на різних типах ґрунтів було проаналізовано карту ґрунтів України та визначено райони для взяття зразків (рис. 2.4).

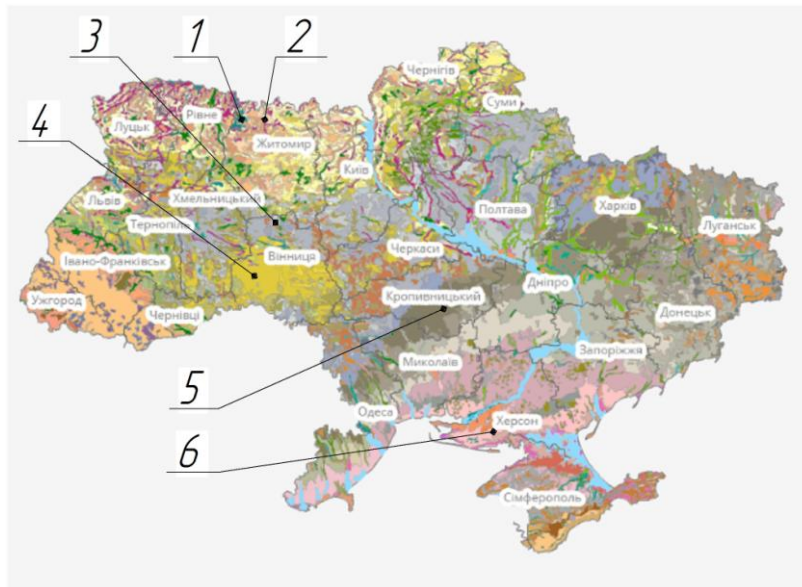


Рис. 2.4. Карта ґрунтів України та місце взяття дослідних зразків: 1 – лучні ґрунти (середньосуглинковий); 2 – дерново-підзолисті ґрунти (легкосуглинковий); 3 – чорноземи неглибокі, лісостепові ґрунти (глина легка); 4 – опідзолені ґрунти (середньосуглинковий); 5 – чорноземи звичайні на лесових породах (глина легка); 6 – каштанові ґрунти (важкосуглинковий) [261]

Проби ґрунту відбирали на кожній із ділянок у трьох точках по діагоналі (рис. 2.4)



Рис. 2.5. Схема відбору дослідних зразків ґрунту для визначення коефіцієнта форми абразивних частинок (зразок 3, землі СФГ «Шар» с. Вовчинець Козятинського району Вінницької області)

Для визначення впливу робочих органів на зміну коефіцієнта форми абразивних частинок проби ґрунту також брали в місцях, де ніколи не проводився його обробіток (ліси, вік яких не менший 100 років).

Для вивчення коефіцієнта форми абразивних частинок та впливу на форму регулярної взаємодії з поверхнею робочих органів сільськогосподарських машин були взяті проби на таких глибинах: поверхня ґрунту, 200 мм, 400 мм, 600 мм та 800 мм (рис. 1).

Абразивні частинки були виділені з попередніх дослідних зразків за методикою, представленою в роботі [48]. Коефіцієнт форми абразивних частинок визначали за формулою, запропонованою Д. Б. Бернштейном (1.8), геометричні параметри вимірювали згідно зі схемою (рис. 2.6) [261].

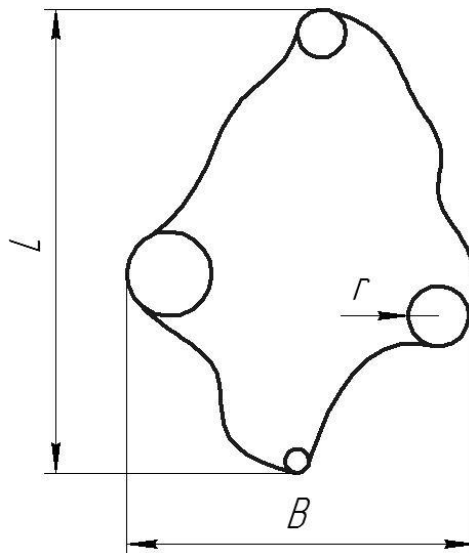


Рис. 2.6. Геометричні параметри абразивної частинки: L – найбільше значення поздовжнього розміру; B – найбільше значення поперечного розміру; r – радіуси виступів

Для вимірювання геометричних параметрів абразивної частинки її фотографували за допомогою мікроскопа «SIGETA CAM-03» (рис. 2.7) і визначали геометричні параметри за допомогою програми «КОМПАС-3D V16».



Рис. 2.7. Мікроскоп «SIGETA CAM-03»

Коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунту визначали для різних фракцій: 1 фракція – до 0,10 мм; 2 фракція – 0,10...0,25 мм; 3 фракція – 0,25...0,50 мм; 4 фракція – 0,50...0,75 мм; 5 фракція – 0,75...1,00 мм.

З кожного зразка визначали коефіцієнт форми для 20 абразивних частинок кожної фракції. План проведення дослідження представлено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

План проведення досліджень

ґрунти	Поверхня ґрунту			Глибина 200 мм			Глибина 400 мм			Глибина 600 мм			Глибина 800 мм		
1. Лучні ґрунти	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n
2. Дерново-підзолисті ґрунти	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n
3. Чорноземи неглибокі лісостепові	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n
4. Опідзолені ґрунти	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n
5. Чорноземи звичайні на лесових породах	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n
6. Каштанові ґрунти	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n
7. Зразки, узяті з лісового масиву (дерново-підзолисті ґрунти)	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n	X ₁	...	X _n

n=20

У кінцеву таблицю занесемо середнє арифметичне (\bar{x}).

2.3.4. Імітаційна лабораторна установка для визначення зношувальної здатності ґрунтів та інших абразивних середовищ і випробовування зразків на зносостійкість

Для визначення зношувальної здатності ґрунтів та інших абразивних середовищ і випробовування зразків матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин на зносостійкість, зважаючи на необхідність відтворення реальних умов зношування робочих органів ґрунтообробних машин, було запропоновано модернізацію методу «крильчатки» (патент № 59681 [264]) рис. 2.8.

Відповідно до запропонованого методу розроблено установку для дослідження матеріалів і покриттів на зносостійкість (патент № 57585 [265]).

У наявному способі зразки обертаються у вільно насипаній абразивній масі в циліндричній конструкції з постійною швидкістю. Під час роботи абразивна маса розпушується й відповідно змінюється її густина, що призводить до зміни механізму та характеру абразивного зношування.

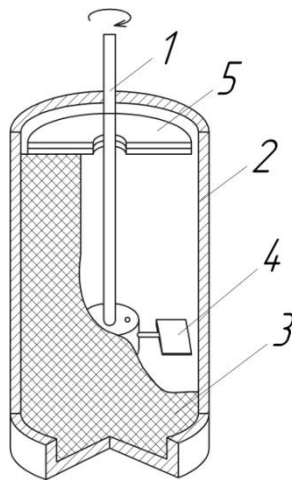


Рис 2.8. Схема випробовування за вдосконаленим способом «крильчатки»: 1 – вал-тримач зразків; 2 – циліндр; 3 – абразивна маса; 4 – зразки; 5 – багатосекційний диск, який створює необхідну густину абразивної маси

Отже, ми запропонували встановити багатосекційний диск над абразивним матеріалом (рис. 2.8), який буде створювати та підтримувати

необхідну густину абразивної маси, а також питомий тиск на зразок шляхом зміни його ваги (рис. 2.9).

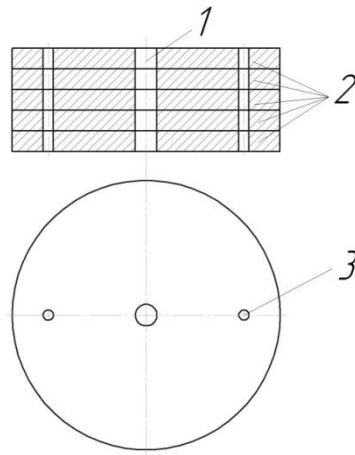


Рис. 2.9. Багатосекційний диск: 1 – отвір для вала-тримача зразків; 2 – секції диска; 3 – отвір для з'єднувального гвинта

Нахил зразків до площини обертання становив 17° , що інтенсифікує процес зношування та сприяє перемішуванню абразивного середовища. Абразивна маса змінювалася після проходження кожним зразком шляху в 100 км. Привод вала-тримача (рис. 2.10) здійснювали від шпинделя вертикально-розточного верстата 2Е78П (рис. 2.11), що дозволяє варіювати швидкість руху зразка від 15,5 до 715,9 м/хв (від 0,26 до 11,94 м/с).

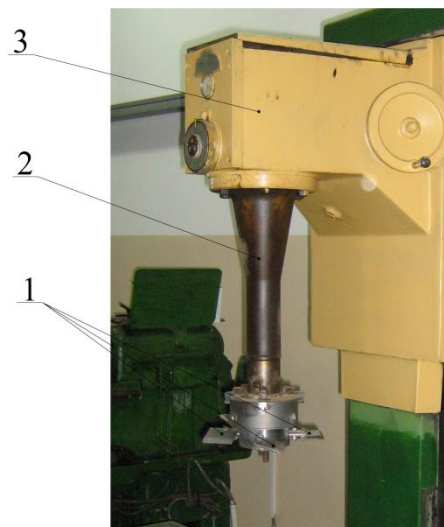


Рис. 2.10. Вал-тримач із дослідними зразками: 1 – дослідний зразок; 2 – вал-тримач; 3 – верстат 2Е78П.



Рис. 2.11. Загальний вигляд установки для випробовування на зносостійкість

Ваговий знос зразка визначався на лабораторних терезах CP 34001 S фірми «Sartorius» (Німеччина). Клас точності за ДСТУ 7270:2012 [266] – II (високий). Лінійний знос вимірювали шляхом обрисовування контуру зразка після напрацювання на еталонному планшеті.

Шлях тертя – 500 км. Протягом цього шляху зразок контролювався за втратою маси 5 разів, або через кожні 100 км [267].

2.3.5. Методика дослідження впливу рослинних решток на інтенсивність абразивного зношування

Лабораторні дослідження впливу рослинних решток на інтенсивність абразивного зношування проводили за вдосконаленим способом «крильчатки» (пункт 2.3.4).

Постійними було прийнято такі фактори: швидкість переміщення – 125,28 м/хв та тиск суміші на зразок 122,6 кПа. У ролі робочого середовища застосовували кварцовий пісок, розмір фракцій якого становив 50...100 мкм. Коефіцієнт форми абразивних частинок K_{ϕ} – 114,18.

Для дослідження використовували сталь 65Г, яка піддавалася об'ємному гартуванню при температурі 810...830 °С і середньому відпуску із дуже точною витримкою при температурі 460...480 °С.

Таблиця 2.7

Уміст рослинних решток в абразивній масі (фракція кварцового піску розміром 50...100 мкм, коефіцієнт форми абразивних частинок $K_f=114,18$)

№	Абразивна маса	Уміст рослинних решток (% від маси)
1.	Без рослинних решток	0
Рослинні рештки після збирання сільськогосподарських культур (сухі)		
2.	Соя	3
		6
3.	Соя (плющена)	3
		6
4.	Пшениця	3
		6
5.	Ячмінь	3
		6
6.	Люцерна	3
		6
7.	Ріпак	3
		6
8.	Кукурудза	3
		6
9.	Соняшник	3
		6
10.	Сіно (лугова трава)	3
		6
Рослинні рештки після збирання сільськогосподарських культур (вологі)		
11.	Соя (вологість 38%)	3
		6
12.	Ячмінь (вологість 34%)	3
		6
Рослини в різних фазах росту		
13.	Пшениця (у фазі колосіння)	3
		6
14.	Кукурудза (у фазі молочно-воскової стиглості)	3
		6

Для підтвердження лабораторних досліджень були проведені експлуатаційні дослідження на двох суміжних ділянках поля по 56 га. Ділянки були розміщені на супіщаних ґрунтах в Овруцькому районі Житомирської області. Перша ділянка відразу після збирання кукурудзи на силос, друга ділянка – чистий пар (поле не оброблялося рік, уносилися гербіциди для недопущення наявності рослинних решток на поверхні поля). Для дослідження використовували універсальний дисковий агрегат УДА-4,5.

2.3.6. Устаткування та методика визначення коефіцієнта тертя складових частин середовища ґрунту по сталі

У нас час найбільшого поширення набули два методи для визначення коефіцієнта тертя ковзання:

- метод «руху тіла по горизонтальній поверхні під дією сили»;
- метод «похилої площини».

У своїй роботі використовували стандартний метод «похилої площини», який дозволяє визначити статичний коефіцієнт тертя. Статичний коефіцієнт тертя визначено із залежності:

$$f = \operatorname{tg} \alpha_{\kappa}, \quad (2.5)$$

де α_{κ} – кут, при якому починається рух тіла (рис. 2.12).

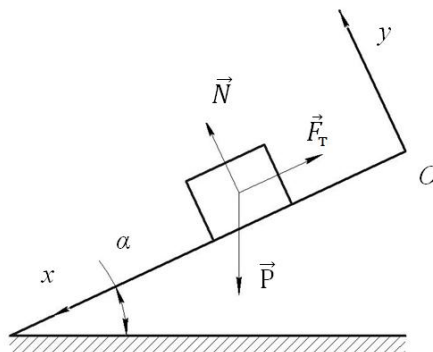


Рис. 2.12. Схема досліджень визначення коефіцієнта тертя методом «похилої площини»

Для визначення динамічного коефіцієнта тертя ковзання використовували методику запропоновану в роботі «К задаче определения трения скольжения» [268]. Динамічний коефіцієнт тертя ковзання визначено за залежністю:

$$f = \left[1 - \left(\frac{t}{t_T} \right)^2 \right] \operatorname{tg} \alpha \quad (2.6)$$

де t – час руху без урахування сили тертя (час вертикального падіння, $\alpha=90^\circ$), с; t_T – час рух з урахування сили тертя по похилій площині, с.

Відстань, на якій проводили дослідження становила $l=1$ м. Рух тіла фіксували за допомогою камери «GoPro HERO 5 Session», кут нахилу площини визначав електронний кутомір (рис. 2.13), обробку даних відеозйомки проводили за допомогою програми «Wondershare Filmora Video Editor».

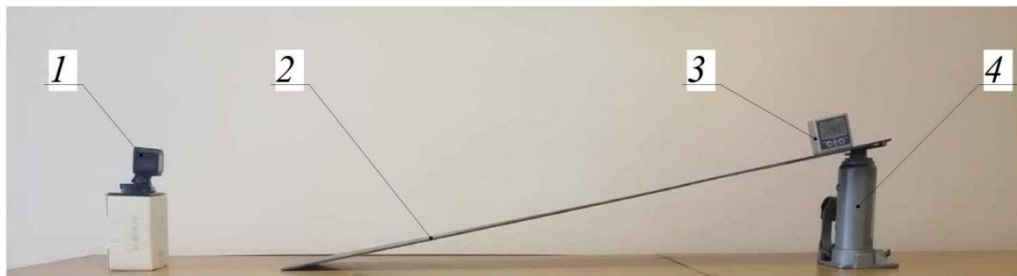


Рис. 2.13. Загальний вигляд установки для визначення коефіцієнта тертя ковзання рослинних решток по сталі: 1 – камера «GoPro HERO 5 Session», 2 – стальна пластина довжиною 1 м, 3 – кутомір, 4 – пристосування для зміни кута нахилу пластини [269]

Для досліджень використовували сталь 65Г, сталь 45 і сталь 28MnB5 із шорсткістю $Ra=0,4$ мкм, $Ra=1,6$ мкм, та $Ra=6,3$ мкм із вказаними напрямками нерівностей.

Коефіцієнт тертя ковзання по сталі визначали:

- для рослинних решток культур, які набули найбільшого розповсюдження в агропромисловому комплексі України: соя, соя (плющена), пшениця, ячмінь, люцерна, ріпак, кукурудза, соняшник та сіно (лугова трава);
- для трьох типів ґрунтів із різною вологістю.

2.4. Методика дослідження впливу способу зберігання на абразивну зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин

Дослідження проведенні за методикою розробленою в 2014 році та представленою в роботі [267]. Слід зауважити, що для прискорення досліджень та підвищення об'єктивності шлях тертя був зменшений до 7488 м (тривалість випробовування одного зразка становила 60 хвилин, що дозволяло повністю очистити поверхню від продуктів корозії). Для визначення зносостійкості сталі після очищення від продуктів корозії, шлях тертя зразків становив 100 км (проведено тільки на трьох зразках). Пристосування для розміщення зразків (рис. 2.14) були встановлені в трьох ґрунтово-кліматичних зонах України:

1. Овруцькому районі, Житомирської області (Полісся);
2. Козятинському районі, Вінницької області (Лісостеп);
3. Доманівському районі, Миколаївської області (Степ).



Рис. 2.14. Пристосування для розміщення дослідних зразків [270]

Початок проведення досліджень – 1 вересня 2014 року, закінчення зберігання зразків – 1 вересня 2016 року. Відповідно до розробленої методики зразки були розміщені в трьох кліматичних зонах України у вісьмох варіаціях (табл. 2.8).

Варіанти розміщення дослідних зразків [270]

Спосіб зберігання	Висота над поверхнею			Матеріал	Кількість зразків
1. На відкритому майданчику з 3 грунтовим покриттям.	На поверхні	100 мм над поверхнею	500 мм над поверхнею	Сталь 65Г (без термообробки)	3
2. На відкритому майданчику з 3 трав'яним покриттям.				Сталь 65Г з об'ємним гартуванням при температурі 810...830 °С і середньому відпуску при температурі 460...480 °С	3
3. На відкритому майданчику з 3 бетонним покриттям.				Сталь 65Г, зміцнена електроерозійною обробкою	3
4. На відкритому майданчику з 3 асфальтованим покриттям.				Сталь 65Г, зміцнена електродом Т-590	3
5. Під навісом з 3 бетонним покриттям.				Сталь 65Г з об'ємним гартуванням при температурі 810...830 °С і середньому відпуску при температурі 460...480 °С після абразивного зношування	3
6. Під навісом з 3 асфальтованим покриттям.				Сталь 65Г з об'ємним гартуванням при температурі 810...830 °С і середньому відпуску при температурі 460...480 °С з обробкою корміном	3
7. У закритому опалювальному приміщенні з 3 бетонним покриттям.				Сталь 65Г з об'ємним гартуванням при температурі 810...830 °С і середньому відпуску при температурі 460...480 °С з обробкою технічним вазеліном УН	3
8. У закритому неопалювальному приміщенні з 3 бетонним покриттям.				Сталь 65Г з об'ємним гартуванням при температурі 810...830 °С і середньому відпуску при температурі 460...480 °С з обробкою оливою Shell Ensio Oil N	3
				Сталь 65Г з об'ємним гартуванням при температурі 810...830 °С і середньому відпуску при температурі 460...480 °С з обробкою відпрацьованою моторною оливою	3
				Сталь 28MnB5	3
				Сталь Л 53	3

Загальна кількість зразків, установлених на зберігання – 2376 зразків, на 72 рамних установках (рис. 2.14). Лабораторні дослідження з визначення інтенсивності зношування тривали 1 рік і 4 місяці, у цей період зразки зберігалися в опалювальному приміщенні.

Інтенсивність корозії досліджували доти, поки вся поверхня не покриється продуктами корозії.

2.5. Устаткування та методика дослідження фізичних, механічних, хімічних і триботехнічних властивостей матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин

Хімічний склад матеріалів ґрунтообробного робочого органу визначали методом атомно-емісійної спектроскопії.

Дослідження мікроструктури матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин виконували за схемою представленою на рис. 2.15 [271].



Рис. 2.15. Схема проведення досліджень на вирізаному зразку

Зразки шліфували та піддавали обробці азотною кислотою (HNO_3),

Твердість поверхні в польових умовах визначали за допомогою портативного твердоміра Т-УД2 (рис. 2.16), заводський номер – 008.119.12.16,

дата виготовлення – 13.12.2016 р. [272]. Повірка твердоміра проходила в ДП «Дніпропетровський регіональний державний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації», свідоцтво № 10-0/6926/1 від 12.01.2017 р. (додаток Б).



Рис. 2.16. Твердомір Т-УД2

Технічні характеристики приладу представлено в табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Технічна характеристика твердоміра Т-УД2

№	Шкала твердості	Діапазон вимірювання	Похибка
1.	Роквелл, HRC	20...70	±2
2.	Бринелль, HB	90...450	±10
3.	Віккерс, HV	240...940	±15
4.	Границя міцності σ_b (ГОСТ 22761-77), МПа	370...1500	Нормується при градуюванні

Вимірювання твердості проводили відповідно до ASTM A1038. Цей метод найбільше підходить для контролю твердості зміцнених поверхневих шарів, оскільки глибина проникнення індектора звичайно знаходиться в межах 30...50 мкм [273].

У лабораторних умовах випробування твердості робочих органів ґрунтообробних машин виконували методом Роквелла відповідно до ISO 6508-1 [274].

Дослідження на згин з надрізом проводили за стандартом ISO 148-1:2011-01 [275] на маятниковому копрі PSW-750.

Дослідження зміни твердості поверхні робочих органів проводили на агрегатах:

- плуга «Diamant 11», виробник «Lemken»;
- культиватора КПС-9 ПМ, виробник ВАТ «Восход»;
- культиватора «John Deere 2210»;
- розпушувача «John Deere 2700»;
- культиватора «Kverneland cultibar»;
- плуга «Kverneland»;
- універсального дискового агрегату УДА-4,5.

2.6. Структура, методи та методики експлуатаційних досліджень

2.6.1. Методика дослідження впливу умов і режимів експлуатації на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Експлуатаційні дослідження впливу вологості ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин проводили в сільськогосподарських підприємствах Житомирської та Вінницької областей протягом 2016–2018 років. Середня швидкість дискового ґрунтообробного агрегату становила 12 км/год, плуга – 10 км/год, культиватора – 11,5 км/год.

Визначення вологості ґрунту проводили методом висушування до постійної маси відповідно до ДСТУ Б В.2.1-17:2009.

Дослідження здійснювали на сільськогосподарських машинах, представлених у табл. 2.10.

Робочі органи, які використовували в процесі дослідження

Грунтообробна машина	Тип ґрунту	Робочий орган	Матеріал робочого органу
Культиватор «John Deere 2210»	Супіщаний	Стрілчаста лапа	Сталь 28MnB5 Сталь 65Г
	Середній суглинок		
	Глина легка		
ПЛН-3-35	Супіщаний	Леміш	Сталь 65Г Сталь Hardox 500
	Середній суглинок		
	Глина легка		
УДА-4,5	Супіщаний	Дисковий робочий орган типу «ромашка»	Сталь 28MnB5 Сталь 65Г
	Середній суглинок		
	Глина легка		

Поля в усіх випадках були після збирання зернових культур (озима пшениця та ячмінь). Швидкість руху для плуга варіювалися в межах 10...13 км/год, культиватора та дискового агрегату – 11...15 км/год. Для виявлення характеру зміни абразивного зношування слідували за зміною лінійних розмірів складових частин робочих органів ґрунтообробних машин. Визначення зміни ваги та лінійних розмірів проводили після напрацювання 10 га на одну стрілчасту лапу, 30 га на один диск та 5 га на один леміш.

Дослідження впливу швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів проводили згідно з чинними державними та галузевими стандартами в умовах аграрних підприємств Житомирської та Вінницької областей на ґрунтообробних машинах, представлених у табл. 2.11.

Масовий знос робочих органів визначався на лабораторних вагах СР 34001 S фірми «Sartorius» (Німеччина).

Робочі органи, які використовували в процесі дослідження

Грунтообробна машин	Тип ґрунту	Робочий орган	Матеріал робочого органу + нанесений зносостійкий матеріал
Культиватор «John Deere 2210»	Супіщаний	Стрілчаста лапа	28MnB5
	Середній суглинок		65Г
			65Г+Т-620
			65Г+Т-590
	Глина легка		65Г+М-Fe 6
	Супіщаний	Леміш	65Г
			65Г+Т-620
			65Г+Т-590
Середній суглинок	65Г+М-Fe 6		
Глина легка	Hardox 500		
	Л53		
УДА-4,5	Супіщаний	Дисковий робочий орган типу «ромашка»	28MnB5
	Середній суглинок		65Г
			65Г+Т-620
			65Г+Т-590
	Глина легка		65Г+М-Fe 6

2.6.2. Дослідження впливу геометричної форми та хімічного складу зносостійкого шару на зносостійкість і довговічність робочих органів ґрунтообробних машин

У роботі для досліджень використовували три типи робочих органів ґрунтообробних машин:

- а) сферичний вирізний дисковий робочий орган;
- б) леміш плуга;
- в) стрілчасту лапу культиватора.

Реалізуюючи системний підхід, необхідно врахувати всі істотні чинники, які впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів.

У працях А. В. Балабухи і Х. Венхуа стверджується, що геометрична форма нанесення зносостійкого покриття має вирішальне значення для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин [276, 277]. Для визначення впливу геометричної форми нанесення зносостійкого покриття на поверхню робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь запропоновано різні технологічні варіанти (рис. 2.17). Нанесення зносостійкого покриття виконували на дискові робочі органи, виготовлені зі сталі 65Г.



Рис. 2.17. Варіанти нанесення зносостійкого покриття на дискові робочі органи

Зміцнення робочих органів виконували трьома видами електродів Т-620, Т-590 та М-Fe 6, хімічний склад яких представлено в табл. 2.12.

Таблица 2.12

**Хімічний склад зносостійкого шару на поверхні робочих органів
ґрунтообробних машин**

Хімічний елемент	Марка електрода		
	Т-620	Т-590	М-Fe 6
Mn	1...1,5	1...1,5	≤3,0
Si	2...2,5	2...2,5	-
C	2,9...3,5	2,9...3,5	≤2,5
P	≤0,04	≤0,04	≤0,04
S	≤0,035	≤0,035	≤0,04
Cr	22...24	22...27	≤10
Ti	0,5...1,5	-	-
B	0,5...1,5	0,5...1,5	-
Mo	-	-	≤3,0
Nb	-	-	≤10

Дослідження особливостей зношування лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин проводили на трьох типах ґрунтів протягом 2015–2018 років у сільськогосподарських підприємствах Житомирської та Вінницької областей. Ґрунтообробні машини та робочі органи, які використовували в процесі дослідження, представлені в табл. 2.13

Таблиця 2.13

Робочі органи, які використовували в процесі дослідження

Ґрунтообробна машина	Тип ґрунту	Робочий орган	Матеріал робочого органу + нанесений зносостійкий матеріал
Культиватор «John Deere 2210»	Супіщаний	Стрілчаста лапа	28MnB5
			65Г
			65Г+Т-620
	Середній суглинок		65Г+Т-590
			65Г+М-Fe 6
ПЛН-3-35	Супіщаний	Леміш	65Г
			65Г+Т-620
			65Г+Т-590
	Середній суглинок		65Г+М-Fe 6
			Глина легка
	Л53		
Плуг «Kverneland»	Супіщаний	Леміш (зі змінним долотом)	65Г
			Hardox 500
Плуг «Diamant 11» виробник «Lemken»	Глина легка	Леміш (зі змінним долотом)	65Г
			Hardox 500
Культиватор КПС-9 ПМ		Стрілчаста лапа	28MnB5
			65Г
			65Г+Т-620
	65Г+Т-590		
65Г+М-Fe 6			

Дослідженню підлягали серійні лемеші, виготовлені зі сталі Л53 і Hardox 500, та стрілчасті лапи, виготовлені зі сталі 28MnB5. Випробування проводили без зміни фізико-механічних властивостей, які надані їм заводами-виробниками. Робочі органи, виготовлені зі сталі 65Г, піддавалися об'ємному загартуванню при температурі 810...830 °С і середньому відпуску з дуже точною витримкою при температурі 460...480 °С.

*a**б*

Рис. 2.18. Загальний вигляд плугів, які використовували під час досліджень: *a* – плуг «Diamant 11» фірми «Lemken» *б* – плуг «Kverneland»

*a**б*

Рис. 2.19. Лемеші до плуга ПЛН-3-35: *a* – дослідний леміш для супіщаних ґрунтів; *б* – серійний.

Висновки по розділу 2

1. Обґрунтовано етапи проведення досліджень і запропоновано методологію розв'язання проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин на основі комплексного підходу.

2. Основні теоретичні дослідження базувалися на використанні методів теорії ймовірності й випадкових процесів, трибології, синергетики, математичної статистики, надійності машин, фізики твердого тіла та

системного й комплексного підходів до розв'язання проблеми підвищення довговічності.

3. Обґрунтовано структуру, методи та методики досліджень абразивних властивостей ґрунтів. Запропоновано конструкції лабораторних установок і розроблено нові методики та методи дослідження абразивних властивостей середовища ґрунту.

4. Обґрунтовано устаткування та методики дослідження фізичних, механічних, хімічних і триботехнічних властивостей матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин, які дозволяють визначати властивості матеріалів, а також їхню зміну в процесі експлуатації робочих органів як у лабораторних, так і в польових умовах.

5. Обґрунтовано структуру, методи та методики експлуатаційних досліджень, які дозволяють визначити вплив матеріалу, геометричних параметрів, умов і режимів експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин та особливостей їхнього зношування на зносостійкість та довговічність.

РОЗДІЛ 3

ТЕОРЕТИЧНО-ПРИКЛАДНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТОБРОБНИХ МАШИН КОМПЛЕКСНИМ ПІДХОДОМ АДАПТАЦІЇ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

3.1. Математична модель підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням умов та режимів експлуатації

Як відомо з роботи [50] для робочих органів ґрунтообробних машин можливо існування двох закономірностей зношування (рис. 3.1).

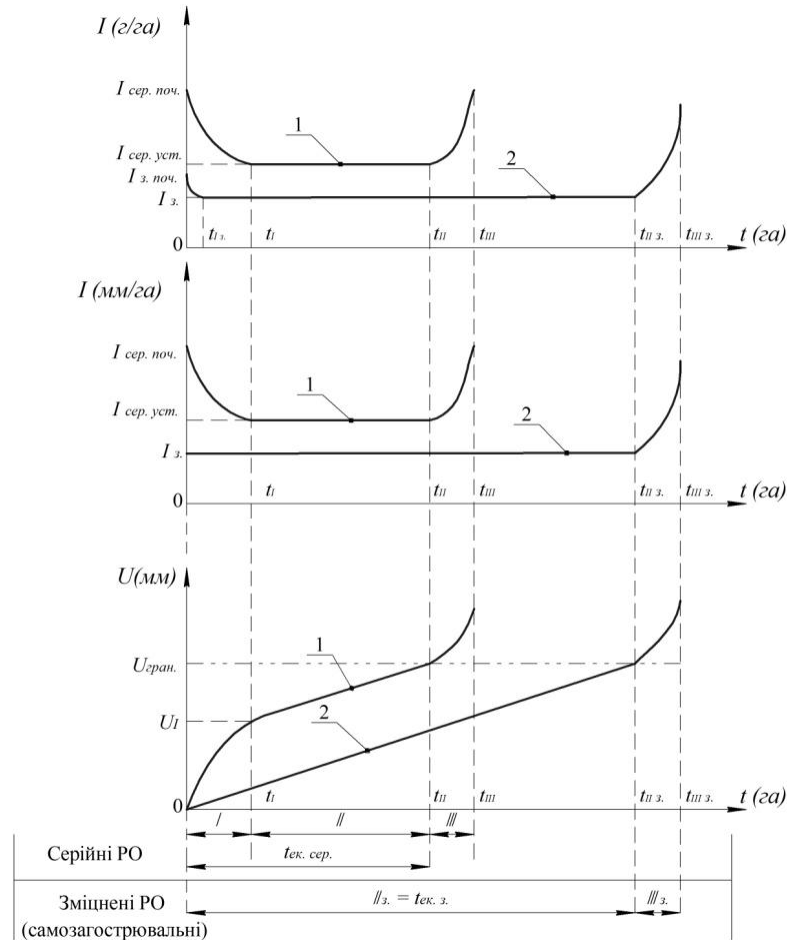


Рис. 3.1 Типові криві зміни зносу та швидкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин в часі: 1 – серійні робочі органи; 2 – зміцнені (здатні до самоорганізації) робочі органи [314]

Для серійних робочих органів початковий етап експлуатації характеризується наявністю невстановленого перехідного режиму з високою початковою швидкістю (відрізок *I*, рис. 3.1). Тривалість початкового періоду залежить від абразивних властивостей ґрунтів, так на піщаних і супіщаних ґрунтах період перехідного режиму (самоорганізації робочих органів) відбувається набагато швидше ніж на суглинкових і глинистих ґрунтах. Після періоду самоорганізації настає період встановленого зношування (відрізок *II* рис. 3.1), коли $I_{сер.уст.}(мм/год, г/год) = const$ та $I(г/год) = const$. Після закінчення періоду встановленого зношування швидкість зношування суттєво зростає. В більшості випадків після закінчення другого періоду робочі органи ґрунтообробних машин вибраковуються, оскільки вони перестають виконувати агротехнічні вимоги. Швидкий знос пов'язаний зі зменшенням товщини різальної кромки та «втоми» матеріалу робочих органів призводить до обломлювання або надщерблення (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Обломлювання носка стрілкової лапи культиватора

Період *III* дуже чітко спостерігається для дискових робочих органів та стрілочатих лап культиваторів і майже відсутній для лемешів і долота лемеша.

Розглянемо криві 1 та 2 (рис. 3.1) без зон *III* і *III_з*. Порівнюючи функції зносу серійних та зміцнених (самозагострювальних) робочих органів бачимо, що на початковому проміжку $[0; t_1]$:

1) функція зносу серійних робочих органів має нелінійний характер і описується залежністю:

$$U(t) = at^2 + bt + c \quad (3.1)$$

де c – початковий знос, мм;

a, b – параметри $[a] = \text{мм/га}^2$, $[b] = \text{мм/га}$.

2) функція зносу зміцнених робочих органів має лінійний характер і описується залежністю (без врахування зони III):

$$U(t) = c + \gamma t \quad (3.2)$$

де γ – параметр, $\gamma \in (0; t_{II.3})$, що характеризує кут нахилу прямої (для проміжку $[0; t_{II.3}]$, $[\gamma] = \text{мм/с}$).

З урахуванням зони III маємо:

$$U(t) = \begin{cases} c + \gamma t, t \in [0; t_{II.3}] \\ a_3 t^2 + b_3 t + c_{II}, t \in [t_{II.3}; t_{III.3}] \end{cases} \quad (3.3)$$

Параметр γ можна знайти виходячи з залежності (3.3):

$$\gamma = \frac{a_3 t_{II.3}^2 + b_3 t_{II.3} + c_{II}}{t_{II.3}^2} \quad (3.4)$$

Відхилення функції зносу серійних і зміцнених робочих органів ґрунтообробних машин оцінимо площею складної фігури утвореною кривими в інтервалі $[0; t_1]$:

$$S = \int_0^{t_1} (at^2 + bt + c - c - \gamma t) dt = \int_0^{t_1} (at^2 + bt - \gamma t) dt = \left(\frac{at^3}{3} - \frac{bt^2}{2} - \frac{\gamma t^2}{2} \right) \Big|_0^{t_1} = \frac{at_1^3}{3} - \frac{bt_1^2}{2} - \frac{\gamma t_1^2}{2} \quad (3.5)$$

де t_1 – напрацювання, після якого функція зносу серійних робочих органів набуває лінійного характеру.

Для досягнення ефекту самозагострювання залежність лінійного зносу робочих органів від часу повинна мати вигляд кривої 2 (рис. 3.1). Це обумовлює проведення зміцнення однієї із сторін робочих органів із забезпеченням початкової форми кромки різальних елементів, яка буде підтримуватися протягом всього терміну експлуатації. З математичної точки зору для досягнення ефекту самозагострювання серійних робочих органів необхідно розробити заходи, які дозволять $S \rightarrow 0$, а для підвищення довговічності робочих органів необхідно, щоб параметр кривої 2 $\gamma \rightarrow \min$. Період припрацювання $t_{1.з.}$ для даних робочих органів характеризується більш інтенсивним масовим зношуванням і відсутністю такої закономірності для лінійного зношування (рис. 3.1). Зміну закономірності зношування серійних робочих органів (крива 1) на закономірність самозагострювальних робочих органів (крива 2) можливо досягти за рахунок регулювання фізико-механічних властивостей матеріалу поверхонь робочих органів з урахуванням особливостей характеру зношування в залежності від абразивних властивостей ґрунтів та режимів експлуатації.

Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням умов та режимів експлуатації передбачає розгляд впливу всіх значимих факторів в процесі експлуатації. Оскільки довговічність робочих органів ґрунтообробних машин передусім визначається їх зносостійкістю [78, 84, 87, 136, 137, 218, 240], то доцільним є розгляд впливу значимих факторів на величину зносу. При цьому знос розглядаємо як функцію від напрацювання $U(t)$, t – напрацювання одного робочого органу, га. При експлуатації та зберіганні ця функція буде мати чотири складові:

$$U_{\Sigma} = U(t) = U_1(t) + U_2(t) + U_3(t) + U_4(t), \quad (3.6)$$

де $U_1(t)$ – знос робочого органу, який залежить від конструктивних та технологічних методів підвищення зносостійкості;

$U_2(t)$ – знос робочого органу, обумовлений режимом експлуатації;

$U_3(t)$ – знос робочого органу, який визначається ґрунтово-кліматичними умовами експлуатації;

$U_4(t)$ – знос робочого органу, залежний від способу та умов зберігання.

Враховуючі напівемпіричний характер залежності функції зносу (3.1) серійних робочих органів, маємо:

$$U_1(t) = K_1(a_1 t^2 + b_1 t + c_1), \quad (3.7)$$

де $K_1 = \sum_{i=1}^6 K_{1i}$ – коефіцієнт, що враховує конструктивні та технологічні методів підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин;

a_1, b_1, c_1 – параметри, які визначаються експериментальним шляхом, ($[a_1] = \text{мм/га}^2, [b_1] = \text{мм/га}, [c_1] = \text{мм}.$)

$$K_1 = \begin{cases} K_{11} - \text{вплив матеріалу робочого органу на величину зносу;} \\ K_{12} - \text{вплив режимів обробки основного матеріалу на величину зносу;} \\ K_{13} - \text{вплив геометричних параметрів робочого органу на величину зносу;} \\ K_{14} - \text{вплив способу зміцнення робочого органу на величину зносу;} \\ K_{15} - \text{вплив ефекту самозагострювання робочого органу на величину зносу;} \\ K_{16} - \text{вплив рівностійкості зношування зон робочого органу на величину зносу.} \end{cases}$$

$$U_2(t) = K_2(a_2 v^2 + b_2 v + c_2)t, \quad (3.8)$$

де a_2, b_2, c_2 – параметри, які визначаються експериментальним шляхом, ($[a_1] = \text{год}^2/\text{мм} \times \text{га}, [b_1] = \text{год/га}, [c_1] = \text{мм/га}.$);

$K_2 = K_{21}$ – вплив режимів експлуатації (швидкість руху) ґрунтообробного агрегату;

$$U_3(t) = K_3(a_3 t^2 + b_3 t + c_3), \quad (3.9)$$

де a_3, b_3, c_3 – параметри, які визначаються експериментальним шляхом, ($[a_3] = \text{мм/га}^2, [b_3] = \text{мм/га}, [c_3] = \text{мм}$);

$K_3 = \sum_{j=1}^3 K_{3j}$ – коефіцієнт, який враховує ґрунтово-кліматичні умови експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин;

$$K_3 = \begin{cases} K_{31} - \text{вплив стану середовища ґрунту на величину зносу;} \\ K_{22} - \text{вплив вологості ґрунту на величину зносу;} \\ K_{23} - \text{вплив стану рослинних решток на величину зносу.} \end{cases}$$

$$U_4(t) = K_4(a_4t^2 + b_4t + c_4) \quad (3.10)$$

де K_4 – коефіцієнт, який враховує способи та умови зберігання;

a_4, b_4, c_4 – параметри, які визначаються експериментальним шляхом, ($[a_4] = \text{мм/га}^2, [b_4] = \text{мм/га}, [c_4] = \text{мм}$).

Зазначимо, що, в основному, процеси, які відбуваються в системі «робочий орган – ґрунт» мають стохастичну природу, то виконується умова:

$$K_1 + K_2 + K_3 + K_4 = 1 \quad (3.11)$$

Підставимо вирази (3.7-3.10) в формулу (3.6), отримаємо рівняння зносу для серійних робочих органів:

$$U_{\Sigma}(t) = K_1(a_1t^2 + b_1t + c_1) + K_2(a_2v^2 + b_2v + c_2)t + K_3(a_3t^2 + b_3t + c_3) + K_4(a_4t^2 + b_4t + c_4) \quad (3.12)$$

Для усталених режимів експлуатації, визначених ґрунтово-кліматичних умов та при дотриманні встановлених умов зберігання серійних робочих органів ґрунтообробних машин ($a_1 = a_3 = a_4; b_1 = b_3 = b_4; c_1 = c_3 = c_4$), рівняння (3.12) дещо спрощується:

$$U_{\Sigma}(t) = (K_1 + K_3 + K_4)(a_1 t^2 + b_1 t + c_1) + K_2(a_2 v^2 + b_2 v + c_2)t. \quad (3.13)$$

Для зміцнених робочих органів зношування носить лінійний характер (3.17). При цьому спостерігається процеси самозагострювання різальних елементів ґрунтообробних робочих органів. Відповідно до рівняння (3.6) функція зносу набуває вигляду:

$$U_{\Sigma}(t) = K'_1 \gamma'_1 t + K'_2 (a'_2 v^2 + b'_2 v + c'_2)t + K'_3 \gamma'_3 t + K'_4 \gamma'_4 t \quad (3.14)$$

де $\gamma'_1, \gamma'_3, \gamma'_4$ – параметри, які визначаються експериментальним шляхом ($[\gamma'_1] = [\gamma'_3] = [\gamma'_4] = \text{мм/га}$);

K'_1, K'_2, K'_3, K'_4 – відповідні коефіцієнти значим факторів, що враховують конструктивні та технологічні методи підвищення зносостійкості зміцнених робочих органів ґрунтообробних машин, режими експлуатації, ґрунтово-кліматичні умови експлуатації, способи та умови зберігання відповідно, для яких також виконується умова:

$$K'_1 + K'_2 + K'_3 + K'_4 = 1 \quad (3.15)$$

Для усталених режимів експлуатації, визначених ґрунтово-кліматичних умов та при дотриманні встановлених умов зберігання зміцнених робочих органів ґрунтообробних машин $\gamma'_1 = \gamma'_3 = \gamma'_4$ рівняння (3.14) дещо спрощується:

$$U_{\Sigma}(t) = (K'_1 + K'_3 + K'_4) \gamma'_1 t + K'_2 (a'_2 v^2 + b'_2 v + c'_2)t, \quad (3.16)$$

або після деяких перетворень маємо:

$$U_{\Sigma}(t) = \left((K'_1 + K'_3 + K'_4) \gamma'_1 + K'_2 (a'_2 v^2 + b'_2 v + c'_2) \right) t \quad (3.17)$$

Значення параметрів $a_1, b_1, c_1, \gamma'_1, \gamma'_3, \gamma'_4$, визначено за результатами експериментальних досліджень і представлено в додатку В, а значення коефіцієнтів $K_1, K_2, K_3, K_4, K'_1, K'_2, K'_3, K'_4$ – в додатку Г.

3.2. Фізико-математична модель системи «робочий орган – ґрунт»

У трибологічній системі одночасно протікає велика кількість процесів і явищ. Зазвичай у прикладних дослідженнях процеси і явища, які відбуваються в трибосистемі, розглядають окремо, що не дозволяє повною мірою пояснити їхню природу.

Основні процеси і явища, що проходять у динамічному стані для трибосистеми «робочий орган – ґрунт» представлені в роботі [278]. Для об'єктивного підходу до таких процесів і явищ необхідно використовувати системний аналіз, який дозволить упорядкувати і спростити міркування [279].

У перше спроби системного аналізу в трибології були зроблені Х. Чихосом у праці «Tribology – a system approach to science and technology of friction, lubrication and wear» (на пострадянському просторі, у зв'язку з помилковим перекладом, вона відома як «Системный анализ в трибонике») [280].

Проведений раніше системний аналіз трибосистем не можливо повністю застосовувати для трибосистеми «робочий орган – ґрунт», оскільки, як зауважено в роботі [278], вона має специфічні особливості, що не дозволяють їй повністю підпадати під класифікацію запропоновану Х. Чихосом [280].

Для проведення системного аналізу трибосистеми «робочий орган – ґрунт» необхідно виконати такі етапи:

- побудувати фізико-математичну модель трибосистеми в динамічному і статичному стані, яка може об'єктивно описати всі явища, процеси та субпроцеси, що відбуваються в трибосистемі;

- скласти феноменологічну модель процесів, які відбуваються в трибологічній системі;
- проаналізувати індивідуальні властивості деталей та агрегатні властивості трибосистеми;
- математично описати функціональні перетворення вхідних величин X у вихідні Y ;
- визначити основні критерії ефективного функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт», а також обмеження й умови функціонування.

Застосування системного підходу до вирішення задач при моделюванні трибосистеми «робочий орган – ґрунт» дозволить:

- провести синтез знань з різних наук (фізика, хімія, математика, трибологія теорії систем, теорії управління, матеріалознавство, ґрунтознавство та ін.) [281];
- суттєво скоротити час на проведення громістких лабораторних, стендових й експлуатаційних досліджень для прийняття об'єктивних рішень щодо підвищення зносостійкості складових частин трибосистеми.

Відповідно до визначення, зміни структури трибомеханічної системи можуть містити [280]:

1. Утворення або зникнення елементів системи. Як відомо з праці [282], трибосистема «робочий орган – ґрунт» утворюється з трьох складових: навколишнє середовище, робочий орган та ґрунт. У процесі її функціонування можлива поява змащувального прошарку між робочим органом і ґрунтом у вигляді води. Такий стан системи спостерігається у випадку перезволоження ґрунту (для піщаних та супіщаних ґрунтів при досяганні вологості 20%, а для суглинків і глини – 30% [38]). Поява четвертого елемента під час функціонування системи здебільшого призводить до невиконання необхідних вимог щодо перетворення вхідних величин X у вихідні Y .

2. Зміна взаємозв'язків елементів. У трибосистемі «робочий орган – ґрунт» доволі часто спостерігається зміна механізму зношування з абразивного на ударно-абразивне, абразивно-окислювальне та ін. На поверхні робочих

органів одночасно на різних ділянках поверхні можливий прояв різних механізмів зношування.

3. *Зміна властивостей елементів системи.* Функціональне існування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» передбачає зміну властивостей одного з елементів, а саме ґрунту (твердості, ступеня закріплення абразивних частинок, зміни просторового положення компонентів та ін.). Зміна властивостей робочих органів є небажаними, але неминучим явищем. У процесі функціонування трибосистеми відбуваються зміни таких властивостей: геометрії і топографії поверхні робочих органів; хімічний склад поверхні робочих органів; міцнісні властивості робочих органів; маса робочих органів.

Для зменшення негативних явищ при функціонуванні трибосистеми «робочий орган – ґрунт», а саме зміни властивостей робочих органів, необхідно на основі системного аналізу розробити теоретичну модель її функціонування.

Суттєва характеристика будь-якої моделі – ступінь її подібності до об'єкту моделювання. За цією ознакою всі моделі можна розділити на ізоморфні та гомоморфні. Моделюючи складні трибосистеми, варто використовувати ізоморфні моделі, оскільки вони містять основні параметри об'єкта моделювання і за суттю здатні замінити його.

Метою фізико-математичного моделювання трибосистеми «робочий орган – ґрунт» є встановлення функціональної залежності зношування робочих органів ґрунтообробних машин:

$$I = f(V, p, E, H_m, L, G_z, A, K_\phi, P(\Delta H), C_v, W, H_a, P_z, \Psi, f_t), \quad (3.18)$$

де: I – інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин, $\text{м}^3/\text{м}$, $\text{г}/\text{м}$, $\text{мм}/\text{м}$; E – модуль пружності матеріалу робочих органів, $\text{Н}/\text{м}^2$; f_t – коефіцієнта тертя; V – швидкість переміщення робочих органів відносно ґрунту, $\text{м}/\text{с}$; p – тиск на поверхні робочих органів, $\text{Н}/\text{м}$; H_m – мікротвердість поверхні робочих органів, Па ; L – шлях тертя, м ; G_z – ступінь закріплення абразивних частинок; $P(\Delta H)$ – імовірність виникнення ударного навантаження;

C_V – відсотковий вміст кварцового піску в ґрунті (механічний склад ґрунту); Ψ – кислотність ґрунту; W – вологість ґрунту, %; H_a – мікротвердість абразиву; P_z – твердість ґрунту, кг/м^2 ; A – середній розмір абразивних частинок, м; K_ϕ – коефіцієнт форми абразивних частинок.

Трибосистема «робочий орган – ґрунт» і модель, що їй відповідає, складаються з елементів, представлених на рис. 3.3 [278].

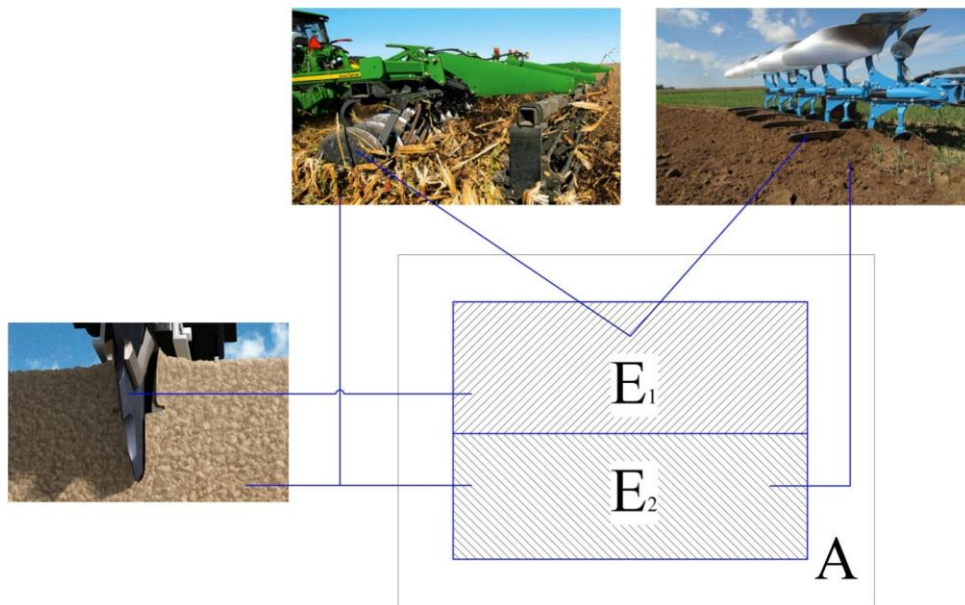


Рис. 3.3. Трибологічна система і трибологічна модель: A – довкілля; E_1 – робочий орган ґрунтообробних машин; E_2 – ґрунт

Відомо, що властивості елементів трибосистеми впливають на її структуру [268]. У такому разі, елементи трибосистеми суттєво відрізняються за своїми фізико-механічними та хімічними властивостями.

Особливості трибосистеми «робочий орган – ґрунт»:

- 1) інтенсивному зношуванню підлягає лише один з її елементів, а саме робочий орган;
- 2) джерелом проміжного середовища є другий елемент трибосистеми – ґрунт за певної вологості;
- 3) ґрунт як елемент трибосистеми неоднорідний за своїм складом і містить у собі ряд компонентів: фізичний пісок, фізичну глину, рослинну масу,

живі організми, повітря, воду, солі, кислоти та ін. Кожний з цих компонентів чинить вплив на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин;

4) в окремих випадках цю трибосистему доцільно розділити на дві підсистеми, оскільки механізми зношування ділянок поверхні робочого органу відрізняються (залежно від ступеня закріплення абразиву в ґрунті).

Згідно із запропонованою моделлю, взаємодія елементів E_1 і E_2 трибосистеми відбувається за відсутності мастильного матеріалу. Хоча в глинистих і суглинистих ґрунтах після досягнення граничного вмісту вологості на робочій поверхні з'являється вільна вода, що виконує функції змазки [38]. Це піддержують результати експериментальних досліджень [38, 81], звідки видно, що коефіцієнт тертя суттєво зменшується в супіщаних ґрунтах за вологості 20%, у важких суглинках і глині – 30%. За такої вологості технологічний обробіток ґрунту стає неможливим. У зв'язку з цим ми не розглядали трибосистеми з мастильним матеріалом (водою).

Взаємодіючи, елементи трибосистеми впливають один на одного. Така взаємодія відбувається лише в динамічному стані трибосистеми «робочий орган – ґрунт», тоді як в статичному стані вона відсутня. Процеси, що протікають у динамічному стані трибосистеми, зображено на рис. 3.4.

До виходу трибосистеми належать такі супутні процеси (z), як наклеп поверхні тертя, старіння, термомеханічні, електричні процеси та ін. [280].

Як видно, найбільшому впливові в трибосистемі піддається елемент 1 (робочий орган ґрунтообробної машини) з боку елемента 2 (ґрунту). Інтенсивність указаних процесів залежить від величини вхідних характеристик (V, P) та початкового стану елементів системи.

Мету існування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» на фундаментальному рівні можна розглядати як трансформацію $\{X\} \xrightarrow{T} \{Y\}$. Головний вхід (X) у трибосистему – це відповідно рух та робота, яку виконує елемент E_1 , головний вихід – структура елемента E_2 . У реальних умовах

отримуємо багато інших вихідних показників, що є побічними й переважно небажаними.

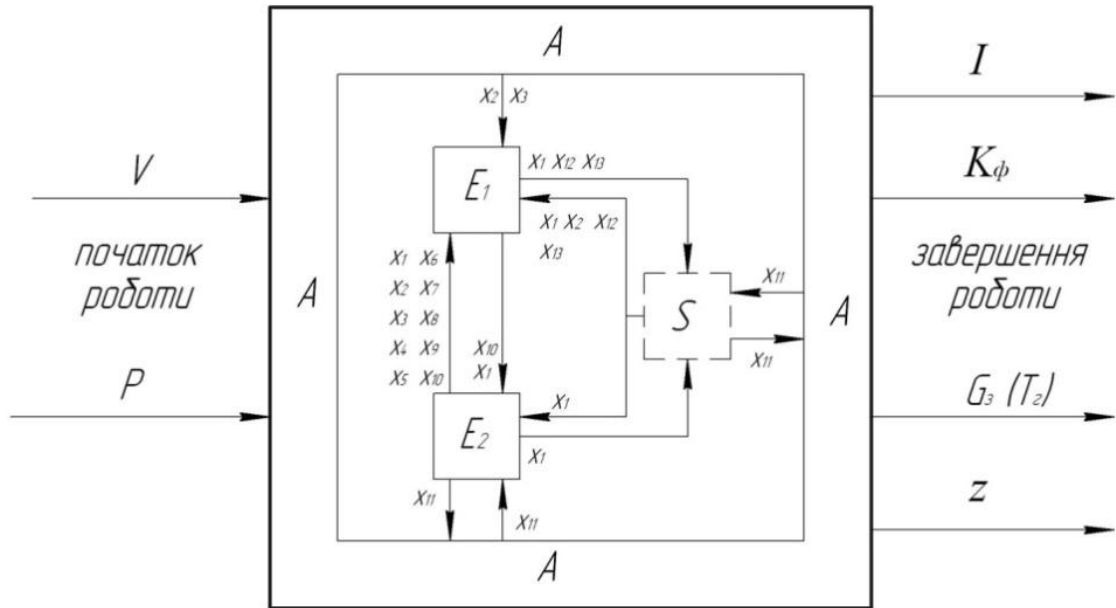


Рис. 3.4. Структурно-логічна схема системи «робочий орган – ґрунт» у динамічному стані: x_1 – адгезія; x_2 – корозія; x_3 – окиснення; x_4 – пружна деформація; x_5 – пластична деформація; x_6 – мікрорізання; x_7 – дряпання; x_8 – відривання; x_9 – руйнування поверхні тертя; x_{10} – фазові та структурні перетворення; x_{11} – дифузія; x_{12} – адсорбція; x_{13} – хемосорбція; V – відносна швидкість переміщення; P – тиск на поверхні тертя; I – інтенсивність зношування; G_3 – ступінь закріплення абразивних частинок; P_z – твердість ґрунту; K_ϕ – коефіцієнт форми абразивних частинок; z – супутні процеси; A – довкілля; E_1, E_2 – елементи системи; S – мастильний матеріал (вода)

З роботи [267] відомо, що енергетичний баланс трибосистеми можна представити залежністю:

$$\sum E_x = \sum E_y + \sum E_z + \sum E_s + \sum E_t, \quad (3.19)$$

де E_x – підведена енергія;

E_y – корисна енергія (для трибосистеми «робочий орган – ґрунт» корисна енергія витрачається на формування структури елемента E_2);

E_z – витрати системи;

E_s – накопичення енергії (деформація);

E_t – теплота.

Теплота, яка виділяється під час взаємодії елемента E_1 з елементом E_2 , доволі швидко розсіюється в другому елементі, що пов'язано з відносно великим його об'ємом порівняно з першим елементом і суттєвою різницею температур із довкіллям.

Оскільки масовому зносу піддається лише один елемент трибосистеми, то масовий баланс можна виразити таким рівнянням:

$$\sum m = (\sum m_{E_1} - \sum m_{E_{1a}} - \sum m_{E_{1c}}) + (\sum m_{E_2} + \sum m_{E_{1a}} + \sum m_{E_{1c}}) \quad (3.20)$$

де m – маса трибосистеми;

m_{E_1} – маса елемента E_1 до виконання роботи;

$m_{E_{1a}}$ – маса матеріалу елемента E_1 , яка переноситься в елемент E_2 під час виконання роботи;

$m_{E_{1c}}$ – маса всіх продуктів хімічної реакції елемента E_1 , яка переноситься в елемент E_2 під час виконання роботи;

m_{E_2} – маса елемента E_2 до виконання роботи.

Сума $(\sum m_{E_{1a}} + \sum m_{E_{1c}})$ характеризує величину інтенсивності зношування й залежить від умов функціонування системи (V, p) , властивостей елемента E_1 (E, H_m , – хімічний склад матеріалу), властивостей елемента E_2 ($G_3, A, K_\phi, P(\Delta H), C_V, W, H_a, P_z, \Psi$), коефіцієнта тертя матеріалу елемента E_1 по елементові $E_2(f_T)$, а також від шляху тертя (L).

Здебільшого дослідники намагаються однобічно розв'язати проблему підвищення зносостійкості, покращуючи властивості робочої поверхні

елементу E_1 . Насправді, для вирішення цієї проблеми доцільніше застосовувати системний аналіз трибосистеми «робочий орган – ґрунт».

Пріоритет застосування системного аналізу в трибології належить німецькому трибологу Х. Чихосу. Проведений раніше системний аналіз наявних трибосистем не можливо повною мірою застосувати для трибосистеми «робочий орган – ґрунт», оскільки вона має специфічні особливості, які не підпадають повною мірою під відому класифікацію [280].

3.3. Теоретичні основи фрикційної взаємодії ґрунту з поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин

Технологічні процеси, що виконують сільськогосподарські машини, повинні проектуватися, ґрунтуючись на фізичні, хімічні та механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів. Найбільш складним для дослідження серед сільськогосподарських матеріалів є ґрунт. Це зумовлено складністю його будови, адже ґрунт – гетерогенна система, яка має тверду, рідку та газоподібну фази, а також містить живі організми. Крім того, співвідношення між фазами може змінюватися в часі. Однією з основних фізичних характеристик ґрунту при проектуванні ґрунтообробних машин, є коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні робочого органу. Сьогодні, при проектуючи сільськогосподарські машини, коефіцієнт тертя між робочою поверхнею ґрунтообробних машин і ґрунтом розглядають тільки на макрорівні. За коефіцієнт тертя між робочою поверхнею ґрунтообробних машин і ґрунтом приймають коефіцієнт ковзання і враховують тільки механічну складову (закон Амонтона–Кулона). Насправді процес тертя між ґрунтом і поверхнею робочого органу набагато складніший і його не можна описати за допомогою коефіцієнта тертя ковзання тільки з погляду механіки. Саме тому необхідно теоретично визначити коефіцієнт тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом, урахувавши можливості протікання всіх видів зовнішнього

тертя (кочення, ковзання, кочення з проковзуванням) у фрикційному контакті та молекулярну складову процесу тертя.

Властивості фрикційного контакту суттєво впливають на процеси тертя та зношування, оскільки внаслідок дискретності контакту торкання виступів відбувається тільки на окремих ділянках, які утворюють фактичну зону контакту. Фрикційну взаємодію двох твердих тіл досліджували Ф. П. Боуден [283], Д. Тейбор [283, 284], К. Джонсон [285], М. Б. Демкін [286, 287], Д. Баклі [288], А. В. Белий [289], І. В. Крагельський [57, 62, 290], І. Г. Горячева [291] та інші, тому це питання ґрунтовно розкрито в сучасній літературі. Водночас питання взаємодії твердого тіла з дисперсним середовищем, а особливо з реальною ґрунтовою масою, залишається не розкритим.

Коефіцієнт тертя – важлива характеристика фрикційного контакту двох тіл. У класичних і сучасних працях [292–296] коефіцієнт тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів розглядають тільки з погляду механіки. Такий однобічний підхід не дозволяє об’єктивно описувати процеси, що протікають на поверхні тертя. Урахування всіх факторів при визначенні коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин дозволить більш якісно проводити проектування сільськогосподарських машин.

Під час розгляду фрикційної взаємодії двох тіл необхідно спочатку розглянути фрикційні властивості елементів трибосистеми. У нашому випадку це ґрунт і поверхня робочих органів ґрунтообробних машин. Особливістю цієї трибосистеми є те, що для робочих органів ми розглядаємо тільки поверхню, а для ґрунту – увесь об’єм, оскільки в процесі функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» відбувається постійне перемішування ґрунту і взаємодіяти з поверхнею робочих органів можуть об’єми ґрунту, які на початку функціонування трибосистеми знаходилися на певній відстані від поверхні робочого органу.

Фрикційні властивості ґрунту виявляються в дії сили опору ковзанню тіла (робочого органу, опорної поверхні тощо) щодо поверхні ґрунту – сили зовнішнього тертя – та в дії сили опору ковзанню однієї частини ґрунту щодо

іншої – сили внутрішнього тертя. У класичних працях для визначення сили зовнішнього тертя ґрунту запропоновано використовувати формулу Амонтона–Кулона:

$$F_T = fN = Ntg\varphi. \quad (3.21)$$

Як відомо, ця залежність не враховує молекулярної складової процесу тертя, яку обов'язково необхідно враховувати при проектуванні робочих органів ґрунтообробних машин, тому що вона займає значне місце під час тертя ґрунтової маси та робочої поверхні ґрунтообробних машин [297, 298].

Саме тому математичне моделювання процесів, що відбуваються при фрикційному контакті твердого тіла й ґрунту, з урахуванням всіх явищ і процесів в зоні контакту, становить інтерес для сільськогосподарського машинобудування [299].

Коефіцієнт тертя між поверхнею робочих органів та ґрунтом складається не тільки з коефіцієнта тертя ковзання, а також із тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням. Імовірність виникнення того чи іншого виду тертя залежить від ступеня закріпленості абразивних частинок у ґрунті.

Під час експлуатації ґрунтообробних машин у зоні контакту робочого органу й ґрунту одночасно відбуваються всі три види тертя: тертя ковзання, тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням. Тому загальний коефіцієнт тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом можна записати виразом:

$$f_{\text{заг}} = k_1 f_{\text{ковз}} + k_2 \left((f_{\text{коч1}}/M_{R1}) + (f_{\text{коч2}}/M_{R2}) + \dots + (f_{\text{кочn}}/M_{Rn}) \right) + k_3 f_{\text{коч. з прок.}}; \quad (3.22)$$

$$k_1 + k_2 + k_3 = 1, \quad (3.23)$$

де $f_{\text{заг}}$ – загальний коефіцієнт тертя між поверхнею робочого органу та ґрунтом; $f_{\text{ковз}}$ – коефіцієнт тертя ковзання між поверхнею робочого органу та ґрунтом; $f_{\text{коч1}}, f_{\text{коч2}}, f_{\text{кочn}}$ – коефіцієнт тертя кочення між поверхнею робочого органу та частинками ґрунту; $f_{\text{коч. з прок.}}$ – коефіцієнт тертя кочення з проковзуванням між поверхнею робочого органу та ґрунтом; k_1, k_2, k_3 – коефіцієнти, що враховують частку, яка припадає на один із видів тертя відповідно; M_{R1}, M_{R2}, M_{Rn} – математичне очікування радіуса частинок ґрунту, що взаємодіють із поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин.

Як бачимо з формули, процес тертя між ґрунтом та поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин набагато складніший, ніж при фрикційній взаємодії двох твердих тіл. Зі свого боку це пов'язано зі складною будовою ґрунтового середовища.

Негативні явища абразивного зношування (процес мікрорізання) будемо спостерігати при $k_1 = 1$, коли абразив жорстко закріплений і не відбувається процес переміщення абразивних частинок по всьому об'єму абразивної маси. Під час взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин з ґрунтом в процесі їх експлуатації k_1 не може дорівнювати 1.

При $k_2 = 1$ відбувається найменш інтенсивний процес абразивного зношування (полідеформаційне деформування). Процес зношування при $k_2 = 1$ має втолювальний характер. Для того щоб $k_2 = 1$, в абразивній масі не повинно бути вологи, абразивні частинки повинні мати ідеально круглу форму й між ними не повинно бути речовин, які можуть їх з'єднати. Ця абразивна маса є ідеальною та в реальних умовах експлуатації деталей машин не зустрічається. Крім того, слід зауважити, що навіть при ідеальній абразивній масі неможливо досягнути тертя кочення без проковзування, оскільки частинки абразивної маси та поверхня робочого органу зазнають пружних деформацій (частинки ґрунту стискаються, а метал робочого органу – розтягується). Саме тому $k_2 \rightarrow 0$.

Відповідно до молекулярно-механічної теорії та через неоднорідність ґрунтового середовища коефіцієнт тертя ковзання між поверхнею робочого органу та ґрунтом дорівнює:

$$f_{\text{ковз}} = \frac{\beta_1 a_1 S_{\phi 1} + \beta_2 a_2 S_{\phi 2} + \dots + \beta_n a_n S_{\phi n}}{P} + (b_1 + b_2 + \dots + b_n) \quad (3.24)$$

де $a_1, a_2 \dots a_n$ – середня інтенсивність молекулярної складової частинок ґрунту; $S_{\phi 1}, S_{\phi 2} \dots S_{\phi n}$ – площа фактичного контакту поверхні робочого органу зі складовими частинками ґрунту; $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$ – коефіцієнти, що враховують частку, яка припадає на кожен частинку ґрунту; P – сила тиску на поверхню робочого органу в результаті взаємодії з ґрунтом; $b_1, b_2 \dots b_n$ – коефіцієнт, який характеризує механічну складову сили тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і складовими частинками ґрунту.

На відміну від коефіцієнта тертя ковзання, який є безрозмірною величиною, коефіцієнт тертя кочення $f_{\text{коч}}$ має розмірність довжини (м). Величина $f_{\text{коч}}$ залежить від матеріалу тіл і визначається тільки дослідним шляхом. Для порівняння коефіцієнта тертя кочення і ковзання використовують показник $f_{\text{коч}}/R$.

На основі теорії проковзування та адгезійної теорії коефіцієнт тертя кочення з проковзування між поверхнею робочого органу й ґрунтом складає:

$$\begin{aligned} f_{\text{коч. з прок.}} &= \psi_1 \left(\frac{f_{\text{коч1}}}{M_{R1}} + \frac{f_{\text{коч2}}}{M_{R2}} + \dots + \frac{f_{\text{кочn}}}{M_{Rn}} \right) + \psi_2 (f_{\text{прок1}} + f_{\text{прок2}} + \dots + f_{\text{прокn}}) + \\ &\psi_3 \left(\frac{\beta_1 a_1 S_{\phi 1} + \beta_2 a_2 S_{\phi 2} + \dots + \beta_n a_n S_{\phi n}}{P} \right) = \psi_1 \left(\frac{f_{\text{коч1}}}{M_{R1}} + \frac{f_{\text{коч2}}}{M_{R2}} + \dots + \frac{f_{\text{кочn}}}{M_{Rn}} \right) + \psi_2 \left(\left(\frac{12F_1}{N} \left(\frac{M_{R1}}{M_{b1}} \right)^2 \right) + \right. \\ &\left. 12F_2 N M R_2 M b_2^2 + \dots + 12F_n N M R_n M b_n^2 + \psi_3 \beta_1 a_1 S_{\phi 1} + \beta_2 a_2 S_{\phi 2} + \dots + \beta_n a_n S_{\phi n} P \right) \end{aligned} \quad (3.25)$$

де ψ_1 – коефіцієнт, який ураховує тертя кочення без проковзування; ψ_2 – коефіцієнт, який ураховує тертя зумовлене проковзуванням; ψ_3 – коефіцієнт

урахування адгезійної складової тертя кочення; F_1 , F_2 , F_3 – сила тертя, яка зумовлена проковзуванням елементів ґрунтового середовища; N – нормальне навантаження; M_{b1} , M_{b2} , M_{bn} – математичне очікування напівширини контактної площадки, елементів ґрунту.

На величину коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом впливають характеристики ґрунтового середовища [297–299], які представлені на рис 3.5.



Рис. 3.5. Характеристики ґрунтового середовища, які впливають на величину коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом [300]

На коефіцієнт тертя також впливають і фізико-механічні властивості поверхні робочих органів ґрунтообробних машин (шорсткість, напрямок шорсткості, вид термічної обробки) [300].

Слід наголосити, що на величину коефіцієнта тертя суттєво впливає наявність вібрацій, у процесі яких змінюються характеристики ґрунтового середовища, що впливають на величину коефіцієнта тертя. У більшості відомих працях зазначено, що в результаті вібрацій можлива зміна не тільки реологічних характеристик, а й властивостей тіла. Ця зміна викликає

зменшення величини коефіцієнта тертя. Ефективний коефіцієнт тертя за вібрації у двох площинах (рис. 3.6) можна визначити залежністю [301]:

$$f_{\text{еф}} = f_0 \left(1 - \frac{mw^2 A_z}{N} - \frac{mw^2 A_x}{N} \right) \quad (3.26)$$

де f_0 – коефіцієнт тертя спокою; m – маса; w – частота вібрації; A – амплітуда вібрації; N – нормальна реакція опори.

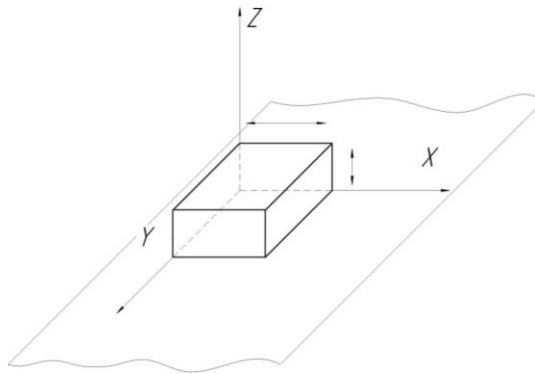


Рис. 3.6. Схема дії вібрації

Відмінність коефіцієнта тертя спокою від коефіцієнта тертя ковзання зумовлена виникненням вібрацій унаслідок відносного переміщення двох тіл.

У випадку, коли вібрації виникають на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин і передаються ґрунтовому середовищу, можуть змінюватись характеристики, які суттєво впливають на величину коефіцієнта тертя ґрунту по сталі. Зокрема, зі зміною ступеня закріплення абразивних частинок (унаслідок вібрацій) пов'язана зміна виду тертя на поверхні робочих органів з тертя ковзання на тертя кочення та тертя кочення з проковзуванням, що зі свого боку призведе до зменшення коефіцієнта тертя.

Зважаючи на вищеперераховане, коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні робочих органів ґрунтообробних машин можна трактувати, як випадкову функцію, яка змінюється в процесі функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт». Звичайно, неможливо точно передбачити, яким буде коефіцієнт тертя, тому що він залежить від багатьох факторів (характеристик ґрунтового

середовища (рис. 3.5) і поверхні робочих органів), спільну дію яких можна записати як елементарну подію.

У процесі взаємодії робочого органу з ґрунтом коефіцієнт тертя змінюється в межах від 0 до 1 (тобто при 0 коефіцієнт тертя буде дорівнювати $f_{\text{заг}} = \min$, а при 1 $f_{\text{заг}} = \max$). Це теоретичне твердження: оскільки під час експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин реальні значення змінюються в межах 0,2...0,9 і певний стан не можна пронумерувати, то маємо неперервний випадковий процес. У результаті функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» для кожного моменту часу t імовірність будь-якого стану системи в майбутньому залежить від її стану в теперішньому й не залежить від того, як система прийшла до цього стану. Тому це явище доцільно описувати марківським випадковим процесом.

Модель функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт» представимо у вигляді графа, у якому стан (вершини) зв'язані між собою переходами з i -го стану в j -ий стан (рис. 3.7).

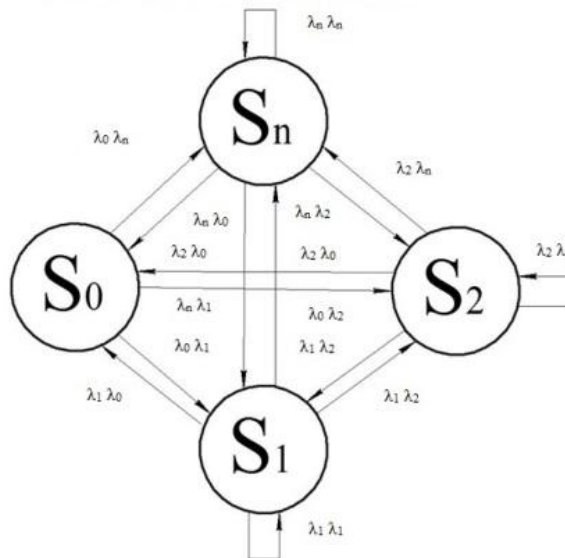


Рис. 3.7. Процес функціонування трибосистеми «робочий орган – ґрунт»: $S_0, S_1 \dots S_n$ – стан системи, якому відповідає певне величина коефіцієнта тертя ($f_{\text{заг}}$) між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом; λ_{ij} – щільність імовірності переходу

Для заданого графу (рис. 3.7) система диференціальних рівнянь Колмогорова має вигляд:

$$\begin{cases} \frac{dp_0(t)}{dt} = \lambda_{10}p_1(t) + \lambda_{20}p_2(t) + \lambda_{n0}p_n(t) - (\lambda_{01} + \lambda_{02} + \lambda_{0n}) \times p_0(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} = \lambda_{01}p_0(t) + \lambda_{21}p_2(t) + \lambda_{n1}p_n(t) - (\lambda_{10} + \lambda_{12} + \lambda_{1n}) \times p_1(t) \\ \frac{dp_2(t)}{dt} = \lambda_{02}p_0(t) + \lambda_{12}p_1(t) + \lambda_{n2}p_n(t) - (\lambda_{20} + \lambda_{21} + \lambda_{2n}) \times p_2(t) \\ \frac{dp_n(t)}{dt} = \lambda_{0n}p_0(t) + \lambda_{1n}p_1(t) + \lambda_{2n}p_n(t) - (\lambda_{n0} + \lambda_{n1} + \lambda_{n2}) \times p_n(t) \\ p_0(t) + p_1(t) + p_2(t) + p_n(t) = 1 \end{cases} \quad (3.27)$$

Цей граф (рис. 3.7) можна представити у вигляді матриці суміжності:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

Початкові умови (перед початком роботи коли, відсутній процес тертя, стан S_0): $p_0(0) = 1, p_1(0) = p_2(0) = p_n(0) = 0$.

У граничному стані $t \rightarrow \infty$ імовірності покажуть середню відносну тривалість системи в цьому стані.

Система рівнянь Колмогорова дає змогу знаходити всі ймовірності значення коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом як функції часу.

У результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що процес тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин неможливо описати законом Амонтона–Кулон, оскільки він урахує тільки механічну складову процесу тертя. З'ясовано, що на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин при взаємодії з ґрунтом відбуваються одночасно три види тертя: тертя ковзання, тертя кочення, тертя кочення з проковзуванням. Рівняння (3.22) дозволяє, визначивши загальний коефіцієнт тертя, урахувати всі види тертя, які відбуваються на поверхні, й адгезійну складову процесу тертя, а система рівнянь (3.27) дає змогу знаходити всі ймовірності значення

коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та ґрунтом як функції часу.

3.4. Вплив ступеня закріплення абразивної частинки на механізм та характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Під час абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин на поверхні тертя протікають механічні, фізичні, хімічні та термічні процеси, співвідношення між якими визначають інтенсивність абразивного зношування. Унаслідок раніше проведених досліджень [97, 153, 175, 302, 303] встановлено, що при зношуванні робочих органів ґрунтообробних машин механічні процеси на поверхні тертя переважають над іншими й визначають механізм та інтенсивність зношування. Вибір матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин повинен базуватися на властивостях ґрунтового середовища, які будуть визначати механізм абразивного зношування [304]. Один з основних чинників, що визначає механізм абразивного зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин – ступінь закріплення абразивної частинки в ґрунті. Тому дослідження впливу ступеня закріплення абразивної частинки на механізм зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин є, беззаперечно, актуальним завданням.

Зношування деталей машин при переміщенні в абразивній масі в різний час вивчали М. М. Северньов [80, 81], В. М. Ткачев [167, 168], М. М. Тененбаум [56, 144, 145, 177], Б. І. Костецкий [63, 82, 83], В. І. Дворук [305], В. В. Аулін [78, 84, 85, 233] та ін.

М. М. Северньов пропонує розглядати ґрунт як тверде тіло з доволі шорсткою поверхнею [80, 81], що є не коректним і не дозволить об'єктивно описати процеси на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин у процесі абразивного я Поверхня робочих органів ґрунтообробних машин взаємодіє з абразивними частинками, які переміщуються по всьому шарі ґрунтової маси,

що призводить до зміни фактичної площі контакту та «шорсткості» абразивної маси протягом усього часу абразивного зношування.

Процес зношування робочої поверхні деталей машин, які працюють в абразивній масі, досліджують переважно з погляду зору взаємодії з жорстко закріпленою абразивною частинкою. Відповідно до «молекулярно-механічної» теорії механізм абразивного зношування складається з 3 етапів, які представлені в табл. 1.3.

Процес відокремлення металу від поверхні робочих органів ґрунтообробних машин (табл. 1.3) можливий за таких умов:

- твердості абразивної частинки не менше 6,5 одиниць за Моосом;
- закріпленості абразивної частинки;
- наявності гострих виступів в абразивній частинці;
- тиску на абразивну частину, який дозволить їй проникати в поверхню металу.

Тому таку схему руйнування матеріалів у процесі абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин (табл. 1.3) можна зарахувати тільки до одного конкретного випадку.

Б. І. Костецький [63, 82, 83] абразивний знос поділяв на дві форми: а) з переважанням механіко-хімічного руйнування; б) з переважанням механічного руйнування. Він уважав, що форму абразивного зношування визначає співвідношення механічних властивостей абразивних частинок і поверхневих шарів металу. У цьому твердженні не врахована можливість зміни форми абразивного зношування залежно від ступеня фіксації абразивної частинки в абразивній масі.

Один з основних показників, який визначає механізм протікання абразивного зношування – це ступінь закріплення абразивної частинки. Саме тому необхідно провести дослідження для визначення впливу ступеня закріпленості абразивної частинки на механізм абразивного зношування.

Під час експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин в розпушеній ґрунтовій масі (передпосівний обробіток, боронування у два сліди і

т.д.) виникає ймовірність взаємодії поверхні робочих органів ґрунтообробних машин із незакріпленими абразивними частинками (рис. 3.8).

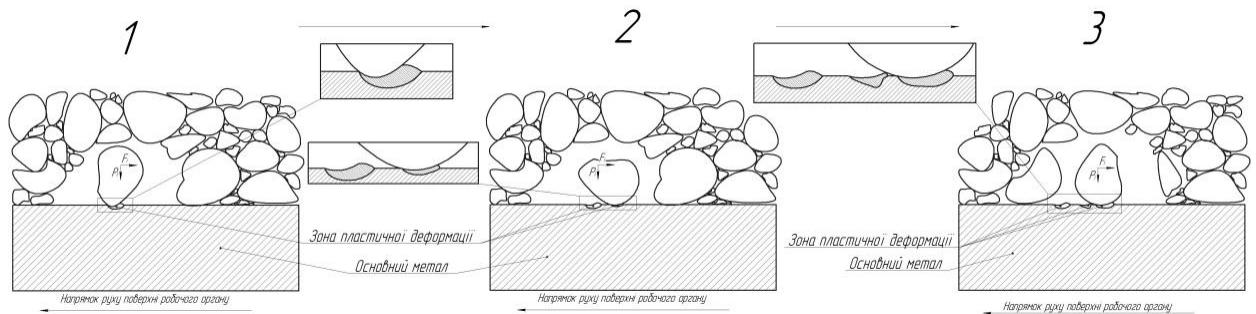


Рис. 3.8. Взаємодія поверхні робочих органів ґрунтообробних машин із незакріпленою абразивною частинкою

При взаємодії незакріплених абразивних частинок з поверхнею робочих органів (рис. 3.8) можливе протікання двох видів тертя: кочення з проковзуванням і ковзання. На поверхні тертя відбувається пластична деформація поверхні металу, зношування поверхні має втомлювальний характер. Величина пластичної деформації залежить від площі контакту між абразивною частинкою та поверхнею робочого органу, що зі свого боку залежить від форми абразивної частинки. Імовірність взаємодії поверхні робочих органів ґрунтообробних машин з «вільними» абразивними частинками невисока, більш імовірними є різні варіанти фіксації абразивних частинок представлених на рис. 3.9.

Виникнення пластичної деформації на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин спостерігається в усіх варіантах закріплення абразивної частинки, величина якої залежить від ступеня її закріпленості, тиску на неї та фактичної площі фрикційного контакту (рис. 3.9, де *a* – абразивна частинка закріплена з одного боку (згори); *б* – абразивна частинка закріплена з одного боку (за напрямком руху); *в* – абразивна частинка закріплена з одного боку (проти напрямку руху); *г* – абразивна частинка закріплена з двох боків зверху та за напрямком руху; *д* – абразивна частинка закріплена з двох боків зверху та проти напрямку руху; *е* – абразивна частинка закріплена з двох боків за напрямком та проти напрямку руху; *ж* – абразивна частинка закріплена з трьох боків (жорстко) [306]).

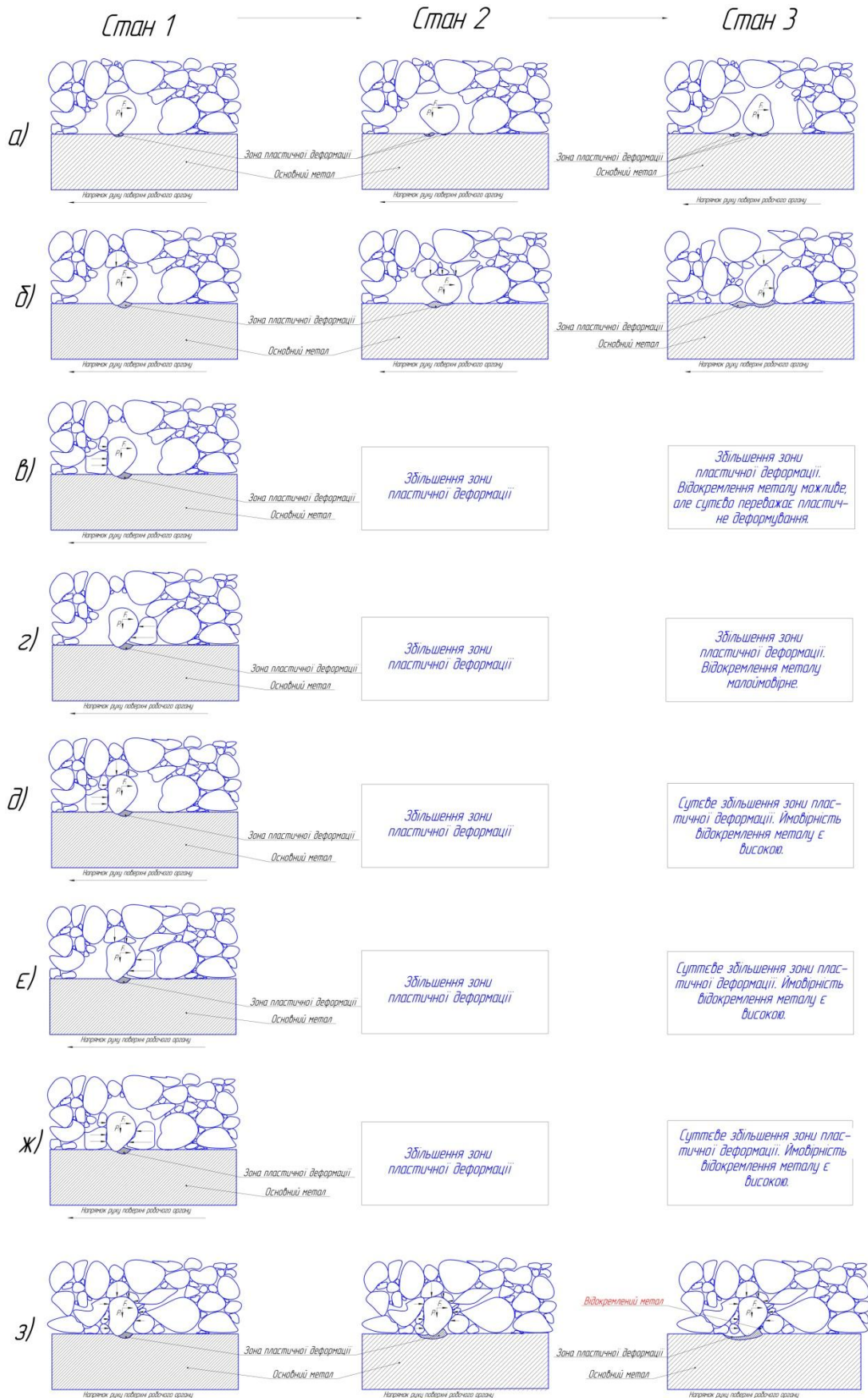


Рис. 3.9. Взаємодія абразивної частинки з поверхнею робочого органу залежно від варіанта закріплення абразивної частинки в ґрунті

Відокремлення металу (мікрорізання) прямо залежить від ступеня закріплення абразивної частинки в ґрунті: чим більший ступінь закріплення абразивної частинки тим вища імовірність відокремлення металу. Слід наголосити, що таке твердження справедливе за умови, коли твердість абразивної частинки буде дорівнювати твердості поверхні металу або буде більшою за неї.

Імовірність виникнення процесу мікрорізання металу також прямо залежить від коефіцієнта форми та тиску на абразивну частинку. Оскільки, всі ці фактори незалежні, імовірність виникнення процесу мікрорізання на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин можна описати залежністю:

$$P(\text{Мікр.})=P(T)+P(C.З.)+P(K.Ф.)+P(P) \quad (3.29)$$

де $P(\text{Мікр.})$ – імовірність зняття металу (мікрорізання) з поверхні робочих органів ґрунтообробних машин у результаті взаємодії з ґрунтовим середовищем; $P(T)$ – імовірність взаємодії з абразивною частинкою, твердість якої рівна або більша за твердість поверхні робочих органів ґрунтообробних машин; $P(K.Ф.)$ – імовірність взаємодії з абразивною частинкою, форма якої може призвести до процесу мікрорізання; $P(P)$ – імовірність виникнення тиску, що призведе до проникнення абразивної частинки в поверхню робочих органів ґрунтообробних машин.

Як бачимо із залежності 3.29, виникнення процесу мікрорізання залежить від збігу несприятливих факторів абразивного зношування в процесі експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин.

За умови жорсткого закріплення абразивних частинок (рис. 3.9, ж) та закріплення абразивної частинки з двох боків (рис. 3.9, є) на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин спостерігається тільки тертя ковзання. У всіх інших випадках (рис. 3.9, а-д) на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин можемо спостерігати два види тертя: тертя ковзання та тертя кочення з проковзуванням.

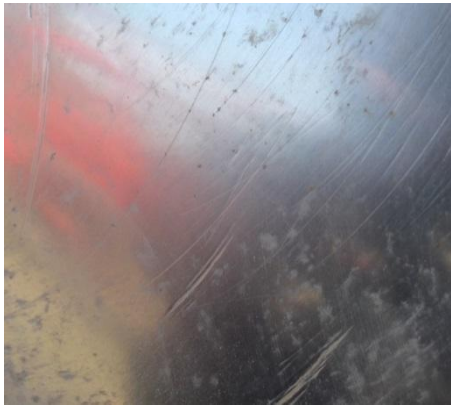
При реальній експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин абразивна частинка, яка взаємодіє з поверхнею робочих органів, може змінювати варіанти закріплення й по-різному впливати на поверхню робочих органів у різний момент часу .

Для підтвердження теоретичних положень були проведені експериментальні дослідження на супіщаних ґрунтах в Овруцькому районі Житомирської області на універсальному дисковому агрегаті УДА-4,5 в осінній період 2017 року, робочі органи якого виготовлено зі сталі 65Г. Експлуатацію дискового агрегату проводили у трьох різних ступенях закріплення абразивної частинки:

1. ділянка після озимої пшениці;
2. ділянка після озимої пшениці, повторне боронування на 2 день після першого обробітку;
3. ділянка після озимої пшениці, повторне боронування на 21 день після першого обробітку.

Під час експерименту слідкували за першим рядом сферичних вирізних дискових робочих органів типу «ромашка». К процесі досліджень з'ясовано, що при експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин на ділянках поля, де абразивні частинки мають вищий ступінь фіксації, імовірність виникнення мікрорізання значно вища (рис. 3.10).

Як бачимо з рис. 3.10, унаслідок зношування в незакріпленій абразивній масі відсутні сліди мікрорізання, на відміну від зношування в ґрунтовій масі, де абразивні частинки знаходилися в закріпленому стані. Поверхня тертя внаслідок зношування незакріпленим абразивом має вигляд відполірованої поверхні, що свідчить про переважання пластичної деформації в зоні фрикційного контакту (рис. 3.8, б).



а)



б)

Рис. 3.10. Поверхня робочих органів ґрунтообробних машин після експлуатації: *а* – на ділянці поля після озимої пшениці; *б* – на ділянці поля після озимої пшениці, повторне боронування на 2 день після першого обробітку

У цьому підрозділі теоретично встановлено механізм зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин в залежності від варіантів закріплення абразивної частинки в ґрунті. З'ясовано, що із збільшенням ступеня закріплення абразивної частинки зростає об'єм металу, який піддається пластичній деформації, і збільшується імовірність протікання негативних явищ (мікрорізання) на поверхні тертя. Результати експлуатаційних досліджень підтвердили теоретичні дослідження впливу ступеня закріплення абразивної частинки ґрунту на механізм та характер зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

3.5. Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів для забезпечення надійної експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин

Для проектування, вибору матеріалу, режимів термообробки й виготовлення деталей машин, що працюють в абразивному середовищі необхідно досконало знати абразивні характеристики середовища та процеси, що відбуваються в ньому.

У наш час для теоретичного вивчення властивостей ґрунтів дослідники [307–309] використовують феномологічний підхід. Феномологічний підхід досить поширений в теоретичній механіці, гідравліці, теорії пружності та в інших науках. Цей підхід базується на нехтуванні другорядними для даного кола проблем властивостями тіл, зберігаючи за ними лише основні властивості, які вирішальні для розглядуваних процесів [310]. У процесі вивчення абразивних властивостей ґрунтів ідеалізація такого середовища неприпустима, оскільки кожна його складова може призвести не тільки до зміни інтенсивності зношування, але й до зміни механізму зношування.

Для вивчення абразивних властивостей ґрунту необхідно застосовувати структурно-динамічний аналіз, який дозволить урахувати реальну структуру ґрунту та процеси, що відбуваються в ньому та на поверхні робочих органів під час їхньої взаємодії [311].

Із вищезазначеного видно, що для модельного уявлення ґрунту використовують феномологічний підхід з ідеалізацією його елементів. Зокрема у праці С. В. Левін [309] зауважено, що загалом механіка ґрунтів обмежується лише механічними явищами й не приділяє належної уваги фізико-хімічним та іншим процесам, що відбуваються в ґрунтах. Це свідчить про те, що механіка ґрунтів вивчає не реальні ґрунти, а деякі їх механічні моделі, тобто тіла, які наділені спрощеними властивостями [310].

Перша механічна модель ґрунтів, що відображає їх дисперсність – ідеальне сипуче тіло (рис. 3.11): скупчення кульок, не зв'язаних між собою [309].

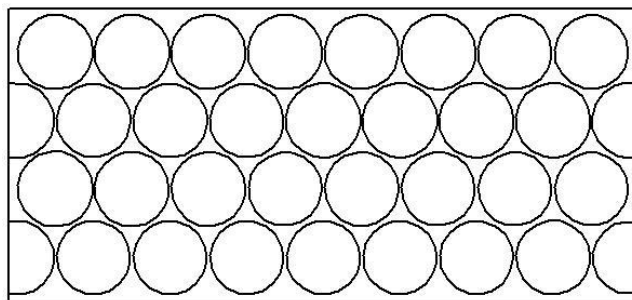


Рис. 3.11. Механічна модель ідеального сипучого тіла

Спочатку цю модель використовували для всіх пухких ґрунтів, але пізніше встановили та обґрунтували, що її можна застосовувати тільки для піщаних ґрунтів [309].

Для зв'язаних глиняних ґрунтів запропоновано 2 моделі (рис. 3.12).

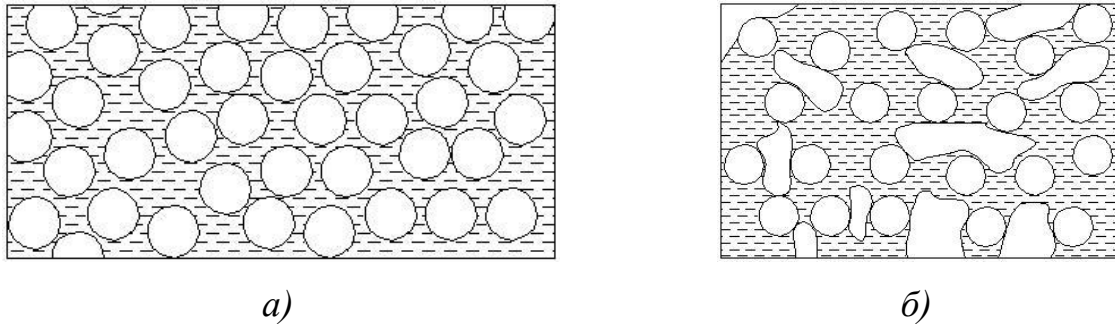


Рис. 3.12. Механічні моделі зв'язаних ґрунтів: а) двофазна система; б) трифазна система

Перша з них (рис. 2, а) моделює слабо зв'язані насичені водою ґрунти, друга (рис. 2, б) – зв'язані маловологі ґрунти [309].

У роботі В. В. Ауліна ґрунт розглянуто як пружно-в'язке середовище на основі моделі Кельвіна–Фойгта [307]. Абразивну частинку при моделюванні моно- та полідисперсного середовища ґрунту досліджено як таку, що має ідеально сферичну форму (рис. 3.13).

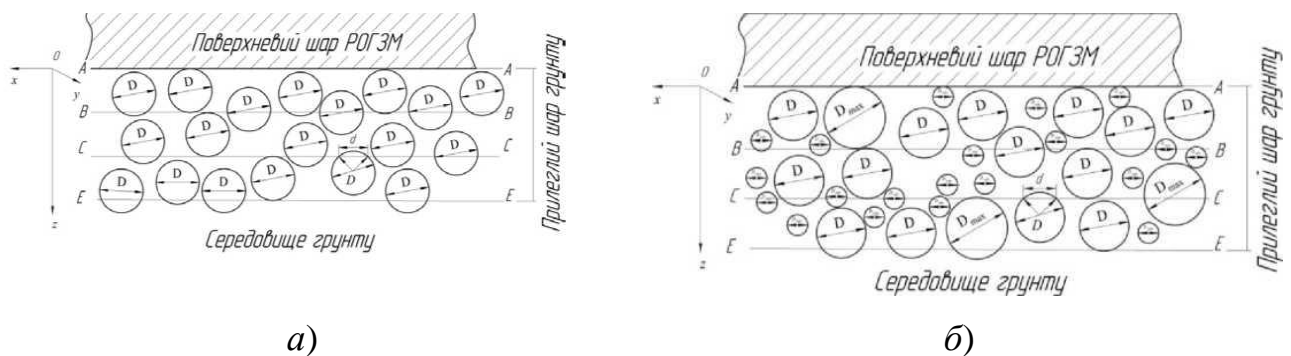


Рис. 3.13. Схема взаємодії поверхневого шару робочого органу з шаром ґрунту: а) монодисперсний шар ґрунту; б) полідисперсний шар ґрунту

В. П. Дьяков, моделюючи шар ґрунту, який піддається обробці сільськогосподарськими машинами, запропонував використовувати реологічну пружно-в'язку модель (рис. 3.14) [312].

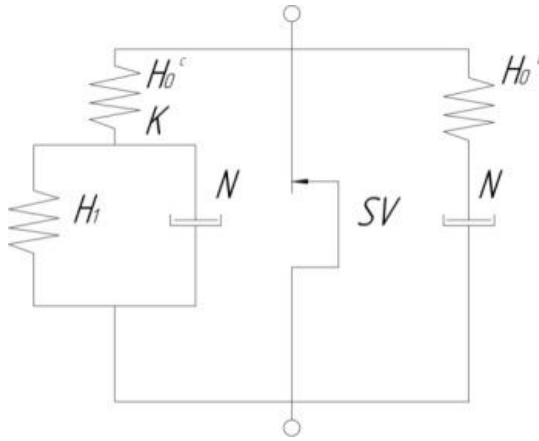


Рис. 3.14. Реологічна пружно-в'язка модель ґрунту

Модель ґрунту як реологічне тіло, являє собою систему з паралельно з'єднаних тіл Кельвіна, Максвелла й елемента Сен-Венана. Модель тіла Кельвіна відображає пружну післядію деформації за постійного напруження, модель Максвелла – релаксацію пружних напружень за постійної деформації, а елемент Сен-Венана – кардинальну властивість дискретних тіл – опір тертю, що діє як на початковій стадії деформації, так і в граничному її стані деформації. Останнє є обов'язковою вимогою до змісту моделі [312].

Наведені моделі ґрунтів доволі різноманітні, що зумовлено їх будуванням під час вирішення певних локальних завдань. Зокрема, у дослідженнях В. В. Ауліна – для визначення площі контакту абразивних частинок з матеріалом робочого органу [307], у роботі С. В. Левіна – для визначення несучої здатності ґрунтів [309], у праці В. П. Дьякова – для визначення втрати міцності ґрунту у вигляді зусиль відокремлення пласта від масиву [312]. Сьогодні відсутня математична або фізична модель, яка достовірно описує абразивні властивості ґрунту й дозволяє прогнозувати його зношувальну здатність. Виходячи з вищезазначеного, необхідно розробити математичну модель зміни абразивних властивостей ґрунту в процесі самоорганізації.

За класифікацією дисперсних систем за агрегатним станом ґрунт зараховують до капілярних систем. Для об'єктивної оцінки абразивних властивостей ґрунту необхідно розглянути його фазовий склад рис. 3.15.

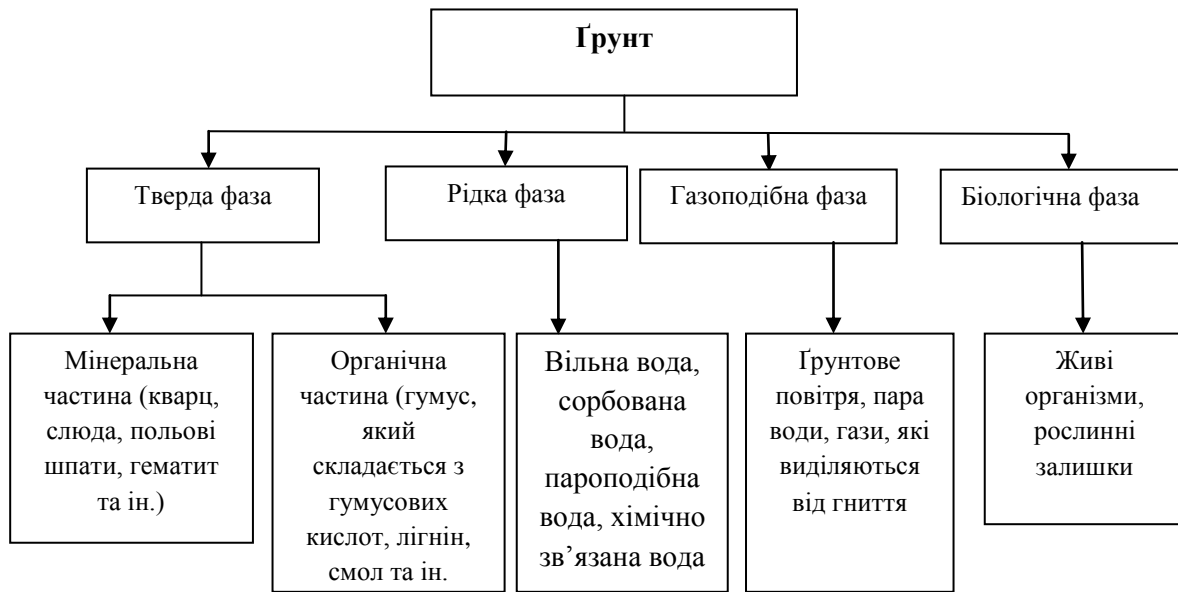


Рис. 3.15. Фазовий склад ґрунту

Зношувальна здатність ґрунту залежить від його фазового складу. У загальному вигляді її можна описати рівнянням:

$$Z_{\text{ґрунт}} = \omega_1 Z_1 + \omega_2 Z_2 + \dots + \omega_n Z_n, \quad (3.30)$$

де $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ – об'ємна частка 1, 2 ... n-го елемента системи ($\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n = 1$); Z_1, Z_2, \dots, Z_n – зношувальна здатність фаз ґрунту.

Як видно з рис. 3.15, ґрунт складається з чотирьох фаз: тверда (Z_1), рідка (Z_2), газоподібна (Z_3), біологічна фаза (Z_4).

Зношувальна здатність твердої фази ґрунту залежить від умісту твердих мінеральних частинок, твердість яких рівна або більша за твердість матеріалу робочого органу, їхнього розміру, форми та ступеня закріплення абразивних частинок:

$$f(Z_1) = (K_{\phi}, T_a, P_a, C_z, B_a), \quad (3.31)$$

де K_{ϕ} – коефіцієнт форми абразивних частинок; T_a – твердість абразивних частинок; P_a – розмір абразивних частинок; C_z – ступінь закріплення абразивної

частинки в ґрунті; B_a – уміст твердих мінеральних частинок, твердість яких рівна або більша за твердість матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин.

Тверда фаза визначає абразивні властивості ґрунту, але інші його фази також можуть суттєво впливати на механізм та інтенсивність абразивного зношування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

Розглянемо ґрунт як неоднорідне сипке тіло із здатністю до утворення монолітних складових. Висунемо низку припущень:

- 1) таке «тіло» здатне до самоорганізації (переходити з одного стану в інший протягом певного часу);
- 2) перехід у процесі самоорганізації з одного стану в інший відбувається поступово;
- 3) ґрунт – відкрита система;
- 4) ґрунт складається із чотирьох підсистем (фаз) (рис. 3.15).

Ураховуючи те, що ґрунт – складна нелінійна нерівноважна дисипативна відкрита система, здатна до самоорганізації (тобто в процесі функціонування системи відбувається спонтанний ріст порядку й організованості в системі), її слід розглядати за допомогою синергетичного підходу.

Абразивні властивості ґрунту змінюються в часі, тому необхідно провести дослідження ймовірнісного стану такого об'єкта впродовж фіксованого інтервалу часу. Загалом зміну абразивних властивостей ґрунту можна представити у вигляді схеми (рис. 3.16).

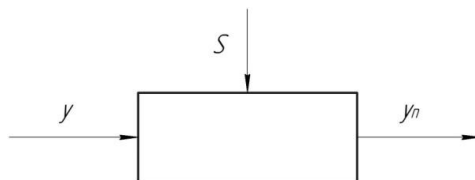


Рис. 3.16. Схема зміни абразивних властивостей середовища ґрунту: y – початкова величина абразивних властивостей ґрунту; y_n – прогнозована величина абразивних властивостей ґрунту; S – перешкоди (погодні умови, механічний вплив на систему)

Прогнозована величина y_n в загальному випадку представлена як змінна стану системи (ґрунту), на вхід якої подаються величина y і яка знаходиться під

дією відповідних перешкод S . У результаті спостереження отримуємо вибірку реалізацій y_{nt} , $t \in N$ і $y_t \in N$.

Для побудови математичної моделі, яка б дозволила прогнозувати зміну абразивних властивостей ґрунту необхідна апріорна інформація. Оскільки, прогнозуючи використовуємо синергетичний підхід, то обсяг інформації мінімальний і моделі побудовано без урахування деяких факторів.

Один з основних факторів, який впливає на абразивність ґрунту це ступінь закріплення абразивної частинки. Для його оцінки використовували показник c – питоме зчеплення, кПа.

Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів здійснено на основі експериментального методу [313]. Лабораторні дослідження проведено в закритому приміщенні з постійною температурою. Опади та дії рушіїв сільськогосподарських машин імітовано через 24 години від початку експерименту.

Перед лабораторним вивченням зміни абразивних властивостей ґрунту протягом певного часу були проведені дослідження в експлуатаційних умовах, у результаті яких отримали дані про величину питомого зчеплення для різних типів ґрунтів (табл. 3.1.) [313].

Таблиця 3.1

Результати експлуатаційних досліджень [313]

№	Місце проведення	Тип ґрунту (за механічним складом)	Вологість, %	Наявність кореневої системи	Глибина від поверхні, мм	Питоме зчеплення c , Па
1	Овруцький район	Піщаний	10,06	Без кореневої системи	100	6784,5
2	Коростенський район	Супіщаний	7,3	Коренева система багаторічної трави	100	5134,68
3	Житомирський район	Глинистий	16,8	Коренева система озимої пшениці	100	6407,1

Під час експерименту встановлено, що збільшення вологості призводить до зростання ступеня закріплення абразивних частинок. Виявлено, що

закономірність притаманна всім типам ґрунтів і зберігається до насичення ґрунту вологою.

Ґрунт – складна система здатна до самоорганізації, що зі свого боку призводить до зміни абразивних властивостей у процесі функціонування. Для визначення впливу тривалості самоорганізації та наявності перешкод проведено дослідження, результати яких представлено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Результати лабораторних досліджень впливу перешкод (опадів та дія рушіїв сільськогосподарських машин) і тривалості самоорганізації ґрунтового середовища на зміну величини питомого зчеплення [311]

Тип ґрунту	Фактори, які впливають на процес самоорганізації (перешкоди S)	Питоме зчеплення c у різні періоди проведення досліджень після механічного руйнування структури ґрунту, Па			
		$t_1=0$ год	$t_2=168$ год	$t_3=336$ год	$t_4=504$ год
Піщаний	Без перешкод	384,30	547,45	876,54	1604,5
	З імітацією опадів (20 мм)		687,38	1049,72	2043,71
	З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)		1329,57	1812,01	2456,49
	З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин		1476,56	3006,36	4579,34
Супіщаний	Без перешкод	438,41	679,41	980,37	2017,65
	З імітацією опадів (20 мм)		950,33	1494,38	2706,18
	З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)		1700,63	2397,79	3264,06
	З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин		1981,52	3897,66	5481,47
Глинистий	Без перешкод	497,84	690,50	1020,37	2134,61
	З імітацією опадів (20 мм)		945,73	1576,82	2774,48
	З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)		1712,48	2578,91	3474,32
	З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин		2170,4	3980,29	5680,54

За результатами таких досліджень побудовано графічні залежності прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів (рис. 3.17). Загалом

математичну модель, яка описує зміну величини питомого зчеплення, можна представити у вигляді поліноміальної функції другого порядку:

$$y = ax^2 + bx + c, \quad (3.32)$$

де a , b і c – експериментально визначенні коефіцієнти (табл. 3.3).

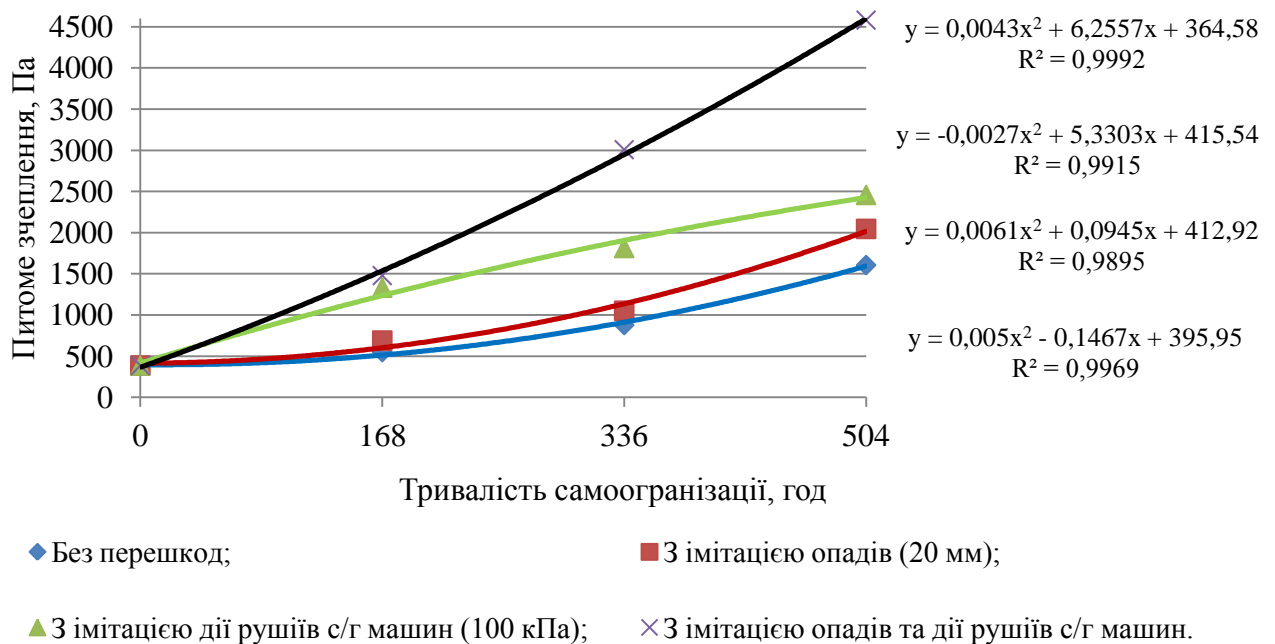


Рис. 3.17. Зміна питомого зчеплення для піщаних ґрунтів унаслідок самоорганізації ґрунтового середовища [311]

У реальних умовах функціонування ґрунту графічна залежність зміни питомого зчеплення від часу буде мати дещо інший вигляд (рис. 3.18).

На рис. 3.18 представлені не всі можливі варіанти «життя» ґрунту, адже різноманіття сільськогосподарських культур вимагає різних варіантів його обробітку. Також на інтенсивність протікання процесу самоорганізації ґрунту суттєво впливають погодні умови.

**Експериментально визначені коефіцієнти математичної
моделі для прогнозування зміни питомого зчеплення**

Тип ґрунту	Фактори, які впливають на процес самоорганізації (перешкоди S)	Коефіцієнти математичної моделі (3.32)			Коефіцієнт детермінації
		a	b	c	
Піщаний	Без перешкод	0,005	0,1467	395,95	$R^2=0,9969$
	З імітацією опадів (20 мм)	0,0061	0,0945	412,34	$R^2=0,9895$
	З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)	-0,0027	5,3303	415,54	$R^2=0,9915$
	З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин	0,0043	6,2557	354,58	$R^2=0,9992$
Супіщаний	Без перешкод	0,0071	0,5556	472,23	$R^2=0,9842$
	З імітацією опадів (20 мм)	0,0062	1,249	470,19	$R^2=0,9929$
	З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)	-0,0035	7,2284	475,12	$R^2=0,9937$
	З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин	0,0004	7,2284	475,12	$R^2=0,9983$
Глинистий	Без перешкод	0,0082	-0,995	530,2	$R^2=0,9870$
	З імітацією опадів (20 мм)	0,0066	1,0939	517,01	$R^2=0,9975$
	З імітацією дії рушіїв с/г машин (100 кПа)	-0,0028	7,256	516,7	$R^2=0,9985$
	З імітацією опадів та дії рушіїв с/г машин	0,0002	10,209	485,49	$R^2=0,9998$

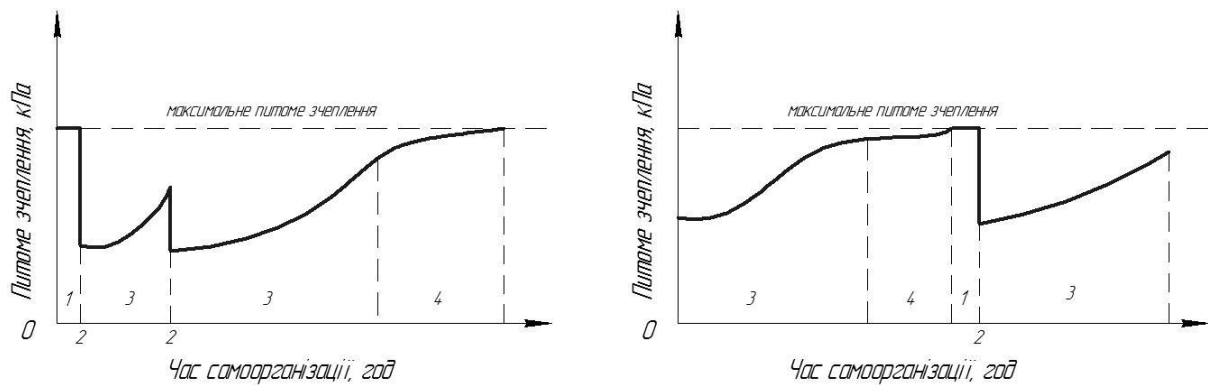


Рис. 3.18. Можливі варіанти самоорганізації ґрунту в реальних умовах ведення сільського господарства: 1 – зона знаходження ґрунту в рівноважному стані; 2 – зона механічного впливу на ґрунт (обробіток); 3 – зона активної самоорганізації; 4 – зона вповільнення самоорганізації

Досліджуючи більш достовірне прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів, розглядаємо тільки активну зону самоорганізації (рис. 3.18, зона 3).

Процес самоорганізації середовища ґрунту відбувається більш інтенсивно за наявності зв'язувальних компонентів (глини). Зовнішні чинники суттєво прискорюють процеси самоорганізації. Зокрема наявність імітації опадів інтенсифікує процес самоорганізації на 19,7...54,5 %, наявність імітації дії рушіїв сільськогосподарських машин – в 1,53...2,52 рази (табл. 3.2).

Характер залежності зміни питомого зчеплення c для всіх типів ґрунтів від імітації дії рушіїв сільськогосподарських машин (100 кПа) суттєво відрізняється від інших, що зумовлено більш швидким процесом самоорганізації на початку функціонування системи.

Для визначення впливу величини питомого тиску рушіїв сільськогосподарських машин і часу дії таких рушіїв на швидкість реалізації процесу самоорганізації середовища ґрунту проведено відповідні дослідження, результати яких представлені в табл. 3.4.

На піщаних ґрунтах зростання питомого тиску від імітації дії рушіїв сільськогосподарських машин призводить до більш суттєвого зростання

величини питомого зчеплення (у 2,01...2,18 разів) порівняно із супіщаними (в 1,64...1,72 разів) та глинистими ґрунтами (в 1,58...1,81 разів) (табл. 3.4, рис. 3.17).

Зростання часу імітації дії рушіїв на ґрунт (збільшення часу дії питомого тиску на поверхню ґрунту) призводить до інтенсифікації процесів самоорганізації в ґрунті й зростання величини питомого зчеплення (ступеня закріплення абразивних частинок), що в свою чергу призводить до збільшення зношувальної здатності ґрунту (рис. 3.18). Так, збільшення часу дії питомого тиску від 2 хв до 8 хв призводить до зростання питомого зчеплення в 1,4...1,75 разів.

Таблиця 3.4

**Вплив величини тиску та часу прикладання навантаження на величину
питомого зчеплення ґрунту**

Тип ґрунту	Величина тиску, кПа	Час прикладання статичного навантаження, хв	Питоме зчеплення c у різні періоди проведення досліджень, після механічного руйнування структури ґрунту, Па			
			$t_1=0$ год	$t_2=168$ год	$t_3=336$ год	$t_4=504$ год
1	2	3	4	5	6	7
Піщаний	100	2	384,30	1329,57	1812,01	2456,49
	100	4		1640,40	2129,13	3214,52
	100	8		1984,73	2597,24	4302,91
	150	2		2104,32	2714,12	3640,23
	200	2		2640,92	3727,09	4643,21
	250	2		2902,35	3894,13	4938,75
Супіщаний	100	2	438,41	1700,63	2397,79	3264,06
	150	2		2201,66	3402,32	4870,27
	200	2		2600,37	3807,37	5240,31
	250	2		2938,13	4201,99	5372,31
Глинистий	100	2	497,84	1712,48	2578,91	3474,32
	150	2		2481,32	3724,32	5300,66
	200	2		2842,03	3943,24	5381,32
	250	2		3114,31	4455,61	5498,13

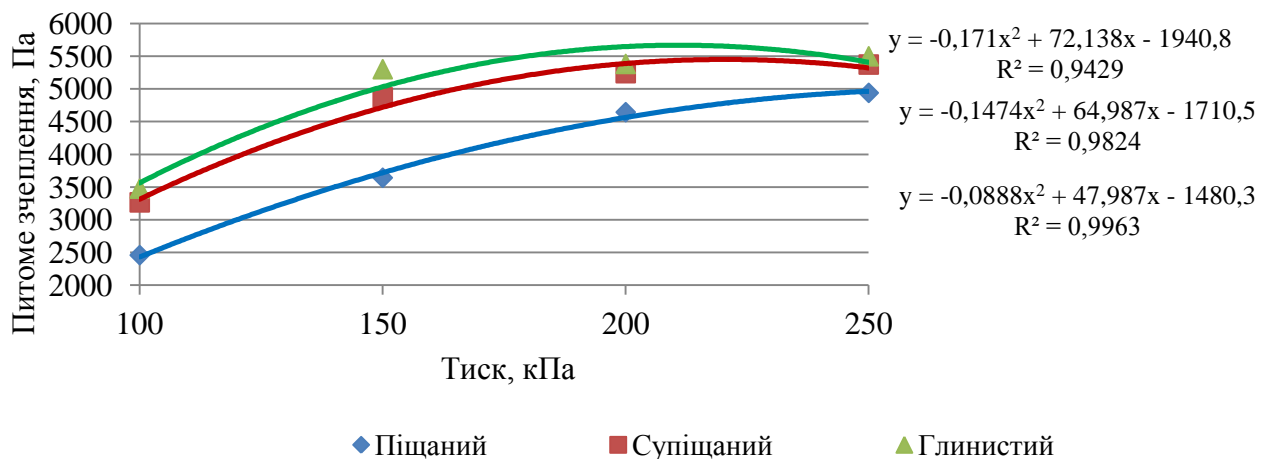


Рис. 3.19. Зміна питомого зчеплення для різних типів ґрунтів в залежності від величини питомого тиску, що імітує дії рушіїв сільськогосподарських машин (час проведення дослідження $t_4=504$ год)

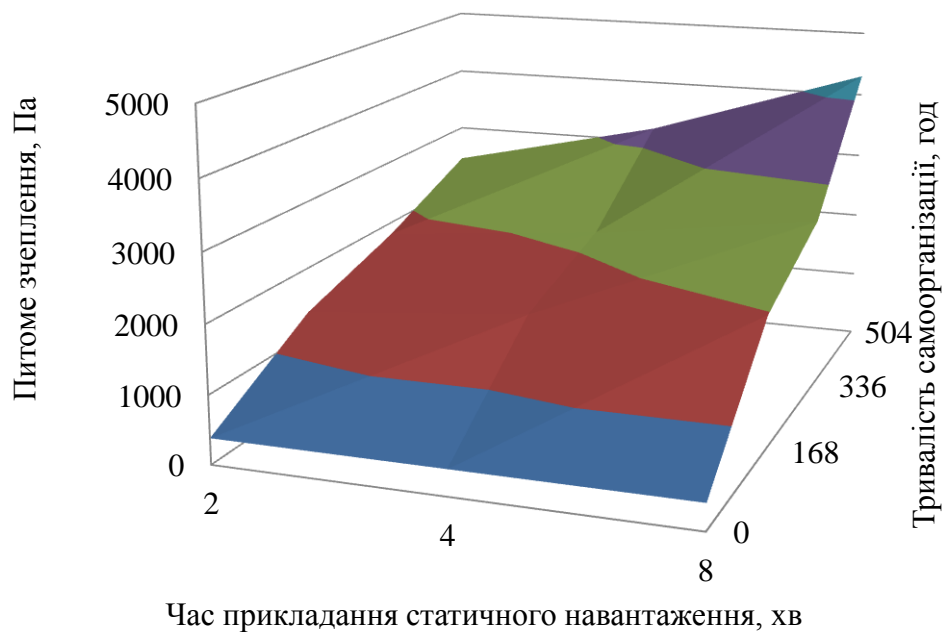


Рис. 3.20. Поверхня відгуку впливу часу прикладання статичного навантаження та часу самоорганізації ґрунту на величину питомого зчеплення

На величину зношувальної здатності ґрунтів суттєво впливає наявність води, яка також впливає й на інтенсивність процесу самоорганізації ґрунту (табл. 3.5, рис. 3.21).

На глинистих ґрунтах зростання кількості опадів призводить до суттєвого зростання величини питомого зчеплення (в 1,2...1,84 раза) порівняно із супіщаними (в 1,21...1,53 раза) та глинистими ґрунтами (в 1,2...1,43 раза) (табл. 3.5, рис. 3.21).

Для з'ясування спільного впливу величини питомого тиску та кількості опадів на інтенсифікацію процесу самоорганізації ґрунтового середовища проведено двофакторний експеримент на трьох типах ґрунтів (рис. 3.22).

Таблиця 3.5

Вплив кількості опадів на зміну величини питомого зчеплення

Тип ґрунту	Кількість опадів, мм	Питоме зчеплення c у різні періоди проведення досліджень після механічного руйнування структури ґрунту, Па			
		$t_1=0$	$t_2=168$ год	$t_3=336$ год	$t_4=504$ год
Піщаний	10	384,30	640,94	1031,94	2001,32
	20		687,38	1049,72	2043,71
	30		728,41	1200,13	2081,13
	40		804,32	1471,32	2402,13
Супіщаний	10	438,41	894,32	1240,23	2531,16
	20		950,33	1494,38	2706,18
	30		1107,63	1502,31	2931,47
	40		1214,54	1904,32	3071,62
Глинистий	10	497,84	870,23	1304,28	2608,36
	20		945,73	1576,82	2774,48
	30		1198,74	1742,13	3027,12
	40		1314,52	2403,46	3102,26

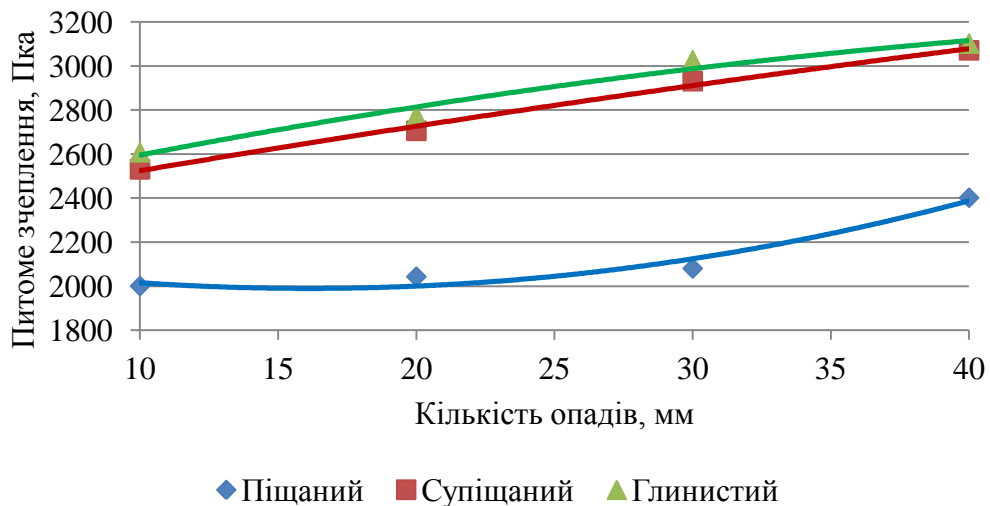


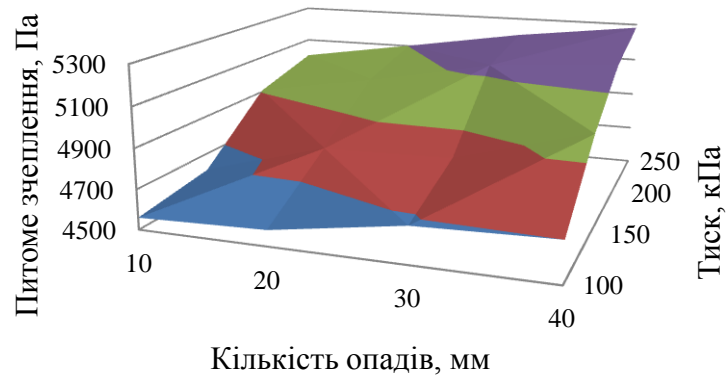
Рис. 3.21. Зміна питомого зчеплення для різних типів ґрунтів в залежності від кількості опадів (час проведення дослідження $t_4=504$ год)

Унаслідок спільної дії двох факторів: кількості опадів та величини питомого тиску, що імітує дії рушіїв сільськогосподарських машин – процес самоорганізації середовища ґрунту інтенсифікується відповідно для піщаних ґрунтів у 2,8...3,2 рази, для супіщаних – у 2,9...3,1 рази, для глинистих – у 2,75...2,9 рази в порівнянні з самоорганізацією без перешкод.

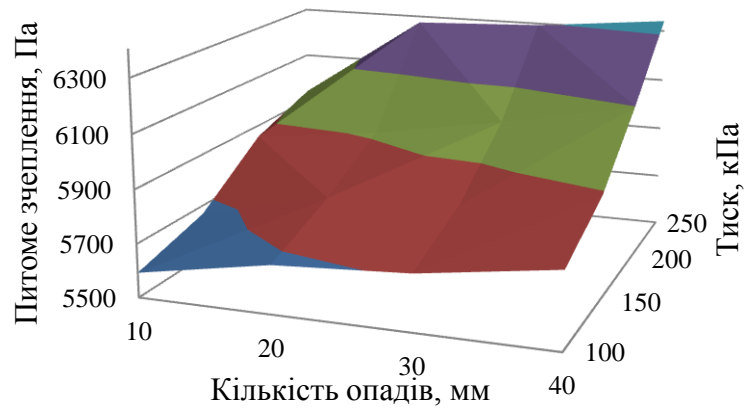
Для уникнення негативних явищ абразивного зношування (процесу мікрорізання) необхідно:

- під час обробки ґрунтів з високим ступенем закріплення абразивних частинок застосовувати робочі органи з нанесеним зносостійким покриттям, твердість яких більша за твердість абразивних частинок в 1,1...1,3 рази;
- на ґрунтах з невисоким ступенем закріплення абразивних частинок використовувати серійні робочі органи, виготовлені зі сталі 65Г та 28MnB5.

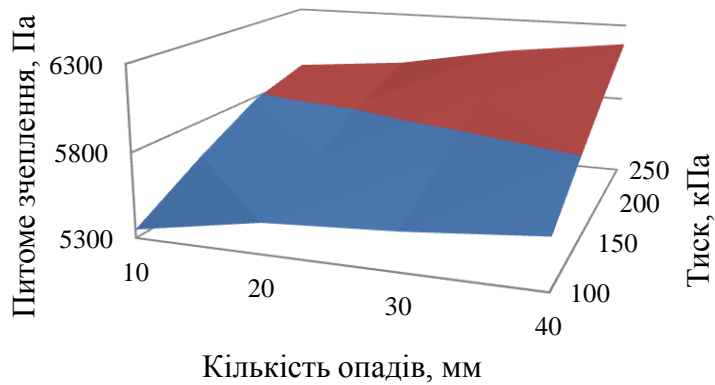
Для зменшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин у процесі експлуатації, зважаючи на отримані математичні моделі зміни абразивних властивостей ґрунту під час самоорганізації, потрібно проводити обробіток ґрунту на початку самоорганізації системи.



а)



б)



в)

Рис. 3.22. Поверхні відгуку впливу кількості опадів та величини тиску, що імітує дії рушіїв сільськогосподарських машин на величину питомого зчеплення (час проведення дослідження $t_4=504$ год): а – піщаний ґрунт; б – супіщаний ґрунт; в – глинистий ґрунт

У результаті проведених досліджень встановлено, що ґрунт як складна система спроможна до самоорганізації, у процесі якої підвищується його абразивна здатність. Зовнішні чинники (опади та питомий тиск від дії рушіїв) пришвидшують процес самоорганізації ґрунту, що призводить до зростання його абразивних властивостей. Зовнішні чинники не впливають на загальну закономірність більш інтенсивної самоорганізації ґрунтового середовища на початку її функціонування після механічного руйнування структури. Розроблені математичні моделі, які враховують зовнішні чинники, дозволяють прогнозувати зміну абразивних властивостей ґрунту.

Проведені дослідження дозволяють прийти до висновку, що на самоорганізацію ґрунту впливають зовнішні чинники: опади та дія рушіїв сільськогосподарських машин. На різних типах ґрунтів ці чинники діють по-різному на процес самоорганізації, зокрема дія рушіїв сільськогосподарських машин більш суттєво інтенсифікує процес самоорганізації на піщаних ґрунтах, а наявність вологи – на глинистих.

Зменшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин можна досягти завдяки ранньому повторному обробітку (після механічного руйнування структури ґрунту), поки не відбулося підвищення абразивних властивостей унаслідок самоорганізації ґрунту.

3.6. Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Алгоритм послідовності розробки теоретичних основ забезпечення самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин у системному вигляді представлено на рис. 3.23.

Як видно з рис. 3.23, мету роботи реалізовано шляхом розв'язування таких завдань:

- пошуку вихідних даних для оптимізації процесу самоорганізації (самозагострювання) робочих органів;

- визначення цільових функцій.

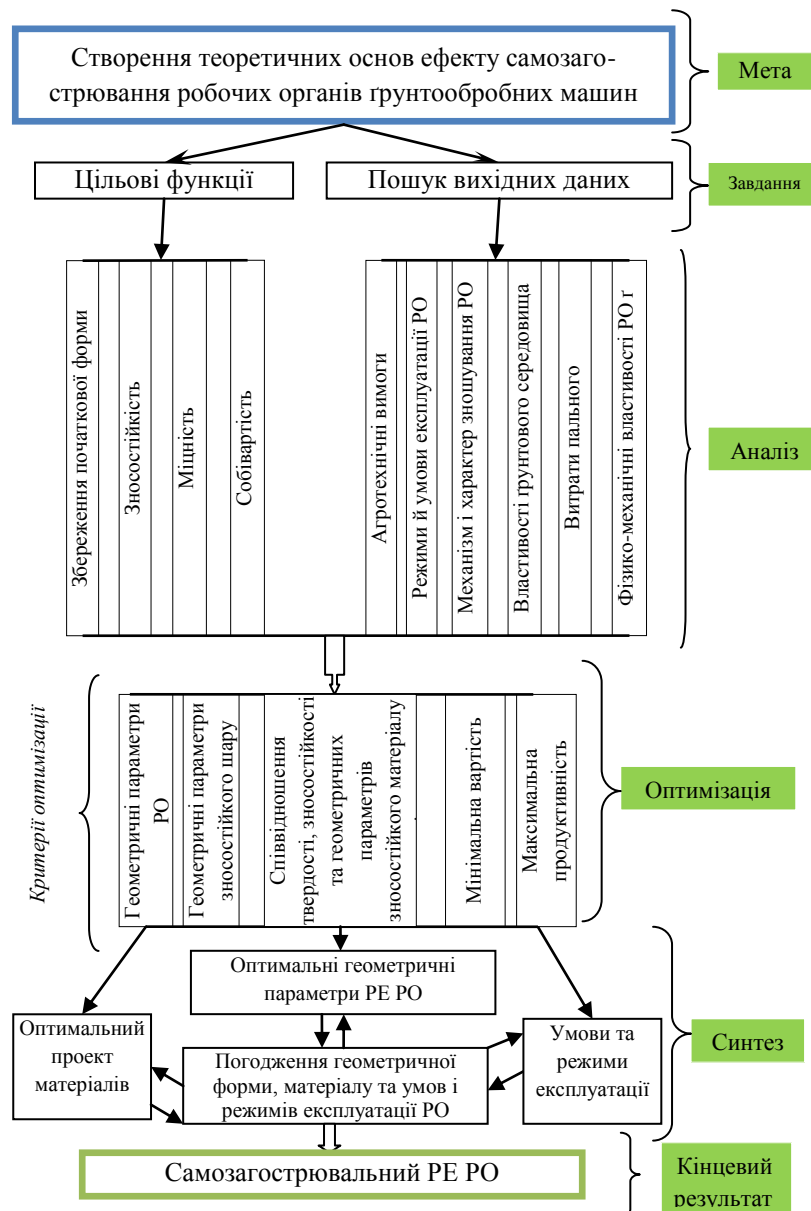


Рис. 3.23. Алгоритм розробки самозагострювальних різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: РО – робочі органи; РЕ – різальний елемент [314]

Під час аналізу вихідних даних і цільових функцій було сформовано критерії оптимізації. Після розробки локальних методів оптимізації критеріїв функції, розглядалася задача синтезу оптимального проекту самозагострювального різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин, що є кінцевим результатом теоретичних досліджень.

Етапи системного аналізу та оптимізацію вивчено детально, а синтез – з погляду загального підходу.

Форма різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин повинна забезпечувати виконання відповідних технологічних операцій, здійснюючи при цьому якомога найменший опір. Визначення форми твердого тіла, що здійснює опір потоку, є класичною задачею варіативного обчислення [225]. Вирішивши рівнянні Ейлера, визначимо оптимальний кут різання ґрунту:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{3}{2}f \pm \sqrt{\frac{9}{4}f + 2} \quad (3.33)$$

де f – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі.

Провівши розрахунки автор роботи [248] прийшов до висновку, що оптимальний кут різання α повинен бути в межах $39,3 \dots 52,7^\circ$. Це твердження добре узгоджується з дослідженнями А. Ш. Рабіновича, який встановив, що в результаті зношування різальних елементів кут утворений на лицевій поверхні леміша має нахил до горизонту $48 \dots 52,5^\circ$ [179].

Такі розрахунки базовані на врахуванні тільки одного коефіцієнта тертя – ковзання. Під час взаємодії робочого органу з ґрунтом на його поверхні відбуваються три види тертя: тертя ковзання, тертя кочення та тертя кочення з проковзування. Якщо великий ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті, то тертя ковзання переважає над усіма іншими видами тертя. Якщо ґрунт знаходиться в пухкому стані, перевага тертя ковзання не настільки суттєва і нехтувати іншими видами тертя недоцільно. Зазначмо, що проектуючи робочі органи ґрунтообробних машин, необхідно врахувати цю обставину.

Теоретично визначити оптимальних кут різання для різних станів ґрунту – складне завдання. Саме тому здійснено аналіз зношених робочих органів ґрунтообробних машин, які працювали на різних типах ґрунтів і в різних станах (табл. 3.6) і визначено кути, які утворені в різальній частині (рис. 3.24, 3.25 та 3.26).

**Кут загострення, який утворюється в результаті зношування серійних
монометалевих робочих органів ґрунтообробних машин (матеріал
дискового робочого органу та стрілочатої лапи – сталь 65Г, лемеша – сталь
Hardox 500) [314]**

Робочий орган	Кут загострення, град					
	Супіщаний	Супіщаний (пухкий ґрунт)	Середній суглинок	Середній суглинок (пухкий ґрунт)	Глина легка	Глина легка (пухкий ґрунт)
Леміш (лезова частина)	26...35	-	32...48	-	52...70	-
Долото леміша (змінне)	47...51	-	49...57	-	58...79	-
Стрілочата лапа (крила, перший ряд)	17...21	16...19	23...25	22...23	31...38	27...31
Дисковий робочий орган (тип «ромашка», перший ряд)	27...31	26...30	33...35	30...34	36...41	32...36

Кут загострення, який утворився в результаті зношування (природній кут), відрізняється по всій довжині леза (рис. 3.24 та рис. 3.25). Це можна пояснити зміною величини тиску абразивної маси на різних частинах леза. Розробляючи самозагострювальні різальні елементи робочих органів, таку закономірність (рис. 3.26) необхідно врахувати під час обґрунтування співвідношення між параметрами зносостійкого шару й основного металу.



Рис. 3.24. Формоутворення різального елемента змінного долота леміша (експлуатація на супіщаних ґрунтах)



Рис. 3.25. Формоутворення різального елемента леза леміша (експлуатація на легкій глині)



Рис. 3.26. Зміна кута загострення різального елемента лезової частини леміша в процесі експлуатації на різних типах ґрунтів: точки *A*, *B*, *C*, *D* – місця проведення замірів [314]

В результаті експлуатації на піщаних і супіщаних ґрунтах виявлено, що різальні елементи робочих органів ґрунтообробних машин, які виготовлені з матеріалу без нанесення зносостійкого покриття (одношарові), здатні до самозагострювання (рис. 3.24). На більш важких ґрунтах (суглинках і глинах) спостерігається затуплення різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин (рис. 3.25).

Для інших типів робочих органів ґрунтообробних машин спостерігається подібна закономірність зміни кута загострювання від типу ґрунту по довжині різальної кромки.

Досягнення форми природного зношування не завжди призводить до зменшення тягового опору агрегату, а відповідно й до зменшення витрат пального (рис. 3.27). Для об'єктивності оцінки впливу самоорганізації серійних робочих органів результати представлено у відсотковому значенні, оскільки обробіток ґрунту проводився різними агрегатами. За 100% узято витрати пального в процесі експлуатації агрегату з новими робочими органами.

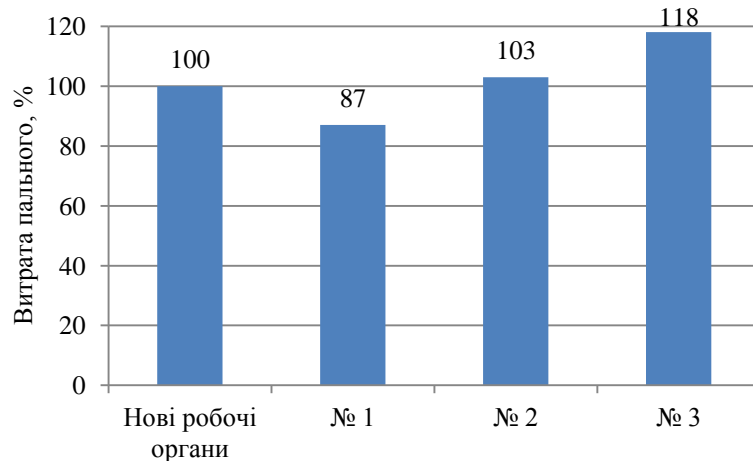


Рис. 3.27. Витрата пального в початковій формі і при досягненні форми природного зношування в процесі експлуатації для одношарових лемішів виготовлених зі сталі Hardox 500: № 1 – на супіщаних ґрунтах; № 2 – на суглинкових ґрунтах; № 3 – на легкій глині [314]

Як видно з рис. 3.27, на піщаних і супіщаних ґрунтах зношування призводить до самоорганізації робочих органів, що сприяє процесові самозагострювання, який так само спричиняє зменшення витрат пального під час обробітку ґрунту. На суглинкових та глиняних ґрунтах природна форма зношування призводить до затуплення лезової частини й зростання витрат пального. Саме тому розробка самозагострювальних різальних елементів робочих органів для цих типів ґрунтів є найбільш актуальною. Для піщаних та супіщаних ґрунтів необхідно розробити заходи щодо підвищення зносостійкості зі збереженням природної форми зношування, а для суглинкових і глиняних ґрунтів – заходи, які дозволять керувати процесом зношування, з можливістю досягнення ефекту самозагострювання.

Під час проектування самозагострювальних різальних елементів робочих органів одним з основних показників є співвідношення зносостійкості матеріалів робочих органів та їхніх геометричних характеристик.

Для досягнення ефекту самозагострювання і забезпечення рівності зношування робочих органів співвідношення зносостійкості та товщини основного металу й зносостійкого шару повинно відповідати значенням, визначеним у відомих працях [50, 167, 168, 179], відповідно до критерію, запропонованого А. Ш. Рабіновичем. Зокрема, у праці В. П. Іванова вказано, що значення даного співвідношення повинно бути для більшості ґрунтів $\omega=1,5$ [315]. На основі аналізу зношених робочих органів, аналізу попередніх досліджень та практичного досвіду встановлено критерій ω для різних типів робочих органів ґрунтообробних машин з урахуванням умов експлуатації (табл. 3.7).

Таблиця 3.7

Критерій самозагострювання ω (визначений експериментально)

Ґрунт	Стан ґрунту	Критерій ω		
		Леміш	Стрілчата лапа культиватора	Дисковий робочий орган
Супіщаний	Поле після збирання с/г культур	1,6...1,7	1,5...1,6	1,9...2,0
	Пухкий ґрунт	-	1,3...1,4	1,3...1,4
Середній суглинок	Поле після збирання с/г культур	1,5...1,6	1,4...1,5	1,9...2,0
	Пухкий ґрунт	-	1,25...1,35	1,4...1,5
Глина легка	Поле після збирання с/г культур	1,5...1,6	1,35...1,45	1,8...1,9
	Пухкий ґрунт	-	1,2...1,3	1,45...1,55

Для лемішів не визначали критерію самозагострювання ω у процесі експлуатації на пухких ґрунтах, оскільки вони не працюють у таких умовах.

Зі зменшенням абразивності ґрунту та ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті спостерігається зменшення критерію ω для всіх типів робочих органів ґрунтообробних машин (табл. 3.7).

Для дискових робочих органів критерій ω суттєво більший, що пов'язано насамперед із наявністю динамічних навантажень під час роботи на твердих ґрунтах. Цей результат підтверджено суттєвим зменшенням критерію ω унаслідок зменшення ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті, а отже, і його твердості.

За наявності кам'янистих складових у ґрунті критерій ω повинен бути суттєво збільшений, що б унеможливити обломлювання різальних елементів робочих органів.

У класичному розумінні співвідношення яке визначає критерій ω повинно відповідати залежності наведеній в роботі [179] по всій поверхні різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин. Дана залежність не розкриває повною мірою процеси самоорганізації робочих органів ґрунтообробних машин, оскільки не враховує особливості зношування складових частин робочих органів. Це співвідношення має забезпечувати не тільки можливість самозагострювання різальних елементів робочих органів, але й рівностійкість зношування робочих органів. В основі запропонованих співвідношень зносостійкості й товщини нанесеного зносостійкого та несучого шарів робочих органів лежать експериментальні дослідження характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин в залежності від абразивних властивостей ґрунту та режимів експлуатації.

Зони, на які запропоновано розділити робочі органи ґрунтообробних машин для забезпечення самоорганізації, що призведе до підвищення довговічності та забезпечить якісний обробіток ґрунту протягом усього терміну експлуатації представлені на рис. 3.30.

Рис. 3.30 зображує зони нанесення зносостійкого покриття на поверхню робочих органів ґрунтообробних машин для досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості: 1 – зона, яка найбільш інтенсивно зношується; 2 – зона з меншою інтенсивністю зношування. Такий розподіл не оптимальний, наприклад, леміш плуга більш доцільно поділити на 4 зони, але

це ускладнить, а в деяких випадках унеможливить процес нанесення зносостійкого шару в умовах ремонтних майстерень аграрних підприємств.

Зону 2 для лемішів і культиваторних лап можна зміцнювати точково для утворення зубчастої поверхні. Форма такої поверхні сприяє якісному виконанню технологічної операції і призводить до зменшення тягового опору на 3,2...6,4%, але зменшує зносостійкість на 8,1...14,5 %.

При використанні лемішів зі змінним долотом зона 1 не зміцнюється.

Для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів робочих органів та рівностійкості зношування необхідно, щоб параметри зносостійкого шару мали співвідношення:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{1з.} h_{1з.}}{\varepsilon_{2з.} h_{2з.}}, \quad (3.34)$$

де $\varepsilon_{1з.}$ – зносостійкість зміцнювального покриття зони 1; $\varepsilon_{2з.}$ – зносостійкість зміцнювального покриття зони 2; $h_{1з.}$ – товщина зміцнювального покриття зони 1; $h_{2з.}$ – товщина зміцнювального покриття зони 2.

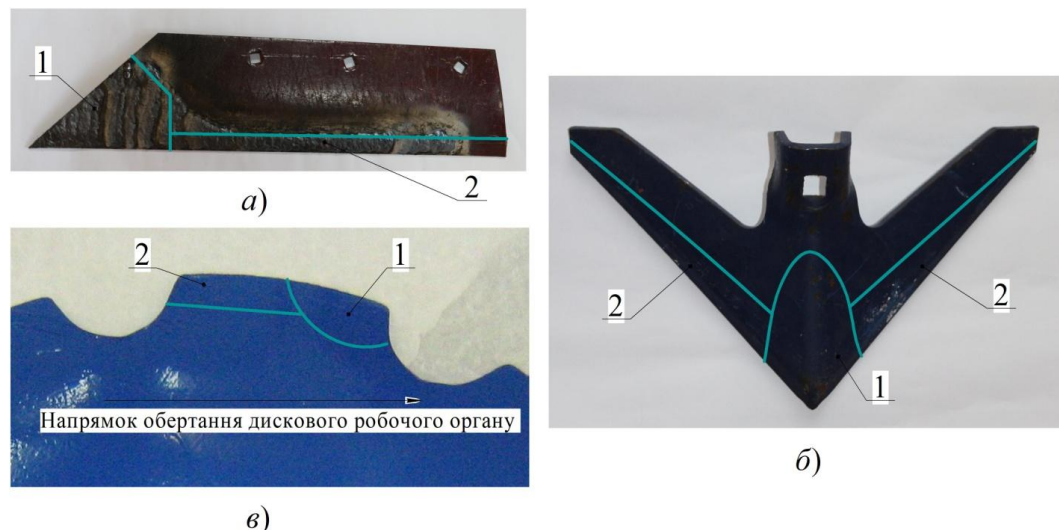


Рис. 3.28. Схеми нанесення зносостійкого покриття на різальні елементи робочих органів ґрунтообробних машин для досягнення ефекту самозагострювання та забезпечення рівностійкості зношування леміша (а), стрілочатої лапи (б) та дискового робочого органу (в): 1, 2 – зони нанесення зносостійкого шару

Значення χ встановлено для різних типів ґрунтів з урахуванням їхнього стану.

Таблиця 3.8

Співвідношення між параметрами зносостійкого шару χ (визначено експериментально)

Ґрунт	Стан ґрунту	Критерій χ		
		Леміш	Стрілчаста лапа культиватора	Дисковий робочий орган
Супіщаний	Поле після збирання с/г культур	1,50...1,60	1,20...1,30	1,10...1,15
	Пухкий ґрунт	-	1,05...1,15	1,05...1,10
Середній суглинок	Поле після збирання с/г культур	2,25...2,35	2,45...2,55	1,90...2,00
	Пухкий ґрунт	-	1,80...1,90	1,50...1,60
Глина легка	Поле після збирання с/г культур	2,35...2,45	2,40...2,50	2,10...2,15
	Пухкий ґрунт	-	1,80...1,90	1,55...1,65

Швидкість руху ґрунтообробного агрегату суттєво впливає на характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин, а отже, і на співвідношення параметрів зносостійкого шару в різних зонах робочих органів. Дослідження критерію χ проведені на агрегатах, які працювали в діапазоні швидкостей 10...11 км/год. За умови подальшого зростання швидкості необхідно вводити корегувальний коефіцієнт Ω , який визначається за формулою:

$$\Omega = (V_{роб} - V_{поч}) \times \beta \quad (3.35)$$

де $V_{роб}$ – робоча швидкість агрегату; $V_{поч}$ – початкова швидкість агрегату (11 км/год); β – поправочний коефіцієнт, який ураховує зростання інтенсивності зношування зони 1 під час зростання швидкості руху агрегату (для супіщаних і піщаних ґрунтів $\beta \approx 1,03$, для суглинків $\beta \approx 1,025$ та для глиняних ґрунтів $\beta \approx 1,012$).

Початковий кут загострення робочих органів ґрунтообробних машин суттєво впливає не тільки на реалізацію ефекту самозагострювання, а й на довговічність робочих органів. Проведений аналіз дослідних робіт та їх синтез з отриманими даними експлуатаційних досліджень дозволили встановити оптимальні кути загострення робочих органів ґрунтообробних машин. Для лемішів оптимальний кут загострення лезової частини знаходиться в межах $8...10^\circ$, носової частини – $20...27^\circ$, для стрілчатих лап лезової частини $8...10^\circ$, носової частини – $25...30^\circ$, для дискового робочого органу – $28...34^\circ$. Зміцнюючи стрілчатую лапу із зовнішнього боку, загострення крил лапи проводили з внутрішнього боку. Загострювання в усіх випадках проводили одностороннє.

В аналізі наведено суперечливі дані щодо боку нанесення (зовнішню чи внутрішню) зносостійкого матеріалу на стрілчатую лапу, тому для проведення експериментальних досліджень лапи виготовляли з внутрішнім і зовнішнім нанесенням зносостійкого покриття.

Унаслідок проведених експлуатаційних досліджень у всіх робочих органів, які були виготовлені за рекомендаціями наведеними в теоретичних дослідженнях, спостерігався ефект самозагострювання.

Під час експлуатації стрілчатих лап із внутрішнім зносостійким шаром на супіщаних та суглинкових ґрунтах помічено виступ зміцненого шару, який обломлювався взаємодіючи з твердими включеннями в ґрунті. Довговічність таких лап на цих ґрунтах була в 1,6..1,9 раза менша, ніж серійних. На глинистих ґрунтах лапи з внутрішнім зносостійким шаром демонстрували ефект самозагострювання, а довговічність їх була на 2,8% більша за лапи з зовнішнім зносостійким шаром.

Процес самоорганізації (самозагострювання) робочих органів ґрунтообробних машин, досягнутий за рахунок нанесення зносостійкого шару, дозволив суттєво зменшити витрати пального в процесі експлуатації на суглинкових і глинистих ґрунтах та підвищити довговічність на супіщаних і піщаних ґрунтах порівняно з використанням серійних робочих органів (розділ 7).

Одержані результати теоретичних досліджень та експлуатаційних досліджень дозволяють упроваджувати самозагострювальні різальні елементи робочих органів на аграрних підприємствах з урахуванням особливостей експлуатації та типів ґрунтів.

Висновки по розділу 3

1. На основі синтезу знань з різних наук побудовано фізико-математичну модель трибоситеми «робочий орган – ґрунт», виявлено її специфіку, визначено процеси, які відбуваються внаслідок функціонування системи, встановлено енергетичний і масовий баланс системи й окреслено напрямки, що дозволить суттєво підвищити довговічність та зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин.

2. Ураховуючи процеси і явища, які відбуваються на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин під час взаємодії з ґрунтом та фрикційні властивості ґрунту, теоретично встановлено коефіцієнт тертя між ґрунтом і поверхнею робочих органів, який дозволить при розробці робочих органів з підвищеною довговічністю та зносостійкістю, більш якісно проводити проектування поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин.

3. Виявлено, що коефіцієнт тертя ґрунту по поверхні робочих органів ґрунтообробних машин – випадкова функція і його значення є миттєвою величиною, яка залежить тільки від стану, у якому знаходиться дана і не залежить від того, як система прийшла в цей стан. Саме тому це явище описано

марківським випадковим процесом. Для визначення ймовірних значень коефіцієнта тертя ґрунту по поверхні робочих органів ґрунтообробних машин побудовано систему рівнянь Колгомова.

4. З теоретичного та експериментального погляду визначено вплив ступеня закріплення абразивних частинок ґрунту на механізм і характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин. З'ясовано, що з ростом ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті ймовірність виникнення негативного явища (процесу мікрорізання) на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин зростає.

5. Приведено результати теоретичних та лабораторних досліджень процесу самоорганізації середовища ґрунту. Встановлено, що в процесі самоорганізації середовища ґрунту відбувається зміна його абразивних властивостей, переважно в бік зростання абразивних властивостей. Зовнішні чинники (опаді й дії рушіїв сільськогосподарських машин) по-різному впливають на інтенсивність процесу самоорганізації на різних типах ґрунтів. Урахування процесів самоорганізації середовища ґрунту в період експлуатації ґрунтообробних машин сприятиме суттєвому підвищенню їхньої довговічності та зносостійкості.

6. Теоретично й експериментально, з урахуванням режимів експлуатації (швидкість руху ґрунтообробного агрегату) визначено умови та критерії досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів і рівності зношування для різних типів робочих органів ґрунтообробних машин (стрілчата лапа, леміш та дисковий робочий орган) на різних типах ґрунтів.

7. Розроблена математична модель підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням умов та режимів експлуатації.

РОЗДІЛ 4

ВПЛИВ СЕРЕДОВИЩА ҐРУНТУ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ТА
ДОВГОВІЧНІСТЬ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН4.1. Визначення ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті та
коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунту

Дослідження проводили відповідно до розробленої методики (пункт 2.3.2). Загальний вигляд установки для дослідження ступеня закріплення абразивної частинки в ґрунті та коефіцієнта внутрішнього тертя ґрунту представлено на рис. 2.3 Усі експерименти проводилися в осінній період 2018 року.

В результаті проведених досліджень отримуємо графіки, представлені на рис. 4.1–4.3 (дата проведення 13.10.2018 р.; місце проведення – Овруцький район Житомирської області; координати: широта – 51,27799804, довгота – 28,80246162; ґрунт – супіщаний; фон – поле після кукурудзи; середня вологість ґрунту – 10,06%).

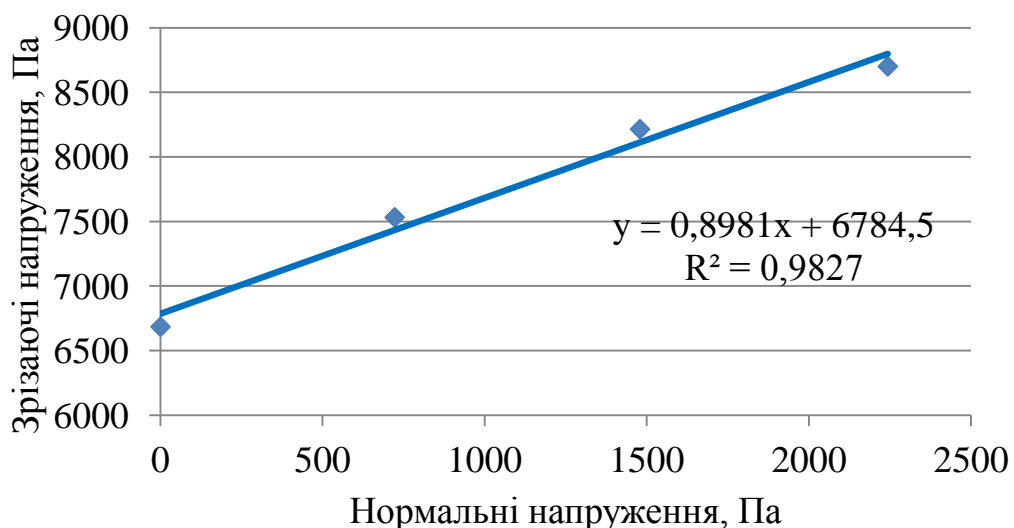


Рис. 4.1. Результати досліджень визначення коефіцієнта внутрішнього тертя f та питомого зчеплення c на піщаних ґрунтах (глибина зрізу – 100 мм)

Графік на рис. 4.1 дозволяє зробити висновок, що коефіцієнт внутрішнього тертя піщаних ґрунтів при вологості 10,06 % становить 0,8981. Питоме зчеплення становить 6784,5 Па. Із збільшенням глибини питоме зчеплення c (показник за яким оцінювали ступінь закріплення абразивних частинок) суттєво зростає (рис. 4.2). Із збільшенням глибини проведення досліджень від 100 мм до 200 мм призводить до зростання ступеня закріплення абразивних частинок на 18...37 %.

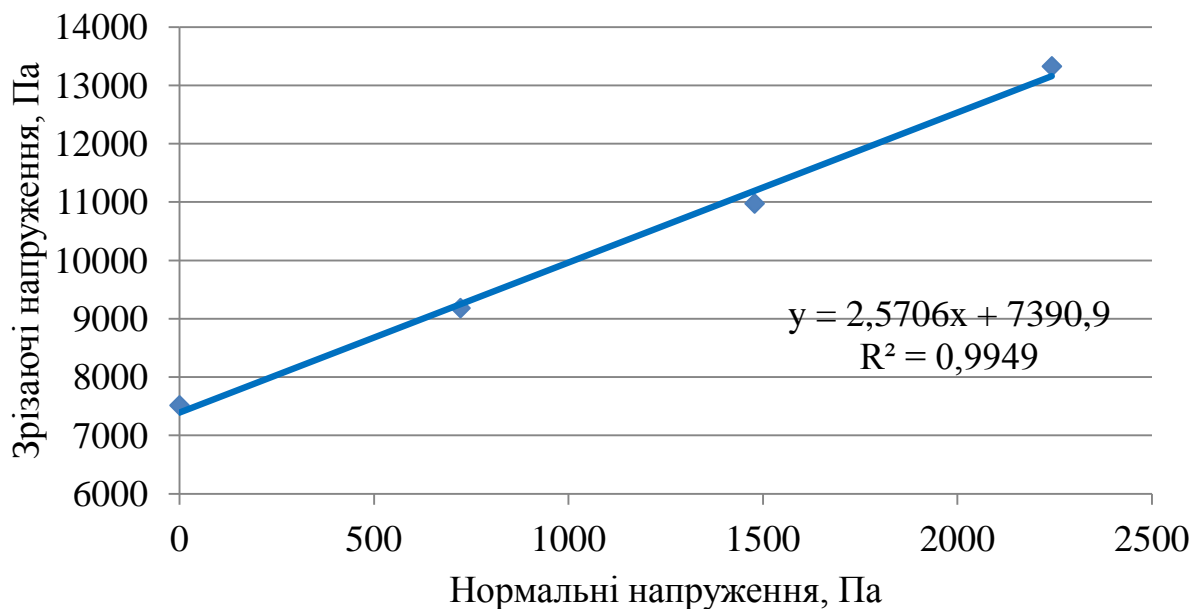


Рис. 4.2. Результати досліджень визначення коефіцієнта внутрішнього тертя f та питомого зчеплення c на піщаних ґрунтах (глибина зрізу 200 мм)

На глибині 300 мм досліді на піщаних ґрунтах не проводили, оскільки орний шар становив усього 260 мм.

Для визначення впливу кореневої системи рослин на коефіцієнт внутрішнього тертя f та питоме зчеплення c проведено досліді за наявності кореневої системи (рис. 4.3).

Коренева система рослин виступає в ролі зв'язувального елемента частинок ґрунту, що й призводить до зростання в декілька разів ступеня закріплення абразивних частинок ґрунту.

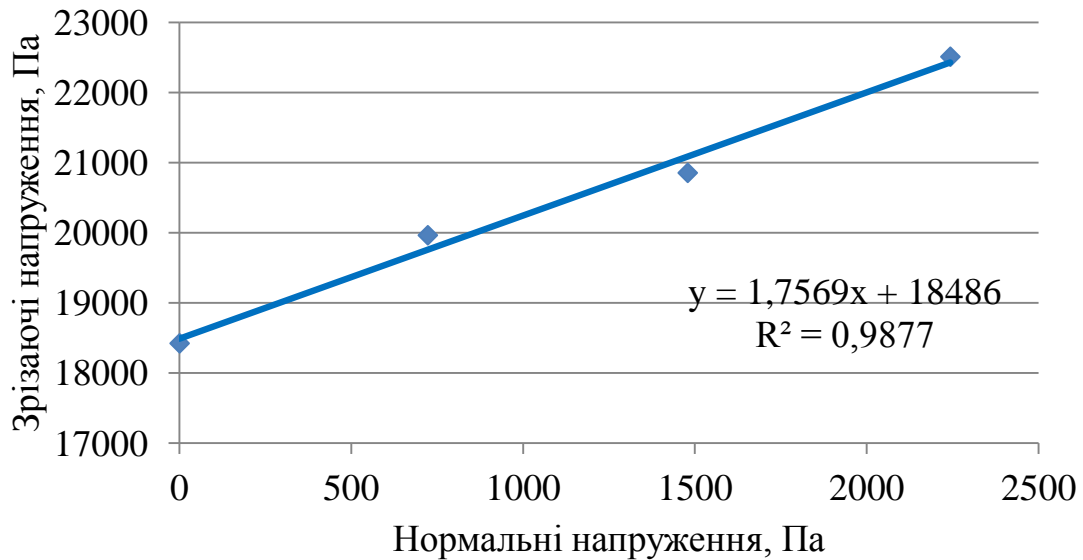


Рис. 4.3. Результати досліджень визначення коефіцієнта внутрішнього тертя f та питомого зчеплення c на піщаних ґрунтах (глибина зрізу 100 мм)

Для визначення впливу вологості та рослинних рештків на значення коефіцієнта внутрішнього тертя f і питомого зчеплення c на різних типах ґрунтів, проведено аналогічні дослідження відповідно до табл. 4.1. Результати експериментів представлено в табл. 4.2.

Наявність кореневої системи суттєво підвищує коефіцієнт внутрішнього тертя та питомого зчеплення c . Зокрема, на піщаних ґрунтах наявність кореневої системи кукурудзи на глибині 100 мм підвищує значення коефіцієнта внутрішнього тертя та питомого зчеплення в 1,95 і 2,72 раза відповідно, а на глинистих ґрунтах наявність кореневої системи пшениці – у 1,39 і 1,14 раза відповідно. Суттєва різниця в значеннях пояснюється відмінністю кореневої системи пшениці та кукурудзи.

Збільшення вологості на глинистих ґрунтах підвищує значення коефіцієнта внутрішнього тертя та питомого зчеплення c . Цей процес триває до перенасичення ґрунту водою і появи вільної води, після чого коефіцієнт

внутрішнього тертя та питоме зчеплення починають зменшуватися. Зменшення коефіцієнта внутрішнього тертя та питомого зчеплення на піщаних і супіщаних ґрунтах також спостерігається внаслідок перенасичення ґрунту вологою і появи вільної води, проте значення вологості, за якої можлива поява вільної води, там значно менші.

Таблиця 4.1

Варіанти проведення досліджень для визначення впливу вологості та рослинних решток на значення коефіцієнта внутрішнього тертя f і питомого зчеплення c (ступеня закріплення абразивних частинок) [270]

№	Місце проведення	Координати	Тип ґрунту (за механічним складом)	Рослинний покрив	Вологість ґрунту, %
1.	Овруцький район	Широта: 51,27799804, довгота: 28,80246162	Супіщаний	Після кукурудзи	10,06
2	Овруцький район	Широта: 51,27799804, довгота: 28,80246162	Супіщаний	Після кукурудзи	8,21
3.	Житомирський район	Широта: 50,13356399, довгота: 28.78126144	Глинистий ґрунт	Після озимої пшениці	16,8
4.	Житомирський район	Широта: 50,13356399, довгота: 28,78126144	Глинистий ґрунт	Після озимої пшениці	14,3
5.	Коростенський район	Широта: 50,78765206, довгота: 28,34549904	Піщаний	Багаторічні лугові трави	8,6
6.	Коростенський район	Широта: 50,78765206, довгота: 28,34549904	Піщаний	Багаторічні лугові трави	7,3
7.	Вінницька обл. Козятинський район	Широта: 49,79478502, довгота: 28,73422623	Глинистий	Після сої	13,3
8.	Вінницька обл. Козятинський район	Широта: 49,79478502, довгота: 28,73422623	Глинистий	Після сої	17,7

**впливу вологості та рослинних решток на значення коефіцієнта
внутрішнього тертя f та питомого зчеплення c (ступеня закріплення
абразивних частинок) [270]**

№	Місце проведення	Тип ґрунту (за механічним складом)	Вологість	Наявність кореневої системи	Глибина від поверхні	Питоме зчеплення c , Па	Коефіцієнт внутрішнього тертя, f
1.	Овруцький район	Піщаний	10,06	Без кореневої системи	100	6784,5	0,8981
					200	7390,9	2,5706
				З кореневою системою кукурудзи	100	18486	1,7569
2.	Овруцький район	Піщаний	8,21	Без кореневої системи	100	6239,03	0,8034
					200	8125,76	2,3681
3.	Коростенський район	Суцільний	8,6	Коренева система багаторічної трави	100	5397,3	1,4215
					200	5689,6	1,5686
4.	Коростенський район	Суцільний	7,3	Коренева система багаторічної трави	100	5134,68	1,3872
					200	5702,4	1,4973
5.	Вінницька обл. Козятинський район	Глинистий	13,3	Коренева система сої	100	5615,34	1,4022
					200	11435	2,1591
6.	Вінницька обл. Козятинський район	Глинистий	17,7	Коренева система сої	100	6663,1	1,4322
					200	11936,2	2,2945
7.	Житомирський район	Глинистий	14,3	Коренева система озимої пшениці	100	5834,15	1,3921
					200	9721,89	2,1342
8.	Житомирський район	Глинистий	16,8	Коренева система озимої пшениці	100	6407,1	1,4596
					200	10927,8	2,429
				Без кореневої системи	100	5640,45	1,0463

В підрозділі 3.3 встановлено, що зміна ступеня закріплення абразивних частинок впливає на механізм і характер зношування. Зростання ступеня закріплення абразивних частинок призводить до зростання ймовірності зняття мікростружки металу з поверхні робочих органів ґрунтообробних машин, що зі свого боку призведе до зростання інтенсивності зношування поверхні й зменшення зносостійкості та довговічності робочих органів ґрунтообробних машин (рис. 4.4)

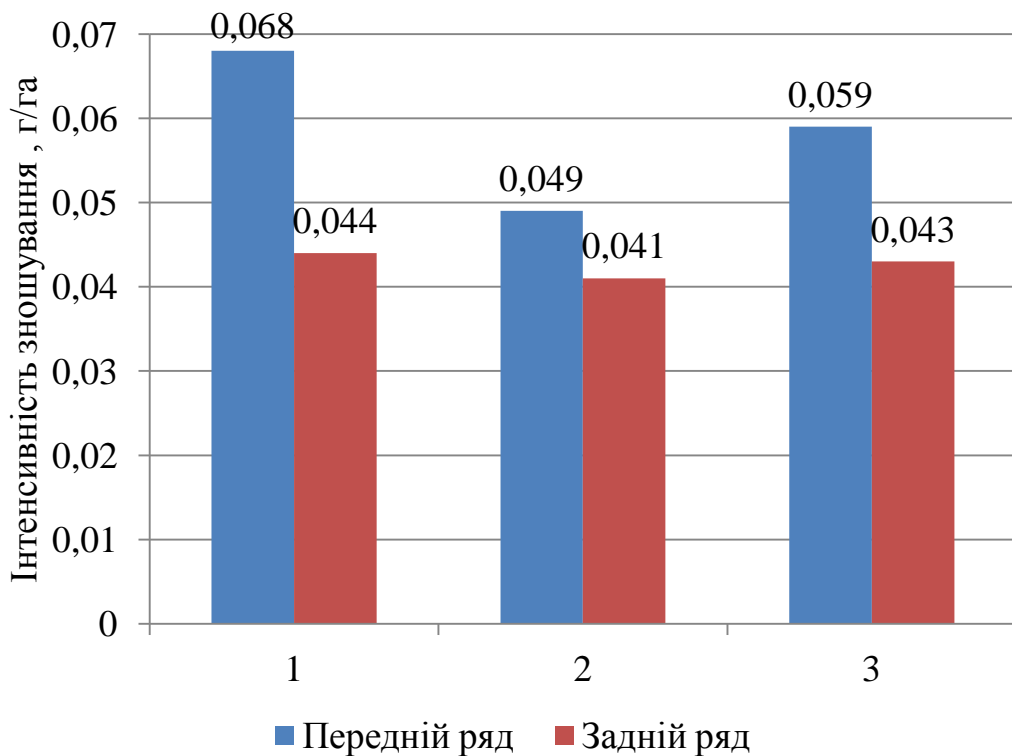


Рис. 4.4. Інтенсивність зношування першого та другого ряду робочих органів універсального дискового агрегату УДА-4,5 (ґрунт супіщаний, матеріал робочого органу – сталь 65): 1 – ділянка після озимої пшениці; 2 – ділянка після озимої пшениці, повторне боронування на 2 день після першого обробітку; 3 – ділянка після озимої пшениці, повторне боронування на 21 день після першого обробітку

Як бачимо, зменшення ступеня закріплення абразивних частинок ґрунту призводить до зменшення інтенсивності зношування. Зокрема під час повторного боронування на другий день перший ряд дисків зношувався на 28%

повільніше. Для другого ряду дисків така закономірність менш виражена (тільки 7%), оскільки вони й у першому обробітку взаємодіяли з обробленим ґрунтом.

У підрозділі 3.4 доведено, що в процесі самоорганізації середовища ґрунту його абразивність суттєво підвищується. Експлуатаційні дослідження підтверджують теоретичні положення і лабораторні експерименти. Унаслідок самоорганізації середовища ґрунту (протягом двох тижнів) зростання абразивних властивостей призвело до інтенсифікації зношування робочих органів ґрунтообробних машин на 20% порівняно з роботою на ґрунті, якому було недостатньо часу для самоорганізації (варіанти 2 і 3, рис. 4.4).

Підтвердженням впливу ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті на зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин може слугувати відмінність інтенсивності зношування дискових робочих органів першого та другого ряду. У цьому разі всі характеристики середовища ґрунту будуть однакові, крім ступеня закріплення абразивних частинок. Після проходження першого ряду дискових робочих органів зменшується ступінь закріплення абразивних частинок, що й призводить до зменшення інтенсивності зношування на 17...35%. (рис. 4.4).

4.2. Коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунтів України та його вплив на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Для абразивного зношування характерним є взаємодія з абразивними частинками [316, 317], які по різному впливають на механізм та характер зношування в залежності від їх характеристик. У процесі взаємодії робочих органів ґрунтообробних машин із ґрунтом зношування поверхні відбувається переважно внаслідок взаємодії з мінералами, твердість яких вища або рівна за твердість металу, тобто які мають твердість HV 7...11 ГПа за даними [164], дані інших авторів відрізняється не суттєво (додаток А).

У підрозділі 1.3 встановлено, що геометрія абразивних частинок суттєво впливає на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Саме тому було проведено дослідження для визначення коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунтів України за методикою представленою в пункті 2.3.3.

Фотографію абразивних частинок, зроблену за допомогою мікроскопа «SIGETA CAM-03», подано на рис. 4.5.

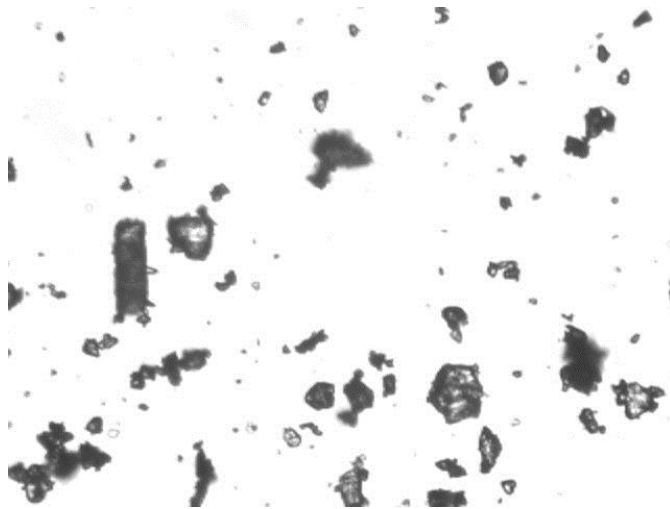


Рис. 4.5. Абразивні частинки ґрунту (дерново-підзолисті ґрунти, глибина забору проби – 200 мм)

Результати визначення коефіцієнта форми абразивних частинок для ґрунтів України представлені в табл. 4.1.

Можна стверджувати, що на глибині орного шару (проба з поверхні ґрунту та проба на глибині 200 мм) коефіцієнт форми абразивних частинок для окреслених фракцій однаковий. Оскільки їхні значення для ґрунту № 1 відрізняються на 1,63...3,34%, для ґрунту № 2 – на 1,01...4,91%, для ґрунту № 3 – на 1,64...4,89%, для ґрунту № 4 – на 1,25...4,16%, для ґрунту № 5 – на 1,62...5,18%, для ґрунту № 6 – на 0,45...2,92%. Про це також свідчить відсутність прямої залежності величини коефіцієнта форми абразивних частинок від глибини орного шару.

Очевидним є зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок унаслідок регулярної взаємодії з робочими органами ґрунтообробних машин

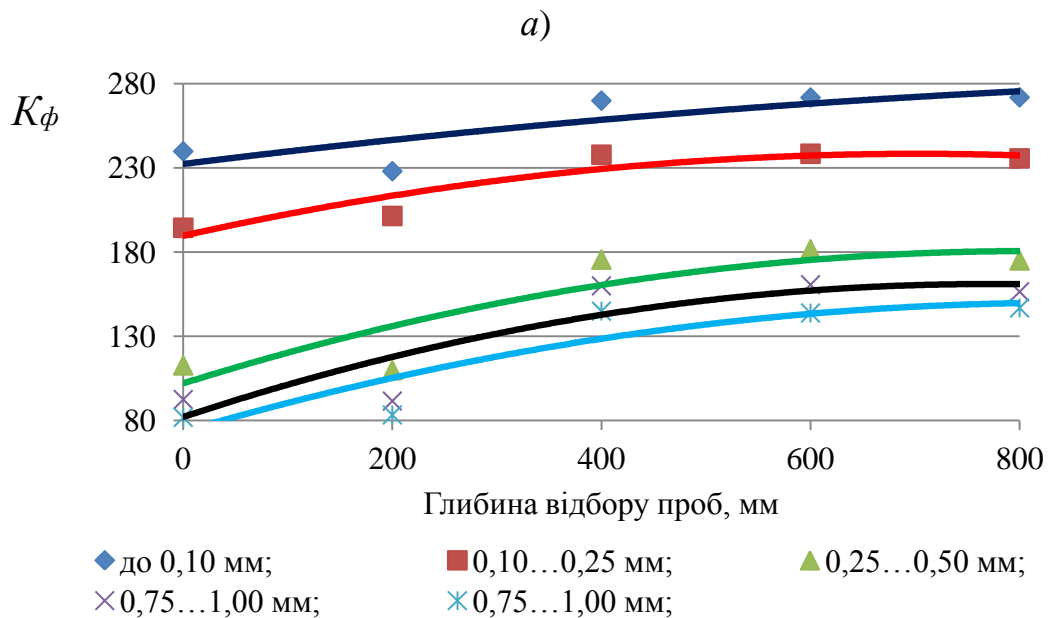
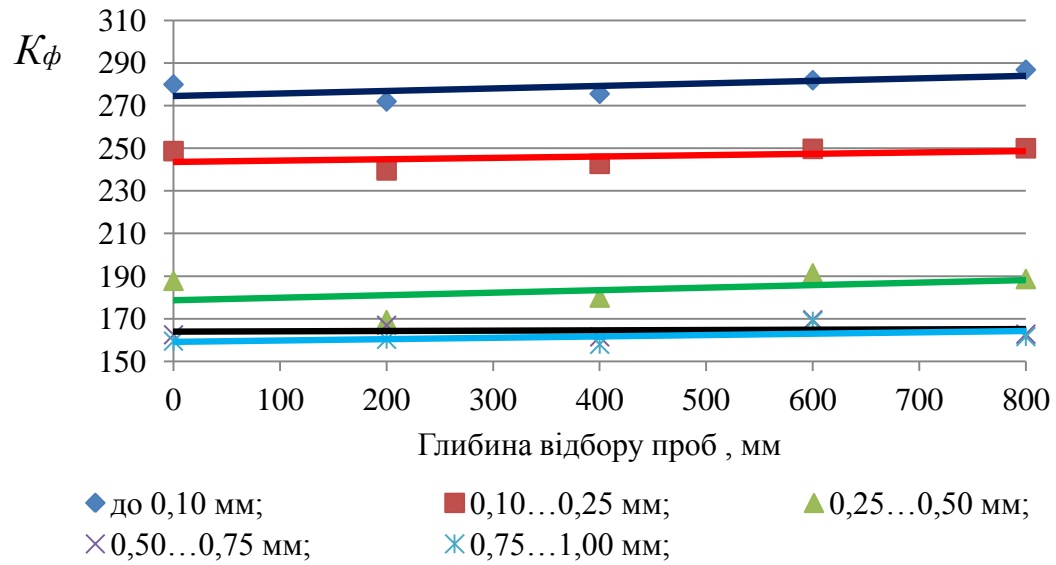
(рис. 4.7). Руйнування гострих виступів й округлення абразивних частинок відбувається не тільки під час взаємодії з поверхнею робочих органів, а й у результаті взаємодії між абразивними частинками за умови зміни агрегатного стану в процесі обробітку ґрунту.

Таблиця 4.1

Результати досліджень коефіцієнта форми K_ϕ абразивних частинок [318]

Ґрунти	Фракція абразивних частинок	Поверхня ґрунту	Глибина 200 мм	Глибина 400 мм	Глибина 600 мм	Глибина 800 мм
1. Лугові ґрунти, середньосуглинковий	до 0,10 мм;	436,32	427,74	487,43	488,35	487,65
	0,10...0,25 мм;	328,75	336,97	381,43	379,17	386,24
	0,25...0,50 мм;	115,76	119,76	189,70	181,48	184,56
	0,50...0,75 мм;	105,72	109,50	227,46	216,79	218,72
	0,75...1,00 мм;	78,90	77,61	210,58	214,56	214,31
2. Дерново-підзолисті ґрунти, легкосуглинковий	до 0,10 мм;	239,68	227,89	269,76	271,62	271,73
	0,10...0,25 мм;	194,32	201,34	237,65	238,23	235,48
	0,25...0,50 мм;	112,69	109,86	175,47	181,53	174,97
	0,50...0,75 мм;	92,47	91,53	159,87	160,57	156,37
	0,75...1,00 мм;	81,83	83,29	144,83	143,75	146,79
3. Чорноземи неглибокі лісостепові, глина легка	до 0,10 мм;	294,38	289,56	346,67	351,92	338,16
	0,10...0,25 мм;	276,16	281,24	330,41	326,18	339,71
	0,25...0,50 мм;	128,94	122,63	179,01	180,69	175,61
	0,50...0,75 мм;	118,93	123,89	164,92	170,34	167,90
	0,75...1,00 мм;	89,79	94,31	153,79	160,31	154,39
4. Опідзолені ґрунти, середньосуглинковий	до 0,10 мм;	346,79	336,82	418,23	429,47	428,81
	0,10...0,25 мм;	287,38	291,03	358,94	361,09	369,24
	0,25...0,50 мм;	165,34	158,45	201,76	193,21	196,34
	0,50...0,75 мм;	110,28	113,89	170,26	176,34	169,23
	0,75...1,00 мм;	100,29	96,49	156,29	164,42	158,37
5. Чорноземи звичайні на лісових породах, глина легка	до 0,10 мм;	274,56	269,23	299,57	292,31	295,34
	0,10...0,25 мм;	183,27	186,98	243,18	237,79	247,51
	0,25...0,50 мм;	164,29	160,37	220,34	218,51	222,57
	0,50...0,75 мм;	129,17	136,23	218,93	215,34	210,43
	0,75...1,00 мм;	98,18	96,59	182,54	176,21	189,35
6. Каштанові ґрунти, важкосуглинковий	до 0,10 мм;	369,56	367,89	406,57	409,87	400,29
	0,10...0,25 мм;	245,69	249,65	298,67	301,45	295,81
	0,25...0,50 мм;	145,87	142,87	201,31	210,19	205,79
	0,50...0,75 мм;	109,84	109,01	192,34	190,23	187,16
	0,75...1,00 мм;	91,75	94,51	176,79	180,45	177,10
7. Зразки, узяті з лісового масиву, дерново-підзолисті ґрунти, легкосуглинковий	до 0,10 мм;	279,89	271,93	275,49	281,87	286,79
	0,10...0,25 мм;	248,63	239,58	242,65	249,67	249,95
	0,25...0,50 мм;	187,79	169,36	179,93	191,28	188,63
	0,50...0,75 мм;	162,46	166,91	161,47	169,47	162,74
	0,75...1,00 мм;	159,48	160,34	157,98	168,91	161,62

Підтвердженням зниження коефіцієнта форми абразивних частинок унаслідок багаторазової взаємодії з робочими поверхнями сільськогосподарських машин є відсутність такої залежності (рис. 4.6) для абразивних частинок, що містяться в ґрунті з лісового масиву (зразок ґрунту № 7). Зразок ґрунту № 7 відбирали на відстані 500 м від дослідного поля, з якого відібрано зразки ґрунту №2.



б)

Рис. 4.6. Зміна коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту (K_ϕ) залежно від глибини відбору проб: а – зразок ґрунту № 7; б – зразок ґрунту № 2

Необхідно зазначити, що для абразивних частинок крупної фракції коефіцієнт форми зменшується істотніше, ніж для абразивних частинок дрібної фракції для всіх типів ґрунтів (рис. 4.7). Закономірність, представлену на рис. 4.6, можна пояснити тим, що абразивні частинки меншого розміру не піддаються інтенсивному руйнуванню в результаті взаємодії з робочими органами сільськогосподарських машин, оскільки:

- мають більшу міцність;
- відсутні внутрішні дефекти в будові кристалів;
- мають меншу масу;
- через невеликі розміри не працюють на поверхні робочого органу, як закріплений абразив.

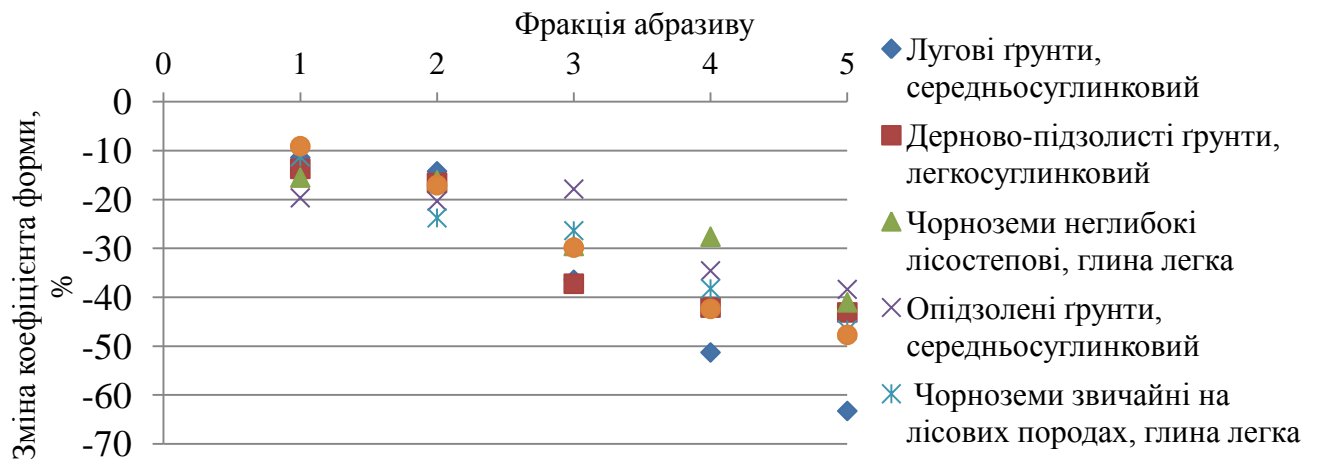


Рис. 4.7. Зміна коефіцієнта форми абразивних частинок (K_ϕ) унаслідок взаємодії з робочими органами, залежно від розмірів абразивних частинок: 1 – до 0,10 мм; 2 – 0,10...0,25 мм; 3 – 0,25...0,50 мм; 4 – 0,50...0,75 мм; 5 – 0,75...1,00 мм [316]

Для визначення впливу коефіцієнта форми абразивних частинок на інтенсивність зношування поверхонь робочих органів проведено лабораторні дослідження на сталях 65Г, 45 і 28MnB5 (рис. 4.8). Як абразив використовували кварцовий пісок із трьох родовищ (Тарасівського, Ігнатпільського, Іршанського), звідки були відібрані частинки фракції 0,50...1,00 мм. Коефіцієнт

форми абразивних частинок становив відповідно для Іршанського родовища – 98,71, для Тарасівського – 114,18, для Ігнатпільського – 163,72.

Як видно з графіка (рис. 4.8.), унаслідок збільшення коефіцієнта форми абразивних частинок зростає й інтенсивність зношування сталей. При чому для менш якісних сталей (сталь 45) швидкість зростання інтенсивності зношування на порядок вища, ніж у сталей, які використовують для виготовлення дискових робочих органів ґрунтообробних і посівних машин. Цю залежність можна пояснити зміною механізму зношування поверхні, оскільки на поверхні сталі 45 зі збільшенням коефіцієнта форми абразивних частинок збільшується площа, на якій є ознаки процесу мікрорізання.

У результаті досліджень було встановлено зміну коефіцієнта форми абразивних частинок для кварцового піску, який використовували в ролі абразивного середовища. Коефіцієнт форми абразивних частинок зменшився для всіх зразків кварцового піску: для Іршанського родовища він становив 79,14 (-19,82%), для Тарасівського – 89,79 (-21,36%), для Ігнатпільського – 113,72 (-30,54%).

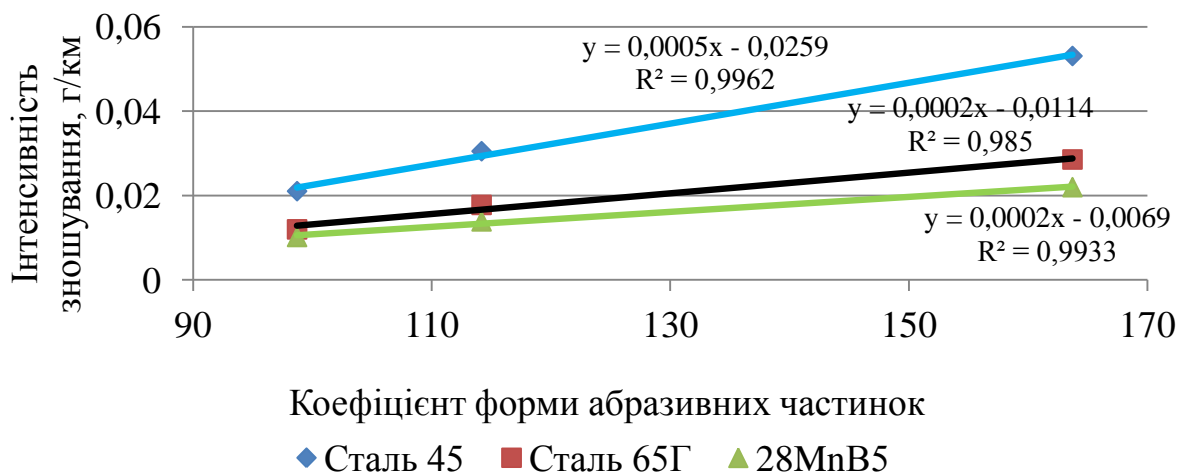


Рис. 4.8. Вплив коефіцієнта форми абразивних частинок на інтенсивність зношування (зразки зі сталі 45 та 65Г піддавалися об'ємному загартуванню при температурі 810...830 °С і середньому відпуску із дуже точною витримкою при температурі 460...480 °С, зразки зі сталі 28MnB5 виготовляли із заготовок для

дискових робочих органів, які підлягають складній термо- та дробоструминній обробці)

Як бачимо, наявна залежність більш суттєвого зменшення коефіцієнта форми внаслідок взаємодії з робочою поверхнею й взаємодії між абразивними частинками для абразивних частинок із великим коефіцієнтом форми (рис. 4.9). Цей процес можна пояснити інтенсивнішою взаємодією з поверхнею дослідного зразка й виникненням граничних напружень через малу площу гострих граней абразивних частинок.

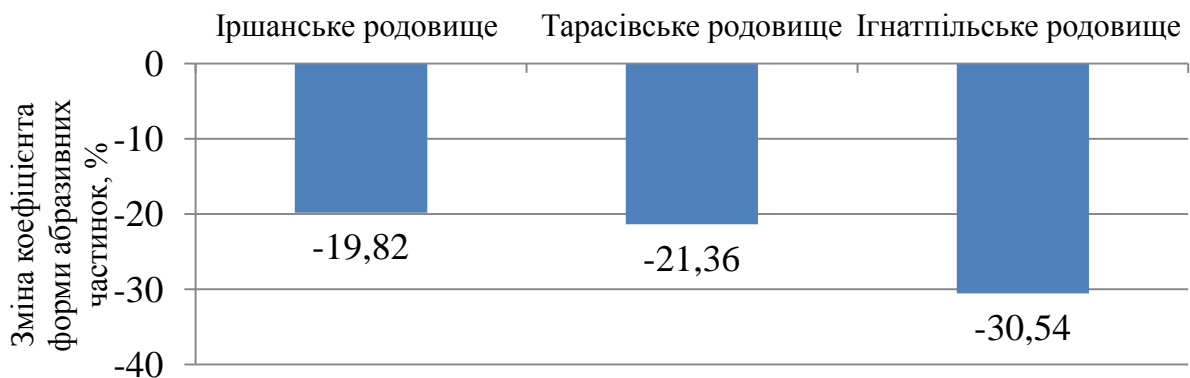


Рис. 4.9. Зміна коефіцієнта форми абразивних частинок за результатами лабораторних досліджень інтенсивності зношування матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин

Зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок в орному шарі в результаті тривалого використання земельних ресурсів має призводити до зменшення абразивної здатності. Проте абразивні частинки більш округлої форми не здатні утримувати вологу в ґрунті, що призводить до швидкого випаровування води, а цезі свого боку спричиняє призводить до збільшення твердості ґрунту, ступеня закріплення абразивних частинок і підвищення інтенсивності зношування. Тому проблема вибору оптимальних агротехнічних термінів обробітку ґрунту для зменшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин із кожним десятиліттям ускладнюватиметься.

У результаті проведених досліджень встановлено, що коефіцієнт форми абразивних частинок ґрунтів України коливається в межах 78,9...487,65. Коефіцієнт форми абразивних частинок для крупних фракцій абразиву значно менший, ніж для дрібних фракцій. Значення коефіцієнта форми абразивних частинок в орному шарі менше на 11,43...47,71% порівняно з абразивними частинками в неорному шарі. Спостерігаємо також закономірність більш значного зменшення коефіцієнта форми абразивних частинок крупних фракцій порівняно з дрібним абразивом унаслідок взаємодії з робочими органами ґрунтообробних і посівних машин. Зношувальна здатність абразивних частинок зростає із збільшенням коефіцієнта форми. Прямої залежності між зменшенням зношувальної здатності ґрунтів і зменшенням коефіцієнта форми абразивних частинок не виявлено через складність будови й самоорганізації ґрунтового середовища.

4.3. Установлення статичного і динамічного коефіцієнтів тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та складових частин середовища ґрунту

Один з основних факторів, який впливає на інтенсивність зношування – коефіцієнт тертя фрикційної пари. Як відомо, коефіцієнт тертя – це характеристика процесу, що залежить від багатьох факторів, у зв'язку з чим його не можливо розглядати як деяку незмінну величину. Здебільшого, наводячи значення коефіцієнта тертя двох матеріалів, не вказують умови (змінні фактори), які можуть суттєво впливати на значення коефіцієнта тертя [319]. В умовах абразивного зношування сталених поверхонь незакріпленими або «напівзакріпленими» абразивними частинками важливим є значення не тільки статичного, але й динамічного коефіцієнта тертя. З'ясовуючи такі значення необхідно чітко зазначати умови проведення дослідження й характеристику матеріалів, які досліджують (марка сталі, термообробка, шорсткість, напрямок хвиль шорсткості, вологість абразивного матеріалу та

ін.). Крім того, слід наголосити, що трибологія не має математичного апарата для визначення коефіцієнта тертя, з урахуванням усіх факторів, що призводить до необхідності визначення коефіцієнтів тертя з урахуванням усіх факторів за допомогою лабораторних експериментів.

У процесі зношування робочих органів ґрунтообробних машин сталі поверхні взаємодіють не з чистим ґрунтом, а зі складною ґрунтовою масою, яка складається з мінеральних частинок, рідкої фази, живих організмів і рослин та ін. Тому використання визначених значень коефіцієнта тертя «ґрунт – сталь» під час прогнозування інтенсивності зношування є некоректним. Ураховуючи вплив складових ґрунтової маси на значення коефіцієнта тертя «сталь – середовище ґрунту», необхідно провести дослідження для визначення коефіцієнта тертя зі сталлю складових ґрунтової маси.

Коефіцієнт тертя ковзання по сталі визначали для рослинних решток культур, які набули найбільшого розповсюдження в агропромисловому комплексі України (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Коефіцієнт тертя ковзання сухих рослинних решток по сталі (листова сталь без термообробки, шорсткість поверхні після полірування $Ra=0,4$, нерівності мали поперечний напрямок) [269]

Рослинні рештки після збирання	Статичний коефіцієнт тертя	Динамічний коефіцієнт тертя
	Сталь 65Г	Сталь 65Г
Соя	0,62...0,71	0,37...0,48
Соя (плющена)	0,68...0,74	0,42...0,53
Пшениця	0,36...0,41	0,21...0,30
Ячмінь	0,44...0,53	0,32...0,37
Люцерна	0,62...0,86	0,44...0,60
Ріпак	0,48...0,57	0,40...0,47
Кукурудза	0,56...0,69	0,43...0,48
Соняшник	0,79...0,84	0,53...0,61
Сіно (лугова трава)	0,36...0,39	0,26...0,29

Такий великий діапазон коефіцієнтів тертя ковзання для кожної культури пояснюється суттєвою різницею в значеннях коефіцієнтів тертя ковзання стебла та листя рослинних решток по сталі. У середньому коефіцієнт тертя ковзання листя на 18...29 % більший за коефіцієнт тертя ковзання стебел.

Для плющених рослинних решток сої коефіцієнт тертя більший на 6...12% порівняно з рештками, які не піддавалися механічній дії. Це зумовлено збільшенням площі фактичного контакту між рослинними рештками сої і поверхнею сталі.

Коефіцієнт тертя ковзання рослинних решток по сталі 65Г та 45 суттєво не відрізняється, а для сталі 28MnB5 менший в середньому на 10...17 %. Зменшення коефіцієнта тертя ковзання сухих рослинних решток по сталі 28MnB5 спричинене зменшенням міжмолекулярної взаємодії між рослинним рештками й поверхнею сталі. Зі свого боку це пов'язано із складною обробкою (прокатування в двох перпендикулярних напрямках) листової сталі 28MnB5, яка імпортується в нашу країну.

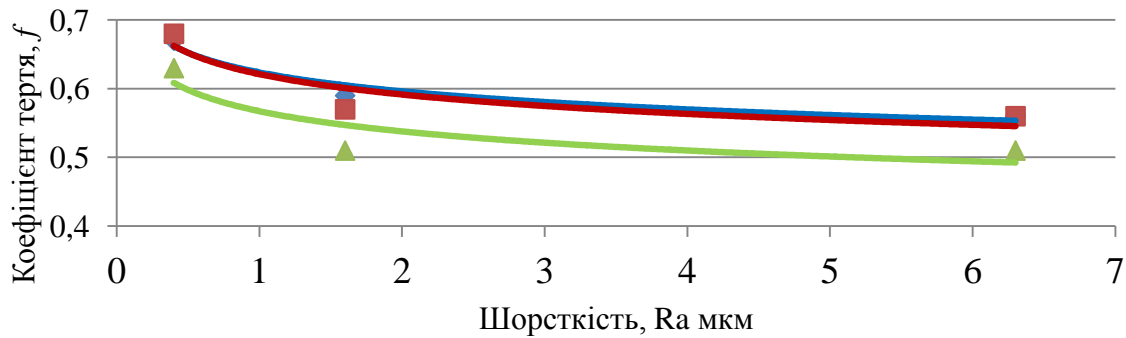
Для дослідження впливу режимів обробки сталі 65Г на коефіцієнт тертя ковзання рослинних решток по сталі здійснено об'ємне гартування при температурі 810...830 °С і середньому відпуску з дуже точною витримкою при температурі 460...480 °С з подальшою дробоструминною обробкою (HRC 39-42). Унаслідок аналізу отримали результати представлені в табл. 4.3.

Обробка сталі, яка дозволяє зменшити поверхневу енергію (у нашому випадку об'ємне гартування сталі 65Г при температурі 810...830 °С і середньому відпуску з дуже точною витримкою при температурі 460...480 °С з подальшою дробоструминною обробкою (HRC 39-42) призводить до зменшення коефіцієнта тертя на 5...16%. Зменшення коефіцієнта тертя відбувається завдяки зниженню рівня міжмолекулярної взаємодії (адгезії) між рослинними рештками й сталлю.

Коефіцієнт тертя ковзання сухих рослинних решток по сталі (сталь 65Г піддавали об'ємному гартуванню при температурі 810...830 °С і середньому відпуску із дуже точною витримкою при температурі 460...480 °С з подальшою дробоструминною обробкою (HRC 39-42), шорсткість поверхні після полірування $Ra=0,4$, нерівності мають поперечний напрямок) [269]

Рослинні рештки після збирання	Статичний коефіцієнт тертя	Динамічний коефіцієнт тертя
	Сталь 65Г	Сталь 65Г
Соя	0,59...0,64	0,34...0,42
Соя (плющена)	0,61...0,65	0,38...0,45
Пшениця	0,34...0,38	0,20...0,28
Ячмінь	0,40...0,45	0,29...0,34
Люцерна	0,52...0,76	0,41...0,51
Ріпак	0,44...0,54	0,35...0,41
Кукурудза	0,48...0,63	0,36...0,41
Соняшник	0,73...0,75	0,48...0,55
Сіно (лугова трава)	0,33...0,36	0,24...0,27

Для визначення впливу шорсткості поверхні сталі на статичний і динамічний коефіцієнти тертя було проведено відповідні дослідження (рис. 4.10).

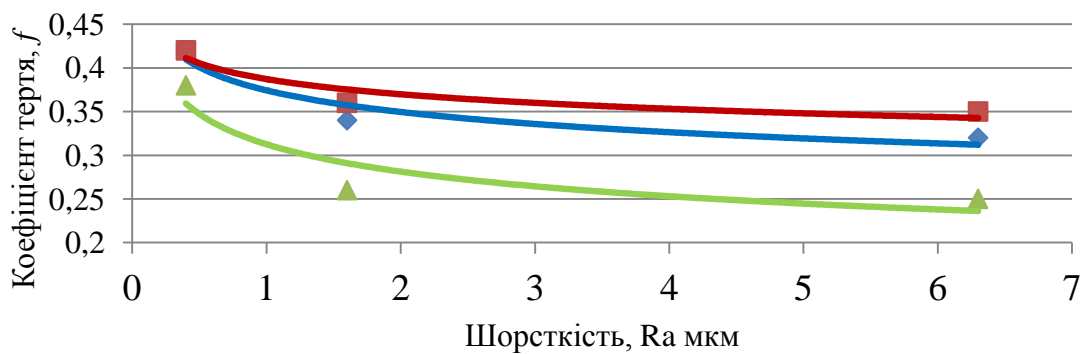


◆ Сталь 65Г

■ Сталь 45

▲ Сталь 28MnB5

а)



◆ Сталь 65Г

■ Сталь 45

▲ Сталь 28MnB5

б)

Рис. 4.10. Вплив шорсткості на статичний і динамічний коефіцієнти тертя ковзання рослинних решток сої по сталі, нерівності мали поперечний напрямок: а – статичний коефіцієнт тертя; б – динамічний коефіцієнт тертя

З графіків (рис. 4.10) видно, що для полірованої поверхні коефіцієнт тертя ковзання значно більший, ніж для поверхонь, які мають чорнову обробку. Насамперед це явище пояснюється більшою фактично зоною контакту двох тіл, що призводить до збільшення сил міжмолекулярної взаємодії. Такі результати не суперечать наявному розумінню природи тертя, адже ще в ранніх працях багатьох дослідників [320] встановлено, що під час тертя без змащування зі збільшенням шорсткості поверхні сила тертя зменшується. Після чого в протягом значного інтервалу зміни шорсткості сила тертя залишається постійною, і тільки у процесі досить грубої обробки поверхні спостерігається

невелике збільшення сили тертя. Така закономірність справедлива як для статичного, так і для динамічного коефіцієнтів тертя [320].

Зміна напрямку нерівностей на полірованій поверхні не призводить до збільшення статичного й динамічного коефіцієнтів тертя ковзання, а під час чорнової обробки при поздовжньому напрямку нерівностей статичний коефіцієнт залишається незмінним, а динамічний зменшується на 7...10 % (рис. 4.11).

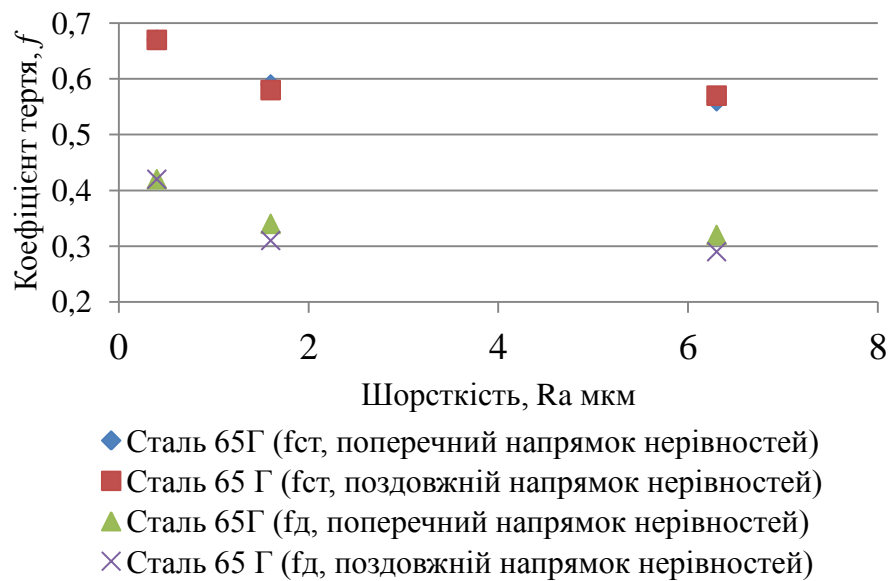


Рис. 4.11. Вплив напрямку нерівностей поверхні сталі на статичний і динамічний коефіцієнти тертя ковзання рослинних решток сої по сталі

Така залежність характерна для всіх видів рослинних решток, які використовувалися під час дослідження.

Як відомо з попередніх праць [199], збільшення вологості рослинних решток призводить до збільшення коефіцієнта тертя ковзання, що ми й підтвердили для всіх дослідних матеріалів (рис. 4.12).

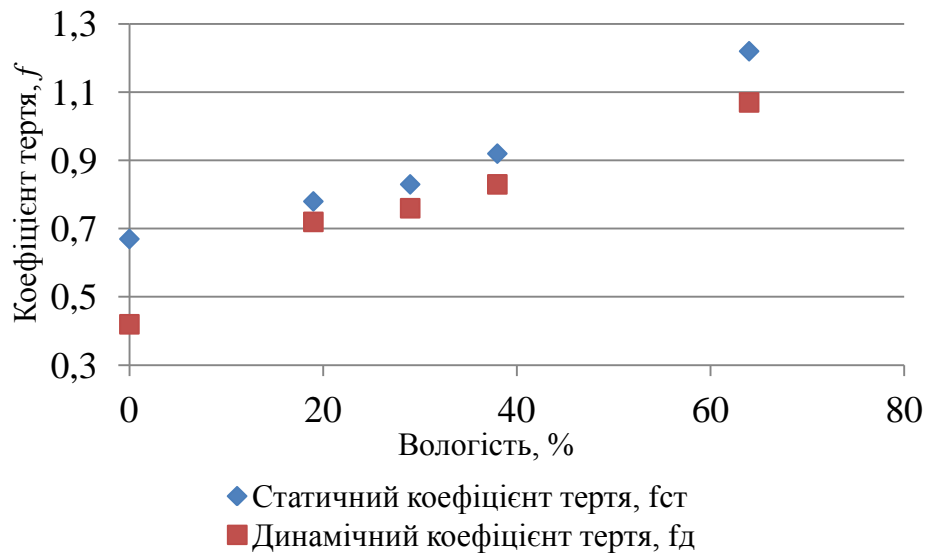


Рис. 4.12. Вплив вологості рослинних решток на статичний і динамічний коефіцієнти тертя ковзання рослинних решток сої по сталі 65Г

У процесі збільшення вологості різниця між статичним і динамічним коефіцієнтами тертя ковзання суттєво зменшується порівняно із сухими рослинними рештками (рис. 4.12).

Статичний і динамічний коефіцієнти тертя «сталь – рослинні рештки» - величення змінна, залежна від багатьох факторів, насамперед від виду та стану рослинних решток, марки сталі, її термообробки, шорсткості, напрямку хвиль шорсткості й вологості рослинних решток.

Унаслідок проведених досліджень доведено, що тертя, яке відбувається в результаті взаємодії рослинних решток зі сталю, неможливо описати законом Амонтона–Кулона, оскільки в такому разі, молекулярна складова суттєво впливає на величину коефіцієнта тертя «рослинні рештки – сталь». Процес тертя між поверхнею робочих органів та рослинними решками необхідно описувати молекулярно-механічною теорією тертя, запропонованою І. В. Крагельским [57].

Біологічна фаза не є основною складовою середовища ґрунту, її частка під час взаємодії з робочими органами ґрунтообробними машинами не перевищує 3...5%, основна частка припадає на тверду фазу. Коефіцієнт тертя

твердої фази ґрунту визначали для різних типів ґрунтів ураховуючи різну вологість, марку сталі та шорсткість поверхні (табл. 4.4).

Як видно з результатів дослідження (табл. 4.4), статичний коефіцієнт тертя між сталю та твердою фазою ґрунту в 1,41...1,52 раза більший за динамічний. Цю закономірність необхідно обов'язково враховувати під час проектування робочих органів сільськогосподарських машин, які взаємодіють з середовищем ґрунту.

Загалом спостерігається закономірність, що величина статичного та динамічного коефіцієнтів тертя для сталі 65Г порівняно зі сталю 28MnB5 значно більша (як зазначалося вище, це пов'язано зі складною обробкою поверхні такої сталі, що спричиняє паціфікацію поверхневого шару й сприяє зменшенню сил міжмолекулярної взаємодії). Слід зауважити, що для глинистих ґрунтів різниця становить від 0 до 5,5%, тоді як для середніх суглинків – від 0 до 4,8 %, для супіщаних – від 2,8 до 14,3%.

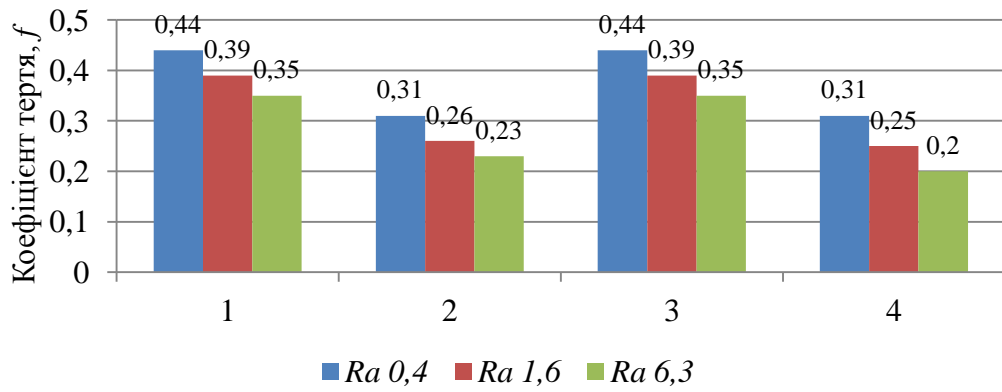
Зменшення коефіцієнта тертя із збільшенням шорсткості поверхні сталі пов'язане зі зменшенням міжмолекулярної взаємодії в зоні фрикційного контакту, що зі свого боку зумовлено зменшенням площі фактичного контакту (табл. 4.4).

Зміна напрямку нерівностей на полірованій поверхні, так само як і для коефіцієнта тертя між сталю та рослинними рештками не призводить до збільшення статичного і динамічного коефіцієнтів тертя ковзання між сталю та твердою фазою ґрунту, а під час чорнової обробки при поздовжньому напрямку нерівностей статичний коефіцієнт залишається практично незмінним, а динамічний зменшується на 4...12 % (рис. 4.13).

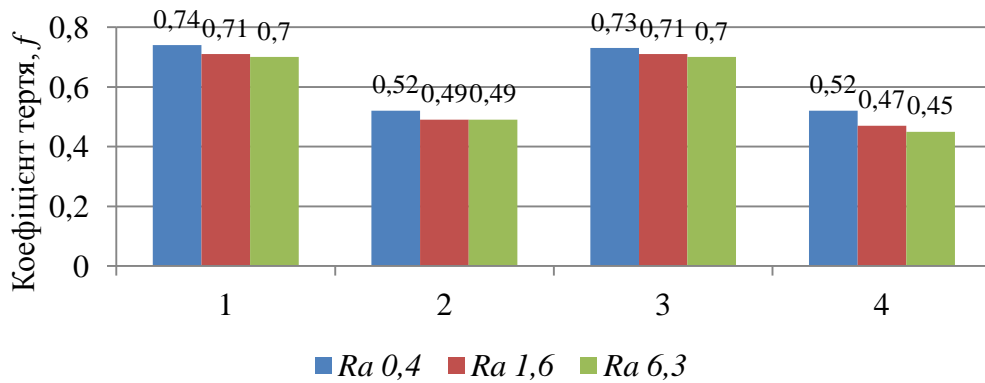
Таблиця 4.4

Коефіцієнт тертя «сталь – тверда фаза ґрунту» (поперечний напрямок нерівностей)

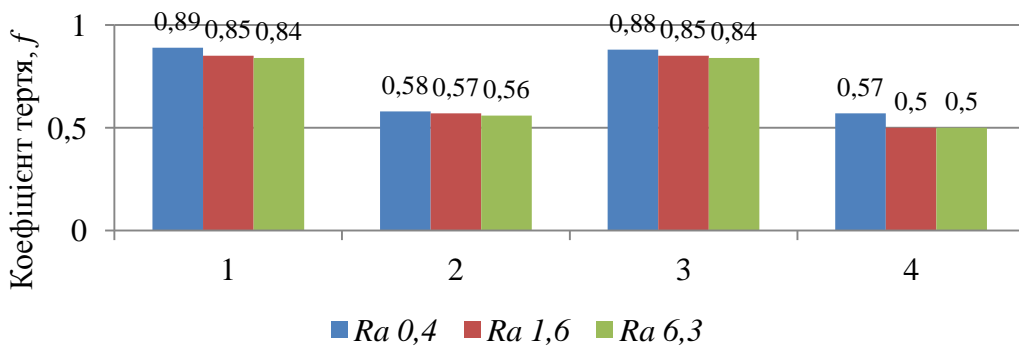
Ґрунт	Вологість, %	Матеріал	Шорсткість, R_a мкм	Статичний коефіцієнт тертя, f	Динамічний коефіцієнт тертя, f
Супіщаний	8,2	Сталь 65Г	0,4	0,44	0,31
			1,6	0,39	0,26
			6,3	0,35	0,23
		28МпВ5	0,4	0,42	0,28
			1,6	0,38	0,26
			6,3	0,33	0,23
	8,8	Сталь 65Г	0,4	0,46	0,30
			1,6	0,42	0,28
			6,3	0,36	0,25
		28МпВ5	0,4	0,42	0,28
			1,6	0,39	0,27
			6,3	0,35	0,24
	9,1	Сталь 65Г	0,4	0,48	0,32
			1,6	0,44	0,30
			6,3	0,42	0,29
		28МпВ5	0,4	0,44	0,31
			1,6	0,41	0,29
			6,3	0,36	0,24
Середній суглинок	7,6	Сталь 65Г	0,4	0,67	0,46
			1,6	0,64	0,42
			6,3	0,63	0,41
		28МпВ5	0,4	0,64	0,43
			1,6	0,62	0,40
			6,3	0,60	0,40
	9,7	Сталь 65Г	0,4	0,74	0,52
			1,6	0,71	0,49
			6,3	0,70	0,49
		28МпВ5	0,4	0,72	0,48
			1,6	0,70	0,47
			6,3	0,67	0,44
	11,4	Сталь 65Г	0,4	0,78	0,52
			1,6	0,75	0,51
			6,3	0,74	0,49
		28МпВ5	0,4	0,78	0,51
			1,6	0,73	0,48
			6,3	0,71	0,46
Глина легка	12,0	Сталь 65Г	0,4	0,79	0,55
			1,6	0,74	0,49
			6,3	0,73	0,48
		28МпВ5	0,4	0,77	0,52
			1,6	0,72	0,50
			6,3	0,69	0,46
	13,2	Сталь 65Г	0,4	0,84	0,59
			1,6	0,82	0,54
			6,3	0,81	0,54
		28МпВ5	0,4	0,82	0,57
			1,6	0,80	0,53
			6,3	0,78	0,52
	15,8	Сталь 65Г	0,4	0,89	0,58
			1,6	0,85	0,57
			6,3	0,84	0,56
		28МпВ5	0,4	0,88	0,58
			1,6	0,84	0,56
			6,3	0,84	0,55



а)



б)



в)

Рис. 4.13. Вплив напрямку нерівностей поверхні сталі на статичний і динамічний коефіцієнти тертя ковзання між сталю та твердою фазою ґрунту: а) – супіщаний ґрунт (вологість ґрунту – 8,2%); б) – середній суглинок (вологість ґрунту 9,7%); в) – глина легка (вологість ґрунту – 15,8%); 1, 3 – статичний коефіцієнт тертя при поперечному та поздовжньому напрямках нерівностей поверхні; 2, 4 – динамічний коефіцієнт тертя при поперечному та поздовжньому напрямках нерівностей поверхні.

Для визначення впливу динамічного коефіцієнта тертя на інтенсивність зношування поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин проведено лабораторні дослідження за вдосконаленим методом крильчатки (пункт 2.3.4). Динамічний коефіцієнт тертя визначали методом похилої площини (шорсткість поверхні становила R_a 1,6, напрямок нерівностей – поперечний). Результати досліджень представлено на рис. 4.14.

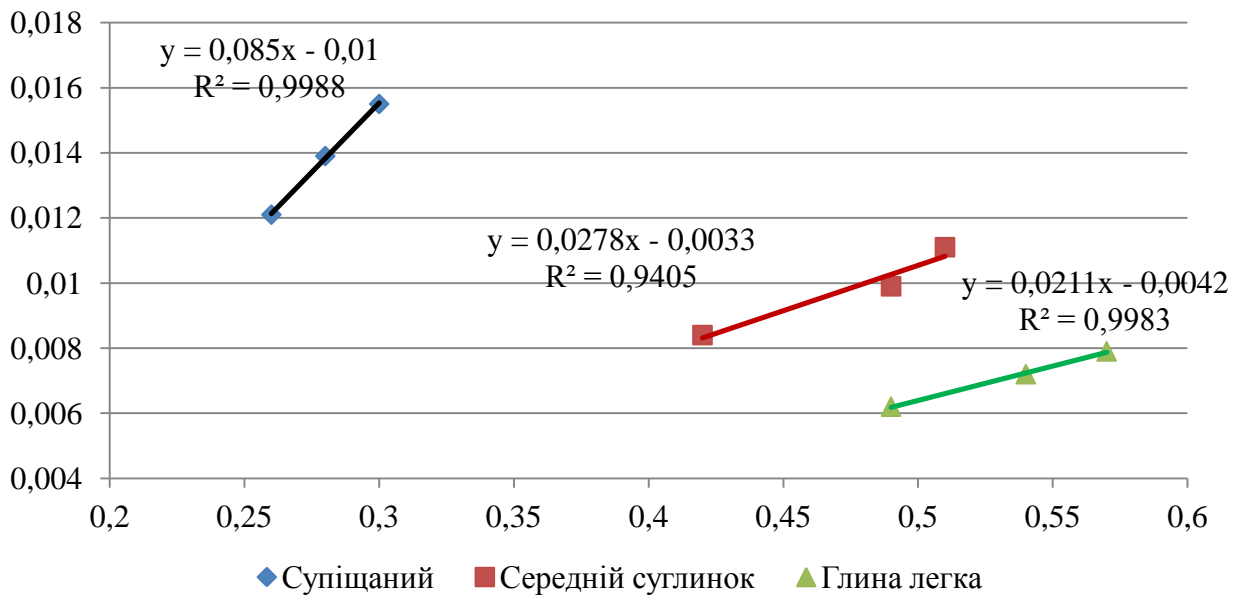


Рис. 4.14. Вплив динамічного коефіцієнта тертя на інтенсивність зношування сталі 65Г (сталь 65Г піддавалася об'ємному загартуванню при температурі 810...830 °С і середньому відпуску з дуже точною витримкою при температурі 460...480 °С)

З ростом динамічного коефіцієнта тертя інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин зростає за лінійною залежністю (рис.4.14). На піщаних ґрунтах ріст динамічного коефіцієнта тертя призводить до більш суттєвого росту інтенсивності зношування матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин порівняно зі зношуванням на легкій глині та середньому суглинку.

У процесі дослідження слідували за відносною зміною динамічного коефіцієнта тертя, визначали в лабораторних умовах за розробленим способом (патент України № 142596 [321]) на установці (патент України № 142715 [322]).

Відносна зміна коефіцієнта тертя відрізняється від абсолютної зміни в межах 3%, що підтверджує доцільність використання розробленого способу дослідження впливу коефіцієнта тертя абразивної маси на інтенсивність зношування матеріалів.

4.4. Вплив рослинних решток на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Наявність рослинних решток в середовищі ґрунту, з яким взаємодіють робочі органи ґрунтообробних машин під час експлуатації, може суттєво змінювати як механізм, так і характер зношування, що зі свого боку призведе до зміни інтенсивності зношування. Для виявлення закономірностей впливу наявності рослинних решток та їхнього стану на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин здійснено лабораторні й експлуатаційні дослідження, результати яких представлені в табл. 4.5 та рис. 4.15.

Як бачимо з табл. 4.5, для більшості сухих рослинних решток спостерігається зменшення інтенсивності масового зношування на 4...5%, що пояснюється зменшенням абразивності середовища завдяки наявності рослинних решток. Для кукурудзи, сої та соняшнику, навпаки характерне несуттєве підвищення інтенсивності зношування на 5...9%.

Для вологого матеріалу притаманне збільшення інтенсивності зношування на 13,5...16%, що можна пояснити виділенням амінокислот та амінів з рослинних решток, які призводять до інтенсифікації хімічних процесів на поверхні тертя. Цю думку підтверджують і результати досліджень з абразивною масою, яка у своєму складі мала рослини до збирання (у фазі колосіння для пшениці та у фазі молочно-воскової стиглості для кукурудзи). Зокрема, інтенсивність зношування для пшениці збільшилась на 15,4...18,6%, а для кукурудзи – на 21,5%. Рослини під час зношування виділяли соки (патоку),

які завдяки амінокислотам і амінам інтенсифікувала процес абразивного зношування.

Таблиця 4.5

**Інтенсивність масового зношування зразків сталі 65Г в абразивній масі
[323]**

№	Абразивна маса	Уміст рослинних решток (% від маси)	Інтенсивність масового зношування, I_m г/км
1.	Без рослинних решток	0	0,022
Рослинні рештки після збирання сільськогосподарських культур (сухі)			
2.	Соя	3	0,022
		6	0,023
3.	Соя (плющена)	3	0,021
		6	0,021
4.	Пшениця	3	0,022
		6	0,021
5.	Ячмінь	3	0,021
		6	0,022
6.	Люцерна	3	0,022
		6	0,021
7.	Ріпак	3	0,021
		6	0,021
8.	Кукурудза	3	0,023
		6	0,022
9.	Соняшник	3	0,022
		6	0,023
10.	Сіно (лугова трава)	3	0,022
		6	0,021
Рослинні рештки після збирання сільськогосподарських культур (вологі)			
11.	Соя (вологість 38%)	3	0,024
		6	0,024
12.	Ячмінь (вологість 34%)	3	0,024
		6	0,025
Рослини в різних фазах росту			
13.	Пшениця (у фазі колосіння)	3	0,026
		6	0,027
14.	Кукурудза (у фазі молочно-воскової стиглості)	3	0,028
		6	0,028

Для підтвердження лабораторних досліджень були проведені експлуатаційні експерименти на двох суміжних ділянках поля по 56 га. Ділянки розміщені на супіщаних ґрунтах в Овруцькому районі Житомирської області. Перша ділянка відразу після збирання кукурудзи на силос, друга ділянка – чистий пар (поле не оброблялося рік, уносилися гербіциди для недопущення наявності рослинних решток на поверхні поля). Результати досліджень представлені на рис. 4.15.

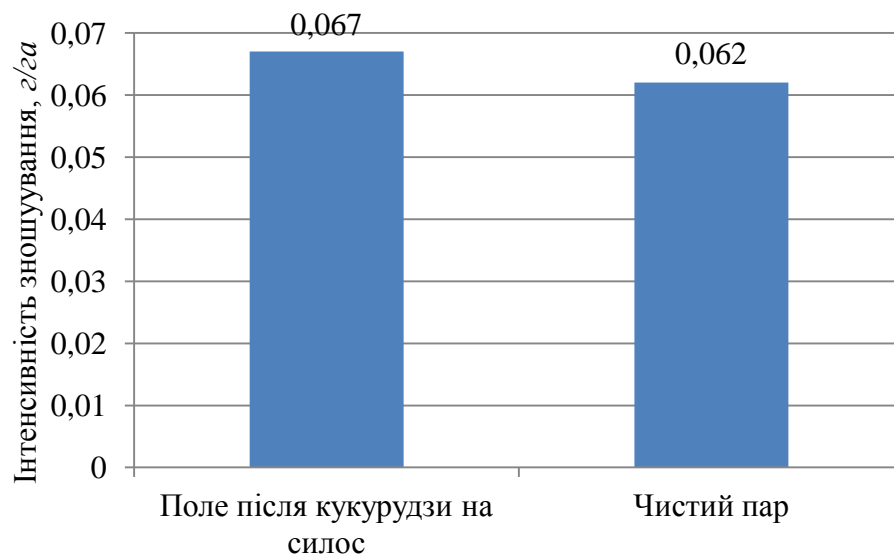


Рис. 4.15. Інтенсивність зношування робочих органів дискового агрегату УДА-4,5

Установлено, що темп масового зношування дискових робочих органів (універсального дискового агрегату УДА-4,5) на полі після збирання кукурудзи більший на 8% порівняно з темпом зношування дискових робочих органів на полі без рослинних решток.

Результати експлуатаційних досліджень підтверджують лабораторні, хоча останні продемонстрували підвищення на 21,5%, а експлуатаційні на 8%. Таке відхилення пов'язане з більш високою концентрацією рослинних решток кукурудзи в абразивній масі під час лабораторних досліджень

Абразивне зношування робочих органів ґрунтообробних машин не можна розглядати як простий механічний процес, адже під час зношування в

реальному ґрунті хімічний фактор може суттєво прискорювати інтенсивність зношування робочих поверхонь.

Висновки по розділу 4

1. Шляхом експериментальних досліджень доведено вплив типу ґрунту, його вологості та рослинних решток (кореневої системи різних сільськогосподарських культур) на коефіцієнт внутрішнього тертя f та питомого зчеплення c (ступеня закріплення абразивних частинок). Результати експлуатаційних досліджень підтверджують теоретичні положення та лабораторні дослідження щодо впливу ступеня закріпленості абразивних частинок у ґрунті на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

2. Для найбільш розповсюджених ґрунтів України встановлено коефіцієнт форми абразивних частинок і закономірність зміни коефіцієнта форми абразивних частинок від глибини залягання. Зростання коефіцієнта форми абразивних частинок для ідеалізованої абразивної маси (кварцовий пісок) призводить до пропорційного росту інтенсивності зношування матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин. У процесі взаємодії абразивних частинок ґрунту з поверхнею робочих органів вони округлюються, що спричиняє зменшення їх коефіцієнта форми. Для реальних ґрунтів прямої залежності між коефіцієнтом форми абразивних частинок та інтенсивністю зношування матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин не помічено через складність будови ґрунту та його здатність до самоорганізації.

3. Експериментально перевірено, що процес тертя, який відбувається внаслідок взаємодії середовища ґрунту та його складових елементів з робочими органами ґрунтообробних машин неможливо описати законом Амонтона–Кулона, його необхідно описувати з позиції молекулярно-механічної теорії тертя.

4. Експериментально визначено динамічний і статичний коефіцієнти тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та складовими частинами середовища ґрунту. Установлено вплив матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, його термічної обробки, шорсткості та напрямку нерівностей на динамічний і статичний коефіцієнт тертя. Зростання динамічного коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і середовищем ґрунту призводить до зменшення зносостійкості робочих органів.

5. Лабораторними та експлуатаційними дослідженнями доведено суттєвий вплив хімічного фактору на механізм і характер абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. У процесі експлуатації робочі органи ґрунтообробних машин взаємодіють не тільки з твердою фазою ґрунту, а також з біологічною фазою (рослинні рештки). Біологічна фаза (рослинні рештки) взаємодіючи з поверхнею робочих органів, виділяє соки (патоку), які завдяки амінокислотам і амінам інтенсифікують процес зношування робочих органів ґрунтообробних машин.

РОЗДІЛ 5**ВПЛИВ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ КОНСТРУКТИВНИХ ТА
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОЧИХ ОРГАНІВ
ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН НА ПІДВИЩЕННЯ ЇХ
ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ****5.1. Зміна властивостей поверхневих шарів робочих органів залежно від
умов експлуатації**

Питання зміни властивостей поверхневих шарів деталей машин, що працюють в умовах абразивного зношування, вивчали Б. І. Костецький [63, 82, 83], М. М. Хрущов [158-160], М. М. Тененбаум [144, 145, 177], М. М. Северньов [80, 81], В. Н. Ткачов [167, 168], В. В. Аулін [84, 85] та інші.

Б. І. Костецьким відзначається, що метал поверхонь тертя в процесі зношування переживає складні перетворення [63, 82, 83]. Відбувається як зміцнення, так і процес зменшення міцності, термічні процеси загартування, зміна хімічного складу внаслідок хімічних реакцій і дифузійних явищ. Характеристики зносостійкості металів можна обґрунтовано пов'язувати не з вихідними механічними властивостями, а з властивостями вторинних структур, які утворюються на поверхнях тертя в процесі зношування [82].

У роботі [324] під час дослідження зміни характеристик поверхневих шарів зразків зі сталі 65Г, у середовищі кварцового піску зернистістю 250 мкм з'ясовано, що відбувається миттєве окиснення поверхневих шарів з утворенням тонких захисних плівок – вторинних структур. Такі дослідження підтверджують утворення вторинних структур у разі абразивного зношування, але не дають чіткої відповіді, як ці зміни впливатимуть на зносостійкість сталі. Крім того, слід відзначити, що дослідження [324] проводилися з ідеалізованою абразивною масою (кварцовим піском), тому не можуть описувати процеси, які відбуваються на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин, оскільки вони взаємодіють із реальним ґрунтом. Ґрунт – це складна гетерофазна система,

взаємодіючи з якою на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин відбуваються складні процеси (хімічні, фізичні, механічні, термічні), дослідити які можна тільки в експлуатаційних умовах.

Виявлення вторинних структур поверхні матеріалу за допомогою електронної мікроскопії не дозволить визначити їхнього впливу на зносостійкість матеріалу. Зміна фізико-механічних властивостей поверхні деталей або робочих органів машин, які піддаються абразивному зношуванню може опосередковано слугувати об'єктивним показником наявності вторинних структур на поверхні тертя.

Одним із показників, що констатує утворення вторинних структур на поверхні тертя, може бути зміна початкової твердості матеріалу. Твердість поверхні деталей машин або робочих органів, що працюють в умовах абразивного зношування, не може повною мірою характеризувати їх зносостійкість. Твердість може виступати як відносний показник зносостійкості матеріалу деталей або робочих органів, які працюють в умовах абразивного зношування, якщо всі інші фізико-механічні та хімічні властивості й характеристики матеріалу залишаються незмінними. У процесі взаємодії з абразивним середовищем поверхнева твердість деталей або робочих органів машин може як збільшуватися, так і зменшуватися, що призведе до зміни зносостійкості й довговічності деталі або робочого органу машини. Передусім зміна твердості поверхні залежить від властивостей матеріалу деталі або робочого органу та механізму й характеру протікання абразивного зношування. Для встановлення матеріалів, здатних підвищувати твердість поверхні робочих органів ґрунтообробних машин (тобто зносостійкість) у процесі взаємодії з ґрунтом, необхідно провести відповідні дослідження на різних типах ґрунтів для різних типів робочих органів. Отримані результати дозволять об'єктивно оцінити роль вторинних структур на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин, що утворюються внаслідок взаємодії з абразивним середовищем (ґрунтом), на їх зносостійкість та довговічність. Проведені дослідження зміни поверхневої твердості дозволять розробити рекомендації виробникам і

сільськогосподарським підприємствам з вибору матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин, які здатні до підвищення своєї зносостійкості в процесі експлуатації, з врахуванням типу ґрунту та режими експлуатації робочих органів.

5.1.1. Зміна поверхневої твердості робочих органів дискових ґрунтообробних машин у процесі експлуатації

Для визначення впливу ґрунтового середовища на зміну поверхневої твердості робочих органів ґрунтообробних машин дослідження проводили на трьох типах ґрунтів: супіщаний, середній суглинок та глина легка.

Результати вимірювання проводили за схемою, представленою на рис. 5.1. Кількість замірів у кожній зоні становило $n=10$. Ширина зон дорівнювала 10 мм. Для достовірності отриманої інформації вимірювання проводили на 6 дискових робочих органах.



Рис. 5.1. Схема проведення замірів твердості на зовнішній поверхні вирізного дискового робочого органу (ширина зон 10 мм)

Вимірювання твердості здійснювали відповідно до ASTM A1038 [273]. Такий метод найбільше підходить для контролю твердості зміцнених поверхневих шарів, оскільки глибина проникнення індектора звичайно знаходиться в межах 30...50 мкм.

Твердість поверхні визначали за допомогою портативного твердоміра Т-УД2, заводський номер 008.119.12.16, дата виготовлення 13.12.2016 р. Повірку твердоміра зроблено в ДП «Дніпропетровський регіональний державний

науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації», свідоцтво №10-0/6926/1 від 12.01.2017 р.

Дослідження зміни твердості дискових робочих органів проводили на таких сільськогосподарських машинах: БДВП-4,2 виробник ТОВ «Краснянське СП Агромаш» в умовах Козятинського району Вінницької області (напрацювання 1840 га); БДВП-7,2 виробник ТОВ «Краснянське СП Агромаш» в умовах Коростенського району Житомирської області; БПД-4,2 виробник ПАО «Завод Фрегат» в умовах Овруцького району Житомирської області; сівалки «John Deere 3S-4000HD» в умовах Овруцького району Житомирської області. Результати досліджень представлено в табл. 5.1.

Як видно з табл. 5.1, твердість нових вітчизняних дисків, виготовлених зі сталі 65Г, коливається в межах 35,91...40,89 HRC, а твердість дисків фірми «Bellota» виготовлених зі сталі 28MnB5 – 48,75...50,69 HRC. У процесі експлуатації робочих органів дискових ґрунтообробних машин твердість поверхні суттєво змінюється. На різних типах ґрунтів закономірність зміни твердості має відмінний характер (рис. 5.2 і 5.3).

Таблиця 5.1

**Зміна мікротвердості внутрішньої поверхні дискових робочих органів
(вимірювання проведено в зоні 1, рис. 5.1) [272]**

Ґрунт	Матеріал	Тип робочого органу	Бік проведення заміру	Твердість робочої поверхні елемента трибосистеми «робочий орган – ґрунт», \bar{x} (HRC)	
				Початкова	Після напрацювання*
Глина легка	Сталь 65Г	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішній	37,29	39,52
			Внутрішній	37,63	40,71
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішній	36,83	44,18
			Внутрішній	37,06	41,68
	28MnB5	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішній	50,44	54,96
			Внутрішній	49,82	54,41
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішній	49,65	56,37
			Внутрішній	50,38	58,04
Середній суглинок	Сталь 65Г	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішній	36,80	40,52
			Внутрішній	37,12	41,37
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішній	36,87	30,97
			Внутрішній	35,91	31,09
	28MnB5	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішній	50,05	54,41
			Внутрішній	49,19	53,29
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішній	49,08	57,5
			Внутрішній	49,94	54,59

Продовження таблиці 5.1

Супіщаний	Сталь 65Г	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішній	39,87	45,73
			Внутрішній	40,27	42,77
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішній	39,75	32,23
			Внутрішній	40,89	33,12
	28MnB5	Передній ряд (вирізні диски типу «ромашка»)	Зовнішній	50,36	37,23
			Внутрішній	49,62	36,38
		Задній ряд (суцільні диски)	Зовнішній	48,75	39,34
			Внутрішній	50,69	41,04
	Сівалка John Deere 3S-4000HD	Сошник	Зовнішній	34,57	24,86

* БДВП-4,2 в умовах Козятинського району Вінницької області напрацювала 1200 га; БДВП-7,2 в умовах Коростенського району Житомирської області напрацювала 1950 га; БПД-4,2 в умовах Овруцького району Житомирської області напрацювала 840 га.

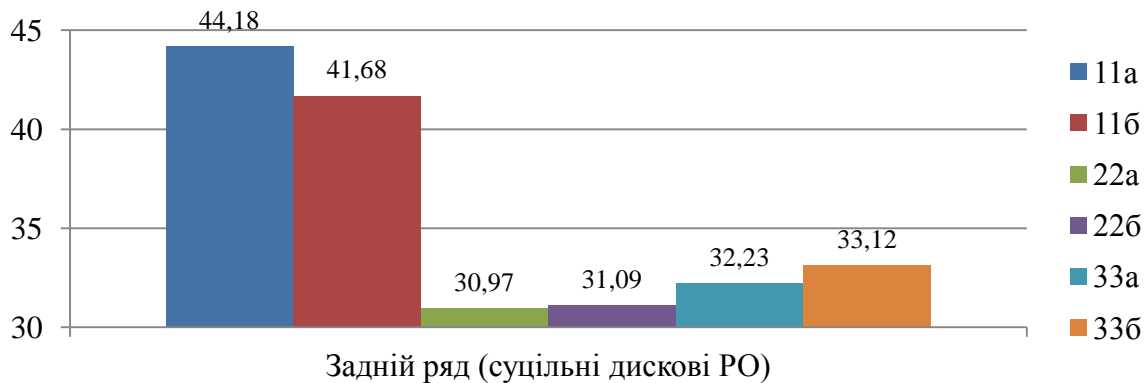
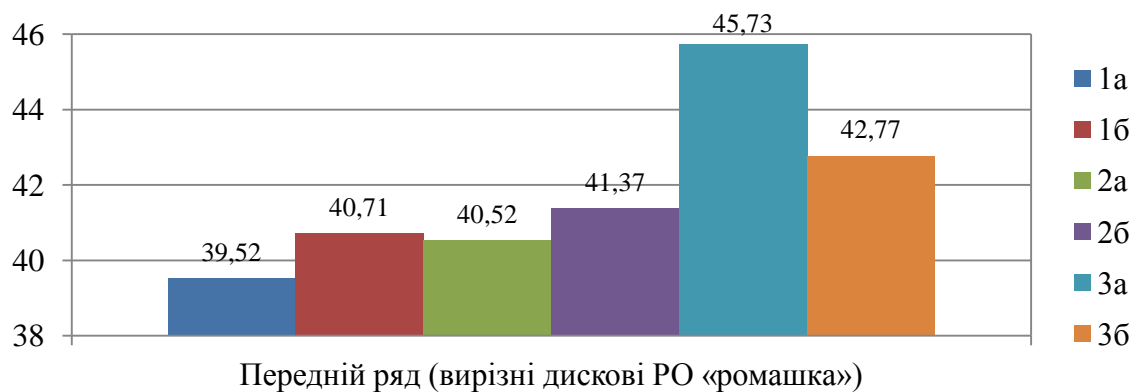


Рис. 5.2. Зміна твердості поверхні дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г: РО – робочі органи; 1a, 11a, та 1б, 11б – зовнішній і внутрішній бік дискового робочого органу відповідно експлуатуються на легкій глині; 2a, 22a та 2б, 22б – зовнішній та внутрішній бік дискового робочого органу відповідно експлуатуються на середньому суглинку; 3a, 33a та 3б, 33б – зовнішній та внутрішній бік дискового робочого органу відповідно, експлуатуються на супіщаному ґрунті

За результатами дослідження можна зробити висновок, що твердість поверхні вирізних сферичних дискових робочих органів, виготовлених зі сталі 65Г, які працюють у першому ряду, підвищується. Це спричинено явищем «наклепу» робочої поверхні, адже такі робочі органи працюють у напівзакріпленому абразивному середовищі. Найбільше твердість поверхні підвищується в дисків, які працюють на супіщаному ґрунті.

Для суцільних дискових робочих органів (задній ряд), які працюють у незакріпленій абразивній масі для всіх типів ґрунтів, окрім легкої глини, спостерігається процес зменшення поверхневої твердості робочої поверхні.

У другого ряду дискових робочих органів не помічено процесу зміцнення поверхні внаслідок взаємодії з абразивними частинка, оскільки вони здебільшого, взаємодіють з вільними абразивними частинка.

Для переднього й заднього рядів дискових робочих органів ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 28MnB5, характерне підвищення поверхневої твердості на 3...7 одиниць HRC на глинистих і суглинкових ґрунтах. На супіщаному ґрунті спостерігається процес зменшення поверхової твердості на 11...14 одиниць HRC.

Для більш детального аналізу зміни поверхневої твердості робочих органів ґрунтообробних машин було проведено дослідження зношених дискових робочих органів за схемою, представленою на рис. 5.4.

Результати досліджень поверхневої твердості зношених дискових робочих органів, що працювали на глинистих ґрунтах (виготовлених зі сталі 28MnB5) представлено в табл. 5.2.

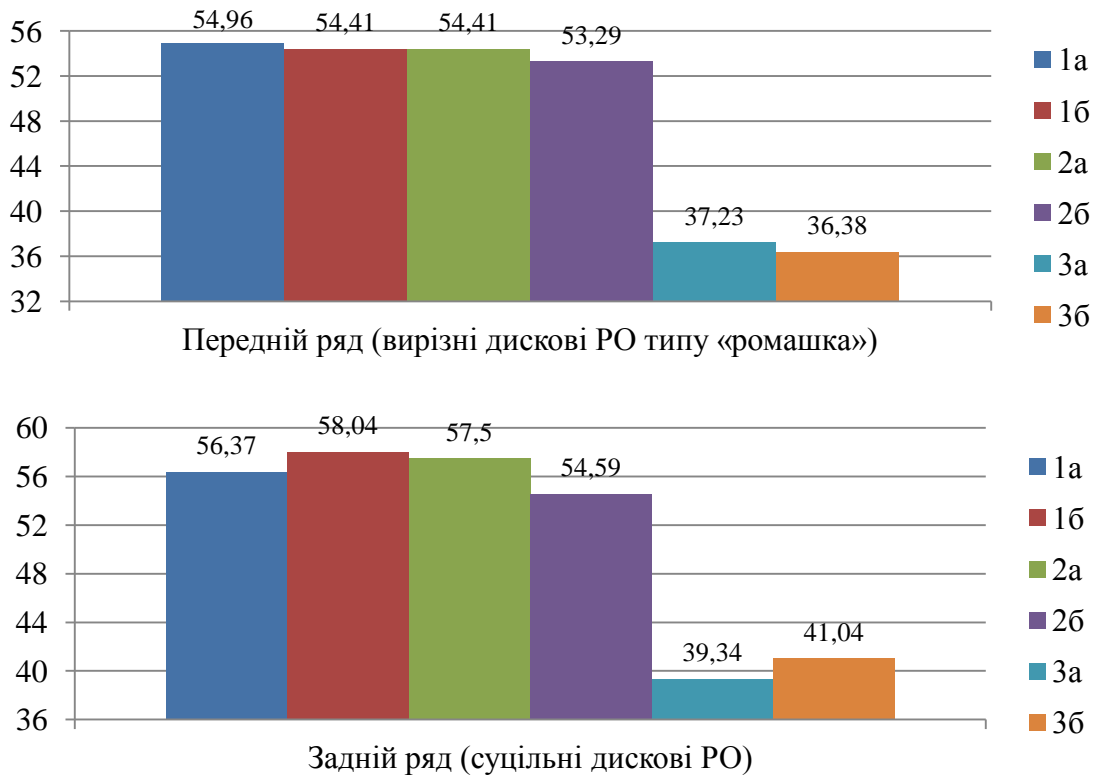


Рис. 5.3. Зміна твердості поверхні дискового робочого органу виготовленого зі сталі 28MnB5: РО – робочі органи; 1а, 1а, та 1б, 1б – зовнішній і внутрішній бік робочих органів відповідно, експлуатуються на легкій глині; 2а, 2а та 2б, 2б – зовнішній та внутрішній бік робочих органів відповідно, експлуатуються на середньому суглинку; 3а, 3а та 3б, 3б – зовнішній та внутрішній бік робочих органів відповідно, експлуатуються на супіщаному ґрунті [272]

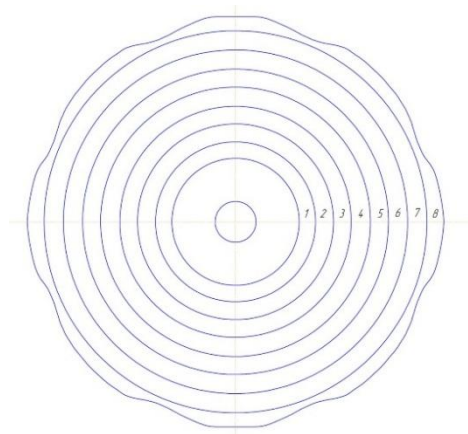


Рис. 5.4. Схема проведення замірів поверхневої твердості на зношеному дисковому робочому органі

Поверхнева твердість зношеного дискового робочого органу, що працював на глинистих ґрунтах у передньому ряду та виготовленого зі сталі 28MnB5 (внутрішня поверхня)

Зона	Середня твердість HRC
1	46,68
2	47,74
3	46,59
4	58,16
5	57,75
6	62,06
7	63,67
8	40,75

З табл. 5.2 видно, що в зонах 1, 2 та 3, де відсутнє інтенсивне абразивне зношування відсутня, немає зміни поверхневої твердості. У зонах 4, 5, 6 та 7, де протікає процес абразивного зношування, спостерігається суттєве підвищення поверхневої твердості завдяки самоорганізації поверхневих шарів. У зоні 8 наявне зменшення поверхневої твердості, викликане складними умовами протікання процесу абразивного зношування та зміною його механізму. Підтвердження цієї думки є зображення на рис. 5.5. Така закономірність зміни поверхневої твердості по площі диску справедлива для робочих органів, виготовлених зі сталі 65Г та 28MnB5 на всіх типах ґрунтів.



Рис. 5.5. Загальний вигляд робочої поверхні дискової борони БДВП-7,2 (перший ряд, матеріал робочого органу – сталь 28MnB5)

Для підвищення довговічності та зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин (ураховуючи, що з підвищенням твердості металу інтенсивність абразивного зношування зменшується) необхідно: на глинистих і суглинкових ґрунтах використовувати дискові робочі органи виготовлені зі сталі 28MnB5, а на піщаних та супіщаних – зі сталі 65Г.

5.1.2. Зміна поверхневої твердості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин у процесі експлуатації

Дослідження зміни твердості поверхні лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин проводили на агрегатах [226]:

- плуга «Diamant 11» виробник «Lemken» (рис. 5.6) в умовах Козятинського району Вінницької області (напрацювання 85 га);
- культиватора КПС-9 ПМ виробник ВАТ «Восход» в умовах Козятинського району Вінницької області (напрацювання 654 га);
- культиватора «John Deere 2210» в умова Овруцького району Житомирської області;
- розпушувача «John Deere 2700» в умова Овруцького району Житомирської області;
- культиватора «Kverneland cultibar» в умова Овруцького району Житомирської області;
- плуга «Kverneland» в умова Овруцького району Житомирської області.

Результати досліджень подано в табл. 5.3.



Рис. 5.6. Загальний вигляд плуга «Diamant 11» фірми «Lemken»

Таблиця 5.3.

**Зміна поверхневої мікротвердості лемішно-лапових робочих органів
грунтообробних машин у процесі експлуатації [226]**

Грунт	Сільськогосподарська машина	Тип робочого органу	Бік проведення заміру	Твердість робочої поверхні елемента системи «робочий орган – ґрунт», \bar{x} (HRC)	
				Початкова	Після напрацювання
Глина легка	«Diamant 11» фірми «Lemken»	Долото	Зовнішній	40,67	44,78
		Груди полиці	Зовнішній	39,91	48,45
		Леміш	Зовнішній	46,80	50,28
		Полоса полиці	Зовнішній	47,16	54,60
	КПС-9 ПМ	Лапа	Зовнішній	38,20	40,20
		Лапа	Внутрішній	38,41	34,00
Супіщаний	«John Deere 2210»	Лапа	Зовнішній	39,24	41,05
		Лапа	Внутрішній	39,09	40,08
	«Kverneland cultiva» (робочі органи фірми «Bellota»)	Лапа	Зовнішній	47,8	48,57
		Лапа	Внутрішній	49,42	51,50
	плуг «Kverneland»	Долото	Зовнішній	53,41	61,30
		Груди полиці	Зовнішній	56,71	62,28
		Леміш (вітчизняного виробництва, сталь 65Г)	Зовнішній	38,77	41,55
		Полиця	Зовнішній	52,53	63,28

Як бачимо з табл. 5.3, у результаті взаємодії лемішно-лапових робочих органів з ґрунтовою масою в процесі їх експлуатації поверхнева мікротвердість підвищується на 1,61...21,42%, що пояснюється процесом «самонаклепу» при взаємодії з абразивними частинками ґрунту, які мають більшу твердість. Слід зазначити більш суттєве підвищення мікротвердості на поверхні робочих органів плугів 7,44...21,42% порівняно з підвищенням мікротвердості на культиваторних лапах 1,61...5,2%.

Виняток становить внутрішня поверхня культиваторних лап агрегату КПС-9 ПМ під час експлуатації на легкій глині, де спостерігається зменшення мікротвердості на 10,29%, що зумовлено відсутністю процесу «самонаклепу».

Для аналізу впливу питомого тиску та ступеня закріплення абразивної частинки на величину зміни поверхневої мікротвердості робочих органів ґрунтообробних машин були проведені дослідження на робочих органах плуга «Kverneland» (рис. 5.7). Для проведення замірів робочу поверхню кожного робочого органу розбивали на сектори (рис. 5.8), після чого виконували епіюра зміни мікротвердості (рис. 5.9)

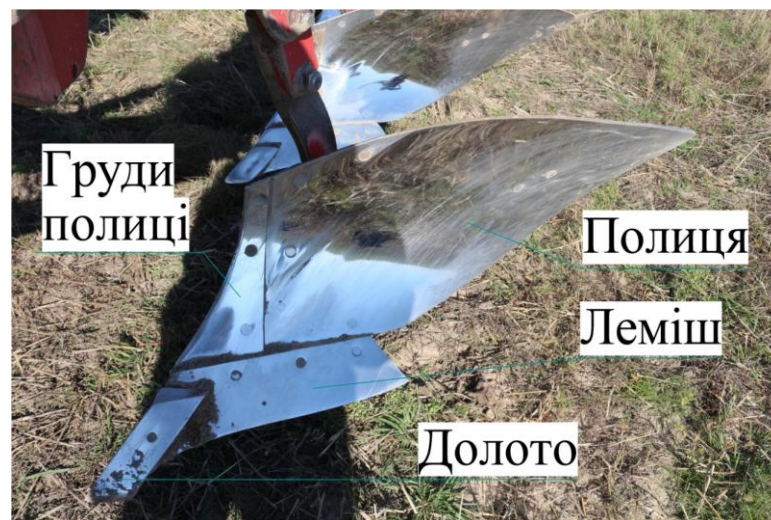


Рис. 5.7. Робочі органи плуга «Kverneland» під час експлуатації в умовах Овруцького району Житомирської області

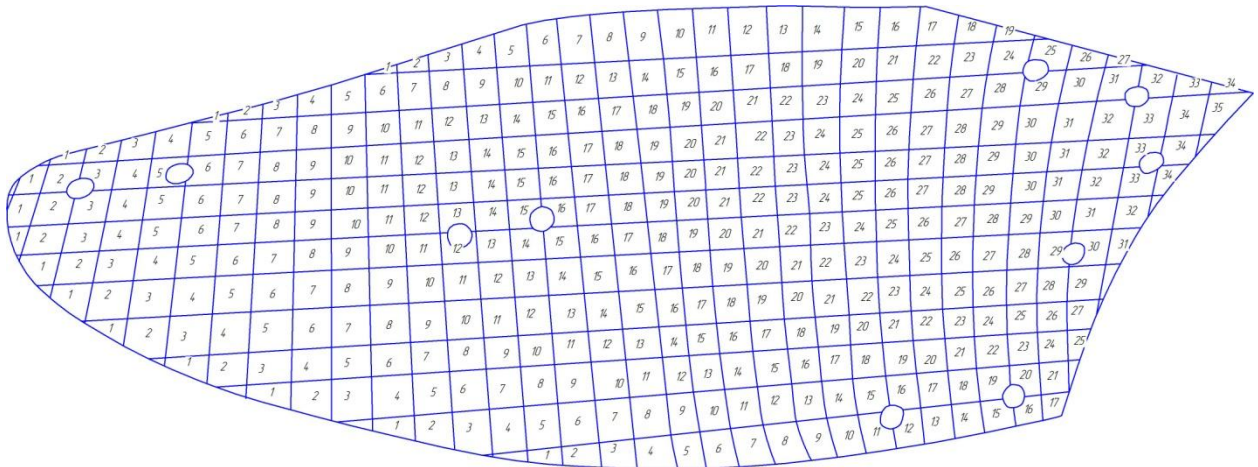


Рис. 5.8. Схема замірів на полиці плуга «Kverneland».

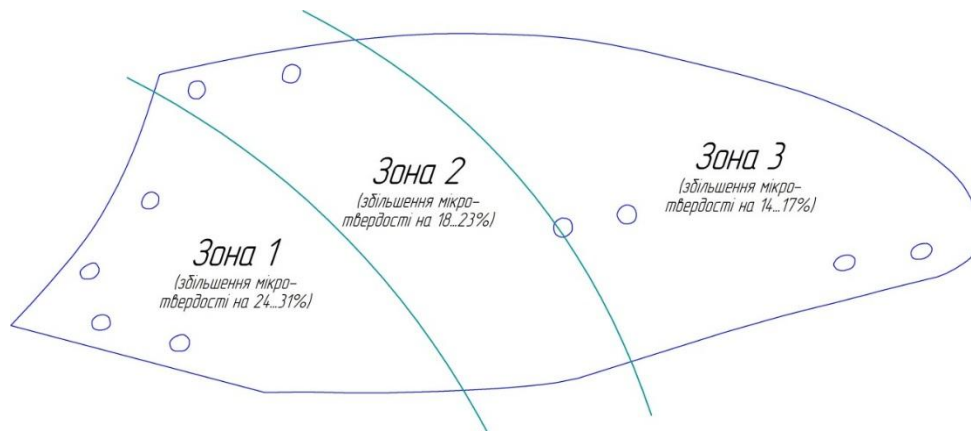


Рис. 5.9. Зміна мікротвердості на поверхні полиці плуга «Kverneland» у результаті взаємодії

У лемеші, долоті та грудях полиці спостережено наявність четвертої зони на ширині до 10 мм у місці початку взаємодії з ґрунтовим середовищем, де навпаки, засвідчено зменшення мікротвердості поверхні на 5,14...7,59%.

Закономірність підвищення мікротвердості на поверхні робочих органів, що працюють у ґрунті справедлива для всіх деталей, які взаємодіють з ґрунтом. Підтвердження цього маємо й для робочих органів сівалок «John Deere 3S-4000HD», СЗ-5,4 і «AMAZONE Centaya», де підвищення поверхневої мікротвердості становить 7,2...11,4%.

У процесі зношування лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин помічено збільшення поверхневої твердості, яке можна пояснити «наклепуванням» поверхневого шару. «Наклепування» відбувається внаслідок

високої швидкості пластичної деформації, що переважає швидкість термічних процесів на поверхні тертя, оскільки ця трибосистема є відкритою.

5.2. Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин

Підвищити зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин можна трьома групами методів: конструкційними, технологічними, експлуатаційними [44, 167]. До сьогодні переважна більшість досліджень цього напрямку присвячено вивченню конструкційних та технологічних методам (наприклад, створенню нових триботехнічних матеріалів, нанесенню зносостійких покриттів на поверхню металу різними методами, оптимізації геометрії деталей, забезпеченню самоорганізації вузлів тертя і т.д.) [42, 43, 44, 50, 79, 84, 87, 88, 180-194]. Значно менше уваги приділено аналізу експлуатаційних методів, незважаючи на те, що на думку В. М. Ткачова [167], вони дозволяють підвищити абразивну зносостійкість деталей машин у 1,5...3 рази.

Тертя об ґрунт поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин характеризується малими питомими тисками частинок ґрунту на неї та їх сприятливою геометричною формою з відсутністю різальних кромek. Завдяки цьому створюються умови, за яких механічного руйнування поверхні тертя відбуватися не може. У таких обставинах дія абразивних частинок викликає інтенсивну мікропластичну деформацію поверхневих шарів, що сприяє виникненню окиснювального зношування. Однак останнє при цьому характеризується виключно високою інтенсивністю, яка набагато перевищує інтенсивність звичайного окиснювального зношування, що виникає під час роботи трибоспряжень [63].

Огляд показує, що на поверхні тертя робочих органів ґрунтообробних машин зношується не основний метал, а окисна плівка. Такий високий темп розвитку й протікання окиснювального зношування пояснюється тим, що поверхня тертя працює в хімічно активному середовищі, дотик з яким за

одночасного протікання мікропластичних деформацій сприяє інтенсивному утворенню окисних плівок, що мають невисоку механічну міцність і легко руйнуються абразивними частинками.

Протягом року робочі органи ґрунтообробних машин експлуатують доволі короткий термін, неробочий період становить близько 90% (за даними корпорації «Сварог Вест Груп»). У сільськогосподарському виробництві використовують такі способи зберігання ґрунтообробних машин: на відкритих майданчиках (з асфальтовим, гравійним, бетонним, ґрунтовим і трав'яним покриттям); під навісом (з бетонним, асфальтованим та гравійним покриттям); у закритих приміщеннях (опалювальні й неопалювальні з бетонним та асфальтовим покриттям). Останній спосіб не набув широкого розповсюдження, оскільки потребує додаткових капіталовкладень.

У процесі зберігання робочі органи ґрунтообробних машин піддаються атмосферній корозії й після відновлення експлуатації таких робочих органів інтенсивність їх зношування зростає. У зв'язку з цим захист від корозії необхідно розглядати як важливий фактор підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Фундаментальні дослідження атмосферної корозії деталей сільськогосподарських машин провів видатний білоруський учений М. М. Северньов [80, 81]. Дослідження проводились у виробничих умовах Республіки Білорусь на спеціальних зразках. На рис. 5.10 засвідчено результати дослідження з визначенням корозійного руйнування незахищених сталених зразків за різних способів зберігання протягом 20 місяців.

Як видно з рис. 5.10, різниця у величині корозійного руйнування сталей за різних умов зберігання значна. Зокрема, за 20 місяців зберігання втрати металу від корозії в закритому приміщенні для наведених марок сталей становлять 54...64 г/м², на відкритому майданчику 219...316 г/м², а на поверхні ґрунту 280...360 г/м².

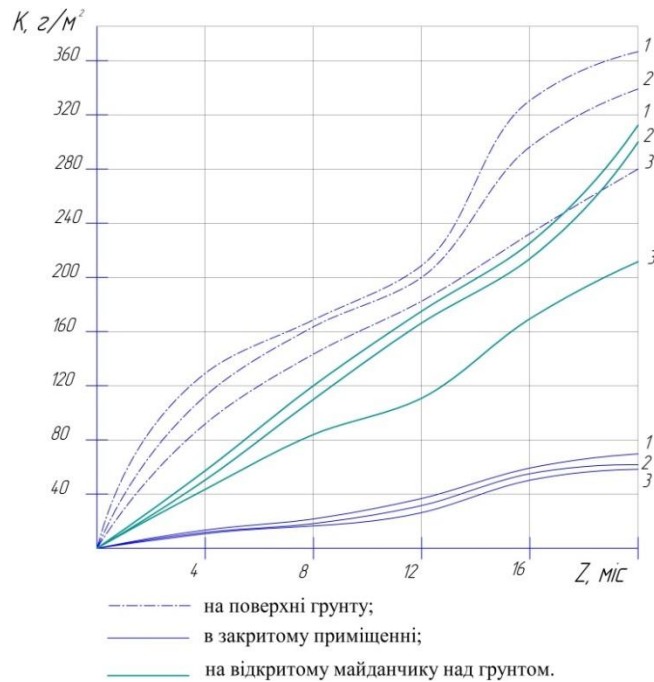


Рис. 5.10. Залежність корозійного руйнування сталей від тривалості та способів їх зберігання: 1 – сталь 3; 2 – сталь 45; 3 – сталь 65Г

Для дослідження впливу попередньої корозії на інтенсивність зношування М. М. Северньовим [80, 81] розробив методику й провів відповідні дослідження на зразках сталі 65Г, сталі 45 та сталі 3 з використанням лабораторної установки за способом «гільза». Абразивним середовищем слугував кварцовий пісок (99% якого були частинки розміром 0,16...0,315 мм). Швидкість обертання шпинделя установки – 240 об/хв., питомий тиск зразка на абразив 0,5 кГ/см². Тривалість досліджень – 20 місяців. Зразки знімали для проведення дослідження кожні 4 місяці й зберігали трьома способами: у закритому приміщенні; у відкритому приміщенні над ґрунтом; на поверхні ґрунту. Дослідження проводилися в умовах Республіки Білорусь. У результаті досліджень отримано залежність інтенсивності абразивного зношування сталей від величини корозійного руйнування [80, 81]:

$$J_k = aK^2 + bK + c \quad \text{мг/дм}^2 \cdot \text{хв}, \quad (5.1)$$

де K – величина корозійного руйнування (г/м^2);

a , b і c – коефіцієнти, величини яких для різних способів зберігання визначені експериментально.

Незважаючи на велику практичну цінність проведених досліджень, вони мають низку недоліків:

- проводили на сталях, які на сьогодні не використовуються для виробництва робочих органів ґрунтообробних машин (окрім сталі 65Г);
- експерименти здійснювали лише в одній кліматичній зоні;
- у процесі досліджень не враховано впливу способу термічної обробки сталі на інтенсивність корозії;
- в експериментах не взято до уваги можливість нанесення захисних покриттів під час зберігання;
- установка за способом «гільза» не відтворює реальні умови зношування робочих органів ґрунтообробних машин;
- зразки не піддавалися абразивному зношуванню перед зберіганням, що не дозволяє оцінити можливість використання залежностей М. М. Северньова для опису процесу атмосферної корозії поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

Більшість із вказаних недоліків були враховані під час розробки сучасної методики дослідження впливу способу зберігання на абразивну зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин, представленої в роботі [267].

Дослідження впливу абразивного зношування на інтенсивність корозійних процесів матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин проводилися протягом 2014–2016 років в 24 сільськогосподарських підприємствах ґрунтово-кліматичних зон Полісся та Лісостепу. Огляд робочих органів ґрунтообробних машин виконували 1 раз на місяць.

Отримані результати дозволяють зробити такі висновки [325]:

- способи зберігання ґрунтообробних машин розподіляються в таких співвідношеннях:

71% – на відкритих майданчиках (переважно на асфальтованих або бетонних), з них 12% з нанесенням захисного покриття;

29% – під навісом на майданчиках (асфальтованих або бетонних), з них 74% з нанесенням захисного покриття. Як захисне покриття здебільшого (понад 95%) використовують відпрацьоване моторне мастило. Такі результати вказують на необхідність проведення дослідження впливу захисних покриттів на інтенсивність атмосферної корозії робочих органів ґрунтообробних машин;

- у перші дні зберігання ґрунтообробних машин на поверхні робочих органів відсутні явні ознаки атмосферної корозії (рис. 5.11);

- у процесі зберігання атмосферна корозія протікає інтенсивніше на поверхні робочих органів, яка піддається абразивному зношуванню (рис. 5.12).



Рис. 5.11. Секція борони БПД-4,2 після напрацювання 1282 га, термін зберігання після роботи 45 год



Рис. 5.12 Поверхня диска борони «Gregoire Besson» після напрацювання 3340 га, термін зберігання після роботи 27 днів

Це можна пояснити особливостями механізму абразивного зношування, адже взаємодія абразивних частинок ґрунту з поверхнею сталі проявляється переважно в її пластичному деформуванні, а також у формуванні та зношуванні вторинних структур. Тобто в поверхневому шарі сталі утворюються дефекти кристалічної будови, що сприяють утворенню оксидів на поверхні [325].

Отримані результати свідчать про неможливість використання залежностей М. М. Северньова для визначення величини корозійного руйнування поверхні робочих органів ґрунтообробних машин залежно від тривалості та способу їх зберігання, оскільки в них не врахований активаційний вплив попереднього абразивного зношування на протікання атмосферної корозії поверхні в реальних умовах.

5.3. Дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів і зносостійкості серійних дискових робочих органів ґрунтообробних машин

Технічні вимоги для дисків до вітчизняної техніки передбачає їх виготовлення зі сталі 65Г або її заміника – сталі М76 та сталі 45 з термообробкою на твердість 39...44 HRC [50]. Фірма «Bellota» є світовим лідером із виробництва робочих органів для дискових ґрунтообробних машин та реалізує свою продукцію більше ніж у 80 країнах світу. За даними офіційного сайту, робочі органи виготовляють з борвмісної сталі (28MnB5) твердістю 50 ± 2 HRC, що забезпечуються автоматичною системою контролю термообробки [326]. На сьогодні залишається не вивченим питання можливості застосування робочих органів дискових ґрунтообробних машин з одного матеріалу та з однаковою термічною обробкою для різних типів ґрунтів (піщаних, супіщаних, суглинкових та глини).

Світовий лідер з виробництва робочих органів для ґрунтообробних машин фірма «Bellota» на своєму офіційному сайті вказує, що в ролі матеріалу для дискових ґрунтообробних робочих органів використовується сталь 28MnB5 [326]. Один з виробників сталі 28MnB5 є «Ovako Sweden AB» [327] на своєму сайті регламентує хімічний склад цієї сталі (табл. 5.4).

Таблиця 5.4

Регламентований хімічний склад сталі 28MnB5 (виробник «Ovako Sweden AB») [306]

Steel	Weldability		C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr %	Al%	B%
28MnB5	CEV0,57max	Min	0,25	0,15	1,00	-	-	-	-	0,0008
	Pcm0,4 max	Max	0,32	0,40	1,50	0,035	0,035	0,30	0,020	0,0050

Хімічний склад матеріалу ґрунтообробного робочого органу фірми «Bellota» визначали методом атомно-емісійної спектрометрії, результати представлено в табл. 5.5.

Таблиця 5.5

Хімічний склад сталі диска Bellota для виготовленого зі сталі 28MnB5

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	B	Ti	N
0,272	0,234	1,26	0,020	0,0035	0,026	0,22	0,019	0,002	0,019	0,004	< 0,002	0,0023	0,033	0,0068

Як бачимо з представлених результатів, хімічний склад матеріалу ґрунтообробного робочого органу фірми «Bellota» відповідає нормативним вимогам до сталі 28MnB5 (крім алюмінію, його вміст більший на 0,006% за допустимі межі).

Випробування твердості робочих органів дискових ґрунтообробних машин (виробник «Bellota») виконували методом Роквелла відповідно до ISO 6508-1 [274], результати подано в табл. 5.6.

Таблиця 5.6

Твердість сталі диска «Bellota» виготовленого зі сталі 28MnB5

Твердість	HRC										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Всередині→ посередині	49,9	49,0	49,5	49,1	49,2	49,0	49,6	49,9	49,6	49,0	49,6
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
Посередині →зовні	49,4	50,0	50,0	49,8	48,8	49,9	49,9	49,9	50,0	49,8	

Дослідження структури сталі робочих органів дискових ґрунтообробних машин фірми «Bellota» виконували за схемою, представленою на рис. 5.13.

Зразки шліфували та піддавали обробці азотною кислотою (HNO₃), результати досліджень представлено на рис. 5.14.



Рис. 5.13. Схема проведення досліджень на вирізаному зразку

Як відомо, уміст бору до 0,1% різко знижує поверхневий натяг сталі. Цей ефект призводить до адсорбції бору на межі щораз більших зерен і вповільнення лінійної швидкості росту кристалів та відповідно до цього подрібнення структури. Зона стовпчастої кристалізації скорочується, структура стає однорідною й дрібнозернистою, поліпшуються пластичні властивості, які ми можемо спостерігати на рис. 5.14.

Дослідження на згин з надрізом проводили за стандартом ISO 148-1:2011-01 [264] на маятниковому копрі PSW-750, результати є представлено в табл. 5.7.

Таблиця 5.7

Випробування на згин сталі робочих органів фірми Bellota (сталь 28MnB5)
[326]

Розміщення надрізу / напрямок		Температура	Енергія удару				Вимірювання
		[°C]	1	2	3	MW	3,8x 10,0
CV -KSZO	A2	+ 20	12 (32 *)	12 (32 *)	13 (34 *)	12 (32 *)	
CV -KSZO	B2	+ 20	11 (29*)	10 (26 *)	10 (26 *)	10 (26 *)	
CV -KSZO	A0	0	10 (26 *)	9 (24 *)	9 (24 *)	9 (24 *)	
CV -KSZO	B0	0	10 (26 *)	10 (26 *)	8 (21 *)	9 (24 *)	

KSZO – розміщення надрізу перпендикулярно до поверхні; А – тангенціальне; В – радіальне; (*) – перерахунок з дослідного зразка на повнорозмірний зразок.

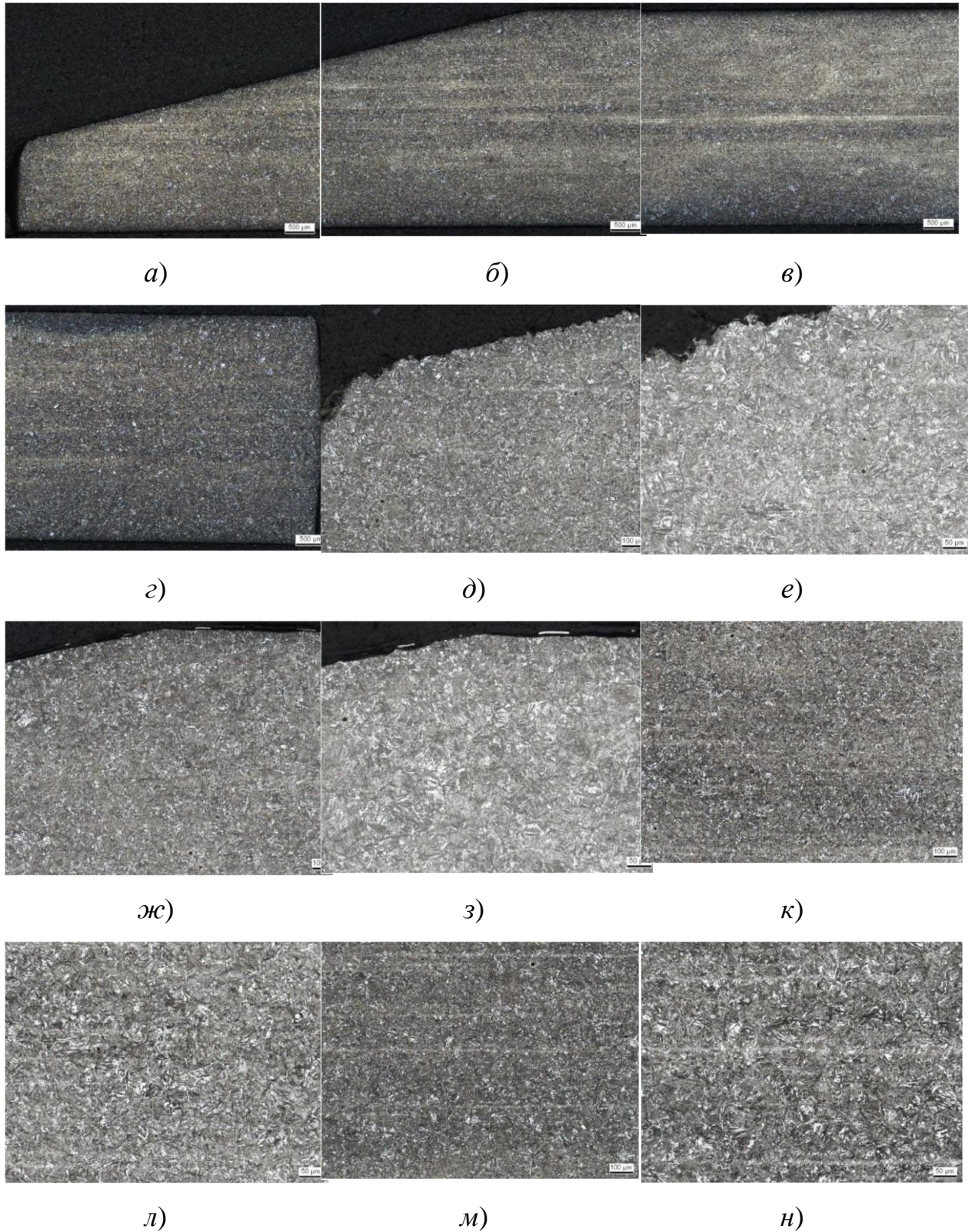


Рис. 5.14. Мікроструктура матеріалу робочих органів фірми «Bellota» (сталь 28MnB5): *а, б* – зовні; *в* – посередині; *г* – усередині; *д, е* – зовні (вершина деталі); *ж, з* – зовні (перехід до нормальної товщини); *к, л* – посередині деталі, *м, н* – деталь усередині

За представленими результатами видно, що енергія удару, яка призводить до руйнування під час згину значно більша за енергію удару, яка може виникнути в процесі експлуатації робочих органів дискових ґрунтообробних машин [80].

Вітчизняні дискові робочі органи ґрунтообробних машин здебільшого виготовляють зі сталі 65Г, саме тому визначали її фізико-механічні властивості. Хімічний склад сталі 65Г, з якої виготовлений робочий орган агрегату УДА-4,5, представлено в табл. 5.8.

Таблиця 5.8

Хімічний склад матеріалу робочого органу агрегату УДА-4,5 (сталь 65Г)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,63	0,26	1,11	<0,01	0,031	0,24	0,033	0,053

Хімічний склад сталі 65Г, з якої виготовлений робочий орган агрегату УДА-4,5, відповідає державному стандарту (ДСТУ 8429:2015) [329], що регламентує вміст хімічних елементів.

Таблиця 5.9

Твердість поверхні робочого органу агрегату УДА-4,5, виготовленого зі сталі 65Г

Твердість	HRC										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Усередині→ посередині	37,2	37,0	37,6	37,4	37,8	37,5	38,1	37,5	36,8	36,9	37,1
	12	13	14	15	216	17	18	19	20	21	
Посередині →зовні	37,0	37,6	37,5	37,1	37,9	37,9	38,3	38,7	37,8	37,4	

Початкова твердість матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, виготовленого зі сталі 65Г, менша в середньому приблизно на 30% порівняно з робочими органами, виготовленими зі сталі 28MnB5. Також спостержено більш

суттєву нерівномірність твердості на об'ємі робочих органів ґрунтообробних машин виготовлених зі сталі 65Г (відхилення від мінімально до максимального становить 1,7 одиниць HRC, тоді як для сталі 28MnB5 таке відхилення знаходиться в межах 1,0 одиниці HRC), що засвідчує неоднорідність властивостей на об'ємі матеріалу. Це явище підтверджує й фото мікроструктури сталі 65Г (рис. 5.15)

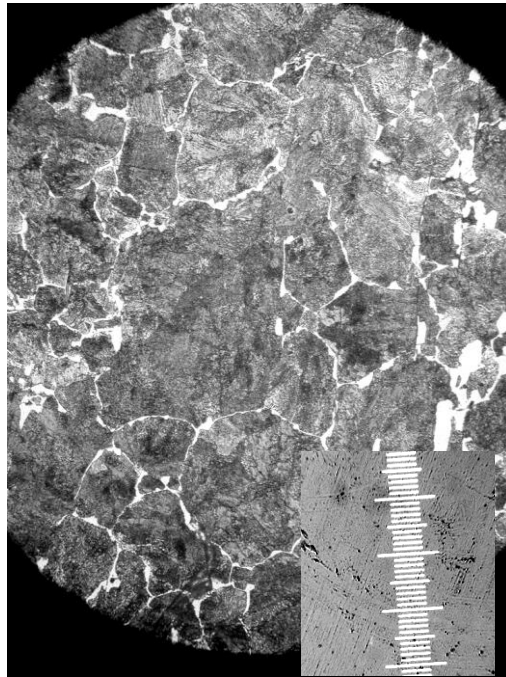


Рис. 5.15. Мікроструктура сталі 65Г, з якої виготовляють робочі органи ґрунтообробних машин

Енергія удару, яка призводить до руйнування робочих органів ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 65Г під час згину на 12...18% менша порівняно з робочими органами ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 28MnB5. Незважаючи на меншу величину енергії удару, яка потрібна для руйнування робочих органів ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 65Г, таке значення значно менше за енергію удару, яка може виникнути в процесі експлуатації робочих органів дискових ґрунтообробних машин.

Основною експлуатаційною та триботехнічною характеристикою матеріалів, які працюють в умовах абразивного зношування, є зносостійкість. Саме тому були проведені експлуатаційні дослідження процесу зношування

робочих органів ґрунтообробних машин, які проводили протягом 2015–2017 років у ТОВ «Аграрні системні технології» Попільнянського району Житомирської області та ТОВ ТОВ «ВП Полісся» Овруцького району Житомирської області на універсальних дискових агрегатах УДА-4,5 та тяжких дискових боронах БПД-4,2 за методикою представленою в роботі [50].

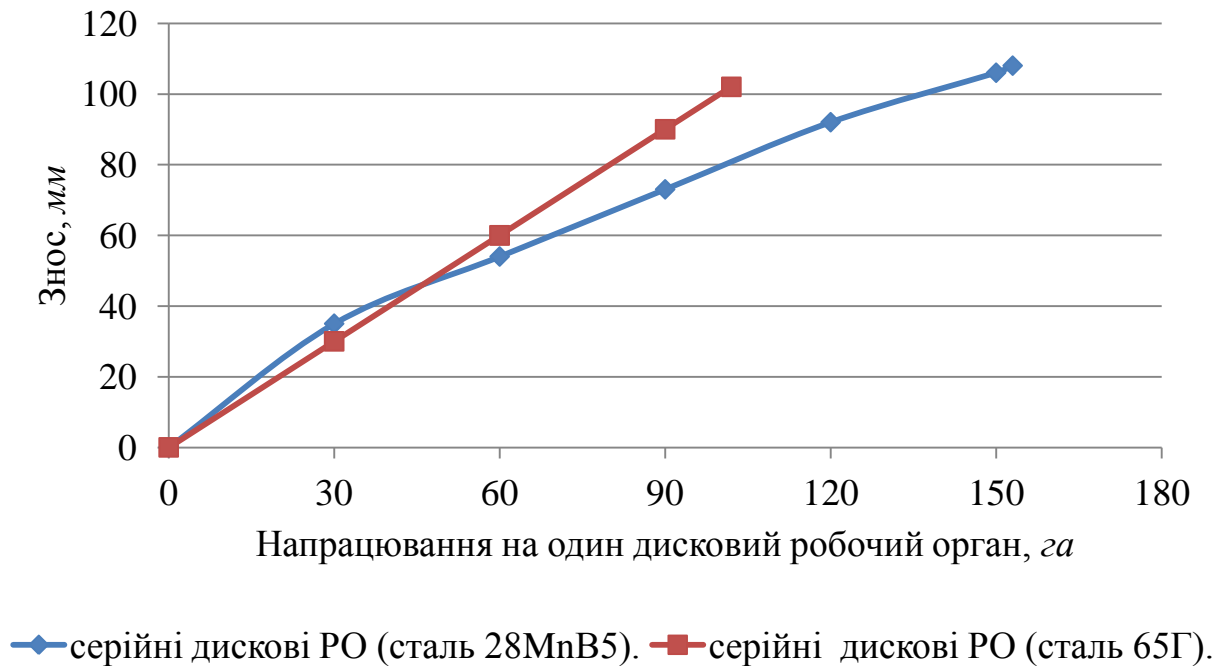


Рис. 5.15. Темп зношування дискових робочих органів ґрунтообробних машин у процесі експлуатації на суглинкових ґрунтах.

Як бачимо з представлених результатів, напрацювання до граничного стану в серійних дискових робочих органах виготовлених зі сталі 65Г, становить 103 га, а в робочих органах фірми «Bellota» – 154 га, тобто зносостійкість у «Bellota» вища в 1,5 рази (середня вартість таких дисків вища в 1,9...2,1 раза порівняно з дисками, виготовлених зі сталі 65Г). Такий ефект спостережено на суглинкових ґрунтах. Ефект підвищення зносостійкості в робочих органах фірми «Bellota» нівелюється порівняно в робочими органами, виготовленими зі сталі 65Г, під час використання їх на піщаних ґрунтах. Цей ефект пояснюється більш агресивними умовами експлуатації на піщаних ґрунтах і здатністю до «самонаклепування» поверхні робочих органів,

виготовлених зі сталі 65Г. На поверхні тертя робочих органів ґрунтообробних машин, експлуатованих в умовах піщаних ґрунтів, переважним механізмом зношування є мікрорізання (рис. 5.17), на відміну від робочих органів, які експлуатують в умовах суглинкових і глинистих ґрунтів, де переважний механізм – полідеформаційне руйнування.



Рис. 5.17. Поверхня тертя дискового робочого органу, який експлуатують на піщаних та супіщаних ґрунтах

Незважаючи на економічну доцільність використання робочих органів дискових ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 65Г, споживачі надають перевагу робочим органам, виготовленим зі сталі 28MnB5, це зі свого боку пов'язано з виникненням дефектів та відсутністю процесу самозагострювання (самоорганізації робочої кромки) у процесі експлуатації робочих органів виготовлених зі сталі 65Г (рис. 5.18).



Рис 5.18. Вигляд робочої кромки диска, виготовленого зі сталі 65Г, у процесі експлуатації на ґрунтах з наявністю твердих включень

Дефекти (зминання робочої кромки та вищерблювання) дискового робочого органу, виготовлених зі сталі 65Г виникають унаслідок взаємодії з твердими включеннями в ґрунті (камінням) (рис. 5.18). У результаті виникнення таких дефектів погіршується якість обробітку ґрунту та зростає тяговий опір машини загалом. Виникнення дефектів переважно пов'язане з неякісною термічною обробкою робочих органів під час їхнього виготовленні.

Як відзначено в роботі [50] диски, виготовлені зі сталі 28MnB5в процесі, експлуатації самозагострюються на відміну від дисків, виготовлених зі сталі 65Г.

Установлено, що підвищення зносостійкості та досягнення ефекту самозагострювання в дискових робочих органах фірми «Bellota» зумовлено використанням високоякісної сталі та складної термічної обробки, що дозволило досягнути якісних триботехнічних характеристик поверхні зношування.

Незважаючи на високу зносостійкість дискових робочих органів ґрунтообробних машин, навіть такий світовий лідер, як «Bellota», не враховує ґрунтово-кліматичних умов експлуатації в процесі проектування та виробництва робочих органів. Тому перспективним є визначення необхідних триботехнічних характеристик поверхонь тертя робочих органів ґрунтообробних машин для кожної ґрунтово-кліматичної зони, що дозволить виготовляти робочі органи підвищеної зносостійкості з урахуванням умов їх експлуатації.

5.4. Підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Вирішення такої складної проблеми, як підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, не може базуватися на використанні одного з методів (технологічного, конструктивного та

експлуатаційного), а повинно ґрунтуватися на системному підході з використанням усього спектру доступних методів.

У процесі реалізації системного підходу необхідно врахувати всі істотні чинники, які впливають на довговічність і зносостійкість робочих органів.

У роботі для досліджень використовувалися два типи робочих органів ґрунтообробних машин:

- а) дикові (вирізний та суцільний дисковий робочий орган);
- б) лемішно-лапові (стрілчата лапа та леміш).

5.4.1. Підвищення довговічності та зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин

Дискові ґрунтообробні машини набувають усе більшого поширення в агропромисловому комплексі України. Зі свого боку це пов'язано з необхідністю мінімізації впливу на ґрунт, оскільки це не тільки зменшує економічні затрати на вирощування сільськогосподарських культур, а й позитивно впливає на екологічну ситуацію (зменшується вплив на ґрунт рушіїв енергетичних засобів та зменшується ерозія ґрунтів).

Підвищення довговічності та зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин вивчали багато дослідників [42, 43, 44, 50, 79, 84, 87, 88, 180-19]. Переважна більшість праць присвячена технологічним методам підвищення зносостійкості для певних ґрунтово-кліматичних умов експлуатації.

У деяких роботах підкреслено, що геометрична форма нанесення зносостійкого покриття має вирішальне значення для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин [239, 276]. Для визначення впливу геометричної форми нанесення зносостійкого покриття на поверхню робочих органів дискових ґрунтообробних машин запропоновано різні технологічні варіанти (рис. 5.19). Нанесення зносостійкого покриття здійснювали на дискові робочі органи, виготовлені зі сталі 65Г.



Рис. 5.19. Варіанти нанесення зносостійкого покриття на дискові робочі органи

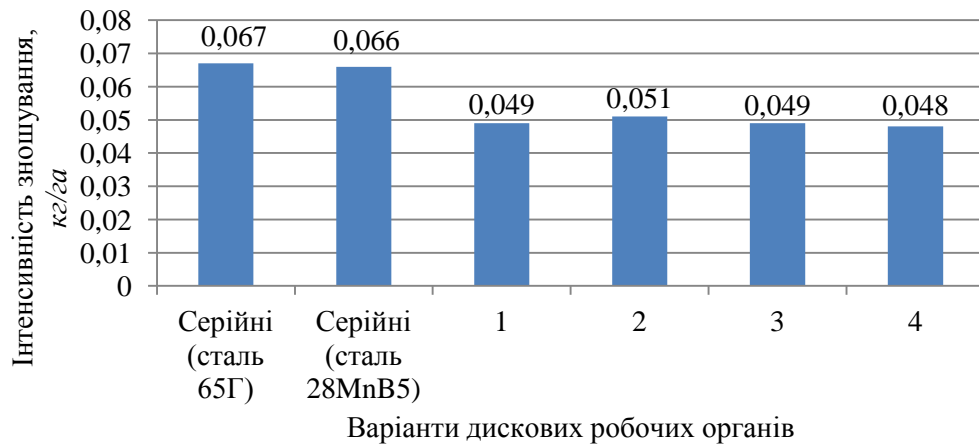
Доведено, що геометрична форма нанесення зносостійкого покриття на поверхню тертя не має вирішального значення для підвищення зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин на всіх типах ґрунтів. Відмінність полягає лише в межах статистичної похибки (до 3%) (рис. 5.20). Зразок 2 (рис. 5.20) зношується більш інтенсивно, оскільки об'єм нанесеного зносостійкого покриття значно менший за об'єм покриття нанесеного на інші зразки робочих органів ґрунтообробних машин.

Зміцнення робочих органів виконували трьома видами електродів Т-620, Т-590 та М-Fe 6, хімічний склад яких представлено в табл. 5.10.

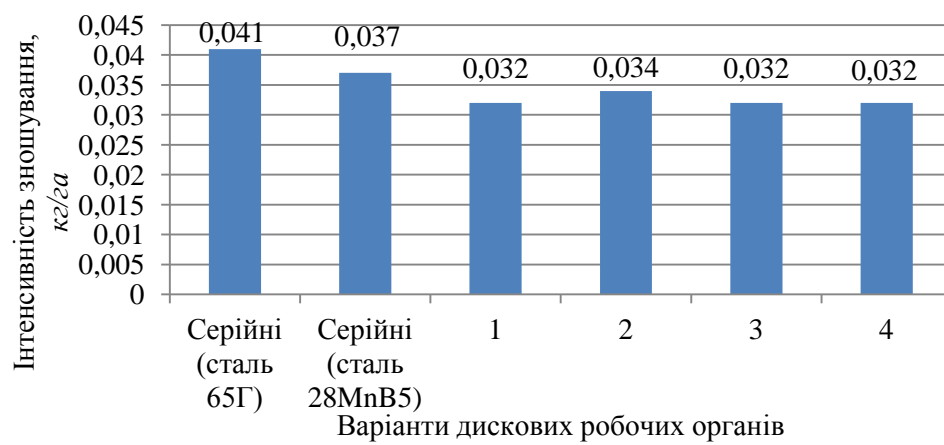
Таблиця 5.10

**Хімічний склад зносостійкого шару на поверхні робочих органів
ґрунтообробних машин**

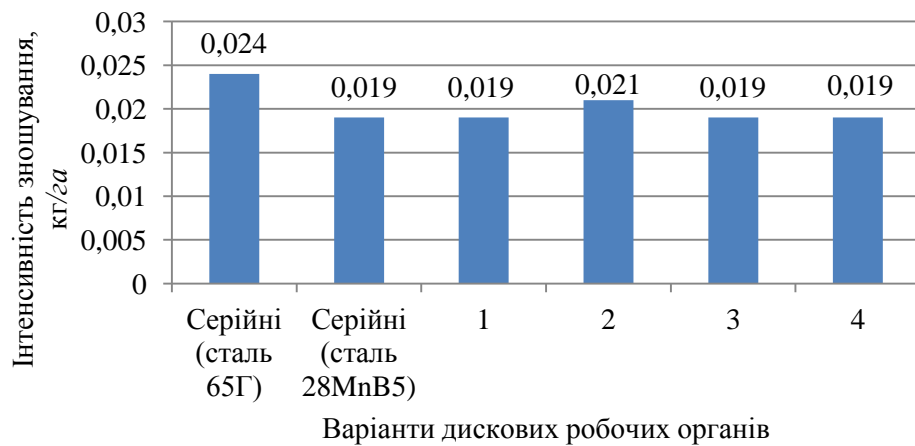
Хімічний елемент	Марка електрода		
	Т-620	Т-590	М-Fe 6
Mn	1...1,5	1...1,5	≤3,0
Si	2...2,5	2...2,5	-
C	2,9...3,5	2,9...3,5	≤2,5
P	≤0,04	≤0,04	≤0,04
S	≤0,035	≤0,035	≤0,04
Cr	22...24	22...27	≤10
Ti	0,5...1,5	-	-
B	0,5...1,5	0,5...1,5	-
Mo	-	-	≤3,0
Nb	-	-	≤10



а)



б)



в)

Рис. 5.20. Інтенсивність зношування серійних і зміцнених (електродом Т-590) дискових робочих органів ґрунтообробних машин у процесі обробітку агрегатом УДА-4,5 перших 500 га поля після збирання кукурудзи на силос (варіанти нанесення зносостійкого покриття 1, 2, 3, 4 представлені на рис. 1): а – супіщаний ґрунт; б – середній суглинок; в – глина легка [330]

Після спрацювання шару нанесеного зносостійкого покриття інтенсивність зношування стала рівною серійному робочому органів. Також помітна динаміка зменшення інтенсивності зношування при зменшенні діаметра диска. Це пояснюється зменшенням тиску на кромку робочого органу у зв'язку зі зменшенням глибини обробітку.

Нанесення зносостійкого покриття на поверхню дискових робочих органів більш суттєво підвищує зносостійкість на супіщаних і піщаних ґрунтах порівняно з суглинками та глинистими ґрунтам (табл. 5.11). Так само це зумовлено різними механізмами абразивного зношування поверхні: на піщаних і супіщаних ґрунтах переважає процес мікрорізання, а на інших типах ґрунтів – процес полідеформаційного руйнування поверхні металу.

Таблиця 5.11

Підвищення зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин, виготовлених зі сталі 65Г [330]

Ґрунт	Марка електрода		
	T-620	T-590	M-Fe 6
Супіщаний	1,35...1,42	1,31...1,39	1,32...1,39
Середній суглинок	1,24...1,35	1,20...1,28	1,19...1,25
Глина легка	1,16...1,21	1,14...1,26	1,13...1,21

Найкраще для підвищення зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин зарекомендували себе електроди T-620 (табл. 5.11), оскільки вони призначені для наплавлення деталей, які працюють в умовах абразивного зношування з помірними ударними навантаженнями. Найменшу зносостійкість мали робочі органи ґрунтообробних машин, зміцнені електродом M-Fe 6.

Слід підкреслити, що використання дискових робочих органів, виготовлених з дорогої борвмісної сталі 28MnB5, дає суттєвий ефект

підвищення зносостійкості тільки на глиняних і суглинкових ґрунтах. Під час експлуатації дискових ґрунтообробних машин на супіщаних і піщаних ґрунтах використання робочих органів, виготовлених зі сталі 28MnB5, не дає позитивного ефекту.

Суттєвий вплив на підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин здійснює площа та об'єм нанесеного зносостійкого покриття (рис. 5.21).

Необхідно наголосити, що в результаті зміцнення (один шар зносостійкого покриття) довговічність дискових робочих органів підвищується на супіщаних ґрунтах у 1,28...1,41 рази, на суглинках у 1,11...1,24 рази та глинистих ґрунтах у 1,07...1,18 рази.

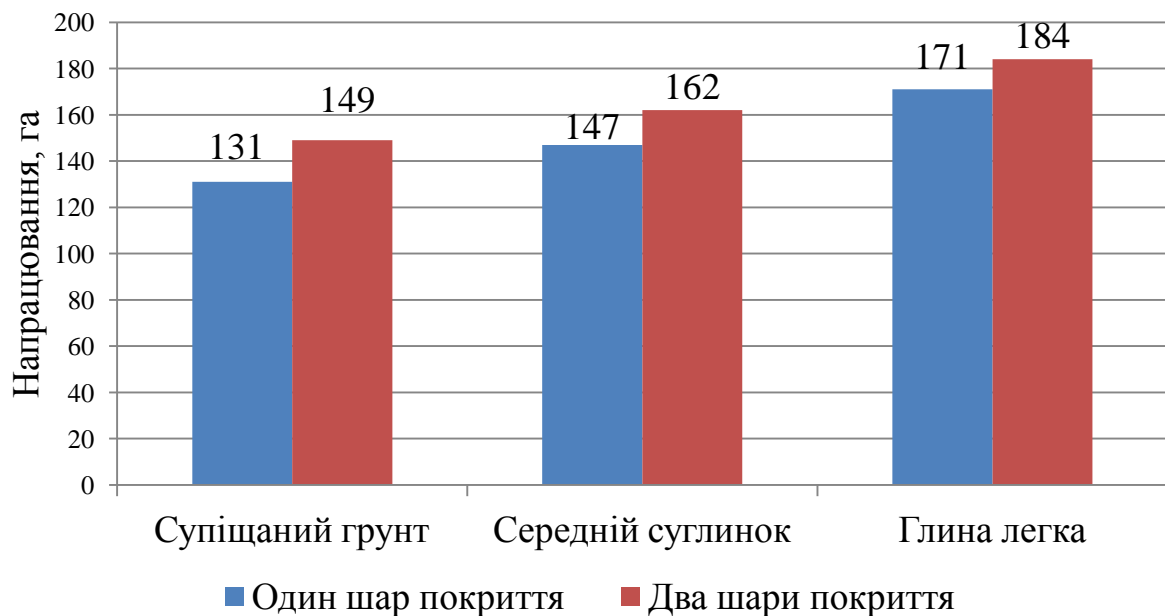


Рис. 5.21. Напрацювання робочих органів агрегату УДА-4,5 до граничного стану (схема нанесення покриття № 4, зміцнення електродом Т-590)

У наслідок нанесення другого шару зносостійкого покриття довговічність робочих органів ґрунтообробних машин підвищується:

- на 13,1 % під час експлуатації на супіщаному ґрунті;
- на 9,3 % під час експлуатації на середньому суглинку;
- на 7,1% під час експлуатації на легкій глині.

Як відомо, у процесі експлуатації дискових робочих органів можливе виникнення двох граничних станів:

- затуплення леза;
- зменшення зовнішнього діаметра.

У першому випадку робочі органи загострюють і продовжують експлуатувати, а в другому – вибраковують. Наявність першого граничного стану призводить до простою техніки та зростання затрат на обслуговування агрегату. Для уникнення виникнення першого граничного стану необхідно правильно вибрати сторону й кут загострення. У результаті проведених досліджень розроблені рекомендації із загострення дискових робочих органів (табл. 5.12).

Таблиця 5.12

**Необхідні геометричні параметри робочих органів дискових
грунтообробних машин для забезпечення їх підвищеної довговічності**

Грунт		Радіус кривини диска, R	Кут загострення
Глина	Важка	$R = (D/2) \sin \alpha$	Зовнішній $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$
	Середня		
	Легка		
Суглинок	Важкий		Зовнішній $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$
	Середній		
	Легкий		
Супіщаний та піщаний	Важкий		При зміцненні загострення внутрішнє $28^{\circ} \dots 34^{\circ}$ Зовнішній $10^{\circ} \dots 20^{\circ}$
	Супіщаний		
	Пісок зв'язаний		
Пісок вільний			

Збільшення вологості ґрунту здебільшого, призводить до зростання його зношувальної здатності. Таке явище триває до досягнення критичного стану, коли на поверхні робочих органів буде виділятися вільна вода. Після цього інтенсивність зношування поверхні суттєво зменшується, оскільки ґрунтова вода буде виступати в ролі змащувальної рідини. Проводити обробіток ґрунту в цьому стані неможливо через невиконання агротехнічних вимог. Для всіх типів ґрунтів визначено оптимальну вологість при, за якої найменша інтенсивність зношування поверхонь робочих органів ґрунтообробних машин (табл. 5.13).

Таблиця 5.13

Вологість ґрунту, яка забезпечує найменшу інтенсивність зношування

Ґрунт		Вологість, %
Глина	Важка	13...17
	Середня	
	Легка	
Суглинок	Важкий	
	Середній	
	Легкий	
Супіщаний та піщаний	Важкий	10...11
	Супіщаний	9...10
	Пісок зв'язаний	
Пісок вільний		7...8

Зростання швидкості переміщення робочих органів ґрунтообробних машин щодо ґрунту призводить до зростання інтенсивності зношування. Для забезпечення підвищеної зносостійкості необхідно, щоб швидкість агрегату була мінімальною. У реальних умовах експлуатації ґрунтообробних машин це неможливо, оскільки може призвести до недотримання агротехнічних вимог до технологічної операції, а також зменшення швидкості призведе до зменшення

продуктивності агрегату та ускладнить виконання операції в жорсткі агротехнічні строки.

Після збирання сільськогосподарських культур на поверхні ґрунту залишаються поживні рештки, які взаємодіючи з робочими органами ґрунтообробних машин, можуть виділяти соки, що будуть інтенсифікувати процес абразивного зношування. Обробіток ґрунту необхідно проводити за найменшої вологості поживних решток сільськогосподарських культур.

Зношування дискових робочих органів ґрунтообробних машин має складний характер (різний механізм і характер абразивного зношування на поверхні робочих органів, протікання супутніх процесів зношування та можливість переходу на ударно-абразивне зношування поверхні). Проблема підвищення зносостійкості й довговічності робочих органів ґрунтообробних машин, що взаємодіють із ґрунтовим середовищем, не може бути вирішена тільки використанням технологічних методів підвищення зносостійкості та довговічності. Для досягнення поставленої мети необхідно застосувати комплексний підхід, який буде містити розробку технологічних, конструктивних методів підвищення зносостійкості й довговічності з врахуванням ґрунтово-кліматичних умов та впровадження науково обґрунтованих методів експлуатації ґрунтообробних машин.

5.4.2. Підвищення довговічності та зносостійкості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин

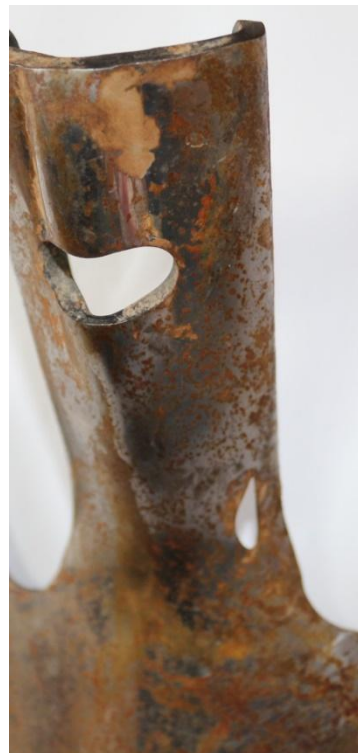
5.4.2.1. Підвищення довговічності та зносостійкості стрілчастих лап

Багатофункціональні можливості стрілчастих лап призвели до створення великої кількості їх конструкцій, що відрізняються специфікою зношування [331]. Процес зношування культиваторних лап характеризується високою інтенсивністю через безпосередній контакт зі складною абразивною масою – ґрунтом.

Основна причина втрати працездатного стану стрілчастих лап – це знос носка та крил по ширині (рис. 5.22, а). Також можливі й інші вибракувані показники (обламування крил, знос кріпильної частини (рис. 5.22, б), тріщини та ін.). Незважаючи на те, що стрілчасті лапи це симетричні робочі органи, можливий нерівномірний знос крил (рис. 5.22, а), зумовлений неправильним регулюванням агрегату.



а



б

Рис. 5.22. Причини втрати працездатного стану стрілчастих лап: а – знос носка та крил по ширині (на прикладі нової та зношеної лапи); б – знос кріпильної частини

У процесі експлуатації культиваторних лап знос поверхні має неоднорідний характер. Носок лапи відчуває найбільше навантаження, відповідно й інтенсивність зношування носка буде вищою за інтенсивність зношування інших частин стрілчастої лапи. Під час виготовлення культиваторних лап зі сталі 65Г, 70Г, 40ХС з однаковими фізико-механічними властивостями матеріалу по всьому робочому органу вибракування лапи

відбувається через передчасний знос носка. У результаті зношування носка зменшується його товщина, а також знижується міцність, що призводить до вигину й обламування кінчика (рис. 5.23).



Рис. 5.23. Носок культиваторною лапи після вигину й обламування

В роботі С. А. Фесько встановлено, що досягнення граничного стану стрілочастих лап, виготовлених із високоякісних зносостійких сталей, на 97% визначається зношуванням і на 3% припадають вигини, скручування, тріщини та злами [332]. Друга закономірність розподілу граничного стану характерна для лап, вироблених зі сталей 65Г, 70Г, 40ХС: 60%: на 60% визначається зношуванням і на 40% припадають вигини, скручування, тріщини та злами [333].

Як відомо, підвищити довговічність і зносостійкість деталей машин можливо трьома групами методів: конструктивними, технологічними й експлуатаційними. У результаті узагальнення інформації з проблеми підвищення довговічності стрілочастих лап зроблено висновки, що понад 90% досліджень присвячено технологічним методам підвищення довговічності стрілочастих лап культиваторів [219, 230, 331–333], близько 8% – конструктивним [332] і приблизно 2% – експлуатаційним. Праці присвячені конструктивним методам, розглядають їх у комплексі з технологічними методами.

Аналіз досліджень підвищення довговічності та зносостійкості показав, що всі вони спрямовані на вирішення певного локального завдання й не розглядають системно питання підвищення довговічності. Проблему підвищення довговічності стрілочастих лап культиваторів необхідно вирішувати

комплексним шляхом з розробкою технологічних і конструктивних методів, які будуть базуватися на ґрунтово-кліматичних умовах експлуатації, а також із застосуванням науково обґрунтованих методів експлуатації. Для впровадження комплексного підходу необхідно вивчити вплив на довговічність стрілчастих лап культиваторів усіх значущих чинників (матеріал і спосіб зміцнення лапи, тип і стан ґрунту, а також режимів експлуатації).

Дослідження особливостей зношування та довговічності стрілчастих лап проводили на трьох типах ґрунтів протягом 2015–2018р. Для цього використовували культиватор «John Deere 2210» з плавальною зчіпкою (рис. 5.24).



Рис. 5.24. Культиватор «John Deere 2210», який використано для досліджень

Робочі органи культиватора виготовляли з зносостійкої борвмісної сталі 28MnB5 і сталі 65Г із різними варіантами зміцнення (табл. 5.14). була обрана Для дослідження обрано сталь 28MnB5 (аналог 27MnB5), оскільки саме її використовують світові лідери сільськогосподарського машинобудування для виробництва стрілчастих лап і вона має підвищену стійкість до абразивного зношування [93].

Стрілчасті лати, виготовлені зі сталі 28MnB5, експлуатували без зміни фізико-механічних властивостей, які надані їм заводами-виробниками. Робочі органи культиватора, виготовлені зі сталі 65Г, піддавалися об'ємному загартуванню при температурі 810...830 °С і середньому відпустку з дуже

точної витримкою при температурі 460...480 °С. Зносостійкий шар наносили на лицьовий бік, його ширина на носку була у 2,5...3 рази ширшою, ніж на крилах стрілкової лапи. Нанесення проводили ручним дуговим зварювання в умовах ремонтних баз сільськогосподарських підприємств відповідно до схеми, представленої на рис 3.28.

Таблиця 5.14

Робочі органи, які використовувалися під час дослідження

Ґрунтообробна машина	Тип ґрунту	Робочий орган	Матеріал робочих органів + зносостійке покриття
Культиватор «John Deere 2210»	Супіщаний ґрунт	15/5000 стрілчаста лапа	28MnB5
			65Г
	Середній суглинок		65Г+Т-620
			65Г+Т-590
	Легка глина		65Г+М-Fe 6

Оскільки в процесі зношування в ґрунті робочі органи змінюють свої розміри по довжині й ширині, для об'єктивної оцінки зносостійкості стрілочастих лап визначали інтенсивність масового зносу при напрацюванні 10 га на одну лапу.

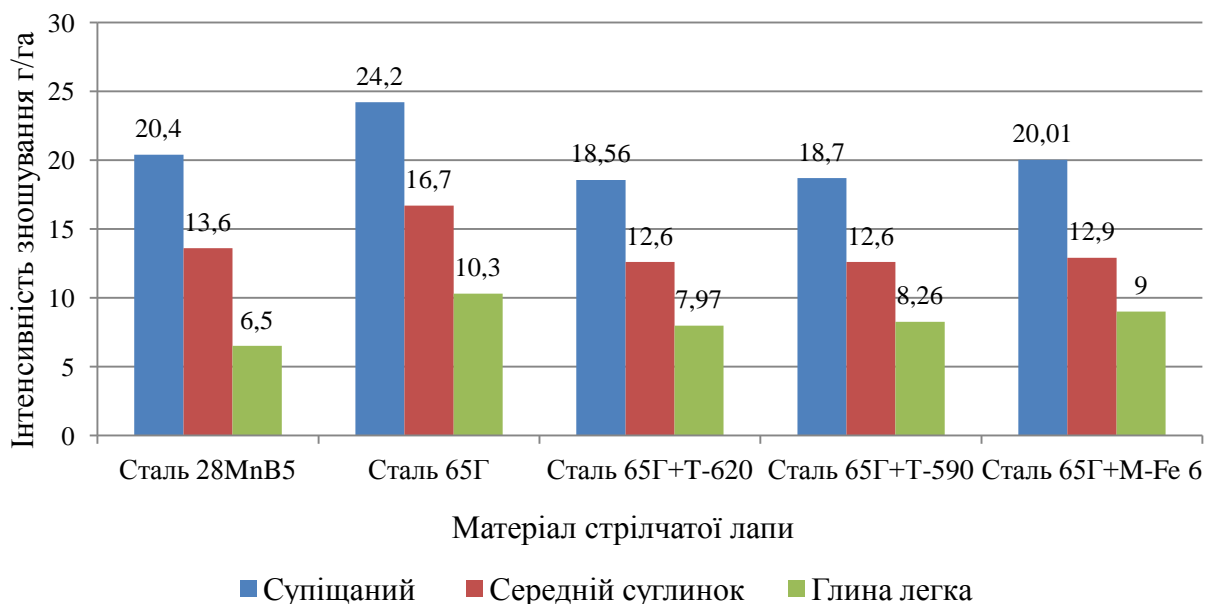


Рис. 5.25. Інтенсивність зношування стрілочастих лап культиватора «John Deere 2210» (напрацювання на одну лапу 10 га)

Зносостійкість стрілчастих лап культиваторів, виготовлених зі сталі 28MnB5, вища ніж зносостійкість стрілчастих лап, виготовлених зі сталі 65Г, на 18% у процесі експлуатації в умовах супіщаних ґрунтів, на 23% – в умовах суглинкових ґрунтів і на 57% – в умовах легкої глини. Нанесені захисні покриття істотно підвищують зносостійкість культиваторних лап, зокрема у результаті нанесення шару електродом Т-620 зносостійкість підвищується на 29...32%, електродом Т-590 – на 25...32% і М-Fe 6 – на 15...29%. Унаслідок зносу зносостійкого покриття інтенсивність зношування була рівною інтенсивності зношування серійної стрілчастої лапи.

Слід також зазначити, що інтенсивність зношування стрілчастих лап у першому ряду на 14,5...21,2% більша за інтенсивність зношування лап у другому ряду. Це пов'язано із зменшенням ступеня закріплення абразивних частинок у результаті часткового розпушення шару ґрунту. Збільшення інтенсивності зношування на 24,2...38,4% спостерігалось в стрілчастих лапах, які працюють по слідах мобільного енергетичного засобу й сільськогосподарської машини. Усе це необхідно враховувати, установлюючи стрілчасті лапи на культиватор, для забезпечення рівнотійкості агрегату.

Збільшення швидкості руху ґрунтообробного агрегату призводить до збільшення інтенсивності зношування [81]. Для виявлення закономірності вплив швидкості руху ґрунтообробного агрегату на інтенсивність процесу абразивного зношування були проведені дослідження зносу стрілчастих лап на різних швидкостях руху агрегату: 8 км/год, 10 км/год і 13 км/год (кордони проведення досліджень регламентуються технічними характеристиками культиватора «John Deere 2210»). Дослідження проводили на супіщаних ґрунтах, напруцювання на одну лапу становило 10 га. У результаті було констатовано відсутність впливу зміни швидкості руху агрегату на інтенсивність зношування. Відсутність впливу зумовлена незначним збільшенням швидкості руху агрегату. Зокрема, у праці М. М. Северньова встановлено, що зі збільшенням швидкості руху в 4,7 рази знос на супіщаних ґрунтах зростає тільки в 1,118 рази [81].

Унаслідок проведених випробувань встановлено, що обламування крил та інші механічні пошкодження траплялися лише в процесі експлуатації на супіщаних ґрунтах у всіх експериментальних зразках, крім стрілчастих лап виготовлених зі сталі 28MnB5. Механічні пошкодження пов'язані з великою кількістю кам'янистих включень у ґрунті. Пошкоджені стрілчасті лапи не враховували під час розрахунку їх довговічності (рис. 5.26).

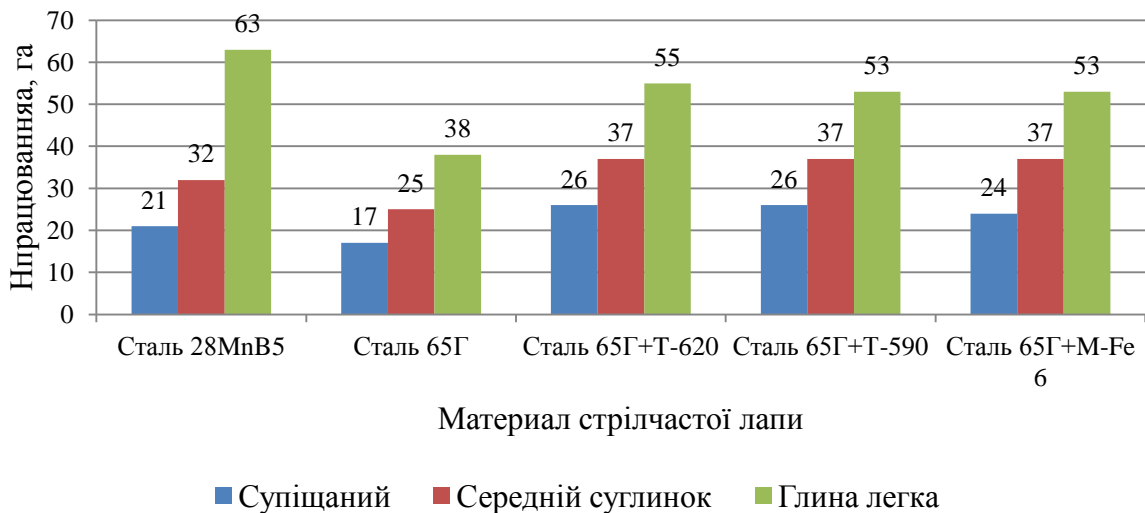


Рис. 5.26. Довговічність стрілчастих лап [334]

Використання стрілчастої лапи з високоякісної борвмісної сталі 28MnB5 дозволило підвищити її довговічність, щодо стрілчастої лапи зі сталі 65Г у процесі експлуатації на супіщаних ґрунтах на 24%, середньому суглинку – на 28% і легкій глині – на 66%.

Слід зазначити, що довговічність культиваторних лап зі сталі 28MnB5 вища, ніж довговічність зміцнених культиваторних лап у процесі експлуатації на глинистих ґрунтах. Під час експлуатації культиваторних лап на супіщаних і середньосуглинкових ґрунтах зміцнені лапи мають вищу довговічність порівняно з лапами, виготовленими зі сталі 28MnB5.

У деяких дослідження зауважено, що нанесення шару на зворотній бік сприяє самозагострюванню і підвищує ресурс стрілчастої лапи на 18%, порівнюючи з нанесенням зносостійкого шару на лицьовий бік [234]. У результаті випробувань встановлено, що довговічність культиваторних лап із

нанесеним зносостійким шаром зі зворотного боку вища за довговічність культиваторних лап із зносостійким шаром з лицьового боку, лише в процесі експлуатації на глинистих ґрунтах. Величина збільшення перебувала в межах статистичної похибки й становила 2,8%. Експлуатуючи такі лапи на супіщаних і суглинкових ґрунтах, у результаті швидкого зносу матеріалу основи спостерігали виступ зміцненого шару, який під час взаємодії з твердими елементами ґрунту обламувався. Довговічність таких лап виявилася в 1,6...1,9 разів меншою за довговічність серійних лап.

Співвідношення геометричних показників нанесеного зносостійкого шару на носок і крила стрілкової лапи має ґрунтуватися на співвідношеннях інтенсивності зношування цих частин. Співвідношення інтенсивності зношування носка та крил стрілкової лапи визначали на серійній лопі, виготовленій зі сталі 65Г (табл. 5.16).

Таблиця 5.16

Співвідношення інтенсивності зношування носка та крил культиваторних лап (напрацювання на одну лопу – 10 га, поле після ріпаку)

Місце проведення замірів	Інтенсивність зношування мм/га		
	Супіщаний	Середній суглинок	Глина легка
Носок	0,85	0,57	0,37
Крила	0,68	0,23	0,15
Співвідношення між інтенсивністю зношування носка і крил стрілкової лапи			
Носок/крила	1,25	2,48	2,46

Результати табл. 5.16 дозволяють визначити схему нанесення зносостійких покриттів на стрілкові лапи з огляду на ґрунтові умови їх експлуатації. У процесі експлуатації культиваторних лап на глинистих і середньосуглинкових ґрунтах необхідно, щоб зносостійкий шар був у 2,5 разів ширшим і товщим за шар, який нанесений на крила лап. На супіщаних ґрунтах геометричні розміри зносостійкого шару на носку та крилах повинні мати співвідношення 1,25/1. Досягнення таких співвідношень може бути реалізовано, не тільки нанесенням зносостійких покриттів, а й установленням знімного наконечника на носок стрілкової лапи.

Ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті суттєво впливає на співвідношення інтенсивності зношування носка й крил стрілочастих лап. Дослідження впливу ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті на інтенсивність зношування носка та крил проводили на супіщаних ґрунтах за різного ступеня закріплення абразивних частинок: ділянка після збирання озимої пшениці; ділянка після збирання озимої пшениці та оранки (на наступний день після оранки); ділянка після збирання озимої пшениці та оранки (на 48 день після оранки).

Результати досліджень представлено в табл. 5.17.

Таблиця 5.17

Співвідношення інтенсивності зносу носка та крил стрілою лапи в умовах піщаного ґрунту за різного ступеня закріплення абразивних частинок

Умови проведення досліджень	Співвідношення між інтенсивністю зношування носка й леза
Ділянка після збирання озимої пшениці	1,28
Ділянка після збирання озимої пшениці та оранки (на наступний день після оранки)	1,08
Ділянка після збирання озимої пшениці та оранки (на 48 день після оранки)	1,21

При використанні культиваторів тільки для передпосівного обробітку (після оранки) інтенсивність зношування носка і крил буде відрізнятися тільки на 8%, що необхідно враховувати при зміцненні стрілочастих лап.

У процесі експлуатації для якісного виконання операції культивації важливо, щоб стрілочаста лапа самозагострювалася. Співвідношення товщини зносостійкого покриття й основного металу можна визначити, використовуючи вище представлені результати й методику, розроблену А. Ш. Рабіновичем [178, 179].

5.4.2.2. Підвищення довговічності та зносостійкості лемешів плугів

Дослідження особливостей зношування й запропонованих способів підвищення довговічності та зносостійкості лемешів проводили на трьох типах ґрунтів протягом 2015–2018 років у сільськогосподарських підприємствах Житомирської та Вінницької областей. Ґрунтообробні машини та робочі органи, які використовувалися у процесі дослідження, представлені в табл. 5.18.

Таблиця 5.18

Робочі органи плугів, які використовувалися у процесі дослідження

Ґрунтообробна машина	Тип ґрунту	Робочий орган	Матеріал робочого органу + нанесений зносостійкий матеріал
ПЛН-3-35	1. Супіщаний 2. Середній суглинок 3. Глина легка	Леміш	65Г
			65Г+Т-620
			65Г+Т-590
			65Г+М-Fe 6
			Hardox 500
			Л53
Плуг «Kverneland»		Леміш (зі змінним долотом)	65Г
			Hardox 500
Плуг «Diamant 11» виробник «Lemken»		Леміш (зі змінним долотом)	65Г
			Hardox 500

Дослідженню підлягали серійні лемеші, виготовлені зі сталі Л53 і Hardox 500, випробування проводили без зміни фізико-механічних властивостей, які надані їм заводами-виробниками. Лемеші, виготовлені зі сталі 65Г, піддавалися об'ємному загартуванню при температурі 810...830 °С і середньому відпуску з дуже точною витримкою при температурі 460...480 °С.

*a**б*

Рис. 5.27. Загальний вигляд плугів, які використовували під час досліджень: *a* – плуг «Diamant 11» фірми «Lemken»; *б* – плуг «Kverneland»

Схема нанесення зносостійкого покриття для лемешів, у процесі експлуатації на різних типах ґрунтів повинна суттєво відрізнятися ґрунтуючись на співвідношенні зносостійкості лезової і носової частин леміша (рис. 5.28, *a*), на відміну від серійних де зміцнення виконують по всій довжині з однаковою товщиною (рис. 5.28, *б*). У попередніх дослідженнях встановлено, що зміцнення серійних лемішів призводить до швидкого зношування носка і втрати здатності заглиблюватися в ґрунт, у зв'язку з чим він замінюється з невикористаною лезовою частиною [318].

*a**б*

Рис. 5.28. Леміші до плуга ПЛН-3-35: *a* – дослідний леміш для супіщаних ґрунтів; *б* – серійний

Результати досліджень зносостійкості серійних і зміцнених лемішів представлено на рис. 5.29.

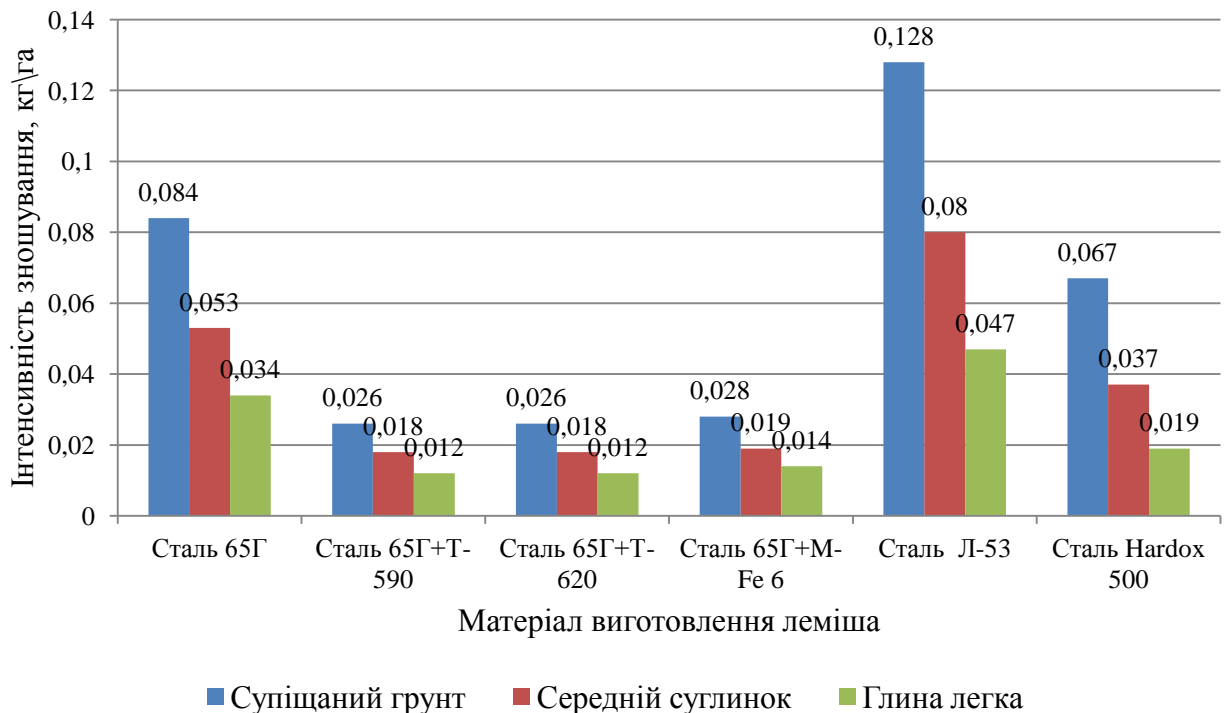


Рис. 5.29. Зносостійкість лемішів плуга ПЛН-3,35 (напрацювання 4 га на один робочий орган) [335].

Виявлено, що використання сталі Hardox 500 для виготовлення лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин більш ефективно в процесі експлуатації на глиняних ґрунтах. Зносостійкість лемішів, виготовлених з такої сталі, вища за зносостійкість лемешів виготовлених зі сталі 65Г, на 26% під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту, на 43% – в умовах суглинкового ґрунту та на 82 % – в умовах легкої глини (рис. 5.29).

Високу ефективність в оранці супіщаних і суглинкових ґрунтів мають леміші зі зносостійким покриттям нанесеним ручним дуговим наплавленням електродами Т-620 та Т-590 (табл. 5.19).

Незважаючи на таке суттєве підвищення зносостійкості лемешів, зміцнених дуговим наплавленням на початкових етапах експлуатації, довговічність їх підвищується не так суттєво (рис. 5.30). Насамперед це пов'язано з інтенсифікацією абразивного зношування поверхні робочих органів після стирання зносостійкого покриття.

Підвищення зносостійкості лемешів виготовлених зі сталі 65Г (плуг ПЛН-3-35, напрацювання на один леміш 4 га)

Ґрунт	Марка електроду		
	T-620	T-590	M-Fe 6
Супіщаний	3,20...3,33	3,21...3,32	2,95...3,07
Середній суглинок	2,85...2,87	2,84...2,85	2,64...2,71
Глина легка	2,77...2,82	2,78...2,83	2,41...2,50

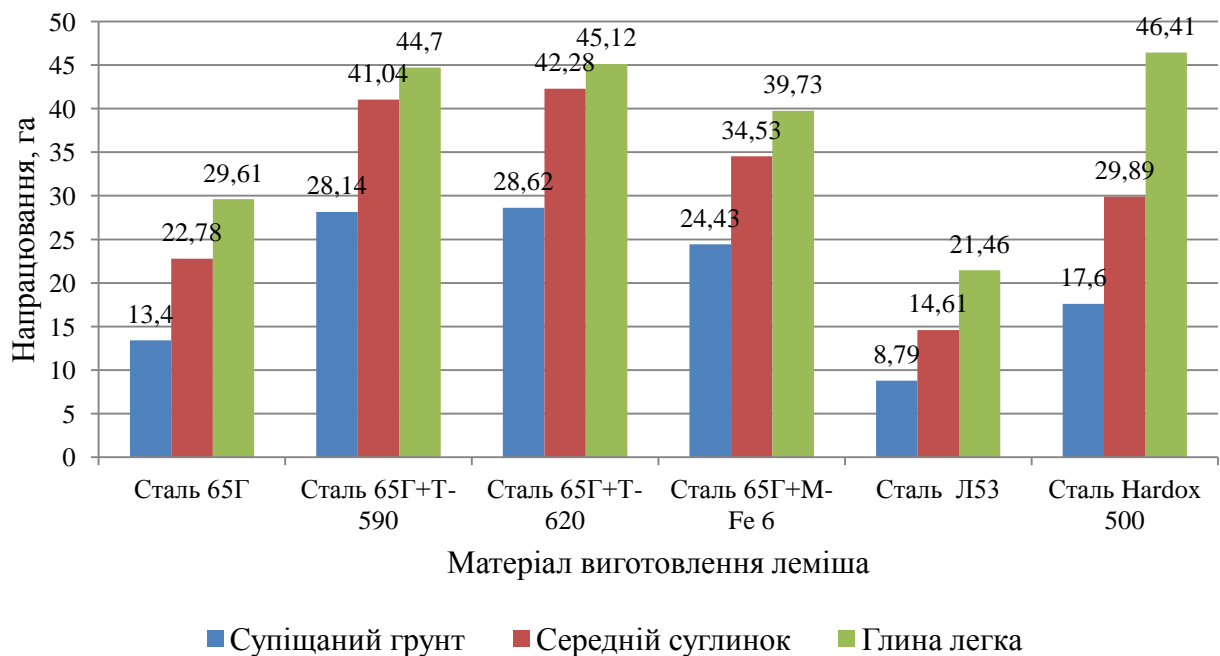


Рис. 5.30. Середня довговічність лемешів плуга ПЛН-3,35 [333]

Використання серійних лемешів виготовлених зі сталі Hardox 500, дозволяє підвищити довговічність, порівнюючи з серійними лемешами зі сталі 65Г в 1,31...1,49 раза, та у 2...2,14 в порівнянні з лемешами зі сталі Л53. Більш суттєве підвищення довговічності лемешів зі сталі Hardox 500 зачвідчене в процесі експлуатації на легкій глині, порівнюючи з експлуатацією їх на супіщаних і суглинкових ґрунтах. Слід зауважити, що довговічність лемешів,

виготовлених зі сталі Hardox 500, вища за довговічність зміцнених лемешів під час роботи на глиняних ґрунтах, а на піщаних і супіщаних навпаки. Зі свого боку це зумовлено різним співвідношенням інтенсивності зношування носка та леза лемеша в процесі експлуатації на різних типах ґрунтів (табл. 5.20).

Таблиця 5.20

Співвідношення інтенсивності зношування лезової і носової частин для різних типів ґрунтів (леміш серійний, сталь Л53, напрацювання на один леміш – 4 га, поля після збирання кукурудзи на силос)

Місце проведення замірів	Інтенсивність зношування, мм/га		
	Супіщаний ґрунт	Середній суглинок	Глина легка
Носок (довжина носка)	8,42	7,31	4,27
Лезо (ширина леза)	5,38	3,12	1,78
Співвідношення між інтенсивністю зношування носка та леза лемеша	1,56	2,3	2,39

Дані табл. 5.20 дозволяють визначити схему нанесення зносостійкого покриття для лемешів, ураховуючи ґрунтово-кліматичні умови їх експлуатації. У процесі експлуатації лемешів в умовах суглинків та глинистих ґрунтів нанесення зносостійкого покриття тільки на носок лемеша дозволить суттєво підвищити його довговічність. На піщаних ґрунтах виявлено, що необхідно зміцнювати носок і лезо одночасно (рис. 5.28, а).

Результати теоретичних досліджень підтверджують, що ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті може суттєво впливати на співвідношення інтенсивності зношування лезової і носової частин лемеша. Для підтвердження або спростування такого твердження були проведені дослідження на супіщаному ґрунті при трьох різних ступенях закріплення абразивних частинок:

- 1) ділянка після озимої пшениці;
- 2) ділянка після озимої пшениці, повторна оранка на 7 день після першого обробітку;

3) ділянка після озимої пшениці, повторна оранка на 74 день після першого обробітку.

Результати досліджень подано в табл. 5.21.

Таблиця 5.21

Співвідношення інтенсивності зношування лезової і носової частин в умовах піщаного ґрунту при різних ступенях закріплення абразивних частинок (глибина обробітку в усіх випадках – 220 мм)

Умови проведення досліджень	Співвідношення між інтенсивністю зношування носка та леза
Ділянка після озимої пшениці	1,49
Ділянка після озимої пшениці, повторна оранка на 7 день після першого обробітку	0,68
Ділянка після озимої пшениці, повторна оранка на 74 день після першого обробітку	0,89

Зміна співвідношення інтенсивності зношування лезової і носової частин лемешів пов'язана з тим, що лезо буде взаємодіяти з «плужною підшвою» в усіх варіантах обробітку й ступінь закріплення абразивних частинок не буде змінюватися, на відміну від абразивних частинок, з якими взаємодіє носок лемеша. Зростання інтенсивності зношування лезової частини лемеша спостерігали на всіх типах ґрунтів. Під час обробітку пухких ґрунтів усіх типів для підвищення довговічності передусім треба зміцнювати лезову частину.

Співвідношення товщини зносостійкого й несучого шару повинно забезпечувати умови самозагострювання без можливості виступу твердого шару. Виступ твердого шару призведе до його обломлювання. Розрахунок товщини зносостійкого шару необхідно проводити за методикою запропонованою в роботі [179].

Використання лемешів зі змінним долотом дозволяє суттєво підвищити їхню довговічність завдяки заміні долота в процесі експлуатації. За період експлуатації таких лемешів може відбуватися від 2 до 4 заміни долота, оскільки швидкість зношування носової частини лемеша суттєво перевищує інтенсивність зношування леза. Крім того, слід зауважити, що під час

механічному пошкодженню носової частини замінюється також тільки долото. Застосування лемішів зі змінним долотом дозволяє підвищити довговічність самого лемеша у 2,3...4,4 рази. Особливістю є те, що долото «захищає» носову частину лемеша від зношування не тільки по довжині, а й по ширині носка (рис. 5.31).

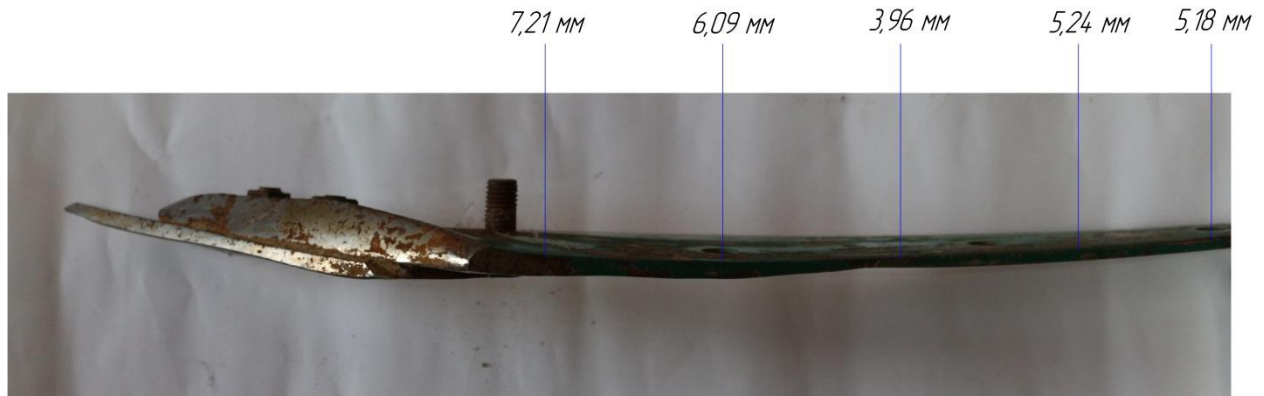


Рис. 5.31 Зміна товщини лемеша зі змінним долотом у процесі експлуатації на супіщаних ґрунтах (леміш відпрацював свій ресурс)

У лемешів зі змінним долотом зміна товщини має хвилеподібний характер, пов'язаний з утворенням долотом хвилі абразивних частинок унаслідок руйнування ґрунту.

У процесі експлуатації лемішно-лапових робочих органів на відміну від дискових, не виявлено інтенсифікації процесу абразивного зношування за наявності рослинних решток на поверхні ґрунту. Проведені дослідження показали, що різниця в інтенсивності зношування лемешів і стрілчастих культиваторних лап за наявності і відсутності рослинних решток знаходиться в межах статистичної похибки ($\pm 3\%$).

Зростання швидкості руху ґрунтообробного агрегату призводить до зростання інтенсивності зношування робочих органів. Для забезпечення підвищеної зносостійкості необхідно, щоб швидкість агрегату була якомога меншою. У реальних умовах експлуатації ґрунтообробних машин це неможливо, оскільки зі зменшенням швидкості зменшується продуктивність

агрегату, що може призвести до невиконання якісної операції в жорсткі агротехнічні строки.

Проведені дослідження особливостей зношування та експлуатаційних випробовувань лемішно-лапових робочих органів дозволяють зробити такі висновки:

- характер і механізм абразивного зношування залежить від типу ґрунту, його агрегатного стану та режимів експлуатації;
- нанесення зносостійкого покриття призводить до підвищення зносостійкості на всіх типах ґрунтів, але найбільшою мірою це проявляється на ґрунтах, які мають більшу зношувальну здатність;
- на піщаних та супіщаних ґрунтах для підвищення довговічності необхідно використовувати лемішно-лапові робочі органи з нанесеним зносостійким покриттям, а на глинистих – виготовлені з високоякісних зносостійких сталей;
- наявність рослинних решток на поверхні ґрунту не призводить до суттєвої зміни інтенсивності абразивного зношування лемішно-лапових робочих органів (на відміну від дискових);
- співвідношення геометричних параметрів зносостійкого покриття повинно базуватися на умовах і режимах експлуатації лемішно-лапових робочих органів;
- підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин повинно ґрунтуватися на комплексному підході з використанням спектру технологічних і конструктивних методів з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та впровадження науково обґрунтованих методів експлуатації.

Висновки по розділу 5

1. Виявлено, що на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин у процесі взаємодії з ґрунтом відбувається утворення вторинних структур,

властивості яких у процесі експлуатації визначаються режимами та умовами експлуатації, а також властивостями матеріалу робочих органів.

2. З'ясовано, що для підвищення довговічності та зносостійкості серійних дискових робочих органів ґрунтообробних машин, які працюють в умовах нерозпушеного ґрунту (перший ряд, напівзакріплене абразивне середовище) необхідно на піщаних і супіщаних застосовувати робочі органи, виготовлені зі сталі 65Г (оскільки вона здатна до самонаклепу внаслідок абразивного та ударно-абразивного зношування), а на глинистих і суглинкових використовувати робочі органи, виготовлені зі сталі 28MnB5. Для дискових робочих органів ґрунтообробних машин, які працюють в умовах розпушеного ґрунту (другий ряд, взаємодія з «вільними» абразивними середовищами), спостерігається утворення вторинних структур на поверхні з меншою твердістю, порівнюючи з початковою, для всіх матеріалів та на всіх типах ґрунтів. На всіх типах лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин спостережено утворення вторинних структур з підвищеною твердістю незалежно від матеріалу робочих органів.

3. Установлено, що для ґрунтообробних машин неробочий період (машини знаходяться на зберіганні) протягом року становить приблизно 90%. (за даними корпорації «Сварог Вест Груп»). Сільськогосподарські виробники зберігають ґрунтообробні машини переважно на відкритих майданчиках (71%), що сприяє інтенсифікації корозійних процесів. Корозійні процеси найбільш інтенсивно протікають на поверхнях робочих органів ґрунтообробних машин, які піддавалися активному абразивному зношуванню за наявності дефектів кристалічної будови на поверхні тертя.

4. Визначено фізико-механічні, хімічні, триботехнічні та експлуатаційні властивості найбільш поширених матеріалів дискових робочих органів ґрунтообробних машин (сталь 28MnB5 і сталь 65Г). З'ясовано, що якісна борвмісна сталь 28MnB5 має кращі фізико-механічні та хімічні властивості порівняно зі сталлю 65Г. Незважаючи на кращі фізико-механічні та хімічні властивості сталі 28MnB5, робочі органи виготовлені зі сталі 65Г мають вищу

довговічність та зносостійкість у процесі експлуатації на супіщаних і піщаних ґрунтах, що зумовлено здатністю до «самонаклепу».

5. Відповідно до особливостей зношування лемішно-лапових і дискових робочих органів розроблено схеми нанесення зносостійкого покриття для підвищення їх довговічності та зносостійкості з урахуванням умов та режимів експлуатації. Установлено, що нанесення зносостійкого покриття більш ефективно в процесі експлуатації робочих органів на ґрунтах, які мають більшу зношувальну здатність (піщані й супіщані ґрунти).

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХНЬОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ

6.1. Закономірності впливу вологості на інтенсивність та характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин

У більшості працях для визначення впливу вологості ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин використовували лабораторні або стендові дослідження, що пов'язано зі значними матеріальними затратами для проведення експлуатаційних досліджень [81, 136]. Результати проведених експлуатаційних досліджень впливу вологості на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин представлені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Вплив вологості ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин (поля після зернових культур)

Ґрунт	Рік проведення досліджень	Вологість, %	Інтенсивність зношування, г/га		Рік проведення досліджень	Вологість, %	Інтенсивність зношування, г/га		Рік проведення досліджень	Вологість, %	Інтенсивність зношування, г/га	
			Сталь 28MnB5 або Hardox 500	Сталь 65Г			Сталь 28MnB5 або Hardox 500	Сталь 65Г			Сталь 28MnB5 або Hardox 500	Сталь 65Г
Стрілчаста лапа												
Супіщаний	2016	8,7	21,2	22,8	2017	10,1	22,3	24,8	2018	9,4	22,1	24,2
Середній суглинок	2016	7,8	12,4	15,8	2017	11,7	13,5	17,0	2018	7,3	12,0	15,3
Глина легка	2016	12,4	6,8	10,5	2017	16,8	6,4	9,8	2018	13,9	7,8	11,7
Дисковий робочий орган												
Супіщаний	2016	8,7	0,065	0,065	2017	10,1	0,068	0,069	2018	9,4	0,067	0,068
Середній суглинок	2016	7,8	0,037	0,039	2017	11,7	0,04	0,045	2018	7,3	0,034	0,037

Продовження таблиці 6.1

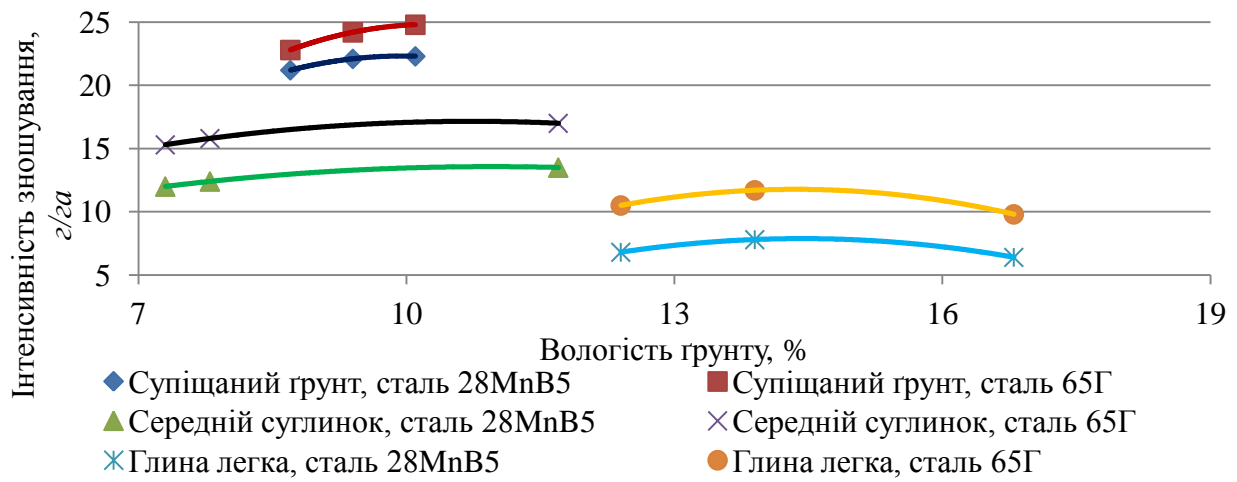
Глина легка	2016	12,4	0,019	0,024	2017	16,8	0,017	0,022	2018	13,9	0,02	0,027
Леміш												
Супіщаний	2016	8,7	65	79	2017	10,1	71	85	2018	9,4	69	83
Середній суглинок	2016	7,8	37	55	2017	11,7	41	59	2018	7,3	35	51
Глина легка	2016	12,4	22	32	2017	16,8	20	29	2018	13,9	25	34

Дані табл. 6.1 дозволяють зробити висновок, що зміна вологості ґрунту на різних типах ґрунтів по-різному впливає на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин (рис. 6.1).

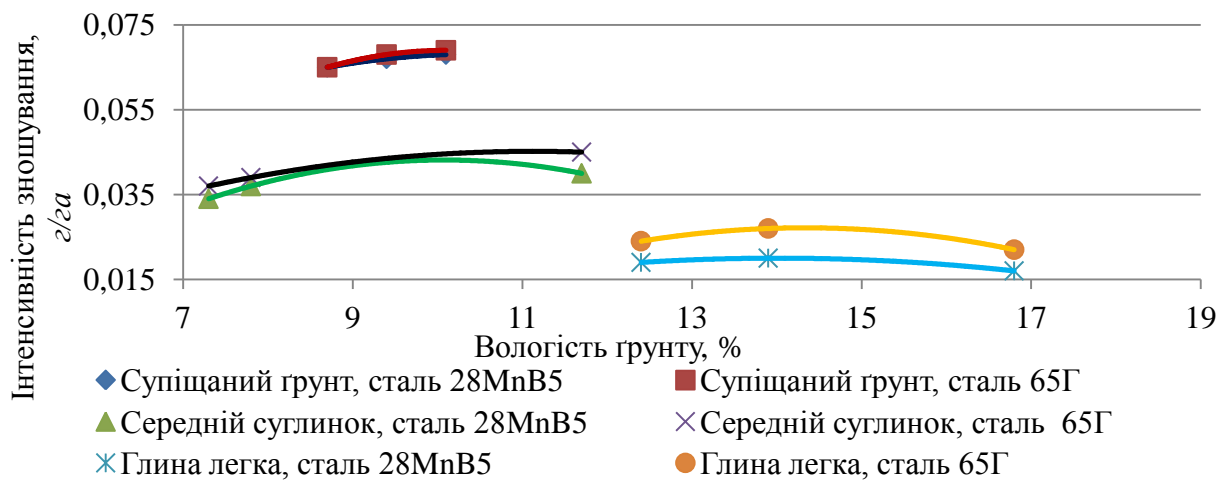
За результатами досліджень з'ясовано, що збільшення вологості ґрунту на супіщаних і суглинкових ґрунтах призводить до підвищення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Отримані математичні залежності дозволяють встановити значення вологості, за якої спостерігається найбільш інтенсивне абразивне зношування робочих органів, після чого інтенсивність зношування зменшується. Залежно від типу робочих органів вологість для супіщаних ґрунтів, за якої процес абразивного зношування протікає найінтенсивніше, становить 10...13 %, а для суглинкових – 9...13 %.

Дослідження впливу вологості ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів на глиняних ґрунтах проведено при вологості до і після екстремуму функції, тому значення вологості, за яких відбувається найінтенсивніше зношування, визначено експериментально. Відповідно під час роботи на глиняних ґрунтах процес зношування робочих органів ґрунтообробних машин протікає найінтенсивніше при вологості 13...16 %.

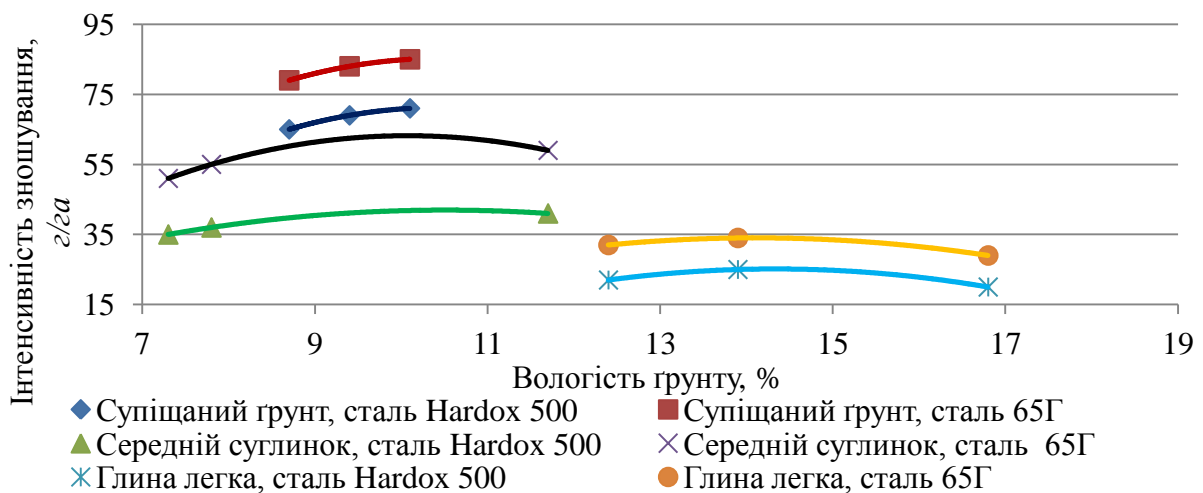
Матеріал робочих органів ґрунтообробних машин не позначається на загальній закономірності впливу вологості ґрунту на інтенсивність зношування.



а)



б)



в)

Рис. 6.1. Вплив вологості ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин (експериментальні дані): а – стрілочасті лапи, б – дискові робочі органи; в – леміш [336]

Для визначення впливу вологості ґрунту на характер зношування слідкували за інтенсивністю зношування складових частин робочих органів ґрунтообробних машин (табл. 6.2).

Таблиця 6.2

Співвідношення інтенсивності зношування носової і лезової частин для різних типів ґрунтів та вологості ґрунту (леміш серійний, сталь 65Г, напрацювання на один леміш – 5 га, поля після озимої пшениці)

Співвідношення між інтенсивністю зношування носка та леза леміша	Вологість ґрунту, %								
	8,7	10,1	9,4	7,8	11,7	7,3	12,4	16,8	13,9
Супіщаний ґрунт	1,48	1,59	1,51	-	-	-	-	-	-
Середній суглинок	-	-	-	2,19	2,21	2,18	-	-	-
Глина легка	-	-	-	-	-	-	2,31	2,34	2,33

Із зростанням вологості супіщаних ґрунтів спостерігається інтенсифікація процесу зношування носової частини леміша. На суглинкових і глиняних ґрунтах така закономірність також наявна, але вона не так явно виражена.

Результати попередніх теоретичних досліджень засвідчують, що ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті може суттєво впливати на характер зношування робочих органів. Для підтвердження або спростування цього твердження були проведені експерименти на супіщаному ґрунті при трьох різних ступенях закріплення абразивних частинок: 1) ділянка після озимої пшениці; 2) ділянка після озимої пшениці, повторна оранка. Результати досліджень представлено в табл. 6.3.

Зміна ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті суттєво впливає на характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Зміна вологості ґрунту на пухких ґрунтах (із малим ступенем закріплення абразивних частинок) не впливає на зміну характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин (табл. 6.3).

Співвідношення інтенсивності зношування носової і лезової частин в умовах супіщаного ґрунту при різних ступенях закріплення абразивних частинок (леміш серійний, сталь 65Г, напрацювання на один леміш – 5 га, глибина обробітку в усіх випадках 200 мм)

Умови проведення досліджень	Вологість ґрунту, %		
	8,7	10,1	9,4
Ділянка після озимої пшениці	1,48	1,59	1,51
Ділянка після озимої пшениці, повторна оранка	0,71	0,72	0,72

Установлено, що при зростанні вологості ґрунту змінюється характер та інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин. За умови збільшення вологості зношувальна здатність ґрунту зростає до межі, характерної для кожного виду ґрунту, після чого інтенсивність зношування починає зменшуватися. Матеріал робочого органу ґрунтообробних машин не впливає на загальну закономірність, зміни інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин при зміні вологості ґрунту. У процесі експлуатації ґрунтообробних машин на пухких ґрунтах вологість ґрунту не впливає на характер зношування робочих органів.

6.2. Вплив швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів

За останні 50 років швидкість руху ґрунтообробних машин виросла у 2 рази. Зокрема, у 60 роках минулого століття швидкість оранки не перевищувала 5 км/год, зараз вона становить 8...10 км/год [218]. У сучасних плугів робоча швидкість може сягати до 12 км/год, у дискових борін та культиваторів – до 15 км/год. Зростання швидкості руху ґрунтообробних агрегатів призводить до зміни характеру та інтенсивності абразивного зношування, тому встановлення закономірностей впливу швидкості руху агрегату на інтенсивність зношування є безумовно актуальним завданням.

Зміна швидкості призводить до зміни характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин, а саме до інтенсифікації зношування частин робочих органів, які першими взаємодіють із середовищем ґрунту [167].

Проведені дослідження мають велике практичне і теоретичне значення, але слід виділити низку недоліків:

- швидкості, при яких проводили дослідження, не відповідають сучасним реаліям;
- не з'ясовано впливу матеріалу на зміну інтенсивності абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин за умови збільшення швидкості руху агрегату;
- у процесі досліджень використовували тільки робочі органи плуга (леміш, відвал і польову дошку);
- не враховано вплив ступеня закріплення абразивних частинок ґрунту на зміну інтенсивності зношування ґрунтообробних машин при зміні швидкості руху агрегату;
- відсутні дослідження на глиняних ґрунтах, які доволі поширені на території України.

У більш пізніх дослідженнях впливу швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів відсутні результати експлуатаційних досліджень, а автори обмежуються теоретичними [51, 86], лабораторними або стендовими дослідженнями [156]. Результати цих праць не можна використовувати в процесі прогнозування інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин у реальних умовах експлуатації.

Результати досліджень впливу швидкості на інтенсивність масового зношування представлені в табл. 6.4.

Вони засвідчують, що зростання швидкості призводить до збільшення інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Більш суттєве зростання інтенсивності зношування спостерігається під час експлуатації робочих органів на ґрунтах з більшою зношувальною здатністю (рис. 6.2).

Таблица 6.4

Інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин, г/га

Тип ґрунту	Швидкість, км/год																	
	11					13					15							
Стрілчаста лапа																		
Матеріал РО	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6			
Супіщаний	20,4	21,9	18,6	18,6	18,8	21,4	23,8	19,2	19,1	20,3	22,7	25,1	20,7	20,6	21,1			
Середній суглинок	12,77	16,1	12,2	12,2	12,7	12,9	16,7	12,5	12,5	13,0	13,4	17,7	12,9	12,9	13,5			
Глина легка	6,6	10,2	7,5	7,5	8,9	6,6	10,6	7,7	7,8	9,1	6,8	11,1	7,8	7,8	9,3			
Дисковий РО типу «ромашка» (перший ряд)																		
Матеріал РО	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6			
Супіщаний	0,063	0,064	0,050	0,050	0,051	0,067	0,068	0,052	0,052	0,054	0,071	0,074	0,056	0,056	0,058			
Середній суглинок	0,036	0,039	0,031	0,031	0,031	0,037	0,041	0,032	0,032	0,033	0,039	0,044	0,034	0,034	0,035			
Глина легка	0,018	0,023	0,018	0,018	0,018	0,018	0,024	0,019	0,019	0,019	0,019	0,025	0,019	0,019	0,019			
Леміш																		
Швидкість, км/год	10					11,5					13							
Матеріал РО	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe	Hardox 500	ЛІ53	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe	Hardox 500	ЛІ53	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe	Hardox 500	ЛІ53
Супіщаний	79	26	26	26	64	126	82	27	28	28	66	131	87	28	28	29	67	140
Середній суглинок	54	19	19	19	37	78	56	18	18	19	38	83	57	20	20	20	38	85
Глина легка	31	12	12	12	20	46	33	12	12	13	20	49	33	12	12	12	20	50

У роботі [81] встановлено, що збільшення швидкості призводить до зростання інтенсивності зношування леміша та грудей відвалу. Збільшення швидкості руху ґрунтообробного агрегату призводить до зменшення шляху тертя абразивних частинок по відвалу, а відповідно і до зменшення інтенсивності зношування.

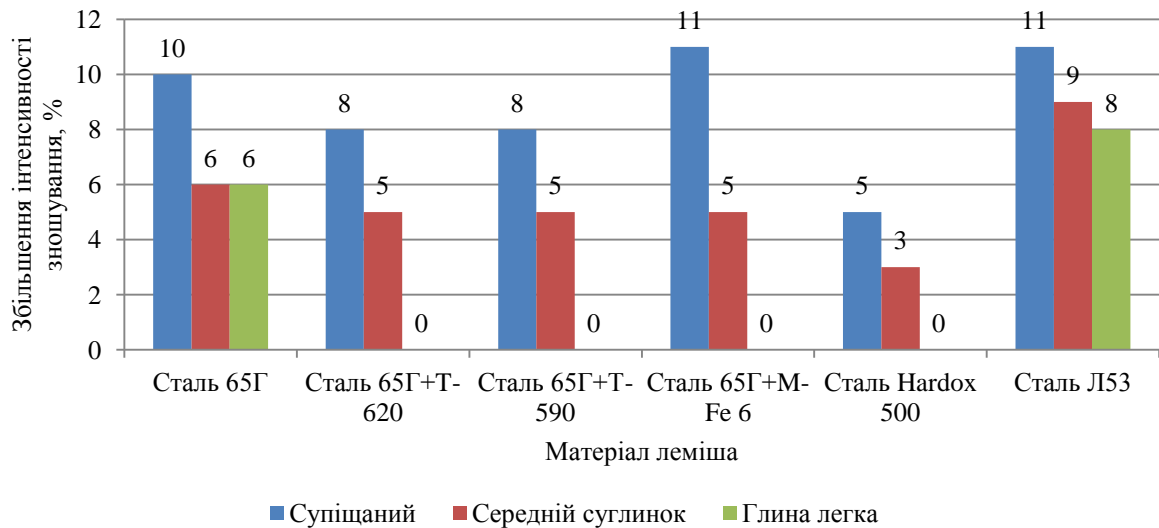


Рис. 6.2. Зростання інтенсивності зношування лемішів при зміні швидкості з 10 км/год до 13 км/год [337]

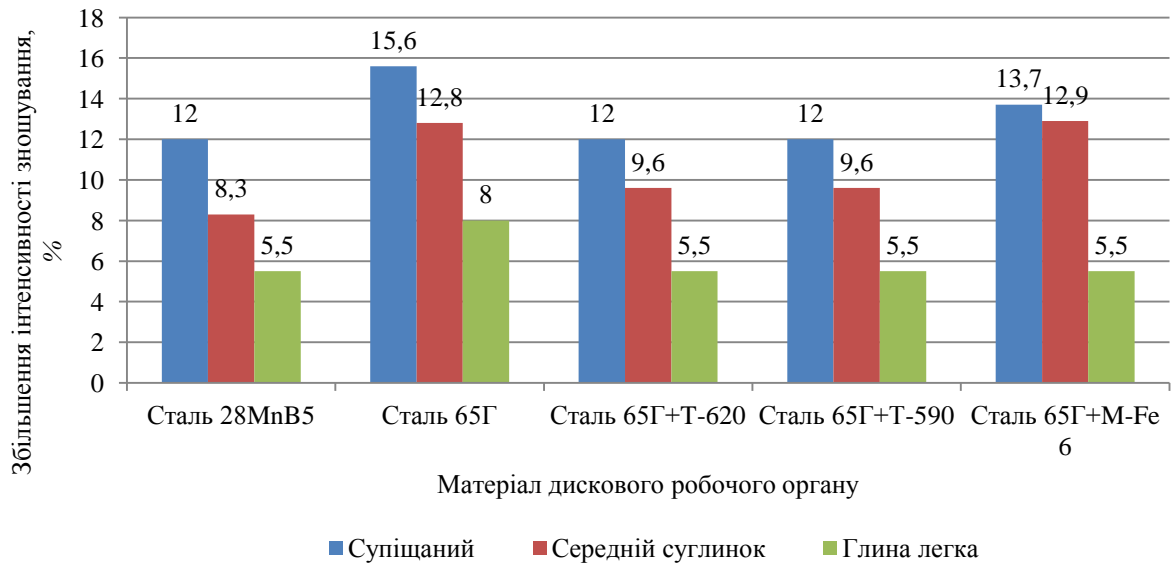
У процесі досліджень виявлено, що зростання швидкості руху ґрунтообробних агрегатів призводить до меншого зростання інтенсивності зношування робочих органів, виготовлених з якісних зносостійких сталей Hardox 500 та 28MnB5. Така закономірність спостерігається під час експлуатації ґрунтообробних машин на всіх типах ґрунтів.

Зростання інтенсивності зношування дискових робочих органів дещо більший ніж у лемішно-лапових робочих органах (рис. 6.3).

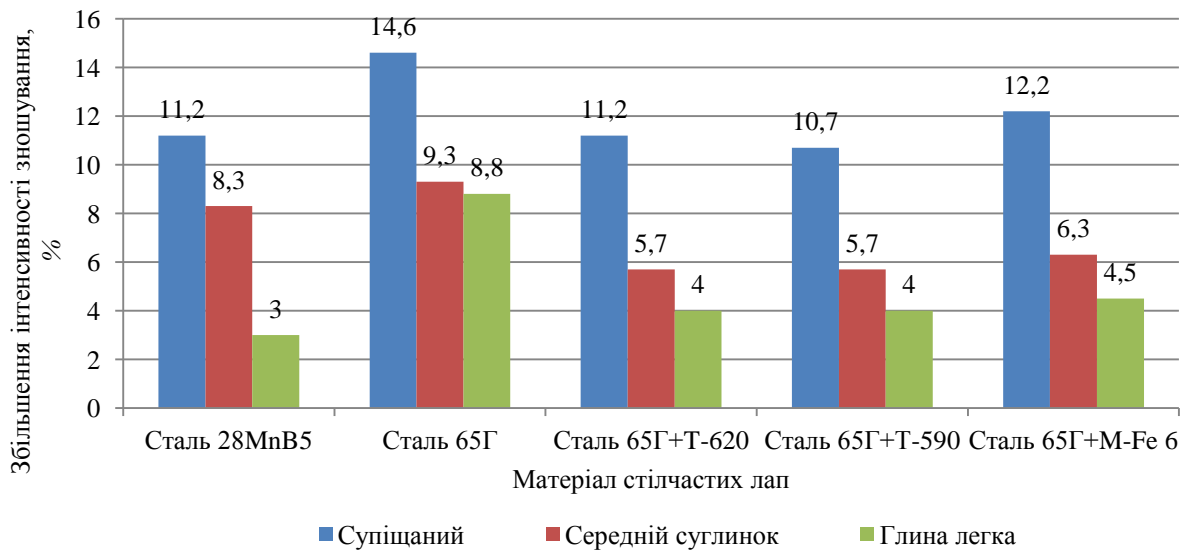
Інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин залежно від швидкості руху ґрунтообробного агрегату аналітично можна описати поліномом другого порядку:

$$I_m = av^2 + bv + c, \quad (6.1)$$

де I_m – інтенсивність масового зношування робочих органів, г/га; v – швидкість руху ґрунтообробного агрегату; a , b та c – коефіцієнти, які характеризують абразивні властивості ґрунтового середовища, визначені експериментальним шляхом (табл. 6.5).



а)



б)

Рис. 6.3. Зростання інтенсивності зношування стрілкових лап і сферичних дискових робочих органів типу «ромашка» при зміні швидкості з 11 км/год до 15 км/год: а – дискові робочі органи; б – стрілкові лапи [335]

Коефіцієнти для визначення інтенсивності зношування робочого органу в залежності від швидкості руху ґрунтообробного агрегату

Ґрунт	Коефіцієнти																	
	a					b					c							
	Стрілчаста лапа																	
	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	28MnB5	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6			
Супіщаний	0,0375	-0,075	0,1125	0,125	-0,0875	-0,4	2,75	-2,4	-2,75	2,85	20,262	0,725	31,388	33,725	-1,9625			
Середній суглинок	-0,0375	0,05	0,0125	0,0125	0,025	-0,8	-0,9	-0,15	-0,15	-0,45	16,963	19,95	12,338	12,338	14,625			
Глина легка	0,025	0,0125	-0,0125	-0,0375	0	-0,6	-0,1	0,4	1,05	0,1	10,175	9,7875	4,6125	0,4875	7,8			
	Дисковий робочий орган типу «ромашка» (перший ряд)																	
Супіщаний	0	-0,0003	0,0003	0,0003	0,0001	0,002	-0,004	-0,005	-0,005	-0,00015	0,041	0,0778	0,0748	0,0748	0,0524			
Середній суглинок	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0	-0,0025	-0,002	-0,0025	-0,0025	0,001	0,0484	0,0459	0,0434	0,00434	0,02			
Глина легка	0,0001	-7E-18	-0,0001	-0,0001	-0,0001	-0,003	0,0005	0,0035	0,0035	0,0035	0,0359	0,0175	-0,0054	-0,0054	-0,0054			
	Леміш																	
	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	Hardox 500	ЛІ53	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	Hardox 500	ЛІ53	65Г	65Г+Т-620	65Г+Т-590	65Г+М-Fe 6	Hardox 500	ЛІ53
Супіщаний	0,4444	0	-0,4444	-0,2222	-0,2222	0,8889	-7,5556	0,6667	10,889	6,1111	6,1111	-15,778	110,11	19,333	-38,444	-12,889	25,111	194,89
Середній суглинок	-0,2222	0,6667	0,6667	0,2222	-0,2222	-0,6667	6,1111	-15	-15	-4,7778	5,44444	17,667	15,111	102,33	102,33	44,556	4,7778	-32
Глина легка	-0,4444	-	-	-	-	0,4444	10,889	-	-	-	-	11,556	-33,444	-	-	-	-	-25,111

Коефіцієнт детермінації для всіх математичних моделей знаходиться в межах $R^2 = 0,97 \dots 1$. Для встановлення аналітичної залежності інтенсивності зношування лемішів на глиняних ґрунтах, від швидкості руху ґрунтообробного агрегату необхідно збільшити діапазон варіювання швидкості руху ґрунтообробного агрегату.

Зміна швидкості руху робочих органів ґрунтообробних машин суттєво впливає на зміну характеру зношування робочих органів. Зокрема, при зміні швидкості руху ґрунтообробного агрегату змінюється співвідношення інтенсивності зношування складових частин робочих органів ґрунтообробних машин (табл. 6.6).

Таблиця 6.6

Співвідношення інтенсивності зношування лезової і носової частин для різних типів ґрунтів та швидкостей руху ґрунтообробного агрегату (леміш серійний, сталь Л53, напрацювання на один леміш – 4 га, поля після збирання ячменю)

Швидкість руху ґрунтообробного агрегату, км/год	Співвідношення між інтенсивністю зношування носка та леза леміша		
	Супіщаний ґрунт	Середній суглинок	Глина легка
10	1,51	2,18	2,26
11,5	1,59	2,27	2,38
13	1,65	2,34	2,41

З табл. 6.6 видно, що збільшення швидкості призводить до зростання інтенсивності зношування носка леміша. Це явище пояснюється суттєвим зростанням питомого тиску в зоні контакту носової частини. Підвищення інтенсивності зношування різальних елементів, за умови збільшення швидкості можна спостерігати й на інших робочих органах ґрунтообробних машин (носок культиваторної лапи та лезова частина зуба диска).

Результати попередніх теоретичних досліджень засвідчують, що ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті може суттєво впливати на характер зношування робочих органів. Для підтвердження або спростування цього

твердження проведено дослідження на супіщаному ґрунті при трьох різних ступенях закріплення абразивних частинок:

- 1) ділянка після озимої пшениці;
- 2) ділянка після озимої пшениці, повторна оранка на 7 день після першого обробітку;
- 3) ділянка після озимої пшениці, повторна оранка на 74 день після першого обробітку.

Результати експерименту представлено в табл. 6.7.

Таблиця 6.7

Співвідношення інтенсивності зношування лезової і носової частин в умовах супіщаного ґрунту при різних ступенях закріплення абразивних частинок (леміш серійний, сталь Л53, напрацювання на один леміш – 4 га, глибина обробітку в усіх випадках – 220 мм)

Умови проведення досліджень	Швидкість руху агрегату		
	10	11,5	13
Ділянка після озимої пшениці	1,40	1,49	1,56
Ділянка після озимої пшениці, повторна оранка на 7 день після першого обробітку	0,68	0,68	0,68
Ділянка після озимої пшениці, повторна оранка на 74 день після першого обробітку	0,87	0,89	0,93

У процесі експлуатації ґрунтообробних агрегатів на пухких ґрунтах не спостерігається зростання інтенсивності зношування носової частини леміша, за умови збільшення швидкості руху ґрунтообробного агрегату, що зумовлено відсутністю зростання питомого тиску в зоні контакту носової частини. Для стрілочастих лап і дискових робочих органів ґрунтообробних машин дана закономірність ідентична.

У результаті проведених досліджень встановлено, що зростання швидкості руху ґрунтообробних агрегатів призводить:

- до інтенсифікації абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин, які безпосередньо взаємодіють із середовищем ґрунту;

- до більш суттєвого зростання інтенсивності зношування дискових робочих органів ґрунтообробних машин в порівнянні з лемішно-лаповими;
- до зміни характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин шляхом інтенсифікації зношування різальних елементів робочих органів.

6.3. Обґрунтування способу зберігання робочих органів ґрунтообробних машин у міжексплуатаційний період у різних ґрунтово-кліматичних зонах України

Атмосферна корозія завдає значних збитків усім галузям економіки (сільське господарство, промисловість, транспорт, енергетика та ін.). Втрати внаслідок атмосферної корозії в США складають понад 100 мільйонів доларів США в рік [338].

Вивчення стану різних сільськогосподарських машин після 1...3 років експлуатації дозволяють зробити висновок, що корозійному впливу навколишнього середовища тією чи іншою мірою піддаються більше 70...80% деталей і збірних одиниць цих машин [224, 339]. Ґрунтообробні та посівні машини знаходяться на зберіганні до 90% часу, протягом якого їхні деталі та робочі органи піддаються атмосферній корозії. Експериментальні дослідження показали, що в сільській місцевості середні втрати сталі за рік становлять близько 14 г/м^2 , або 0,035 мм по товщині деталі при її двосторонній корозії [80, 81]. Корозія руйнує і якісно змінює поверхню деталей машин, що призводить до зниження зносостійкості та міцності машин [340]. Надзвичайно важливим є вирішення проблеми протикорозійного захисту сільськогосподарської техніки в аграрному виробництві, гострою є необхідність усебічних досліджень процесів корозії, корозійної втоми й корозійно-механічного зносу [339]. Саме тому пошук сучасних методів і способів, які дозволяють мінімізувати атмосферну корозію робочих органів та деталей ґрунтообробних машин, – це беззаперечно, актуальне завдання.

Останні роботи з вивчення атмосферної корозії значно просунулися в напрямку розуміння процесу корозійного руйнування поверхні металів. Однак існує багато проблем, пов'язаних із розумінням та прогнозуванням різних явищ. Кінцева мета таких досліджень – можливість передбачити час, місце розташування та ступінь корозії і повністю зрозуміти наслідки впливу корозії на зміну мікроструктури в залежності від навколишнього середовища [341]. Більшість вітчизняних та іноземних праць, присвячених атмосферній корозії, спрямовані на визначення швидкості корозійних процесів, впливу на швидкість різних факторів та з'ясування оптимальних способів та методів захисту від атмосферної корозії [342–350].

Проведені дослідження за методикою (розділ 2) дозволяють констатувати, що під час зберігання робочих органів ґрунтообробних машин на відкритих майданчиках, незалежно від їхнього покриття, у перші чотири місяці зберігання вся поверхня зразків була вкрита продуктами атмосферної корозії (табл. 6.8).

На початку зберігання в закритих приміщеннях і під навісами темп приросту поверхні, яка вражена корозією, доволі низький і починає суттєво зростати після появи локальних вражень.

Для зразків, які зберігалися на поверхні майданчику, площу корозії визначали на поверхні, яка взаємодіє з атмосферою. Корозійні процеси на поверхні сталі, яка контактує з поверхнею ґрунту в 2,4...3,2 рази швидші ніж на поверхні, яка взаємодіє з атмосферою, що зумовлено наявністю в ґрунті активних речовин і «блукальних» електричних струмів, які пришвидшують процес електрохімічної корозії.

За результатами досліджень слід наголосити, що процеси корозії найінтенсивніше протікали в зоні Полісся (на 7,2...14,8% інтенсивніше за зону Лісостепу й на 9,4...19,7 за зону Степу). Виходячи з вище зазначеного, можна зробити висновок, що інтенсивність корозії прямо залежить від ґрунтово-кліматичних умов зберігання.

Залежність площі поверхні вкритої продуктами корозії від терміну зберігання зразків (умови зберігання: зона Полісся, висота – 500 мм над поверхнею зберігання, зразок: сталь 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480°С)

Дата проведення замірів	Термін, місяців	1. На відкритому майданчику з ґрунтовим покриттям	2. На відкритому майданчику з трав'яним покриттям	3. На відкритому майданчику з бетонним покриттям	4. На відкритому майданчику з асфальтованим покриттям	5. Під навісом з бетонним покриттям	6. Під навісом з асфальтованим покриттям	7. У закритому опалювальному приміщенні з бетонним покриттям	8. У закритому неопалювальному приміщенні з бетонним покриттям
01.09.2014р.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
01.01.2015р.	4	100	100	58	67	9	9	3,2	3,7
01.05.2015р.	8			100	100	82	88	34	78
01.09.2015р.	12					100	100	75	100
01.01.2016р.	16							100	

У всіх зонах проведення досліджень спостережено приблизно однакову інтенсивність корозії на відкритих майданчиках з ґрунтовим та трав'яним покриттям. Слід зауважити, що на відкритих майданчиках із бетонним покриттям інтенсивність корозії (у перші 4 місяці зберігання) менша за інтенсивність корозії на відкритих асфальтованих майданчиках на 10,7...14,5%, і на 38,14...58,23% порівняно з відкритими майданчиками з ґрунтовим і трав'яним покриттям. На інтенсивність корозії впливає й пора року: найінтенсивніше корозія протікає в осінній і весняний періоди, менш інтенсивно в зимовий і найповільніше в літній період (при сухій погоді) [270].

Для порівняльної оцінки стійкості матеріалів та способів захисту від корозії за 1 було прийнято стійкість до корозії сталі 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С (рис. 6.4).

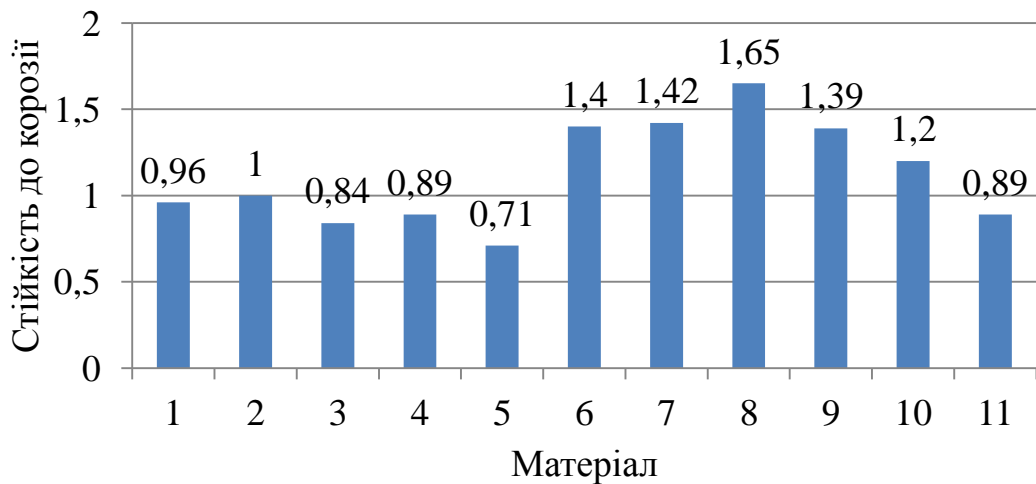


Рис. 6.4. Стійкість до корозії (умови зберігання: зона Полісся, під навісом з бетонним покриттям, висота від поверхні зберігання – 500 мм): 1 – сталь 65Г (без термообробки); 2 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С; 3 – сталь 65Г, зміцнена електроерозійною обробкою; 4 – сталь 65Г, зміцнена електродом Т-590; 5 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С після абразивного зношування; 6 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С з обробкою корміном; 7 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С з обробкою технічним вазеліном УН; 8 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С з обробкою оливою «Shell Ensio Oil N»; 9 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С з обробкою відпрацьованою моторною оливою; 10 – сталь 28MnB5; 11 – сталь Л 53 [270].

Як видно з рис. 6.4, лемішна сталь Л53 продемонструвала меншу корозійну стійкість порівняно зі сталю 65Г. Таке явище можна пояснити більшою кількістю вуглецю в сталі 65Г, який є катодним уключенням. Відомо, що при атмосферній корозії є можливість анодної пасивації [80, 81]. У таких

випадках наявність катодних уключень збільшує анодну поляризацію решти анодного фону й унаслідок зміни його потенціалу в сторону більш позитивних значень сприяє більшій легкості пасування і стійкості пасивного стану [45, 46].

Позитивний вплив захисних антикорозійних покриттів на стійкість проти корозії при зберіганні в закритому опалювальному приміщенні з бетонним покриттям та в закритому неопалювальному приміщенні з бетонним покриттям не такий очевидний (стійкість підвищується на 8,16...21,98%).

Зміцнення поверхні сталі 65Г призводить до зменшення стійкості до атмосферної корозії за наявності поверхневих дефектів, що виникають в результаті термічного впливу. При зміцненні електродом Т-150 стійкість зменшується на 9,64...14,52%, при зміцненні електроерозійною обробкою – на 15,23...20,92%.

Найменшу стійкість до атмосферної корозії продемонстрував зразок, який перед зберігання піддавався абразивному зношуванню (на 24,5...35,4% менше за зразок який не піддавався попередньому абразивному зношуванню), що зумовлено наявністю на поверхні великої кількості дефектів, спричинених процесами мікрорізання та пластичного деформування. Цей зразок моделює реальні поверхні робочих органів ґрунтообробних та посівних машин після експлуатації і підкреслює необхідність пошуку засобів та методів захисту від атмосферної корозії робочих органів ґрунтообробних і посівних машин.

За результатами проведених досліджень впливу атмосферної корозії на зносостійкість сталей побудовані відповідні діаграми рис. 6.5.

Слід підкреслити, що спосіб зберігання суттєво впливає на інтенсивність зношування (рис. 6.6).

Найбільше підвищується інтенсивність (рис. 6.6) зношування при зберіганні на відкритому майданчику з ґрунтовим покриттям (у 5,25 раза) та з трав'яним покриттям (у 5,6 раза), найменше при зберіганні в закритому опалювальному приміщенні з бетонним покриттям (у 2 рази) та в закритому неопалювальному приміщенні з бетонним покриттям (у 2,38 раза).

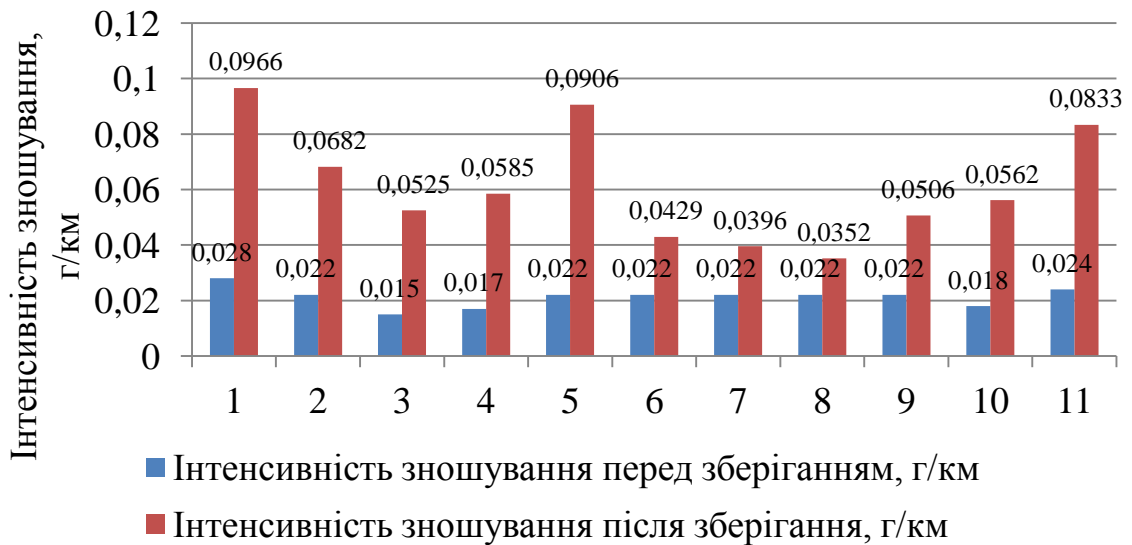


Рис. 6.5. Інтенсивність зношування зразків сталі, шлях тертя – 7488 м (умови зберігання: зона Лісостеп, під навісом із бетонним покриттям, висота розміщення зразків – 500 мм над поверхнею зберігання): 1 – сталь 65Г (без термообробки); 2 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С; 3 – сталь 65Г, зміцнена електроерозійною обробкою; 4 – сталь 65Г, зміцнена електродом Т-590; 5 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С після абразивного зношування; 6 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С з обробкою корміном; 7 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С з обробкою технічним вазеліном УН; 8 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С з обробкою оливою «Shell Ensis Oil N»; 9 – сталь 65Г з об’ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С з обробкою відпрацьованою моторною оливою; 10 – сталь 28MnB5; 11 – сталь Л 53

Висота, на якій зберігалися зразки, також суттєво впливає на величину зростання інтенсивності зношування. Зокрема при зберіганні на поверхні інтенсивність зношування в 1,54...2,83 раза більша за інтенсивність зберігання

на висоті 100 мм і в 2,19...3,04 раза більша за інтенсивність зношування при зберіганні на висоті 500 мм.

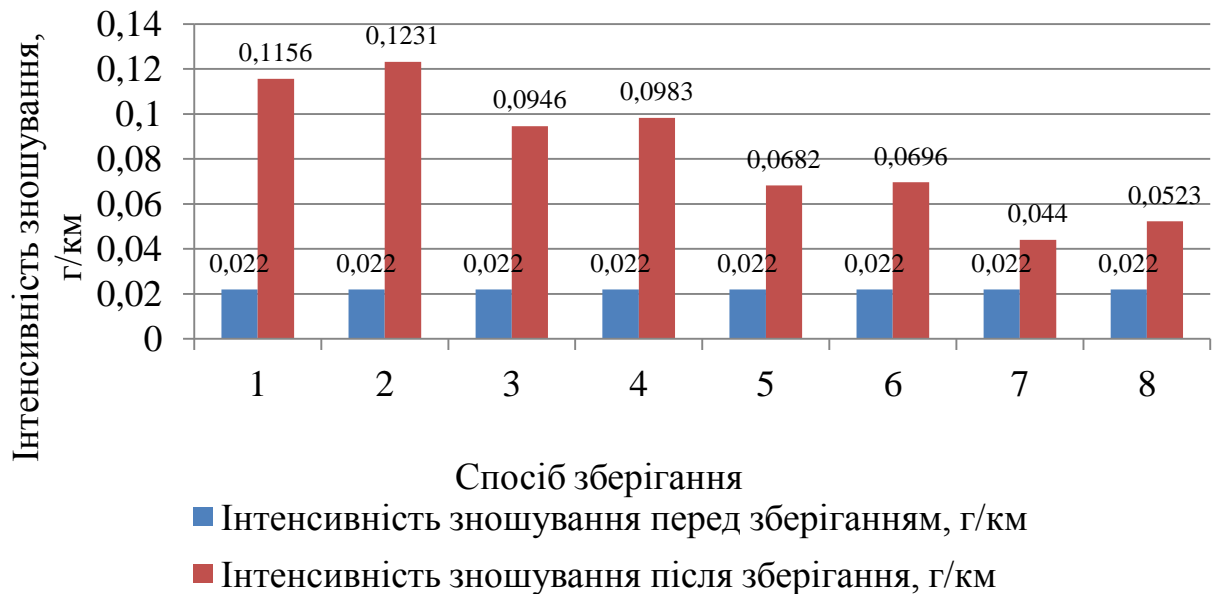


Рис. 6.6. Інтенсивність зношування зразків сталі, шлях тертя – 7488 м (умови зберігання: зона Лісостеп, висота розміщення зразків 500 мм над поверхнею зберігання, зразок – сталь 65Г з об'ємним гартуванням за температури 810...830 °С і середньому відпуску за температури 460...480 °С): 1 – на відкритому майданчику з ґрунтовим покриттям; 2 – на відкритому майданчику з трав'яним покриттям; 3 – на відкритому майданчику з бетонним покриттям; 4 – на відкритому майданчику з асфальтованим покриттям; 5 – під навісом з бетонним покриттям; 6 – під навісом з асфальтованим покриттям; 7 – у закритому опалювальному приміщенні з бетонним покриттям; 8 – у закритому неопалювальному приміщенні з бетонним покриттям

Суттєва зміна інтенсивності зношування після атмосферної корозії спостерігається, при шляху тертя 7488 м, у подальшому інтенсивність зношування зменшується і дорівнює інтенсивності зношування перед початком зберігання.

Атмосферна корозія поверхні металу призводить до зростання інтенсивності абразивного зношування. Після зняття абразивними частинками продуктів корозії інтенсивність зношування вповільнюється.

Для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних та посівних машин (ураховуючи економічну доцільність) у міжсезонний період машини слід зберігати на спеціальних підставках (висота яких не менше 500 мм) у закритих неопалювальних приміщеннях і під навісом з бетонним покриттям із нанесенням на робочі органи захисного антикорозійного покриття. Серед захисних покриттів найкраще саме зарекомендувала олива «Shell Ensis Oil N», але ураховуючи її ринкову вартість, використання є економічно недоцільним і її можна замінити більш дешевими матеріалами.

6.4. Науково обґрунтована система експлуатації ґрунтообробних машин

Упровадження науково обґрунтованої системи експлуатації ґрунтообробних машин з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов машин дозволить суттєво підвищити зносостійкість та довговічність робочих органів. Розроблена система ґрунтується на відомих раніше даних і на особисто отриманих результатах унаслідок комплексно проведених теоретичних, лабораторних та експлуатаційних досліджень (розділи 3, 4, 5, 6 нашої роботи). Упровадження запропонованої системи (рис. 6.7–6.9) дозволяє кардинально по-новому подивитися на вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Економічна оцінка від упровадження запропонованої системи представлена в розділі 7.

Використання робочих органів, виготовлених із високоякісних сталей не дає позитивного ефекту в процесі експлуатації ґрунтообробних машин на ґрунтах, які мають високу зношувальну здатність. На таких ґрунтах слід застосовувати робочі органи з нанесеним зносостійким покриттям або зі змінними деталями. Вибір матеріалу зміцнення та способу нанесення покриття повинен базуватися на економічній доцільності. У сьогоdnішніх реаліях агропромислового комплексу України найбільш оптимальний спосіб – нанесення покриття ручним дуговим наплавленням, покритим електродом.

Грунт		Матеріал робочого органу	Покращення об'ємних та поверхневих властивостей	Нанесення зносостійкого покриття	Геометричні параметри	
Глина	Важка	28MnB5	Заготовка прокатується у двох перпендикулярних напрямках, а диски підлягають складній термо- та дробоструминній обробці	Нанесення зносостійкого покриття не забезпечить суттєвого підвищення довговічності та зносостійкості.	R	Кут загострення
	Середня				Внутрішній 10°-20°	
	Легка					
Суглинок	Важкий	Сталь 65Г 28MnB5	Об'ємне загартування за температури 810...830 °C і середнім відпуском із дуже точною витримкою за температури 460...480 °C (HRC 39-42)	Схема нанесення зносостійкого шару наведена на рис. 8. Зносостійкий шар повинен мати параметри відповідно до значень представлених у табл. 3.7 і 3.8. Корекцію параметрів залежно від швидкості руху агрегату проводити за формулою 3.35	Зовнішній 10°-20°	
	Середній				При зміцненні: загострення проводити бажано із зовнішньої сторони (при технологічній неможливості з внутрішньої) кут загострення 28°-34°	
	Легкий					Зовнішній 10°-20°
Супіщаний та піщаний	Важкий	Сталь 65Г				
	Супіщаний					
	Пісок зв'язаний					
Пісок вільний						

Грунт		Режими експлуатації				Спосіб зберігання	
Глина	Важка	Вол. ґрунту	Швидкість руху	Стан поживних решток	Стан ґрунту	На відкритому майданчику з бетонним покриттям або під навісом із бетонним покриттям із нанесенням консерваційних матеріалів (від поверхні майданчика до поверхні - не менше 100мм) Під навісом із бетонним покриттям із нанесенням консерваційних матеріалів. Відстань від поверхні майданчика до поверхні - не менше 100мм	
	Середня						
	Легка						
Суглинок	Важкий	13...17 %	Збільшення швидкості призводить до підвищення інтенсивності зношування на всіх типах ґрунтів	Обробток ґрунту слід проводити при якомога меншому вмісту патоки в поживних рештках. Для кожної сільськогосподарської культури існують оптимальні строки проведення обробітку ґрунту	Обробіток бажано проводити при найменшому ступені закріпленні абразивних частинок в ґрунті, що можливо досягнути при якомога ранішому повторному обробітку, оптимальній вологості та "відмирання" кореневої системи		
	Середній						
	Легкий						
Супіщаний та піщаний	Важкий	10...11 %					
	Супіщаний						
	Пісок зв'язаний						
Пісок вільний		9...10 %					
		7...8 %					

Рис. 6.7. Комплексний підхід вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості дискових робочих органів

Вибір режимів експлуатації ґрунтообробних агрегатів це доволі складне та суперечливе питання. З одного боку, можуть бути агротехнічні строки та продуктивність агрегату загалом, з іншого – інтенсивність зношування робочих органів. Пошук раціональних режимів експлуатації повинен базуватися на економічних показниках і виробничій необхідності.

Грунт		Матеріал робочого органу	Покращення об'ємних та поверхневих властивостей	Нанесення зносостійкого покриття	Геометричні параметри
Глина	Важка	28MnB5	Заготівка прокатується у двох перпендикулярних напрямах, а диски підлягають складній термо- та дробоструминній обробці	Нанесення зносостійкого покриття не забезпечить суттєвого підвищення довговічності та зносостійкості	Кут загострення лезової частини - 8...10°, носової частини - 25...30°. Зносотійкий шар наносити на зовнішню поверхню. Нанесення на внутрішню поверхню можливе тільки на глинистих ґрунтах без кам'янистих включень. При зміцненні стрілочастих лап з зовнішнього боку загострення проводити з внутрішнього боку. Заготрювання в усіх випадках одностороннє. За відсутності зносостійкого шару використовувати стрілчасті лапи зі змінним носком
	Середня				
	Легка				
Суглинок	Важкий	Сталь 65Г За наявності кам'янистих включень використовувати сталь 28MnB5	Об'ємне загартування за температури 810...830 °C і середньому випуску з дуже точною витримкою за температури 460...480 °C (HRC 39-42)	Схема нанесення зносостійкого шару наведена на рис. 3.28. Зносотійкий шар повинен ма- ти параметри відповідно до значень представлених у табл. 3.7, 3.8, 5.16 та 5.17. Корекцію параметрів залежно від швидкості руху агрегату проводити за формулою 3.35	
	Середній				
	Легкий				
Супіщаний та піщаний	Важкий	За наявності кам'янистих включень використовувати сталь 28MnB5	Об'ємне загартування за температури 810...830 °C і середньому випуску з дуже точною витримкою за температури 460...480 °C (HRC 39-42)	Схема нанесення зносостійкого шару наведена на рис. 3.28. Зносотійкий шар повинен ма- ти параметри відповідно до значень представлених у табл. 3.7, 3.8, 5.16 та 5.17. Корекцію параметрів залежно від швидкості руху агрегату проводити за формулою 3.35	
	Супіщаний				
	Пісок зв'язаний				
Пісок вільний					

Грунт		Режими експлуатації				Спосіб зберігання
		Вол. ґрунту	Швидкість руху	Стан поживних рештків	Стан ґрунту	
Глина	Важка	13...17 %	Збільшення швидкості призводить до підвищення інтенсивності зношування на всіх типах ґрунтів	Обробіток ґрунту слід проводити за якомога меншого вмісту патоки в поживних рештках. Для кожної сільськогосподарської культури існують оптимальні строки проведення обробітку ґрунту	Обробіток бажано проводити при найменшому ступені закріплення абразивних частинок у ґрунті, чого можна досягнути за якомога ранішого повторного обробітку, оптимальний вологості та "відмирання" кореневої системи	На відкритому майдан- чику з бетонним покрит- тям або під навісом з бетонним покриттям з нанесе- нням консерваційних матеріалів (100 мм до поверхні майданчика)
	Середня					
	Легка					
Суглинок	Важкий	10...11 %	Збільшення швидкості призводить до підвищення інтенсивності зношування на всіх типах ґрунтів	Обробіток ґрунту слід проводити за якомога меншого вмісту патоки в поживних рештках. Для кожної сільськогосподарської культури існують оптимальні строки проведення обробітку ґрунту	Обробіток бажано проводити при найменшому ступені закріплення абразивних частинок у ґрунті, чого можна досягнути за якомога ранішого повторного обробітку, оптимальний вологості та "відмирання" кореневої системи	Під навісом з бетонним покриттям з нанесе- нням консерваційних матеріалів. Відстань від поверхні майдан- чика до поверхні - не менше 100 мм
	Середній					
	Легкий					
Супіщаний та піщаний	Важкий	9...10 %	Збільшення швидкості призводить до підвищення інтенсивності зношування на всіх типах ґрунтів	Обробіток ґрунту слід проводити за якомога меншого вмісту патоки в поживних рештках. Для кожної сільськогосподарської культури існують оптимальні строки проведення обробітку ґрунту	Обробіток бажано проводити при найменшому ступені закріплення абразивних частинок у ґрунті, чого можна досягнути за якомога ранішого повторного обробітку, оптимальний вологості та "відмирання" кореневої системи	Під навісом з бетонним покриттям з нанесе- нням консерваційних матеріалів. Відстань від поверхні майдан- чика до поверхні - не менше 100 мм
	Супіщаний					
	Пісок зв'язаний					
Пісок вільний		7...8 %				

Рис. 6.8. Комплексний підхід вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості стрілчатих лап

Спосіб зберігання робочих органів слід вибирати з реальних можливостей сільськогосподарських виробників. У закритих ангарах і під навісами переважно зберігається складна сільськогосподарська техніка (комбайни, сівалки тощо). Вибір місця зберігання для ґрунтообробної техніки виходить із залишкового принципу. У разі неможливості зберігати всю ґрунтообробну техніку під навісом, на відкритих майданчиках слід зберігати ґрунтообробні

машини з робочими органами, виготовленими з високоякісних сталей, оскільки вони менше піддаються корозійним процесам.

Грунт		Матеріал робочого органу	Покращення об'ємних та поверхневих властивостей	Нанесення зносостійкого покриття	Кут загострення	
Глина	Важка	Використовуючи високоякісні сталі (Hardox 500, борміні сталі) необхідно застосовувати леміші зі змінним долотом; використовуючи сталі 65Г, необхідно проводити зміцнення носової і лезової частин	Заготовки з високоякісної сталі прокатуються у двох перпендикулярних напрямках, а диски підлягають складній термо- та дробоструминній обробці Об'ємне загартування сталі 65Г проводити за температури 810...830 °С і середньому відпуску з дуже точною витримкою за температури 460...480 °С (HRC 39-42).	Нанесення зносостійкого покриття не забезпечить суттєвого підвищення довговічності та зносостійкості За відсутності зносостійкого шару необхідно застосовувати леміші зі змінним долотом	Кут загострення лезової частини знаходиться в межах 8...10°, носової частини - 20...27°.	
	Середня					
	Легка					
Суглинок	Важкий			Схема нанесення зносостійкого шару наведена на рис. 3.28. Зносотійкий шар повинен мати параметри відповідно до значень, представлених у табл. 3.7, 3.8, 5.20 та 5.21. Корекцію параметрів залежно від швидкості руху агрегату проводити за формулою 3.35.		
	Середній					
	Легкий					
Суцільний та піщаний	Важкий					
	Суцільний					
	Пісок зв'язаний					
Пісок вільний						

Грунт		Режими експлуатації				Спосіб зберігання	
Глина	Важка	Вол. ґрунту	Швидкість руху	Стан поживних рештків	Стан ґрунту	Леміші з високоякісних сталей: на відкритому майданчику з бетонним покриттям або під навісом з бетонним покриттям з нанесенням консерваційних матеріалів (100 мм до поверхні майданчика) Леміші з сталі 65Г: під навісом із бетонним покриттям із нанесенням консерваційних матеріалів. Відстань від поверхні майданчика до поверхні - не менше 100 мм.	
	Середня	13...17 %	Збільшення швидкості призводить до підвищення інтенсивності зношування на всіх типах ґрунтів	Обробіток ґрунту слід проводити за якомога меншого вмісту пилки в поживних решках. Для кожної сільськогосподарської культури існують оптимальні строки проведення обробітку ґрунту	Обробіток бажано проводити при найменшому ступені закріплення абразивних частинок у ґрунті, чого можна досягнути за якомога ранішого повторного обробітку, оптимальний вологості та "відмирання" кореневої системи		
	Легка						
Суглинок	Важкий						
	Середній	10...11 %					
	Легкий						
Суцільний та піщаний	Важкий						9...10 %
	Суцільний						
	Пісок зв'язаний	7...8 %					

Рис. 6.9. Комплексний підхід вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості лемешів плуга

Запропонований комплексний підхід можна легко адаптувати для інших типів робочих органів ґрунтообробних і посівних машин, які в процесі виконання технологічної операції взаємодіють із середовищем ґрунту.

Висновки по розділу 6

1. Установлено, що зміна вологості ґрунту призводить не тільки до зміни інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин, а й до зміни характеру зношування. У разі зростання вологості ґрунту його зношувальна здатність зростає до певної межі, яка характерна кожному типові ґрунту, після чого в зоні фрикційного контакту з'являється мастильний матеріал (вільна вода) і зношувальна здатність ґрунту починає зменшуватися. На пухких ґрунтах зміна вологості не призводить до зміни характеру зношування.

2. З'ясовано, що зростання швидкості руху ґрунтообробного агрегату призводить до зростання інтенсивності та зміни характеру зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Більш суттєве зростання інтенсивності зношування в разі зростання швидкості руху ґрунтообробного агрегату спостерігається на ґрунтах, які мають більшу зношувальну здатність. Слід зауважити, що для робочих органів виготовлених із високоякісних сталей (Hardox 500 та 28MnB5), притаманне менше зростання інтенсивності зношування в разі збільшення швидкості руху ґрунтообробного агрегату, порівняно з робочими органами, виготовленими зі сталі 65Г.

3. Показано, що наявність корозії на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин призводить до зменшення їхньої зносостійкості та довговічності. На основі проведених досліджень встановлено оптимальні способи зберігання ґрунтообробних машин в міжексплуатаційний період у різних ґрунтово-кліматичних зонах України, які дозволять суттєво сповільнити корозійні процеси на поверхні робочих органів, що зі свого боку забезпечить суттєве підвищення їхньої зносостійкості й довговічності.

4. Розроблено науково обґрунтовану комплексну систему експлуатації ґрунтообробних машин, яка дозволяє комплексно вирішити науково-прикладну проблему підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів (на прикладі дискового робочого органу (рис. 6.7), стрілкової лапи (рис. 6.8), лемеша (рис. 6.9)).

РОЗДІЛ 7

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНОГО КОМПЛЕКСНОГО ПІДХОДУ АДАПТАЦІЇ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

7.1. Виробнича перевірка та впровадження результатів дослідження у виробництво

Результати роботи впроваджені на підприємствах Житомирської та Вінницької областей (додаток Д).

Оцінку запропонованого комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин робили, розбивши запропоновану систему на такі критерії:

- наявність процесу самоорганізації різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин (самозагострювання) у впровадженні розроблених заходів;
- рівностійкість зношування робочих органів ґрунтообробних машин;
- підвищення зносостійкості в разі вибору запропонованого матеріалу або способу зміцнення для певного типу ґрунту;
- підвищення довговічності в разі вибору запропонованого матеріалу або способу зміцнення для певного типу ґрунту;
- підвищення довговічності та зносостійкості в разі вибору рекомендованих режимів експлуатації і способів зберігання.

Самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин можна оцінити двома показниками:

- безпосередньо вимірявши кут загострення робочих органів ґрунтообробних машин;
- оцінивши витрати пального енергетичним мобільним засобом у разі комплектування з ґрунтообробними машинами з різними робочими органами.

Вимірювання кута загострювання робочих органів ґрунтообробних машин у процесі їх експлуатації виконували відповідно до методики,

розробленої в праці [42]. Зліпки виконували швидкотвердним алібастром марки Г 15 (рис. 7.1).



а



б

Рис. 7.1. Вимірювання кута загострювання дискових робочих органів ґрунтообробних машин: а – зліпки, нанесені на різальні елементи дискових робочих органів; б – розрізаний зразок для проведення замірів кута загострювання

Результати досліджень процесу самоорганізації робочих органів ґрунтообробних машин представлено в табл. 7.1.

Таблиця 7.1

Результати досліджень процесу самоорганізації робочих органів ґрунтообробних машин (зміцнення поверхні робочих органів проводили із зовнішнього боку)

Робочий орган	Матеріал робочого органу	Початковий кут загострення	Ґрунт	Кут загострення*
1	2	3	4	5
Стрілчаста лапа (лезова частина)	28MnB5	Зовнішнє загострення 8°...10°	Супіщаний	20°...23°
			Середній суглинок	21°...23°
			Легка глина	26°...32°
	65Г		Супіщаний	17°...21°
			Середній суглинок	23°...25°
			Легка глина	31°...38°
	65Г+Т-620	Внутрішнє загострення 8°...10°	Супіщаний	16°...17°
			Середній суглинок	18°...20°
			Легка глина	22°...26°
	65Г+Т-590		Супіщаний	16°...17°
			Середній суглинок	18°...20°
			Легка глина	22°...26°

Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4	5
	65Г+М-Fe 6		Супіщаний	16°...18°
			Середній суглинок	18°...21°
			Легка глина	22°...28°
Стрілчаста лапа (носок)	28MnB5	Зовнішнє загострення 25°...30°	Супіщаний	44°...50°
			Середній суглинок	45°...52°
			Легка глина	56°...59°
	65Г		Супіщаний	42°...48°
			Середній суглинок	46°...54°
			Легка глина	57°...60°
	65Г+Т-620	Внутрішнє загострення 25°...30°	Супіщаний	34°...39°
			Середній суглинок	36°...44°
			Легка глина	44°...51°
	65Г+Т-590		Супіщаний	34°...38°
			Середній суглинок	37°...46°
			Легка глина	44°...51°
	65Г+М-Fe 6		Супіщаний	36°...42°
			Середній суглинок	39°...49°
			Легка глина	47°...56°
Дисковий робочий орган	28MnB5	Зовнішнє загострення 10°...20°	Супіщаний	29°...31°
			Середній суглинок	32°...34°
			Легка глина	35°...38°
	65Г		Супіщаний	27°...31°
			Середній суглинок	33°...35°
			Легка глина	36°...41°
	65Г+Т-620	Внутрішнє загострення 28°...34°	Супіщаний	27°...30°
			Середній суглинок	30°...31°
			Легка глина	33°...34°
	65Г+Т-590		Супіщаний	27°...30°
			Середній суглинок	30°...31°
			Легка глина	33°...34°
	65Г+М-Fe 6		Супіщаний	28°...30°
			Середній суглинок	30°...32°
			Легка глина	33°...36°
Леміш (лезова частина)	Hardox 500	Зовнішнє загострення 8°...10°	Супіщаний	26°...35°
			Середній суглинок	32°...48°
			Легка глина	52°...70°
	65Г		Супіщаний	22°...28°
			Середній суглинок	34°...49°
			Легка глина	50°...71°
	Л53		Супіщаний	29°...37°
			Середній суглинок	34°...51°
			Легка глина	58°...73°
	65Г+Т-590	Внутрішнє загострення 8°...10°	Супіщаний	19°...27°
			Середній суглинок	29°...40°
			Легка глина	46°...64°
	65Г+М-Fe 6		Супіщаний	19°...27°

Продовження таблиці 7.1

1	2	3	4	5
	65Г+Т-620		Середній суглинок	30°...41°
			Легка глина	46°...64°
			Супіщаний	18°...26°
			Середній суглинок	29°...38°
			Легка глина	46°...63°
Леміш (носова частина або долото для лемешів зі сталі Hardox 500)	Hardox 500	Зовнішнє загострення 20°...27°	Супіщаний	47°...51°
			Середній суглинок	49°...57°
			Легка глина	58°...79°
	65Г		Супіщаний	37°...46°
			Середній суглинок	51°...59°
			Легка глина	57°...78°
	Л53		Супіщаний	44°...50°
			Середній суглинок	50°...62°
			Легка глина	63°...79°
	65Г+Т-590		Внутрішнє загострення 20°...27°	Супіщаний
		Середній суглинок		32°...41°
		Легка глина		41°...49°
	65Г+М-Fe 6	Супіщаний		28°...35°
		Середній суглинок		34°...43°
		Легка глина		41°...49°
65Г+Т-620	Супіщаний	28°...34°		
	Середній суглинок	31°...38°		
	Легка глина	41°...47°		

* Кут загострення після досягнення стабільного значення в процесі експлуатації.

Зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин з дотриманням розроблених схем і встановлених критеріїв (схема – рис. 3.28, критерії – табл. 3.7, 3.8, 5.16, 5.17, 5.20 та 5.21) дозволяє суттєво покращити процес самозагострювання, що призводить до зменшення витрат пального та підвищення довговічності робочих органів.

Як видно з табл. 7.1, робочі органи ґрунтообробних машин, виготовлені зі сталі 65Г, на супіщаних ґрунтах самозагострюються набагато ефективніше, ніж робочі органи виготовлені із високоякісних сталей (Hardox 500 та 28MnB5). Проте високоякісні сталі більш якісно самозагострюються на суглинкових та глинистих ґрунтах.

Процес самозагострювання зміцнених робочих органів значно вищий на суглинкових і глинистих ґрунтах порівняно із серійними, а на супіщаних ця різниця не така суттєва. Матеріал нанесеного зносостійкого шару на

початковому етапі не має істотного впливу на процес формотворення (самозагострювання) під час експлуатації робочих органів (табл. 7.1). У подальшій експлуатації робочих органів із нанесеним зносостійким шаром, який забезпечує більшу зносостійкість та довговічність, процес самозагострювання був стабільним протягом більшого терміну експлуатації.

Об'єктивною оцінкою запропонованих заходів для забезпечення самоорганізації (самозагострювання) робочих органів ґрунтообробних машин є витрати пального мобільним енергетичним засобом під час виконання технологічної операції.

Процес самоорганізації (самозагострювання) робочих органів ґрунтообробних машин, досягнутий завдяки нанесенню зносостійкого шару, дозволив суттєво зменшити витрати пального в процесі експлуатації на суглинкових і глинистих ґрунтах та підвищити довговічність на супіщаних і піщаних ґрунтах, порівняно з використанням серійних дискових робочих органів (рис. 7.2). Дослідження проводили на універсальних дискових агрегатах УДА-4,5, що агрегувався з трактором ХТА-200-02.

Унаслідок процесу самозагострювання дискових робочих органів можна спостерігати зменшення витрат пального в середньому приблизно на 10%. Подібна закономірність спостерігалась для плугів (у середньому приблизно 14%) та культиваторів (у середньому приблизно 11%).

У процесі експлуатації ґрунтообробних машин відбувається нерівномірний знос робочих органів, пов'язаний з концентрацією напружень на різальних елементах. Нерівномірний знос призводить до передчасної втрати працездатного стану робочих органів. Для вирішення цієї проблеми розроблено відповідні рекомендації (розділи 3 та 5) для забезпечення рівностійкості зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Результати досліджень, з упровадження заходів недопущення передчасної втрати працездатного стану робочих органів ґрунтообробних машин представлено в табл. 7.2.

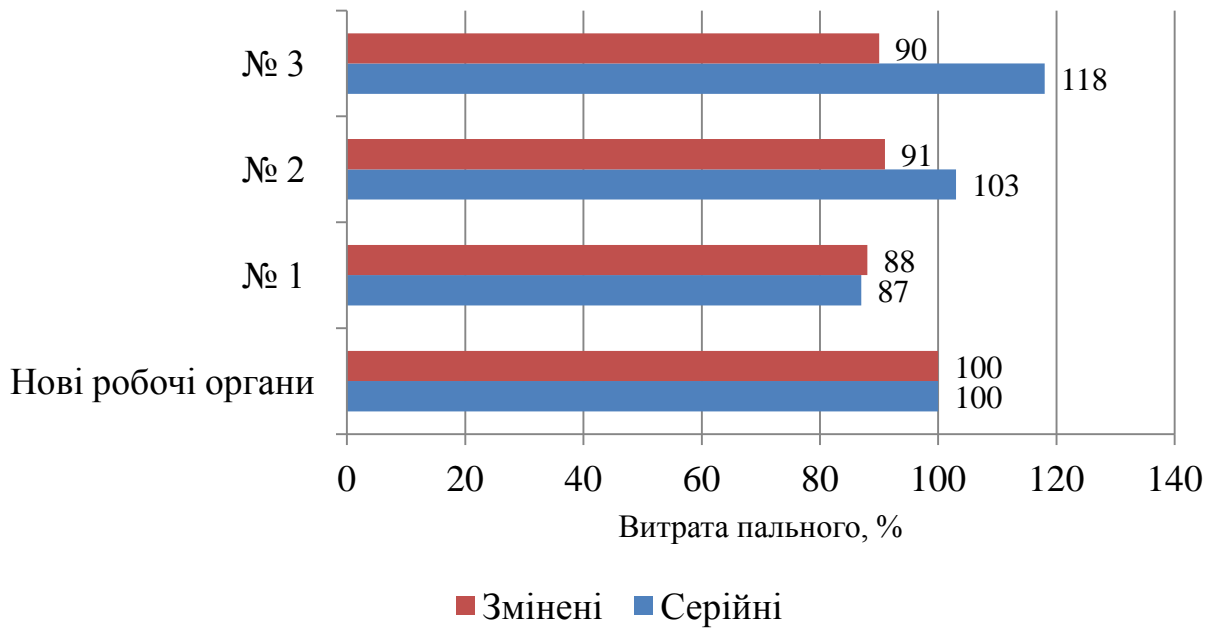


Рис. 7.2. Зміна витрат пального при початковій формі й під час досягнення форми природного зношування (для серійних робочих органів виготовлених зі сталі 65Г) та процесу самозагострювання (для зміцнених робочих органів виготовлених зі сталі 65Г та зміцнених електродом Т-620: № 1 – у процесі експлуатації на супіщаних ґрунтах; №2 – у процесі експлуатації на суглинкових ґрунтах; № 3 – у процесі експлуатації на легкій глині

Забезпечення рівностійкості зношування робочих органів у процесі експлуатації ґрунтообробних машин оцінювали співвідношенням інтенсивності зношування різних ділянок:

- для дискових вирізних робочих органів співвідношенням інтенсивності зношування зовнішнього і внутрішнього діаметрів;
- для лемешів співвідношенням інтенсивності зношування носка та леза;
- для стрілочастих лап співвідношенням інтенсивності зношування носка та крила.

Застосування зміцнювальних матеріалів та нанесення їх за запропонованою схемою дозволяє суттєво покращити рівностійкість

зношування робочих органів ґрунтообробних машин у процесі їхнього зношування.

Таблиця 7.2

**Рівностійкість зношування робочих органів у процесі експлуатації
ґрунтообробних машин (напрацювання дискових робочих органів – 60 га,
леміша – 4 га, стрілкової лапи – 10 га)**

Робочий орган ґрунтообробних машин	Матеріал	Ґрунт		
		Супіщаний	Середній суглинок	Легка глина
1	2	3	4	5
Дисковий РО	28MnB5	1,34	1,59	1,45
	65Г	1,31	1,67	1,87
	65Г+М-Fe 6	1,22	1,28	1,39
	65Г+Т-590	1,23	1,27	1,39
	65Г+Т-620	1,19	1,24	1,38
Стрілчаста лапа	28MnB5	1,18	1,98	2,06
	65Г	1,25	2,48	2,46
	65Г+М-Fe 6	1,16	1,74	1,96
	65Г+Т-590	1,18	1,69	1,81
	65Г+Т-620	1,14	1,66	1,82
Леміш	Hardox 500	1,47	2,18	2,19
	65Г	1,54	2,34	2,37
	Л53	1,56	2,30	2,39
	65Г+М-Fe 6	1,36	1,87	1,89
	65Г+Т-590	1,36	1,89	1,90
	65Г+Т-620	1,31	1,78	1,81

Результати дослідження впливу матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин і зносостійких покриттів на зносостійкість та довговічність різних типів робочих органів у процесі експлуатації на різних типах ґрунтів представлено в розділі 5 нашої праці. Загалом можна зробити висновок, що запропоновані способи зміцнення дозволяють суттєво підвищити

зносостійкість (в 1,13...3,33 раза) та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин (в 1,07...2,14 раза).

Визначення підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів ґрунтообробних машин унаслідок вибору рекомендованих режимів експлуатації та способів зберігання доволі складне завдання, оскільки це комплекс заходів, який повинен тривати протягом усього періоду експлуатації. Оцінити такий комплекс можна тільки з економічного погляду (підрозділ 7.2).

7.2. Техніко-економічний аналіз комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин

Економічну оцінку впровадження запропонованого комплексного підходу виконували на ґрунтообробних машинах в умовах трьох аграрних підприємств протягом 2017–2019 років відповідно до табл. 7.3.

Таблиця 7.3

Ґрунтообробні машини, які використовували в процесі дослідження для економічної оцінки комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів

Аграрне підприємство	Ґрунтообробна машина	Терміни проведення дослідження	Заходи для підвищення довговічності та зносостійкості	
			Прийняті в підприємстві	Розроблені
СФГ «Шар» Козятинського району, Вінницької області	УДА-4,5	2017–2019	+	+
ТОВ «ВП Полісся» Овруцького району Житомирської області	Культиватор «John Deere 2210»	2018–2019	+	+
	Плуг «Kverneland»	2017–2019	+	+
ТОВ " ТОВ «Аграрні Системні Технології» Попільнянського району Житомирської області	ПЛН-3-35	2018–2019	+	+

Економічну оцінку проводили за отриманим кінцевим результатом, тобто по зростанню довговічності робочих органів ґрунтообробних машин у період їх експлуатації. Робочі органи вибраковували в разі втрати працездатного стану (невиконання агротехнічних вимог). Результати досліджень підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин представлено в табл. 7.3.

Таблиця 7.3

**Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин
унаслідок запровадження запропонованого комплексного підходу**

Ґрунтообробна машина	Переважаючі ґрунти в підприємстві	Підвищення довговічності
УДА-4,5	Легка глина	1,97
Культиватор «John Deere 2210»	Супіщаний	1,84
Плуг «Kverneland»	Супіщаний	2,51
ПЛН-3-35	Суглинки	1,89

Унаслідок зміцнення електродом Т-620 довговічність стрілочастих лап зростає в 1,53 раза (табл. 5.15), а в разі застосування комплексного підходу вирішення цієї проблеми довговічність збільшується в 1,84 раза (тобто на зростання від інших заходів комплексного підходу становить 31%). В інших типах робочих органів ґрунтообробних машин також спостерігається суттєве зростання довговічності від застосування комплексного підходу, порівняно з простим зміцненням робочої поверхні (11% для дискових робочих органів і 18% у процесі експлуатації на супіщаних та 24% у процесі експлуатації на суглинкових ґрунтах для лемешів).

Економічну оцінку підвищення довговічності від запровадження комплексного підходу робили на дисковому універсальному агрегаті УДА-4,5 (табл. 7.4).

Економічна оцінка комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин на прикладі УДА-4,5

№	Показник	Агрегат	
		Серійний	Зміцнений + система підвищення довговічності
1	2	3	4
1.	Довговічність: одного дискового робочого органу, га агрегату, га	104 1248	205 2460
2.	Середні витрати пального за період експлуатації	7,3	6,8
3.	Початкова вартість робочого органу, грн	690	727, 24
4.	Економічний ефект унаслідок економії матеріалів, грн	-	14527,91
5.	Економія від зменшення витрат пального, грн	-	27675
6.	Економія від ліквідації операції загострювання під час експлуатації, грн	-	2760
7.	Економічний ефект унаслідок підвищення напрацювання, грн	-	9890
8.	Вартість додаткових засобів, матеріалів та заходів для впровадження запропонованого комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів, грн	-	11876
9.	Загальний економічний ефект від запропонованого комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів, грн	-	42976,91

Економічний ефект для інших ґрунтообробних машин від упровадження запропонованого комплексного підходу підвищення довговічності робочих органів становить 6...18 % від вартості нової машини за період експлуатації одного комплекту робочих органів.

Проведений розрахунок економічного ефекту від упровадження комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин є орієнтовний і не враховує впливу збереження працездатного стану машини на строки та якість виконання технологічних операцій. Для робочих органів, які визначають надійність ґрунтообробних машин, збереження працездатного стану може суттєво впливати на урожайність сільськогосподарських культур.

Висновки по розділу 7

1. Установлено, що зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин відповідно до розроблених схем і критеріїв дозволяє покращити процес самозагострювання протягом усього терміну експлуатації. Отримані результати засвідчують, що порівняно із серійними кут загострювання різальних елементів зміцнених робочих органів менший для стрілчастих лап на 6...32%, для лемешів на 8...19% та дискових робочих органів до 13%. Самоорганізація зміцнених різальних елементів робочих органів призводить до зменшення витрат дизельного пального, при комплектування мобільних енергетичних засобів з дисковими ґрунтообробними агрегатами в середньому приблизно на 10%, з плугами – 14% та з культиваторами – 11%.

2. З'ясовано, що застосування комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дозволяє зменшити нерівномірність їхнього зношування. Зменшення нерівномірності зношування складових частин робочих органів ґрунтообробних машин дозволяє істотно покращити їхню рівностійкість зношування, що унеможливить передчасну втрату працездатного стану.

3. Доведено, що застосування комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дозволяє підвищити їхню довговічність в 1,84...2,51 рази, та отримувати економічний ефект протягом всього терміну експлуатації в межах 13...18% від вартості нової машини.

ВИСНОВКИ

1. Установлено, що ґрунтообробні машини займають провідне місце в структурі машинно-тракторних парків аграрних підприємств, а їхня надійність і якість виконання технологічних операцій залежить від довговічності та зносостійкості робочих органів. Проведений аналіз робіт вітчизняних та зарубіжних учених з проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин дав змогу з'ясувати, що вирішення цієї проблеми, насамперед, базується на застосуванні зміцнювальних технологій для певних умов експлуатації. Фундаментальне її вирішення обумовлює застосування комплексного підходу з використанням цілого спектра технологічних, конструктивних й експлуатаційних методів підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів з урахуванням умов і режимів експлуатації ґрунтообробних машин.

2. Розроблено методологію вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин на основі адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації. Для її реалізації використано стандартні методи, методики та устаткування, а також розроблено особисто автором нові та вдосконалені.

3. Розроблено математичну модель підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням умов і режимів експлуатації. Побудовано структурно-логічну схему системи «робочий орган – ґрунт», що враховує сукупність процесів і явищ, які відбуваються в зоні фрикційного контакту при експлуатації ґрунтообробних машин. На основі виявлених закономірностей функціонування такої системи отримано рівняння енергетичного й масового балансу. Аналіз системи «робочий орган – ґрунт» визначив пріоритетні напрями вирішення науково-прикладної проблеми підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Підвищення

довговічності робочих органів ґрунтообробних машин обґрунтовано на основі молекулярно-механічної теорії тертя з отриманням рівняння динаміки зміни коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин і ґрунтом з урахуванням усіх видів тертя, які наявні в зоні фрикційного контакту.

З'ясовано, що величина коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів і ґрунтом залежить тільки від стану, у якому знаходиться система «робочий орган – ґрунт» і не залежить від того, як ця система прийшла в цей стан, саме тому даний процес необхідно описувати Марковським випадковим процесом.

Для визначення ймовірнісних значень коефіцієнта тертя між робочим органом і ґрунтом побудована відповідна система рівнянь Колгоморова.

4. Теоретично й експериментально встановлено вплив ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті на механізм та характер зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Виявлено, що з ростом ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті ймовірність виникнення процесів мікрорізання на поверхні робочих органів ґрунтообробних машин зростає. На основі результатів досліджень виявлено закономірності процесу самоорганізації середовища ґрунту. Показано, що в процесі самоорганізації середовища ґрунту відбувається зростання його абразивних властивостей.

5. Теоретичні дослідження особливостей зношування робочих органів ґрунтообробних машин, з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації дозволили запропонувати критерії досягнення ефекту самозагострювання та рівностійкості зношування лемішно-лапових та дискових робочих органів.

6. Установлено вплив типу ґрунту, його вологості та наявності біологічної фази на коефіцієнт внутрішнього тертя ґрунту та питоме зчеплення (ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті). Виявлено, що наявність біологічної фази (кореневої системи сільськогосподарських культур) призводить до зростання питомого зчеплення в 1,14–2,72 рази. З'ясовано, що зростання вологості ґрунту буде призводити до росту ступеня закріплення абразивних

частинок та коефіцієнта внутрішнього тертя в ґрунті, яке спостерігається до перенасичення ґрунту вологою, а після появи вільної води в ґрунті – ці показники будуть зменшуватися.

7. Визначено коефіцієнт форми абразивних частинок найбільш типових ґрунтів України та його вплив на зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин. Установлено залежність коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту від типу ґрунту, глибини залягання та розміру абразивних частинок. Виявлено, що зменшення коефіцієнта тертя відбувається під час взаємодії з робочими органами ґрунтообробних машин. Це підтверджується відсутністю залежності зміни коефіцієнта форми абразивних частинок від глибини залягання в орному шарі та лабораторними дослідженнями. Для абразивних частинок розміром до 0,10 мм коефіцієнт форми абразивних частинок знаходиться в межах 227,89–488,35, для абразивних частинок розміром 0,1–0,25 мм – у межах 183,27–386,24, для абразивних частинок 0,25–0,5 мм – 109,86–222,57, для абразивних частинок 0,5–0,75 мм – 91,53–227,46, для абразивних частинок 0,75–1 мм – 78,90–214,56.

8. Виявлено вплив матеріалу робочих органів ґрунтообробних машин, його термічної обробки, шорсткості та напрямку нерівностей на динамічний та статичний коефіцієнт тертя між поверхнею робочих органів та складовими частинами середовища ґрунту. З'ясовано, що процес тертя між робочим органом і ґрунтом не може бути пояснений законом Амонтон-Кулона, такий процес доцільно описувати з позиції молекулярно-механічної теорії тертя. Зменшення сил міжмолекулярної взаємодії між складовими частинами ґрунту та поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин завдяки пацифікації поверхневого шару (складна обробка сталі) або зменшенню площі фактичного контакту (збільшення шорсткості поверхні) призводить до зменшення статичного та динамічного коефіцієнтів тертя. Зростання динамічного коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів і ґрунтом спричиняє пропорційне зростання інтенсивності зношування робочих органів, що

необхідно враховувати під час конструювання робочих органів ґрунтообробних машин.

9. Установлено закономірність впливу наявності рослинних решток у середовищі ґрунту на зміну інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Проведені лабораторні дослідження засвідчують, що наявність сухих рослинних решток, у межах від 3 до 6 % призводить до зменшення інтенсивності зношування на 4–5 %, наявність вологих рослинних решток призводить до зростання на 5–9 %, при наявності рослинних решток до збирання (фаза колосіння для пшениці або молочно-воскової стиглості для кукурудзи) призводить до зростання на 15,4–18,6 %. В експлуатаційних умовах наявність рослинних решток підвищує інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин (у межах 8 %).

10. Виявлені зміни властивостей поверхневих шарів, утворення вторинних структур у зоні фрикційного контакту та інтенсивності зношування робочих органів ґрунтообробних машин дали змогу встановити раціональні матеріали для виготовлення серійних лемішно-лапових та дискових робочих органів ґрунтообробних машин з підвищеною довговічністю. Для дискових ґрунтообробних машин, які працюють в умовах піщаних та супіщаних ґрунтів, робочі органи слід виготовляти зі сталі 65 (сталь здатна до самонаклепу в процесі агресивного абразивного та ударно-абразивного зношування, спостережено підвищення початкової твердості на 15 %), а для умов глинистих і суглинкових ґрунтів – з борвмісної якісної сталі 28MnB5. Серійні лемішно-лапові робочі органи для всіх типів ґрунтів необхідно виготовляти з високоякісних зносостійких сталей, оскільки в умовах абразивного зношування вони проявляють здатність до підвищення твердості вторинних структур на поверхні тертя і мають вищу зносостійкість.

11. Установлено, що нанесення зносостійкого покриття дає можливість підвищити довговічність робочих органів ґрунтообробних машин: для зміцнених дискових робочих органів при експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,28–1,41 раза, на суглинках – в 1,11–1,24 раза та

на глинистих ґрунтах – в 1,07–1,18 раз; для зміцнених стрілочастих лап при експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,41–1,53 раз, на суглинках – в 1,48 раз та на глинистих ґрунтах – в 1,39–1,44 раз; для зміцнених лемішів при експлуатації їх на супіщаних ґрунтах довговічність підвищується в 1,82–2,13 раз, на суглинках – в 1,5–1,85 раз та на глинистих ґрунтах – в 1,34–1,52 раз. Отже, нанесення зносостійкого покриття на робочі органи ґрунтообробних машин більш ефективно на ґрунтах, які мають вищу зношувальну здатність (супіщані та піщані).

Виявлено закономірності впливу ґрунтово-кліматичних умов, режимів експлуатації та способів зберігання на довговічність і зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин. На основі експериментальних даних та теоретичних досліджень розроблено науково обґрунтовану систему експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин.

12. Сформульовано основні принципи підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації, які дозволяють підвищити довговічність робочих органів ґрунтообробних машин в 1,84–2,51 раз в залежності від типу робочих органів та ґрунтово-кліматичних умов. Економічна оцінка підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин комплексним підходом адаптації їх зносостійкості з урахуванням ґрунтово-кліматичних умов та режимів експлуатації засвідчила економію затрат у межах 6–18 % від вартості нової машини протягом експлуатації одного комплекту робочих органів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tylczak J. H. Abrasive wear. ASM Handbook. *Materials Park, OH, ASM International*. 1992. № 18. P. 184–190.
2. Сало В. М., Лещенко С. М., Богатирьова Д. В. Сільськогосподарські машини вітчизняного виробництва для реалізації систем ґрунтозахисних та енергоощадних технологій. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2018. Вип. 47, Ч. 1. С. 3–10.
3. Державна фіксальна служба України [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://sfs.gov.ua/ms/f3> (дата звернення : 14.03.2020).
4. Сільське господарство України. Статистичний збірник. Київ: Державна служба статистики України, 2017. 245 с.
5. Офіційний сайт АТ «Ельворті» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://elvorti.com/> (дата звернення: 14.03.2020).
6. Офіційний сайт ТОВ «Завод «Отікон» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://optikon.ua/> (дата звернення: 14.03.2020).
7. Офіційний сайт ВАТ «ЛКМЗ» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://lkmz.com/> (дата звернення: 14.03.2020).
8. Офіційний сайт ВАТ «Велес-Агро ЛТД» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.velesagro.com/> (дата звернення : 14.03.2020).
9. Офіційний сайт ТОВ НВП «БілоцерківМАЗ» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.bcmaz.com.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
10. Офіційний сайт ВАТ “Галещина машзавод” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://galmash.com.ua/ua> (дата звернення : 14.03.2020).
11. Офіційний сайт ВАТ “Уманьферммаш” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://fermmash.com/corp/index.php/ru/> (дата звернення : 14.03.2020).
12. Офіційний сайт ВАТ “Хмільниксільмаш” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://hmlniksilnash.business-guide.com.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).

13. Офіційний сайт Корпорації “Агро-Союз” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.agrosoyuz.com/ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
14. Офіційний сайт ВАТ ВО “ВОСХОД” [Електроний ресурс]. Режим доступу: <http://voshod.ua/ukr/> (дата звернення: 14.03.2020).
15. Офіційний сайт ВАТ “Завод “Фрегат” [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.fregat.mk.ua/ua/index.php> (дата звернення : 14.03.2020).
16. Офіційний сайт ТОВ АК «Фаворит» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://favorit-td.com.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
17. Пивовар В. Вітчизняна техніка для основного обробітку ґрунту. *Пропозиція*. 2010. [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://propozitsiya.com.ua/vitchiznyana-tehnika-dlya-osnovnogo-obrobitku-gruntu> (дата звернення : 14.03.2020).
18. Державна служба статистики [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
19. Офіційний сайт ДП «ЛЕМКЕН-Україна» [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://lemken.com.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
20. Офіційний сайт Weaving Machinery [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.weavingmachinery.net/> (дата звернення : 14.03.2020).
21. Офіційний сайт Great Plains [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.greatplainsint.com/uk> (дата звернення : 14.03.2020).
22. Офіційний сайт John Deere [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.deere.ua/uk/index.html> (дата звернення : 14.03.2020).
23. Офіційний сайт Case [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.caseih.com/emea/ua-ua/home> (дата звернення : 14.03.2020).
24. Офіційний сайт Amazone [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.amazone.net/default2009.asp> (дата звернення : 14.03.2020).
25. Офіційний сайт Vederstad [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.vaderstad.com/ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
26. Офіційний сайт Kverneland [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://sng.kverneland.com/> (дата звернення : 14.03.2020).

27. Офіційний сайт Kuhn [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.kuhn.ua/> (дата звернення : 14.03.2020).
28. Офіційний сайт Kleine [Електроний ресурс]. Режим доступу : <https://www.grimme.com/de> (дата звернення : 14.03.2020).
29. Офіційний сайт Bellota [Електроний ресурс]. Режим доступу: <https://www.bellota.com/> (дата звернення : 14.03.2020).
30. Сисолін П. В., Сало В. М., Кропівний В. М. . Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування: Кн. 1 : Машини для рільництва / ред. М. І. Черновол. Київ : Урожай, 2001. 384 с.
31. Morris N. L., Miller P. C. H., Orson J. H., Froud-Williams R. J. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment. *A review. Soil & Tillage Research*. 2010. № 108. P. 1–15. URL : <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.004> (Last accessed : 14.03.2020).
32. Гевко Р. Б., Ткаченко І. Г., Павх І. І. Машини сільськогосподарського виробництва : навч. посіб. Тернопіль, 2005. 228 с.
33. Жук А. Ф., Ревякин Е. Л. Развитие машин для минимальной и нулевой обработки почвы. Научно-аналитический обзор. Москва : Росинформагротех, 2007. 156 с.
34. Инаекян С. А. Научные основы повышения эффективности почвообрабатывающих машин для предпосевной обработки почвы : монография. Москва: ВИСХОМ, 1992. 115 с.
35. Канарёв Ф. М. Ротационные почвообрабатывающие машины и орудия : монография. Москва : Машиностроение, 1983. 142 с.
36. Маматов Ф. М., Мирзаев Б. С. Механико-технологические основы орудий для безотвальной противоэрозионной обработки почвы : монография. Ташкент : Voris-nashriyot, 2015. 126 с.
37. Нартов П. С. Дисковые почвообрабатывающие орудия : монография. Воронеж : Воронежский государственный университет (ВГУ), 1972. 184 с.

38. Синеоков Г. Н., Панов И. М. Теория и расчет почвообрабатывающих машин : Монография. Москва : Машиностроение, 1977. 328 с.
39. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Мачок Ю. В., Богатирьев Д. В. Машины для обробітку ґрунту та внесення добрив : навчальний посібник. Харків : Мачулін, 2016. 244 с.
40. Стрельбицкий В. Ф. Дисковые почвообрабатывающие машины : монография. Москва : Машиностроение, 1978. 135 с.
41. Теслюк Г. В., Волик Б. А., Сокол С. П., Кобець О. М., Семенюта А. М. Ґрунтообробні агрегати на основі дискових робочих органів : монографія. Дніпропетровськ : Акцент П.П., 2016. 143 с.
42. Новиков В. С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин. дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина. Москва, 2008. 331 с.
43. Новиков В. С. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин : монография. Москва : ФГБОУ ВПО МГАУ им В. П. Горячкина. 2013. 112 с
44. Бобрицкий В. М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.04 / Кіровоградський національний технічний університет. Кіровоград, 2007. 182 с.
45. Hutchings I. M. Leonardo da Vinci's studies of friction. *Wear*. 2016. P. 51–66.
46. Марков Д. П. Развитие представление о механизмах трения. *Трение и знос*. 2013. Том. 34. №1. С. 87–101.
47. Русско-белорусско-английский толковый словарь в области трения, изнашивания и смазки / под ред. Н. К. Мышкина. Гомель : Инфотрибо, 1996. 173 с.
48. Zum Gahr K.-H. Microstructure and Wear of Materials. Amsterdam – Oxford – New York – Tokyo : Elsevier Science Publishers. 1987. 559 p.

49. Шейнман Е. Л. Абразивный износ. Обзор Американской печати. *Трение и износ*. 2005. Том. 26, №1. С. 100–111.
50. Борак К. В. Підвищення зносостійкості робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь методом електроерозійної обробки : дис. ... канд. тех. наук : 05.02.04 / Житомирський національний агроекологічний університет. Житомир, 2013. 217 с.
51. Аулін В. В. Напружено-деформований стан ґрунту при його взаємодії з різальними елементами робочих органів ґрунтообробних машин. *Науковий вісник Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки*. 2010. №3. С. 6–17.
52. Трение, износ и микротвердость материалов: Избранные работы (к 120 летию со дня рождения) / Отв. ред. И. Г. Горячева. Москва : КРАСАНД, 2012. 512 с.
53. Добровольский А. Г., Кошеленко П. И. Абразивная износостойкость материалов : справочное пособие. Киев : Техника, 1989. 128 с.
54. ГОСТ 23.002 – 78 Обеспечение износостойкости изделий. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. Москва : Издательство стандартов, 1980. 15с.
55. Hokkirigawa K. Kato K. An experimental and theoretical investigation of ploughing, cutting and wedge formation during abrasive wear, *Tribology International*. 1988. Vol. 21, № 1. 51–57.
56. Тененбаум М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. Москва : Машиностроение, 1976. 271 с.
57. Крагельский И. В. Трение и износ. Москва : Машиностроение, 1968. 480 с.
58. Медеяев И. А., Албагачиев А. Ю., Сорокин Г. М. Физическая природа разрушения материалов при абразивном изнашивании. *Трение и износ*. 2004. Том 25, №2. С. 148–154.
59. Огородникова Н. П. Химическое взаимодействие металлов – меди, железа и марганца с α - и β -аминокислотами в водных и органических средах :

автореф. дис. на получение науч. степени канд. хим. наук : 02.00.04. Ростов-на-Дону, 2010. 24 с.

60. Огородникова Н. П., Старкова Н. Н., Рябухин Ю. И. Поведение стали в кислых средах, содержащих аминокислоты, как модель возможного окислительного растворения железа. *Вестник Астраханского государственного технического университета*. 2006. № 6. С. 51–55.

61. Stawicki T., Kostencki P., Białobrzaska B. Roughness of Ploughshare Working Surface and Mechanisms of Wear during Operation in Various Soils. *Metals*. 2018. № 8. 1042. URL : <https://doi.org/10.3390/met8121042>.

62. Крагельский И. В. Добычин М. Н., Комбалов В. С. Основы расчетов на трение и износ. Москва : Машиностроение, 1977. 526 с.

63. Костецкий Б. И. Сопротивление изнашиванию деталей машин. Москва-Киев : МАШГИЗ, 1959. 478 с.

64. Рыбакова Л. М. Структура и износостойкость металла. Москва : Машиностроение, 1982. 212 с.

65. Кащеев В. Н. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 1978. 213 с.

66. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Статистическая физика. Часть 1. Москва : Физматлит, 2005. 616 с.

67. Борак К. В., Руденко В. Г., Кравчук А. В., Добранський С. С. Фізичні, хімічні та механічні процеси в трибосистемі «робочий орган – ґрунт». *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка : Технічні науки*. 2017. Вип. 181. С. 143–147.

68. Kostencki P., Borowiak P. Temperature of ploughshare material in the course of ploughing. *Bimonthly Tribologia* 2016. 266 (2). P. 45-59. URL : <https://doi.org/10.5604/01.3001.0010.7563>.

69. Ларченков Л. В., Протасеня М. Л., Протасеня И. О. Проектирование сельскохозяйственной техники. *Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. 2015. Вып. 29. С. 147–156.

70. Алексеев С. И., Хисамов Р. Р. Трение грунта о вертикальную стенку и его влияние на работу основания в шпунтовой обойме. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. Санкт-Петербург. 2013. № 4. С. 79–87.
71. Алексеев В. В., Максимов И. И., Мишин П. В. Получение функциональной зависимости для коэффициента трения в почвах. *Вестник НГИЭИ*. 2018. №5 (84). С. 34–43.
72. Ружьев В. А., Ожегов Н. М., Капошко Д. А. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин с учетом экологических требований. *Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета*. 2015. №38. С. 254–259.
73. Лещенко С. М., Сало В. М. Шляхи підвищення ефективності роботи комбінованих чизельних ґрунтообробних знарядь з додатковими деформаторами. *Механіко-технологічні процеси, виконавці органи та машини для рослинництва*. 2016. Вип. 4. С. 31–37.
74. Булгаков В. М., Адамчук В. В., Калетнік Г. М., Головач І. В., Горобей В. П. Механіко-технологічне обґрунтування параметрів комбінованого сошника селекційної сівалки. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2016. Вип. 10/1. (29). С. 38–42.
75. Адамчук В. В., Булгаков В. М., Головач І. В., Горобей В. П. Теоретичне та експериментальне обґрунтування комбінованого дводискового-анкерного сошника. *Механізація та електрифікація сільського господарства: Загальнодержавний збірник*. Глеваха, 2016. Вип. №3 (102). С. 11–19.
76. Abbaspour-Gilandeh Y., Hasankhani-Ghavam F., Shahgoli G., Shrabian V. R., Abbaspour-Gilandeh M. Investigation of the effect of soil moisture content, contact surface material and soil texture on soil friction and soil adhesion coefficients. *Acta technologica agriculturae*. 2018. Tom 21, № 2. P. 44–50.
77. Marani S. M., Shahgoli G., Moinfar A. Effect of nano coating materials on reduction of soil adhesion and external friction. *Soil & tillage research*. 2019. Tom 193. P. 42–49.

78. Аулін В. В., Бобрицький В. М., Солових Є. К. Аналіз характеру зношування лез ґрунторіжучих деталей та підвищення їх ресурсу лазерними технологіями. *Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2005. Вип. 35. С. 153–157.

79. Бойко А. И., Балабуха А. В. Исследование формы естественного износа монометаллических лезвий почвообрабатывающих машин. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2000. Вип. 6. С. 78–82.

80. Износ деталей сельскохозяйственных машин / под. ред. М. М. Севернева. Ленинград : Колос, 1972. 288 с.

81. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / под. ред. М. М. Севернева. Минск : Беларус. навука, 2011. 333 с.

82. Костецкий Б. И. Износостойкость деталей машин. Киев, Москва : МАШГИЗ, 1950, 168 с.

83. Костецкий Б. И. Трение, смазка и знос в машинах. Киев : Техніка. 1970. 396 с.

84. Аулін В. В., Тихий А. А. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами : монографія. Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2017. 278 с.

85. Аулін В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.04 / Хмельниц. нац. ун-т. Хмельницький, 2015. 447 с.

86. Блохин В. Н., Котиков Ф. Н., Случевский А. М. Исследование износа рабочей поверхности лемеха от удельного давления и скорости движения абразивной частицы почвы. *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2016. №2, (54). С. 93-97.

87. Ерохин М. Н., Новиков В. С. Повышение прочности и износостойкости лемеха плуга. *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина»*. 2008. №3. С. 100–107.

88. Дудников А. А., Беловод А. И., Пасюта А. Г., Келемеш А. А., Горбенко А. В. Технологические способы повышения долговечности и ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 5/1, (25) С. 4–7.

89. Денисенко М. І., Войтюк В. Д. Зміцнення лез ґрунтообробних робочих органів сільськогосподарських машин з утворенням ефекту самозагострювання. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. №36. С. 175–182.

90. Денисенко М. Опальчук А. Зношування та підвищення довговічності робочих органів сільськогосподарських машин. *Вісник ТНТУ*. 2011. Спецвипуск, Частина 2. С. 201–210.

91. Каденко В. С. Аналіз методів підвищення довговічності ґрунтообробних робочих органів. *Вісник ХНТУСГ ім. П.Василенка*. 2014. Випуск 145. С. 144–148.

92. Ковальчук Ю. О., Дідур В. В., Кравченко В. В. Застосування лазерного зміцнення сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних знарядь. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2012. Вип. 25, ч. 1 С. 74–80.

93. Ковальчук Ю. О., Дідур В. В., Невзоров А. В. Глибина та мікротвердість зміцненого лазером шару сталі 65Г для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. 2015. Вип. 226. С. 295–301.

94. Дудніков А. А., Біловод О. І, Пасюта А. Г. Підвищення надійності робочих органів ґрунтообробних машин. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2014. № 3. С. 172–177.
95. Посонський С. Ф., Бабак О. П. Оптимізація технологічних параметрів індукційного наплавлення композиційним порошком робочих органів ґрунтообробних машин зі сталі Л53. *Проблеми трибології*. 2017. № 3. С. 82–88.
96. Dizdar S., Maroli B. Abrasive wear resistance of thermal surfacing materials for soil tillage applications. *International Thermal Spray Conference and Exposition: Innovative Coating Solutions for the Global Economy, ITSC 2013*. Busan, South Korea. URL : https://www.hoganas.com/globalassets/download-media/technical-papers/sco/t5_eng_abrasive_wear_resistance_of_thermally_surfaced_materials_for_soil_tillage_applications.pdf (Last accessed : 04.02.2019).
97. Pérez G., González H., Toro A. Desgaste abrasivo de cuchillas de arado rotativo en un suelo franco arenoso. *DYNA*. 2010. Vol. 77, Núm. 162. p. 105–114.
98. Kalacska A., Baets P., Fauconnier D., Schramm F., Frerichs L., Sukumaran J. Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines. *Wear*. 2020. Vol. 442-443. URL : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203107> (Last accessed : 04.02.2019).
99. Lemecha M., Napiórkowski J., Ligierf K. orecasting the Wearing of Ploughshares Parts Under Operating Conditions. *Tribologia*. 2019. №4 p. 33–39. DOI: 10.5604/01.3001.0013.5963
100. Miller A. E. Wear in tillage tools. *Wear Control Handbook*. 1980. p. 987–998.
101. Quirke S. J. Abrasive wear testing cf steels in soil. Department of Materials Engineering University of Cape Town. 1987.136 p.
102. Zhang J., Kushwaha R. L. Wear and draft of cultivator sweeps with hardened edges. *Canadian agricultural engineering*. 1995. Vol. 37, №. 1. P. 41–47.

103. Graff L., Roberge R., Crowe T. Wear of Ripper Point Hardsurfacing. *ASABE Section Meeting Presentation*. 2007. P. 2–10.
104. Horvat Z., Filipovic D. Kosutic S. Reduction of mouldboard plough share wear by a combination technique of hardfacing. *Tribology International*. 2008. 41. P. 778–782. URL : <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.01.008> (Last accessed : 04.02.2019).
105. Natsis A., Petropoulos G., Pandazaras C. Influence of local soil conditions on mouldboard ploughshare abrasive wear. *Tribology International*, 2007. p. 151–157. URL : <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.06.002> (Last accessed : 03.02.2019).
106. Singh J., Chatha S. S, Sidhu B. S. Effect Of Surface Alloying On Wear Behaviour OF En-47 Steel. *Materials Today : Proceedings*. 2020. Vol. 21, Part 2. P. 1340–1349. URL : <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.172> (Last accessed : 23.12.2018).
107. Nalbant M., Palali A. T. Effects of different material coatings on the wearing of plowshares in soil tillage. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. 2011. № 35 (3). P. 215–223. URL : DOI: 10.3906/tar-0904-30
108. Yazici A. Wear behavior of carbonitride-treated ploughshares produced from 30MnB5 steel for soil tillage applications. *Metal Science and Heat Treatment*. 2011. Vol. 53. P. 248–253. URL : <https://doi.org/10.1007/s11041-011-9377-z>.
109. Zein El-Din. A. M, Saad F. A., Abdel Hamied R. G. Effect of New Hard Facing Materials of Tillage Tools on Draft and Roughness. *Alexandria Journal of Agricultural Science*. 2016. Vol. 61, № 3. p. 243–251.
110. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учебник для технических вузов 2-е изд. переработ. и доп. / под ред. А. В. Чичинадзе. Москва : Машиностроение, 2001. 664с.
111. Yang C. J., Huang X. P., Wu J. F., Wan F. X. Friction and Wear Behavior of 45# Steel with Different Plant Abrasive. *Advanced Materials Research*. 2013. p. 74–77.

112. Васильев С. П., Ермолов Л. С. Об изнашивающей способности почв. *Повышение долговечности рабочих деталей почвообрабатывающих машин*. 1960. С. 130–141.
113. Zdravecká E., Tkáčová J., Ondáč M. Effect of microstructure factors on abrasion resistance of high-strength steels. *Research in Agricultural Engineering*. 2014. № 60(3). p. 115-120.
114. Беспалов С. А. Металловедческие аспекты в процессах разрушения металлических материалов при трении. *Успехи физики металлов*. 2009. Т. 10. С. 415–435.
115. Wang Q., Li X. Effects of Nb, V, and W on Microstructure and Abrasion Resistance of Fe-Cr-C Hardfacing Alloys. *Welding Journal*. 2010. Vol. 89. P. 133–139.
116. Zhang J., Gao Y., Xing J., Ma S., Yi D, Yan J. Effects of chromium addition on microstructure and abrasion resistance of Fe–B cast alloy. *Tribology Letters*. 2011. P. 31–39.
117. Ma S., Zhang J. Wear resistant high boron cast alloy. A review. *Reviews on advanced materials science*. 2016. Vol. 44 №1. p. 54–62.
118. Kulka M., Mikolajczak D., Makuch N., Dziarski P., Miklaszewski A. Wear resistance improvement of austenitic 316L steel by laser alloying with boron. *Surface and Coatings Technology*. 2016. Vol. 291. P. 292–313.
119. Братковский Е. В., Турушева А. И. Оптимизация химического состава сталей с целью повышения ударно-абразивной стойкости. *Актуальные проблемы современной науки , техники и образования*. 2019. Т. 10. №1. С. 27–29.
120. Шейнман Е. Л. Абразивный износ. Обзор американской печати. Абразивная стойкость материалов. *Трение и износ*. 2006. Том 27, №1. С. 110–122.
121. Курлов А. С., Гусев А. И. Физика и химия карбидов вольфрама. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2013. 272 с.
122. Мороз А. Н., Глотка А. А., Боляк В. Р., Терехов В. Н. Влияние карбидной фазы на износ стали 110Х18М. *Металлургия*. 2014. № 1(31). С. 43–48.

123. Ayadi S., Hadji A. Effect of Heat Treatments on the Microstructure and Wear Resistance of a Modified Hadfield Steel. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2019. vol. 41, №. 5, p. 607–620. URL : <https://doi.org/10.15407/mfint.41.05.0607>.

124. Li C., Deng X., Huang L., Jia Y., Wan Z. Effect of temperature on microstructure, properties and sliding wear behavior of low alloy wear-resistant martensitic steel. *Wear*. 2020. Vol. 442–443. URL : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203125>

125. Wu D., Zhang H., Liu S., Li Y., Li Z., Zou Y. Effect of Microstructure on Wear Resistance of Low-Alloy High-Strength Wear-Resistant Steel. *International journal of electrochemical science*. 2019. №14. p. 7570-7581. doi: 10.20964/2019.08.20

126. Bidulsky R.; Grande M. A., Zago A., Brytan Z., Bidulska J. Wear resistance of various type sintered steels. *Archives of metallurgy and materials*. 2010. Tom 55 (3). P. 623–629.

127. Кузін О. А., Безпалов С. А. Роль структурного стану границь зерен під час контактного руйнування покращуваних сталей. *Вісник Державного університету «Львівська політехніка»*. 2000. № 394 С. 129–133.

128. Малінов Л. С., Мілентьєв В. О., Солідор Н. А. Вплив режимів термічної обробки на мікроструктуру, зносостійкість та механічні властивості високохромистих сталей. *Інноваційні ресурсозбережні матеріали та зміцнювальні технології* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. 6-8 червня 2012, м. Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2012. С. 91–95.

129. Куцова В. З., Богун Л. І., Лавриць С. М. Структура та зносостійкість поверхневих шарів сталі 45 при напиленні з різним тиском повітря. *Журнал металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. №5 (296). С. 47–51.

130. Бриков М. М. Розробка та застосування матеріалознавчих основ підвищення зносостійкості залізобуглецевих сплавів при абразивному зношуванні : автореф. дис... д-ра техн. наук : 05.02.01. Запоріжжя, 2008. 36 с.

131. Беспалов С. А. Підвищення опору зношуванню покращуваних сталей шляхом оптимізації мікроструктури : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.16.01. Київ, 2001. 18 с.
132. Ефременко В. Г., Ткаченко Ф. К., Ерёменко Т. А. Влияние фазового и структурного состояния сплавов на основе железа на износостойкость в условиях помола высокоабразивного материала. *Вісн. Приазов. держ. техн. ун-ту*. 2003. Вип. 13. С. 113–117.
133. Брыков М. Н. Абразивное изнашивание железоуглеродистых сплавов. *Трение и износ*. Том 27, № 1. С. 105–109.
134. Hawk J. A., Wilson R. D., Danks D. R., Catrepillar M. T. Abrasive wear failures. *ASM International*. 2002. № 11. P. 906–921.
135. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів : підручник / за ред. С. С. Яцуна. Київ : Мета, 2003. 448 с.
136. Бартенев И. М., Поздняков Е. В. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Лесотехнический журнал*. 2013. № 3. С. 114–123.
137. Каплук Г. П. Исследование влияния свойств почв на долговечность деталей рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Изд. Академии сельскохозяйственных наук БССР*, 1966. С. 54–68.
138. Rabinowicz E., Dunn L. A., Russell P. G. A study of abrasive wear under three-body conditions. *Wear*. 1961. Vol. 4. P. 345–355. URL : [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(61\)90002-3](https://doi.org/10.1016/0043-1648(61)90002-3).
139. Natsisa A., Papadakis G., Pitsilis J. The Influence of Soil Type, Soil Water and Share Sharpness of a Mouldboard Plough on Energy Consumption, Rate of Work and Tillage Quality. *Journal of Agricultural Engineering*. 1999. Vol. 72. P. 171–176. URL : <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0360>.
140. Singh J., Chatha S. S., Sidhu B. S. Influence of soil conditions on abrasion wear behaviour of tillage implements. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology. Special Issue AFTMME-2017*. 2017. P. 258–263

141. Быков В. Ф. Малютин М. И. Изнашивающая способность почв и износ дисков. *Актуальные проблемы лесного комплекса*. 2008. URL : http://science-bsea.narod.ru/2008/leskomp_2008/bykov_iznos.htm. (дата звернення: 14.03.2020).
142. Кожухова Н. Ю. Влияние состава почв на интенсивность изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2010. №1 (9). С. 30–36.
143. Клей И. Р. Основы выбора материалов для работы в условиях газоабразивного изнашивания. *Трение и износ*. 1980. Том 1, № 2. С. 263–271.
144. Тененбаум М. М. Износостойкость деталей и долговечность горных машин. Москва : Госгортехника, 1960. 246 с.
145. Тененбаум М. М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин. Москва : Машиностроение, 1966. 332 с.
146. Wellinger K. Einfluß der Korngröße von Quarzstaub auf das Verschleißverhalten verschiedener. *Werkstoffpaarungen. VDI-Ztschr.* 1950. №15. P. 371–375.
147. Гончар И. С. Изнашивающая способность почв Полесья. *Повышение долговечности рабочих деталей почвообрабатывающих машин*. Москва : Машиностроение, 1960. С. 124–129.
148. Coronado J. J. Effect of Abrasive Size on Wear. *Abrasion Resistance of Materials*. 2012. p. 167–184.
149. Sevim I., Eryurek B. Effect of abrasive particle size on wear resistance in non-heattreated steels. *Kovove Materialy-Metallic Materials*. 2005. № 43. p. 158–168.
150. Марчук В. Є. Вплив зернистості абразиву на зносостійкість дискретних поверхонь. *Проблеми тертя та зношування*. 2010. Вип. 53. С. 139–146.

151. Тадольдер Ю. А. Влияние геометрии абразивного зерна на интенсивность изнашивания металлов в потоке абразивных частиц. *Труды Талл. политехи. ин-та, Сер. А*. 1966. Вып. 237. С. 15–22.
152. Берштейн Д. Б., Кисетова Н. И., Соркина Е. М., Шеко И. Б. Макрогиометрия и изнашивающая способность почвенных абразивных частиц. *Трение и износ*. 1992. Том 13, № 2. С. 333–339.
153. Hoormazdi G., Küpferle J., Röttger A., Theisen W., Hack K. A Concept for the Estimation of Soil-Tool Abrasive Wear Using ASTM-G65 Test Data. *International Journal of Civil Engineering*. 2019. № 17. P. 103-111. URL : <https://doi.org/10.1007/s40999-018-0333-9>.
154. Фадин В. В., Алеутдинова М. И., Колубаев А. В. Влияние электрического тока высокой плотности на износ и среднюю температуру трибоконтакта сталь/сталь. *Трение и износ*. 2018. Том 39, № 4. С. 370–375.
155. Гаркунов Д. Н. Триботехника. Москва : Машиностроение, 1985. 424 с.
156. Шитов А. Н. Повышение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин с применением импульсного электроконтактного нагрева: На примере лемеха плуга : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». Москва, 2005. 162 с.
157. Гюнтер Х. О., Бессер Д. влиянии частиц минерального происхождения на характер износа. *Теоретические и прикладные задачи трения, износа и смазки машин*. 1982. С. 227–237.
158. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. Москва : Наука, 1970. 252 с.
159. Хрущов М. М., Бабичев М. А. Исследования изнашивания металлов. Москва : Издательство АН СССР, 1960. 272 с.
160. Хрущов М. М. Повышение долговечности рабочих деталей почвообрабатывающих машин. Москва : Машиздат, 1960. 200 с.

161. Scandell F., Scandell R. Development of hardfacing material in Fe-Cr-Nb-C system for use under highly abrasive conditions. *Mater. Sci. Technol.* 2004. Vol. 20. P. 92–105.
162. Al-Rubaine K. C. Equivalent hardness concept and two-body abrasion of iron-base alloys. *Wear.* 2000. Vol. 243. № 1–2. P. 92–100.
163. Pintaude G., Sinatora A., Tanaka D. K. The effects of abrasive particle size on the sliding friction coefficient of steel using a spiral pin-on- disk apparatus. *Wear.* 2003. № 1. P. 55–59.
164. Gao Y. X., Fan H. A micro-mechanism based analysis for size-dependent indentation hardness. *J. of Materials Science.* 2002. №37. P. 4493-4498.
165. Opalka S. M., Hector L. G., Schmid S. R., Reich R. A., Epp J. M. Boundary additive effect on abrasive wear during single asperity plowing of 3004 aluminum alloy. *J. of Tribology.* 1999. №121. P. 384–393.
166. De Pellegrin D. S., Stachowiak G. V. Sharpness of abrasive particles and surfaces. *Wear.* 2004. №6. 614–622.
167. Ткачев В. Н. Работоспособность деталей в условиях абразивного изнашивания. Москва : Машиностроение, 1995. 336 с.
168. Ткачев В. Н. Методы повышения долговечности деталей машин Москва : Машиностроение, 1971. 272.
169. Мышкин Н. К., Горячева И. Г. Трибология: тенденции полувекового развития. *Трение и износ.* 2016. Том 37, №6. С. 665–669.
170. Richardson R. C. D. Wear of Metals by Relatively Soft Abrasives. *Wear.* 1968. Vol. 11. p. 245–275.
171. Richardson R. C. D. The maximum hardness of strained surfaces and the abrasive wear of metals and alloys. *Wear.* 1967. Vol. 10(5). p. 353–382.
172. Richardson R. C. D. The wear of metallic materials by soil—Practical phenomena. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 1967. Vol. 12(1). 22–39.
173. Moore M. A. A Review of Two Body Abrasive Wear. *Wear* 1974. Vol. 27. p 1–17.

174. Moore M. A., Richardson R. C. D., Attwood D. G. The Limiting Strength of Worn Metal Surfaces. *Metal Transactions*. 1972. Vol. 3. p 2485–2491.
175. Moore M. A. Abrasive Wear in Fundamentals of Friction and Wear. *ASM, Metals Park*. 1980.
176. Moore M. A. Abrasive Wear by Soil. *Tribology International*. 1975. Vol. 8. p. 105–110. URL : [https://doi.org/10.1016/0301-679X\(75\)90027-4](https://doi.org/10.1016/0301-679X(75)90027-4).
177. Тененбаум М. М., Шамшетов С. Н. Износостойкость и долговечность сельскохозяйственных машин. Нукус: Каракалпакстан, 1986. 150 с.
178. Рабинович А. Ш., Сальников В. А. Опыт внедрения самозатачивающихся плужных лемехов. *Техника в сельском хозяйстве*. 1961. № 1. С. 27–30.
179. Рабинович А. Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворежущие детали машиню. Москва : ГОСНИТИ, 1962. 106 с.
180. Михальченков А. М., Будко С. И., Киселева Л. С. Стрельчатая лапа культиватора повышенной износостойкости с эффектом самозатачивания. *Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2011. С. 101–103.
181. Михальченков А. М., Тюрева А. А., Козарев И. В. Повышение износостойкости плужных лемехов технологическими методами. *Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии*. 2015. С. 51–53.
182. Михальченков А. М., Тюрева А. А., Паршиков П. А. Повышение износостойкости плужных лемехов упрочнением наиболее вероятных зон износа. *Конструирование, использование, надежность машин сельскохозяйственного назначения*. 2006. Ч. 1. С. 234–239.
183. Михальченков А. М., Тюрева А. А., Михальченкова М. А. Повышение износостойкости плужных лемехов нанесением упрочняющих валиков в области наибольшего износа. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2007. №9. С. 17–19.

184. Михальченков А. М., Капошко Д. А. Повышение ресурса плужных корпусов сварочным армированием. *Ремонт, восстановление, модернизация*. 2005. № 7. С. 20–24.

185. Михальченков А. М. Восстановление деталей двухслойной наплавкой. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. Москва ; 1995. №1. С. 22-23.

186. Сидоров С. А. Обоснование эффективных способов повышения работоспособности и износостойкости сферических дисков почвообрабатывающих машин: дис. канд. ... техн. наук. 05.20.04 / Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина. Москва, 1996. 320 с.

187. Сидоров С. А. Повышение долговечности и работоспособности рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий, применяемых в сельском и лесном хозяйствах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.20.01, 05.21.01 / Всерос. науч.-исслед. ин-т с.-х. машиностроения им. В. П. Горячкина. Москва, 2007. 441 с.

188. Сидоров С. А. Повышение надежности и работоспособности сферических дисков луцильников и борон. *Повышение надежности и технологичности ремонта сельскохозяйственных машин*. 1987. Вып. 240. С. 85–91.

189. Сидоров С. А. Повышение ресурса почворезущих органов наплавочными сплавами. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 2003. № 8. С. 20–22.

190. Сидоров С. А. Преимущества двойной заточки двухслойного наплавленного лезвия. *Тракторы и сельскохозяйственные машины*. 1998. №10. С. 42–43.

191. Сидоров С. А. Совершенствование конструкции и упрочнение дисковых рабочих органов. *Механизация и электрификация сельского хозяйства*. 2003. №8 С. 30–32.

192. Елагина О. Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин : учебное пособие. Москва : Университетская книга. 2009. 485 с.

193. Бойцов В. Б., Чернявский А. О. Технологические методы повышения прочности и долговечности : учебное пособие для студентов вузов. Москва: Машиностроение, 2005. 128 с.

194. Елизаветин М. А., Сатель Э. А. Технологические способы повышения долговечности машин. Москва : Машиностроение, 1969. 400 с.

195. Lebedev A., Lebedev P., Zakharin A., Maryin N., Zhevora Y Improving the reliability and efficiency of tillage machines. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019 Vol. 403. URL : <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012059>.

196. Денисенко М. І., Рубльов В. І. Підвищення довговічності робочих органів ґрунтообробних машин з використанням точкового зміцнення. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2011. № 24, ч. 2. С. 28–35.

197. Колпаков А. В. Технология упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Вестник НГИЭИ*. 2010. С. 40-46.

198. Китргизов В. Е., Шишкин К. П., Балданов К. П., Повышение долговечности плужных лемехов при восстановлении наплавкой угольным электродом. *Вестник ИРГСХА*. 2010. Вып 38. С. 65–70.

199. Титов Н. В. Упрочнение рабочих органов машин, эксплуатируемых в абразивной среде. *Modern problems and ways of their solution in science, transport, production and education*. 2012. URL : <https://www.sworld.com.ua/konfer29/704.pdf>.

200. Лялякин В. П., Аулов В. Ф., Ишков А. В., Кривочуров Н. Т., Иванайский В. В., Соколов А. В., Коваль Д. В., Дрейер Х., Швамм В. Износ долот анкерных сошников сеялки PRIMERA DMC-9000 упрочненных комбинированными покрытиями в условиях Алтайского края. *Вестник*

Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 12 (122). С. 124–132.

201. Щицын В. Ю., Эмтебал К. Э. С., Волков А. А. Технология вибродугового упрочнения с использованием ферродобавок применительно к условиям Республики Куба. *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет им. В. П. Горячкина»*, 2018. С. 35–39.

202. Пулька Ч. В., Сенчишин В. С., Шарик М. В. Підвищення довговічності деталей ґрунтообробних сільськогосподарських машин з використанням різних методів наплавлення. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортних комплексів*. 2018. С. 75–89.

203. Сенчишин В. С., Пулька Ч. В. Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин (обзор). *Автоматическая сварка*. 2012. № 9 (713). С. 48–54.

204. Ľavodová M., Kalincová D., Kotus M., Pavlík Ľ. The Possibility of Increasing the Wearing Resistance of Mulcher Tools. *Acta Technologica Agriculturae*. 2018. Vol. 21 (2) p. 87–93. URL : DOI: 10.2478/ata-2018-0016

205. Волощенко С. М., Гогаев К. А., Аскеров М. Г., Миропольский А. М. Применение высокопрочного бейнитного чугуна для производства сменных деталей ґрунтообрабатывающей сельхозтехники. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2017. № 32 (1254) С. 15–18.

206. Hrab P., Müller M. Research of overlays influence on ploughshare lifetime. *Research in Agricultural Engineering*. 2013, Vol. 59. №. 4. P. 147–152. URL : <https://doi.org/10.17221/3/2013-rae>.

207. Shakhov V., Semjons Ivanovs S., Uchkin P., Ushakov Y. Studies in coatings for working bodies of deep-rippers recovered by plasma surfacing. *18th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development*. Jelgava : Latvia. p. 44–49. URL : <https://doi.org/10.22616/erdev2019.18.n031>.

208. Strebkov S., Slobodyuk A., Bondarev A., Sakhnov A. Strengthening of cultivator paws with electrosark doping. *18th International Scientific Conference on Engineering for Rural Development*. Jelgava : Latvia. p. 549–554. URL : <https://doi.org/10.22616/erdev2019.18.n178>

209. Чумичева Л. М., Астапов С. Ю. Ударостойкая сталь, как альтернатива материалу для изготовления лемеха плуга. *Сборник материалов Международной научно-практической конференции: Инженерное обеспечение инновационных технологий в АПК*. Мичуринск, 2018. С. 90–95.

210. Raval A. H., Kaushal O. P. Wear and tear of hard-surfaced cultivator shovel. *Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America*. 1990. № 21, 2, p. 46–48.

211. Ковальчук Ю. О. Лазерне зміцнення робочих органів ґрунтообробних знарядь зі сталі 65Г. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Техніка та енергетика АПК*. 2016. Вип. 254. С. 174–182.

212. Lemecha M., Napiórkowski J., Konat L. Analysis of wear and tear of working elements with a replaceable cutting edge in an abrasive soil mass. *Tribologia*. 2017. 273(3). P. 101–109. URL : DOI: 10.5604/01.3001.0010.6144.

213. Kostencki P., Stawicki T., Krolicka A., Sędlak P. Wear of cultivator coulters reinforced with cemented-carbide plates and hardfacing. *Wear*. 2019. Vol. 438–439. URL : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203063>.

214. Belousov S. V., Samurganov E. E., Rodionenko A. I. Theoretical justification of the type of a flat-cutting working body of a ploughshare. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709. URL : <https://doi.org/10.1088/1757-899x/709/3/033100>.

215. Миронов Д. А., Лискин И. В., Сидоров С. А. Влияние геометрических параметров долота на тяговые характеристики и ресурс лемехов отечественных плугов. *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2015. № 6 С. 25–29.

216. Алферов А. Гринченко А. Методология обеспечения механической надежности почвообрабатывающих машин при проектировании. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2016. Vol. 18, № 5. С. 47–52.

217. Алферов А. И., Гринченко А. С. Основы прогнозирования и управления надежностью в условиях экстремальных нагрузок. Харьков : Планета-Принт, 2017. 135 с.

218. Новиков В. С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин : монография. Москва : ИНФРА-М, 2019. 155 с.

219. Виноградов В. В. Повышение износостойкости стрелчатых лап почвообрабатывающих орудий карбовибродуговым упрочнением их режущих поверхностей : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / ФГБОУ ВО Орловский ГАУ. Орел, 2017. 156 с.

220. Par B. Wear of plowshare components in SAE 950C steel surface hardened by powder boriding. *Wear*. 2006. Vol. 261. P. 251–255. URL : <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.10.003>

221. Ожегов Н. М., Ружьев В. А., Губарев В. Д., Сулеев В. Д., Шахов В. А. Современные методы упрочнения дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2019. С. 95–98

222. Liuabc X. F., Tian Z. L., Zhang X. F., Chen H. H., Liu T. W., Chen Y., Wang Y. J., Dai L. H. «Self-sharpening» tungsten high-entropy alloy. *Acta Materialia*. 2020. Vol. 186. P. 257–266. URL : <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.005>

223. Gear G. U., Wheels R. States agricultural warehouse. *The cultivator, a monthly journal, devoted to agriculture, horticulture, floriculture and to domestic and rural economy. New Series*. 1847. Vol. IV. P. 231.

224. Wilson E. Steel cultivators. *The cultivator, a monthly journal, devoted to agriculture, horticulture, floriculture and to domestic and rural economy. New Series*. 1848. Vol. V. P. 165.

225. Шульц В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструментов. Ленинград : Машиностроение, 1990. 208 с.

226. Борак К. В. Зміна поверхневої твердості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин в процесі експлуатації. *Біоресурси і природокористування*. 2020. Том 12, № 1–2. URL : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/13870>.

227. Ахметшин Т. Ф. Повышение износостойкости и долговечности почвообрабатывающих рабочих органов. *Известия Оренбургского государственного аграрного университета*. 2013 С. 81–84.

228. Люляков И. В. Разработка технологии восстановления стрельчатых лап культиваторов путем замены режущей части : дисс. ... канд. тех. наук : 05.20.03 / Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова». Саратов, 2005. 192 с.

229. Виноградов В. В. Восстановление и упрочнение стрельчатых лап почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами. *Молодежь и XXI век – 2016* : Материалы VI Международной молодежной научной конференции. Курск, 2016. С. 89–94.

230. Козаченко О. В., Шкрегаль О. М., Каденко В. С., Блезнюк О. В. Польові випробування удосконалених культиваторних лап. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. Харків, 2019. № 15. С. 31–39.

231. Собачкин А. В. Формирование износостойких покрытий для деталей сельскохозяйственного машиностроения при электродуговой наплавке многокомпонентных механоактивированных СВС-материалов : дисс. ... канд. тех. наук : 05.16.09 / Новосибирский государственный технический университет. Новосибирск, 2013. 150 с.

232. Шамшетов С. Н. Повышение долговечности рабочих органов культиваторов для междурядной обработки хлопчатника : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.20.03. Москва, 1985. 20 с.

233. Аулін В. В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах : монографія. Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2014. 369 с.

234. Новиков В. С., Петровский Д. И. Повышение долговечности стрелчатых лап культиваторов. *Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина»*. Москва, 2017. № 4. С. 49–55.

235. Аулін В. В., Карпушин С. О., Тихий А. А. Самозагострювання різальних елементів ґрунтообробних і землерийних машин в умовах зміцнення їх робочих поверхонь. *Вестник ХНАДУ*. 2012. Вып. 57. С. 188–194.

236. Гончаров В. С., Мельников П. А., Попов А. Н., Васильев Е. В. Упрочнение лезвийного инструмента с созданием эффекта самозатачивания. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. С. 233–235.

237. Фаюршин А. Ф., Масягутов Р. Ф. Совершенствование технологии упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин. *Вестник БГАУ/Vestnik BSAU*. 2018. № 3. С. 108–112. URL : <https://doi.org/10.31563/1684-7628-2018-47-3-108-113>.

238. Козаченко О. В. Каденко В. С., Шкрегаль О. М., Блезнюк О. В. Вплив параметрів різальних елементів на інтенсивність зношування лап культиваторів. *Інженерія природокористування*. 2017. № 1. С. 63–67.

239. Каденко В. С. Підвищення зносостійкості лап культиваторів обґрунтуванням форми та параметрів локального зміцнення леза : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.04 / Харківський національний технічний університет ім. П. Василенка. Харків. 2017. 192.

240. Козаченко А., Шкрегаль А., Блезнюк О., Вотченко А., Дроботенко А. Влияние параметров лезвия на долговечность лап культиватора. *Motrol. Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2013. Vol. 15. № 7. С. 61–66.

241. Бабицкий Л. Ф., Москалевич И. В., Соболевский И. В. Развитие бионического направления в земледельческой механике. *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. 2017. № 4 (59). С. 68–74.
242. Волик Б. А., Лепеть Є. І., Коновий А. В. Метод гідродинамічних аналогій в системі модельних досліджень ґрунтообробних машин. *Інженерія природокористування*. 2018. № 2. С. 45–48.
243. Бабицкий Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин. Київ : Урожай, 1998. 162 с.
244. Ren L. Q., Liang Y. H. Preliminary studies on the basic factors of bionics. *Science China Technological Sciences*. 2014. P. 520–530. URL : <https://doi.org/10.1007/s11431-013-5449-1>.
245. Bogatyrev N. R. A "Living" Machine. *Journ al of Bionics Engineering*. 2004. Vol. 1, №. 2. P. 79–87. URL : DOI: 10.1007/BF03399464
246. Yongxiang L. Significance and Progress of Bionics. *Journal of Bionics Engineering*. 2004. Vol. 1, №1. P. 1–3. URL : <https://doi.org/10.1007/bf03399448>
247. Jiang W. Bio-inspired self-sharpening cutting tool surface for finish hard turning of steel. *CIRP Annals*. 2014. Vol. 63. P. 517–520. URL : <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.047>
248. Гусев С. В., Гусев А. С. Теоретическое обоснование эффекта самозатачивания. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. Владимир, 2011. №3. С. 44–47.
249. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. Москва : Наука, 1976. 280 с.
250. Anderson M. J., Whitcomb P. J. RSM Simplified – Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments. Productivity Press, 2016. 311 p. URL : DOI: 10.4324/9781482293777.
251. Antony J. Design of Experiments for Engineers and Scientists. Elsevier, 2014. 220 p. URL : <https://doi.org/10.1016/C2012-0-03558-2>.
252. Chernoff H. Sequential Analysis and Optimal Design. Philadelphia : Society for Industrial Mathematics, 1987. 101 p.

253. Daniel C. Application of Statistics to Industrial Experimentation. John Wiley & Sons, 1976. 320 p. URL : DOI:10.1002/9780470316467.
254. Diamond W. J. Practical Experiment Designs for Engineers and Scientists. John Wiley & Sons, 2001. 448 p.
255. Fisher R. A. The Design of Experiments. Hafner Press, 1971. First Published 1935. 256 p.
256. John P. W. M. Statistical Design and Analysis of Experiments. Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. 380 p.
257. Адлер Ю. П. Введение в планирование эксперимента. Москва : Металлургия, 1968. 158 с.
258. Винарский М. С., Лурье М. В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. Киев : Техника, 1975. 168 с.
259. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Москва : Мир, 1980. 611 с.
260. Вадюнина А. Ф., Корчагина З. А. Методы исследования физических свойств почвы. Москва : Агропромиздат, 1986. 416 с.
261. Борак К. В. Методика визначення триботехнічних характеристик ґрунтового середовища. *Біоресурси і природокористування*. 2018. Т. 10, № 1–2. С. 135–144.
262. Dvoruk V. I., Borak K. V. Research of the degree of fixation of abrasive particle in the soil. *Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології»*. 2019. № 1. С. 67–72.
263. Єщенко В. О., Копитко П. Г., Опришко В. П., Костогриз П. В. Основи наукових досліджень в агрономії. Київ : Дія, 2005. 288 с.
264. Спосіб дослідження матеріалів та покриттів на зносостійкість : патент 59681 Україна : МПК G01N 3/00; № u2010 013233; заявл. 08.11.2010 ; опубл. 25.05. 2011, Бюл. № 10.
265. Установка для дослідження зносостійкості матеріалів та покриттів : патент 57585 Україна : МПК G01N 3/02, G01N 19/02 ; № u2010 07973; заявл. 25.06.2010 ; опубл. 10.03. 2011, Бюл. № 5.

266. ДСТУ 7270:2012. Метрологія. Прилади зважувальні еталонні. Загальні технічні вимоги, порядок та методи атестації. Київ. 54 с.
267. Дворук В. І., Борак К. В. Методика дослідження впливу способу зберігання на абразивну зносостійкість робочих органів ґрунтообробних машин. *Міжнародний науковий журнал “Проблеми трибології”*. 2014. № 1. С. 14–18.
268. Аврутов В. В. К задаче определения трения скольжения. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування*. 2011. Вип. 42. С. 195-199.
269. Дворук В. І., Борак К. В., Руденко В. Г., Добранський С. С., Бучко І. І. Дослідження статичного та динамічного коефіцієнта тертя між поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин та рослинними рештками. *Наукові доповіді НУБІП України*. 2020. №1 (83).
270. Дворук В. І., Борак К. В., Добранський С. С., Герасимчук Д. В. Вплив попередньої корозії на інтенсивність зношування сталі. *Вісник Причорномор'я*. 2019. № 4. С. 106–113.
271. Дворук В. І., Борак К. В. Дослідження зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин. *Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології»*. 2017. №3. С. 100–105.
272. Борак К. В. Зміна поверхневої твердості робочих органів дискових ґрунтообробних машин у процесі експлуатації. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2019. Т. 30 (69). № 2. Ч. 1. С. 24–28.
273. ASTM A1038. Standard Test Method for Portable Hardness Testing by the Ultrasonic Contact Impedance Method.
274. ISO 6508-1:2016 (en) Metallic materials – Rockwell hardness test. Part 1: Test method.
275. ISO 148-1:2011-01 (en) Metallic materials – Charpy pendulum impact test. Part 1: Test method.

276. Балабуха А. В. Исследование изнашивания лемехов, упрочненных дуговой точечной наплавкой. *Збірник наукових праць Луцького державного технічного університету*. 2000. Вип. 7. С. 9–11.
277. Wenhua Xu, En-Hou Han, Zheny Wanga. Effect of tannic acid on corrosion behavior of carbon steel in NaCl solution. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019. Vol. 35, № 1. P. 64–75.
278. Борак К. В. Фізико-математичне моделювання трібосистеми «робочий орган - ґрунт». *Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічний сервіс машин для рослинництва*. 2015. Вип. 159. С. 143–147.
279. Справочник по триботехнике. Т1. Теоретические основы / под ред. М. Хебты, А. В. Чичинадзе. Москва : Машиностроение, 1989. 400 с.
280. Чихос Х. Системный анализ в трибонике. A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear : монографія. Москва : Мир, 1982. 351 с.
281. Антонов А. В. Системный анализ. Москва : Высшая школа, 2004. 454 с.
282. Дворук В. І., Борак К. В. Фізико-математичне моделювання трібосистеми «робочий орган – ґрунт». *Проблеми трибології (Problems of Tribology)*. 2015. № 3. С. 78–82.
283. Боуден Ф. П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел : монографія. Москва : Машиностроение, 1968. 544 с.
284. Tabor D. Surface forces and surface interactions. *J. Colloid and Interface Sci.* 1977. Vol.58, №1. P. 2–13.
285. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. Москва : Мир, 1989. 510 с.
286. Дёмкин Н. Б. Фактическая площадь касания твёрдых поверхностей. Москва : Изд-во АН СССР, 1962. 112 с.
287. Дёмкин Н. Б. Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей. Москва : Наука, 1970. 228 с.

288. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. Москва : Машиностроение, 1986. 360 с.
289. Белый В. А., Свириденко А. И., Петроковец М. И., Савкин В. Г. Трение и износ материалов на основе полимеров. Минск : Наука и техника, 1976. 432 с.
290. Крагельский И. В., Бессонов Л. Ф., Швецова Е. М. Контакт шероховатых поверхностей. *ДАН СССР*. 1953. Т. 93, №1. С. 43–46.
291. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия Москва : Наука, 2001. 478 с.
292. Шевченко І. А. Керування агрофізичним станом ґрунтового середовища. Київ : Видавничий дім «Вініченко», 2016. 320 с.
293. Medelyaev I. A., Albagachiev A. Y., Sorokin G. M. Physical nature of failure of materials during abrasive wear. Трение и износ. 2004. Том 25, №2. С. 148–154.
294. Ларченков Л. В., Протасеня М. Л., Протасеня И. О. Проектирование сельскохозяйственной техники. *Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. 2015. Вып. 29. С. 147–156.
295. Алексеев С. И., Хисамов Р. Р. Трение грунта о вертикальную стенку и его влияние на работу основания в шпунтовой обойме. *Известия Петербургского университета путей сообщения*. 2013. № 4. С. 79–87.
296. Алексеев В. В., Максимов И. И., Мишин П. В. Получение функциональной зависимости для коэффициента трения в почвах. *Вестник НГИЭИ. Княгинино*. 2018. №5 (84). С. 34–43.
297. Abbaspour-Gilandeh Y., Hasankhani-Ghavam F., Shahgoli G., Shrabian V. R., Abbaspour-Gilandeh M. Investigation of the effect of soil moisture content, contact surface material and soil texture on soil friction and soil adhesion coefficients. *Acta technologica agriculturae*. 2018. Tom 21, № 2. P. 44–50.
298. Marani S. M., Shahgholi G., Moinfar A. Effect of nano coating materials on reduction of soil adhesion and external friction. *Soil & tillage research*. 2019. Tom 193. P. 42–49.

299. Napiorkowski J., Lemecha M. Effect of phase structure of an abrasive soil mass on steel wear. *International symposium on material science and engineering*. 2018. Tom. 1946. URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5030316>
300. Борак К. В. Фрикційна взаємодія ґрунту з поверхнею робочих органів ґрунтообробних машин. *Техніка та енергетика*. 2019. Вип. 10. № 4. С. 157–162.
301. Блехман И. И. Вибрационная механика Москва : Физматлит, 1994. 400 с.
302. Gonzalez H., Cappelli N., Toro A. Wear of rotary plows operating in a tropical clay loam soil. *Engenharia Agrícola*. 2013. Vol. 33, № 4. URL: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162013000400017>.
303. Myalenko V. I. Prediction of the Expected Wear Resistance of Soil-Cutting Elements by the Simulation Loading Method. *Journal of Physics: Conference. Series*. IX International Scientific Practical Conference "Innovative Technologies in Engineering" 24–26 May 2018, Yurga, Russian Federation. Vol. 1059. URL: doi :10.1088/1742-6596/1059/1/012022.
304. Napiórkowski J., Lemecha M., Konat Ł. Forecasting the Wear of Operating Parts in an Abrasive Soil Mass Using the Holm-Archard Model. *Materials*. 2019. Vol. 12, № 2180. URL: doi:10.3390/ma12132180.
305. Дворук В. І. Реолого-кінетична концепція абразивної зносостійкості та її реалізація в керуванні працездатністю механічних трибосистем : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.02.04 / Національний авіаційний університет. Київ, 2007. 471 с.
306. Борак К. В. Вплив ступеня закріплення абразивної частинки на механізм зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Техніка та енергетика*. 2020. Вип. 11. № 2. С. 35–40.
307. Аулін В. В., Тихий А. А. Модель взаємодії дисперсного середовища ґрунту з поверхнею робочих органів ґрунтообробних та землерийних машин. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2014. Вип. 27. С. 140–149.

308. Беркович И. И., Болотов А. Н., Морозова Ю. И. Теоретические основы фрикционного взаимодействия дисперсных материалов с твердой поверхностью : монография. Тверь : ТвГТУ. 2012. 92 с.
309. Левин С. В. Механика грунтов. Москва : Недра. 1964. 164 с.
310. Шелудченко Б. А. Агромеханіка ґрунтів. Житомир : Полісся. 1992. 249 с.
311. Борак К. В. Прогнозування зміни абразивних властивостей ґрунтів для забезпечення надійної експлуатації робочих органів. *Технічні науки та технології : науковий журнал*. 2020. № 1 (19). С. 53–64.
312. Дьяков В. П. Механика почвы и реология грунтов. Точки соприкосновения и различия. *Достижение науки и техники АПК*. 2007. №7. С. 48–51.
313. Dvoruk V. I., Borak K. V. Research of the degree of fixation of abrasive particle in the soil. *Міжнародний науковий журнал "Проблеми трибології"*.. 2019. №1. 67–72.
314. Борак К. В. Наукові основи досягнення ефекту самозагострювання робочих органів ґрунтообробних машин. *Сільськогосподарські машини*. 2020. №1. С. 18–40.
315. Востановление деталей машин : Справочник / под ред. В. П. Иванова. Москва : Машиностроение, 2003. 672 с.
316. Кюрчев С. В., Юдовинський В. Б., Журавель Д. П., Мироненко Ю. П. Кинетика внедрения абразивного зерна в поверхностный слой металла. *Праці ТДАТА*. Вип. 9, Т. 2 С. 55–64.
317. Журавель Т. П., Новік О. Ю., А. М. Бондар, Петренко К. Г. Триботехніка. Мелітополь : Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. 280 с.
318. Борак К. В. Уплив коефіцієнта форми абразивних частинок ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів ґрунтообробних машин. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2020. №1. URL : <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/591/558>.

319. Крагельський І. В., Виноградова І. Э. Коэффициенты трения. Москва : МАШГИЗ, 1962. 220 с.
320. Комбалов В. С. Влияние шероховатости твёрдых тел на трение и износ. Москва : Наука, 1974. 112 с.
321. Спосіб дослідження матеріалів та покриттів на зносостійкість та визначення коефіцієнта тертя ковзання сталь-абразивна маса : пат. 142596 Україна, G01N 3/00/ ; № u2019 02358; заявлено 11.03.2019; опубліковано 25.06.2020. Бюл. № 12.
322. Установка для дослідження зносостійкості матеріалів; заявник і патентовласник : пат. 142715 Україна, G01N 3/56 ; № u2019 11856; заявлено 12.12.2019; опубліковано 25.06.2020. Бюл. № 12.
323. Borak K. V. Effect of plant remains on abrasive wear rate of the tilling machine movable operating parts. *Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології»*. 2020. № 1. С. 57–62.
324. Денисенко М. И., Зазимко О. В., Лабунец В. Ф., Загребельный В. В. Роль вторичных структур при абразивном изнашивании конструкционных материалов. *Проблеми тертя та зношування*. 2015. № 4 (69). С. 38–42.
325. Дворук В. І., Борак К. В. Вплив абразивного зношування на атмосферну корозію робочих органів ґрунтообробних машин. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2016. Вип. 10/1 (29). С. 149–152.
326. Офіційний сайт Bellota Agrisolutions Ground Excellence Worldwide Bellota Agrisolutions [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.bellotaagrisolutions.com/en> (дата звернення : 11.11. 2020).
327. Офіційний сайт Ovako [Електроний ресурс]. Режим доступу : <http://www.ovako.com> (дата звернення : 11.11. 2020).
328. Дворук В. І., Борак К. В. Дослідження зносостійкості дискових робочих органів ґрунтообробних машин. *Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології»*. 2017. № 3. С. 100–105.

329. ДСТУ 8429:2015. Прокат із ресорно-пружинної вуглецевої та легованої сталі технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ». 2016. 16 с.

330. Rogovskii I. L., Borak K. V., Maksimovich E. Yu., Smelik V. A., Voinash S. A., Maksimovich K. Yu., Sokolova V. A. Wear resistance of blade and disc working bodies of tillage tilling machines hardened by electrodes. *T-series. Journal of Physics : Conference Series*. (2020) 1679 (4), art. №. 042084.

331. Рыбалко И. Н., Тихонов А. В., Мартыненко А. Д., Сайчук А. В. Анализ напряжённого состояния и технологические способы повышения ресурса стрелчатых лап культиваторов. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. № 6 С. 118–131.

332. Фесько С. А. Разработка технологии восстановления стрелчатых лап культиваторов для высева семян зерновых культур по подготовленной почве : дис. ... канд. техн. наук : 05.20.03 / ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет МСХА имени К. А. Тимирязева, 2018. 172 с.

333. Зайцев С. А. Повышение износостойкости рабочих поверхностей лап культиватора газопламенным напылением с последующим оплавлением : дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 / ФГБОУ ВПО Орловский государственный аграрный университет. Орел, 2013. 164 с.

334. Борак К. В., Герук С. М., Крук И. С. Повышение долговечности стрелчатых лап паровых культиваторов. *Агронорама*. 2020. № 2 (138). С. 10–14.

335. Borak K. Increasing the longevity and wear resistance of share-shelf operating devices of cultivating machines. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. 2020. Vol. 20. № 1. P. 41–48.

336. Борак К. В. Impact of soil moisture on wear intensity of the actuating elements of soil processing machines. *Міжнародний науковий журнал «Проблеми трибології»*. 2020. № 2. С 34–41.

337. Борак К. В., Крук І. С. Вплив швидкості руху ґрунтообробних агрегатів на інтенсивність зношування робочих органів. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2020. №1. С. 30–36.

338. Leygraf C., Wallinder I. O., Tidblad J., Graedel T. Atmospheric Corrosion. New Jersey : John Wiley & Sons. 2016. 397 p.

339. Попович П. В. Методи оцінки ресурсу несучих систем причіпних машин для внесення добрив з врахуванням впливу агресивних середовищ : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11 / Терноп. нац. техн. ун-т ім. І. Пулюя. Тернопіль, 2014. 443 с.

340. Петрашев А. И. Совершенствование технологических процессов и ресурсосберегающих средств консервации сельскохозяйственной техники при хранении : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.20.03 / Саратов. гос. аграр. ун-т им. Н. И. Вавилова. Тамбов, 2007. 400 с.

341. Frankel G. S., Sridhar N. Understanding localized corrosion. *Materials today*. 2008. Vol. 11. P. 38–44.

342. Diaz I. Clarifications Regarding Literature on Atmospheric Corrosion of Weathering Steels. *International Journal of Corrosion: Atmospheric Corrosion*. 2012. P. 77–85.

343. Salgueiro A. M., Allélyb C., Oglea K., Volovitch P. Corrosion mechanisms of Zn(Mg, Al) coated steel in accelerated tests and natural exposure: 1. The role of electrolyte composition in the nature of corrosion products and relative corrosion rate. *Corrosion Science*. 2015. Vol. 90. P. 472–481.

344. Huang J., Meng X., Zheng Z., Gao Y. Optimization of the atmospheric corrosivity mapping of Guangdong Province. *Materials and corrosion-werkstoffe und korrosion*. 2019. Vol. 70, № 1. P. 91–101.

345. Pan C., Guo M., Han W., Wang Z. Study of corrosion evolution of carbon steel exposed to an industrial atmosphere. *Corrosion engineering science and technology*. 2019. Vol. 54, № 3. P. 241–248.

346. Refaita Ph. Corrosion and cathodic protection of carbon steel in the tidal zone: Products, mechanisms and kinetics. *Corrosion Science*. 2015. Vol. 90. P. 375–382.
347. Grgura B. N. Corrosion of mild steel with composite polyaniline coatings using different formulations. *Progress in Organic Coatings*. 2015. Vol. 79. P. 17–24.
348. Грицай Ю. В., Цьонь О. П., Рубінець Н. А. Корозійні пошкодження техніки у сільськогосподарському машинобудуванні. *Вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. 2016. Вип. 170. С. 172–175.
349. Попович П., Цьонь О., Довбуш Т. Вплив експлуатаційних середовищ на поширення поверхневих корозійно-втомних тріщин в елементах конструкцій сільськогосподарських машин. *Вісник ТНТУ. Машинобудування, автоматизація виробництва та процеси механічної обробки*. 2014. Т. 75, № 3. С. 157–166.
350. Дослідження атмосферної корозії вуглецевої сталі за умов утворення адсорбційних та фазових плівок вологи / Л. І. Ниркова та ін. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. Т. 48, № 5. С. 117–123.

ДОДАТКИ

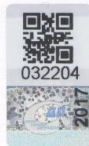
Мікротвердість природних абразивів

Абразив	Джерело отримання інформації (одиниці виміру твердості абразивів)			
	А. Г. Добровольський (HV, ГПа)	М. М. Тененбаум (кГ/мм ²)	М. М. Севернев (шкала Мооса/ кГ/мм ²)	Коротков В. А. (шкала Мооса/ Н/м ² ×10 ⁷)
Глиняні мінерали	-	-	1,0...2,5/-	
Гіпс	0,29	30	-	
Мусковіт		-	2,0...3,0/-	
Біотид	-	-	2,5...3,0/-	
Мрамор	1,08	110	-	4...5/110
Барит	1,18	120	-	
Вапняк	0,98...1,76	135...180	-	
Флюорит	1,72	-	-	
Цикніт	1,47...3,12	-	-	
Вугілля	0,27...4,17	-	-	
Ангідрид	-	180	-	
Доломіт	3,14...4,07	200...325	-	3,5...4,0/325...415
Хаусманіт	4,27	-	-	
Мангатін	5,73	-	-	
Нефрит	5,88	600	-	
Скло	5,85...6,03	-	-	4,5...6,5/585
Гематит	5,65...6,17	-	-	
Рогова обманка	-	-	5,5...6,0/650	
Польові шпати	-	-	6,0...6,5/695...720	
Мікролін	-	695	-	
Епідот	-	-	6,5/720	
Ортоглаз	7,08	720	-	

Продовження таблиці А1

Уранова смолка UO ₂	6,6...7,88	-	-	
Ураніт	7,67...8,23	-	-	
Халцедон	9,07	925	-	
Сірий колчедан	9,8	-	-	
Кремінь	9,18...9,8	1000	-	
Кварц: пісок димчатий гірський хрусталь	7,84...10,8 10,58...12,0 10,29...11	1080*	7,0/1050...1130*	7/1000...1100*
Кварцит	11,07	1130	-	
Кассетирит	9,89...12,04	-	-	
Магнезит	12,9	-	-	
Гранати	13,98	-	6,5...7,5/750...900	
Граніт	13,62...16,46	-	6,0...7,0/820	6,5...7/830
Топаз	14,46	1500	-	
Корунд (мінерал)	20,15...22,54	2300	-	9/2000...2200
Рубін	22,44...24,32	-	-	
Алмаз	100	-	-	
Карбід кремнію	-	-	-	7...9/2900...3500
Карбід бора	-	-	-	-/4000...4250

Свідоцтво про перевірку комбінованого твердоміра NOVOTEST T-Y2



ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
 “ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ РЕГІОНАЛЬНИЙ ДЕРЖАВНИЙ
 НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЦЕНТР СТАНДАРТИЗАЦІЇ,
 МЕТРОЛОГІЇ ТА СЕРТИФІКАЦІЇ”
 49044, м. Дніпро, вул. Барикадна, 23
 МІНЕКОНОМРОЗВИТКУ УКРАЇНИ

Свідоцтво про уповноваження № ПК 007-2014 від 19 червня 2014 р.

СВІДОЦТВО

про перевірку законодавчо регульованого засобу вимірювальної техніки

№ 10-0/6926/1 Чинне до 12.01.2018

Назва та умовне позначення Твердомір комбінований

NOVOTEST T-Y2 Зав. № 0081191216

Виробник ТОВ НТЦ "Промтехнології"

За результатами перевірки встановлено, що засіб вимірювальної техніки
 (далі – ЗВТ) відповідає вимогам керівництва з експлуатації
(назва нормативно-правового акта)

у діапазоні від 90 до 450 НВ: $\Delta_{осн} = \pm 10 \text{ НВ}$;

що містить вимоги до метрологічних характеристик і значення метрологічних

у діапазоні від 20 до 70 HRC: $\Delta_{осн} = \pm 2 \text{ HRC}$;

характеристик (клас точності, похибки, діапазон вимірювання), особливості застосування ЗВТ)

Додаток на стор. у прим.

Персонал, який виконував
 роботи з перевірки

10-0
 Місце відбитка
 повітряного тавра

(підпис)

П.О. Сазонов
 (ініціали, прізвище)

12.01.2017

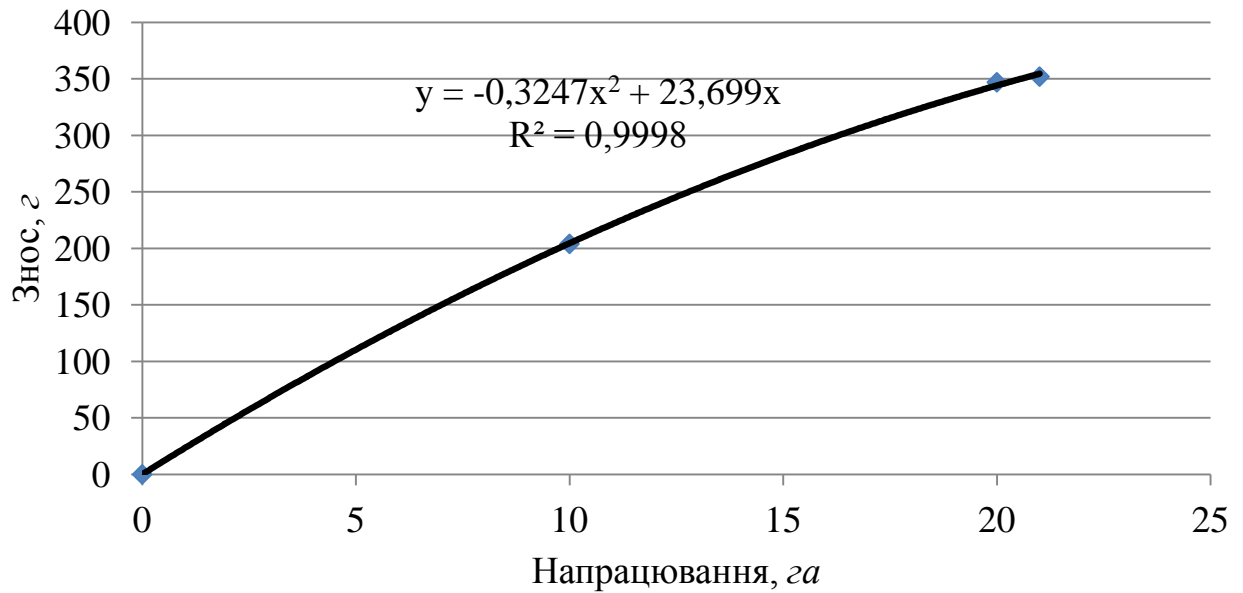
Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Рис. В 1. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 28MnB5 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

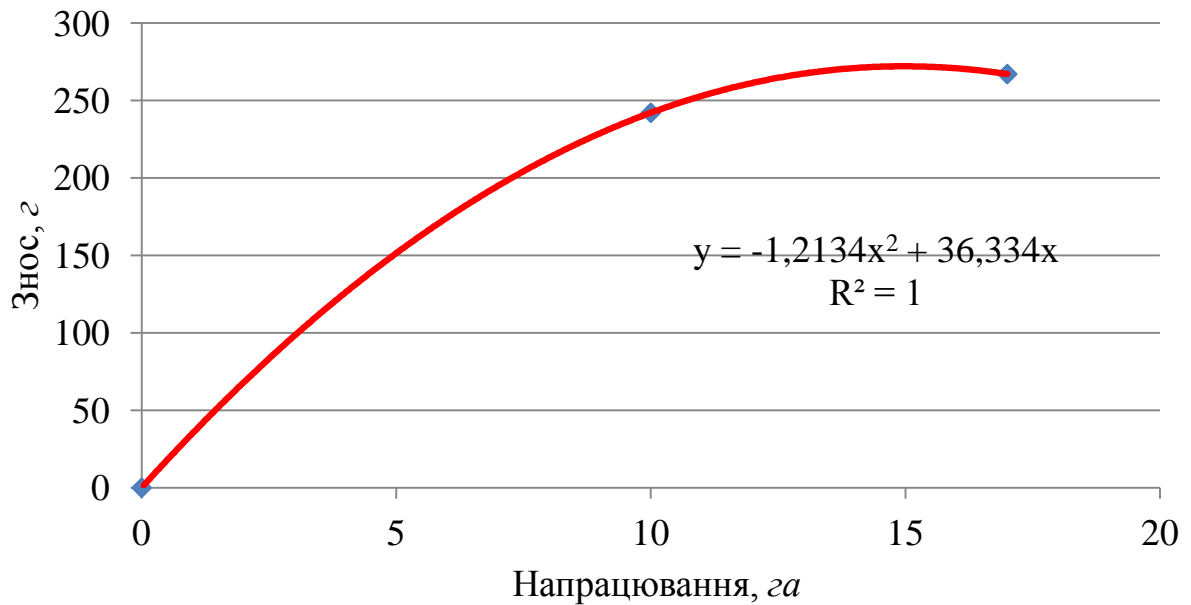


Рис. В 2. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

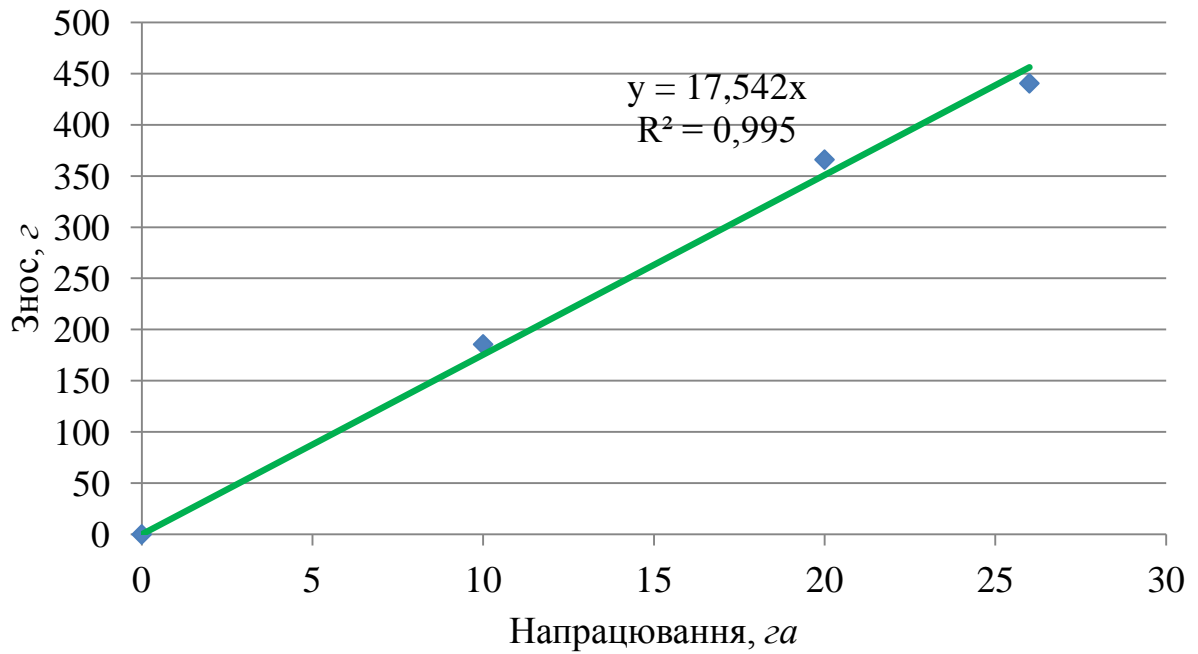
Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Рис. В 3. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

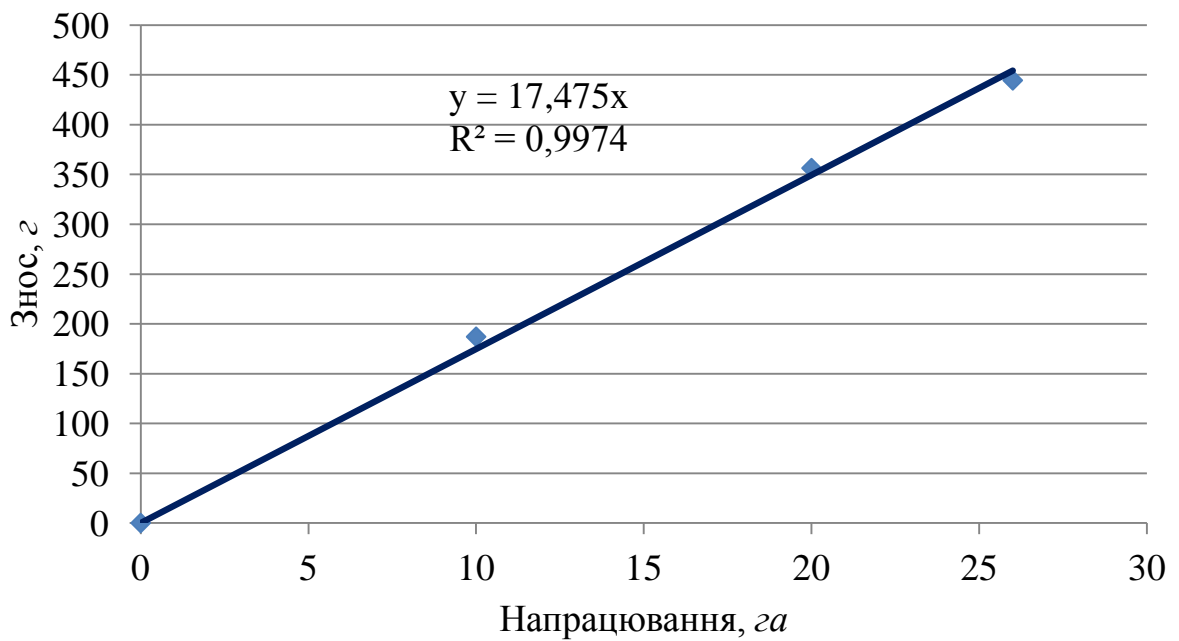


Рис. В 4. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г+Т-590 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

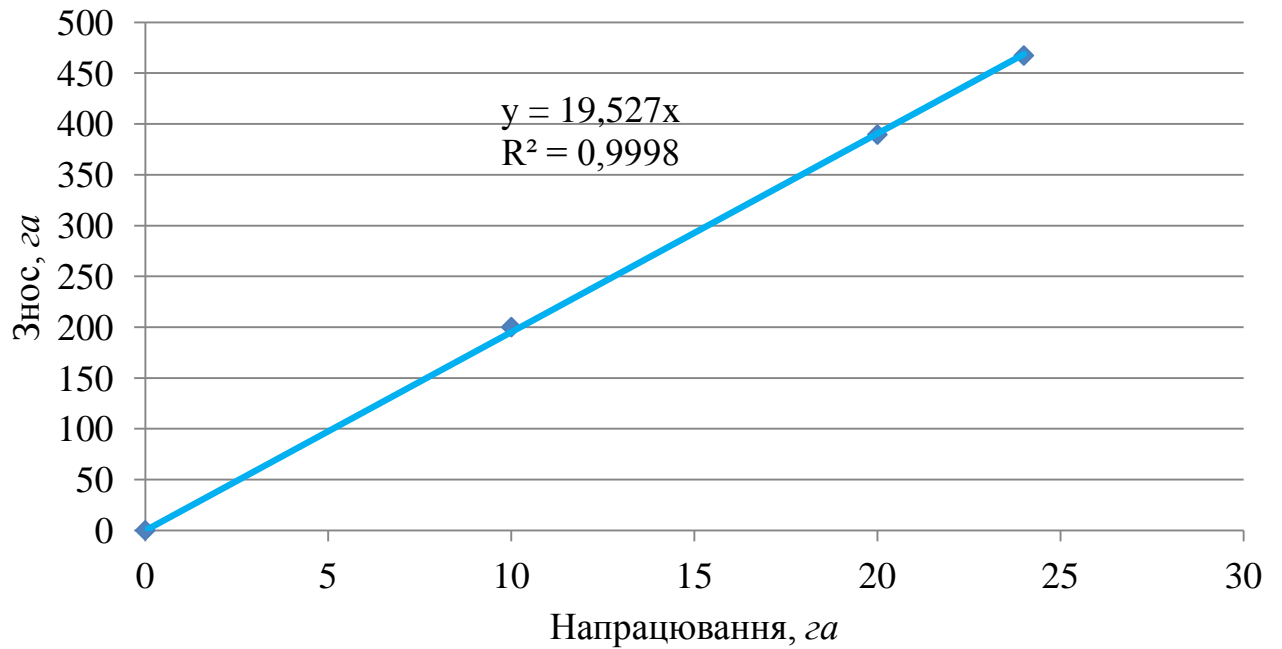
Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Рис. В 5. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г+М-Fe6 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

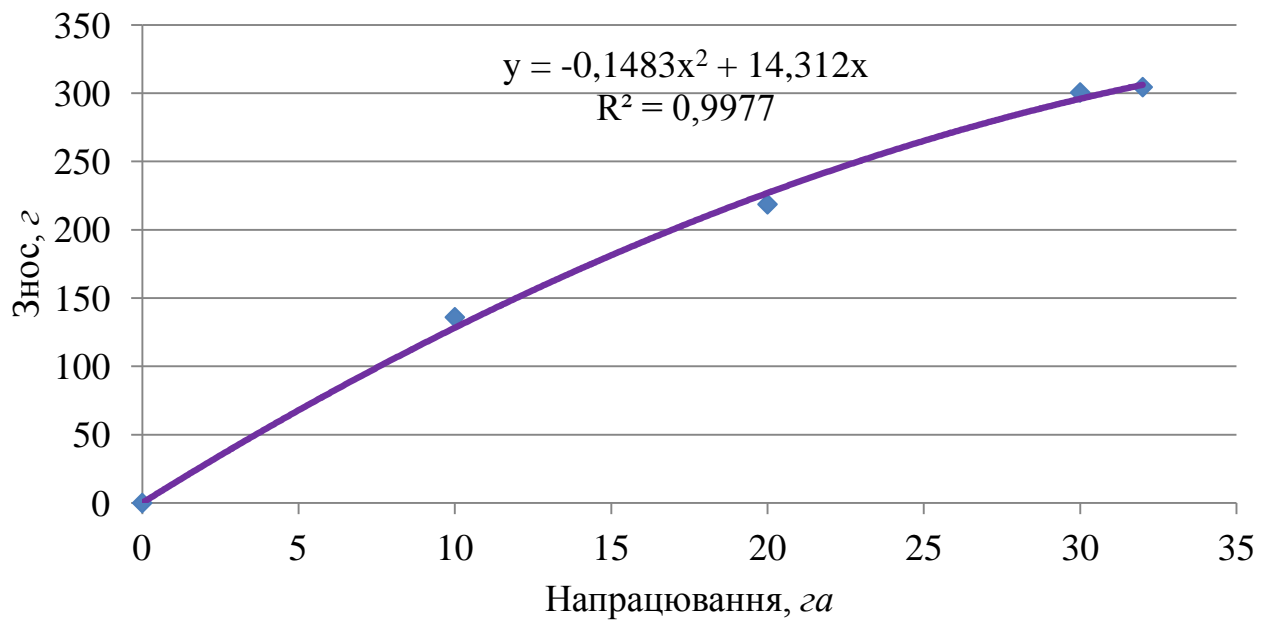


Рис. В 6. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 28MnB5 під час експлуатації в умовах середнього суглинка

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

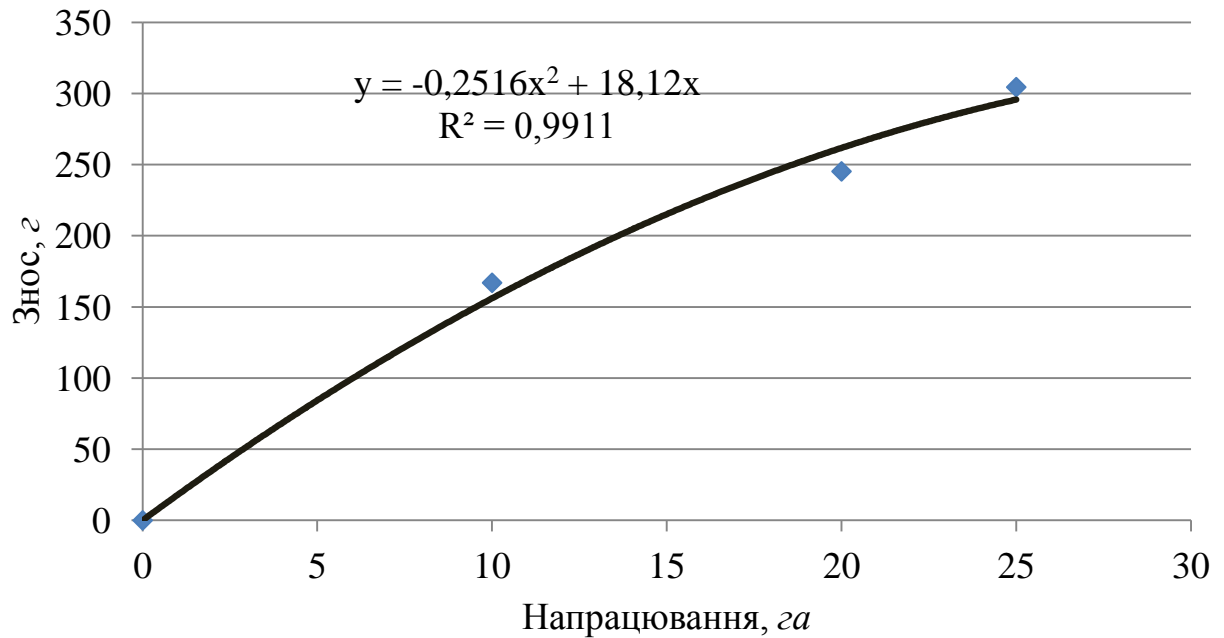


Рис. В 7. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах середнього суглинка

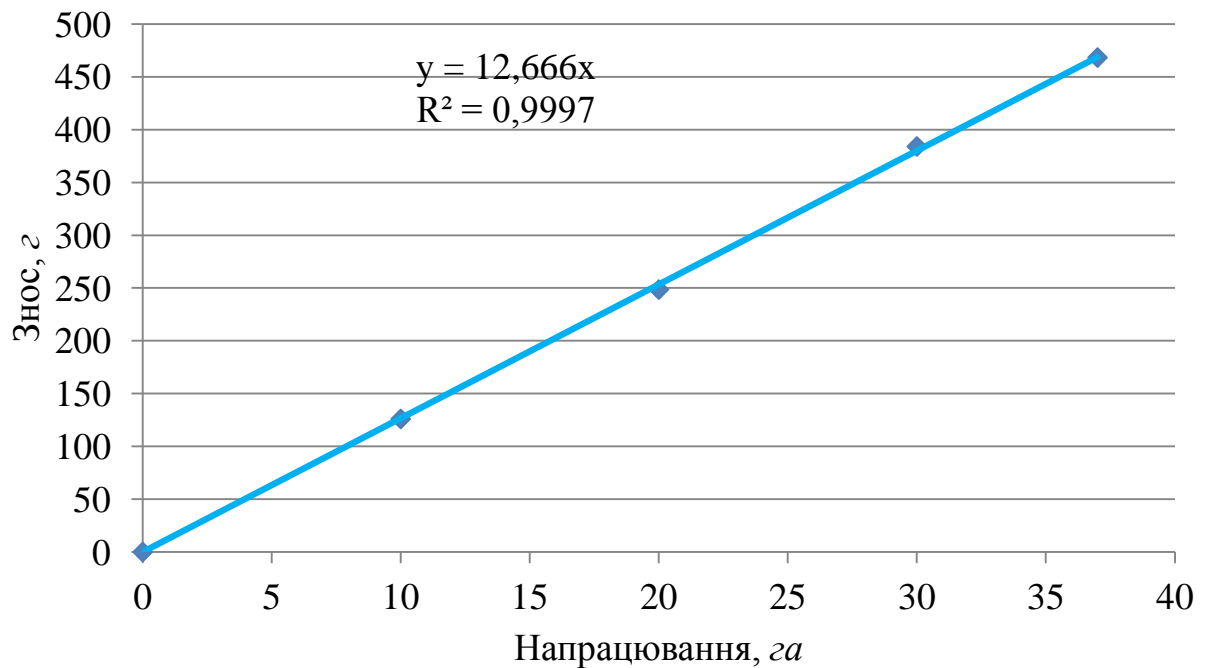


Рис. В 8. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах середнього суглинка

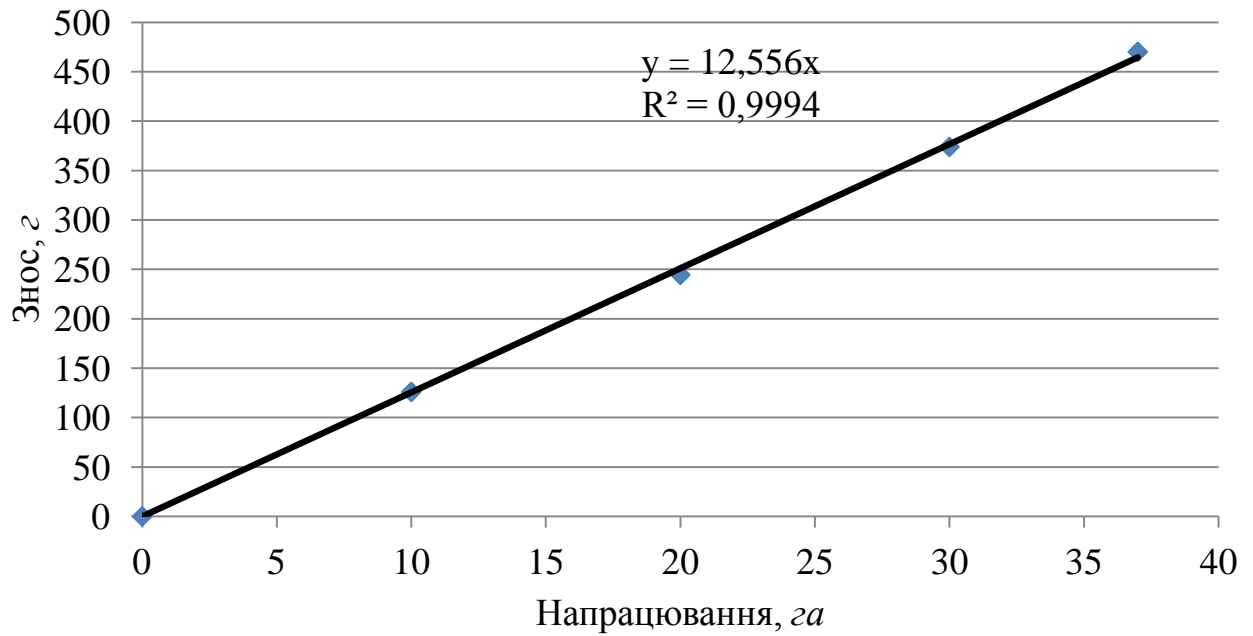
Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Рис. В 9. Зношування стрічатої лапи виготовленої зі сталі 65Г+Т-590 під час експлуатації в умовах середнього суглинку.

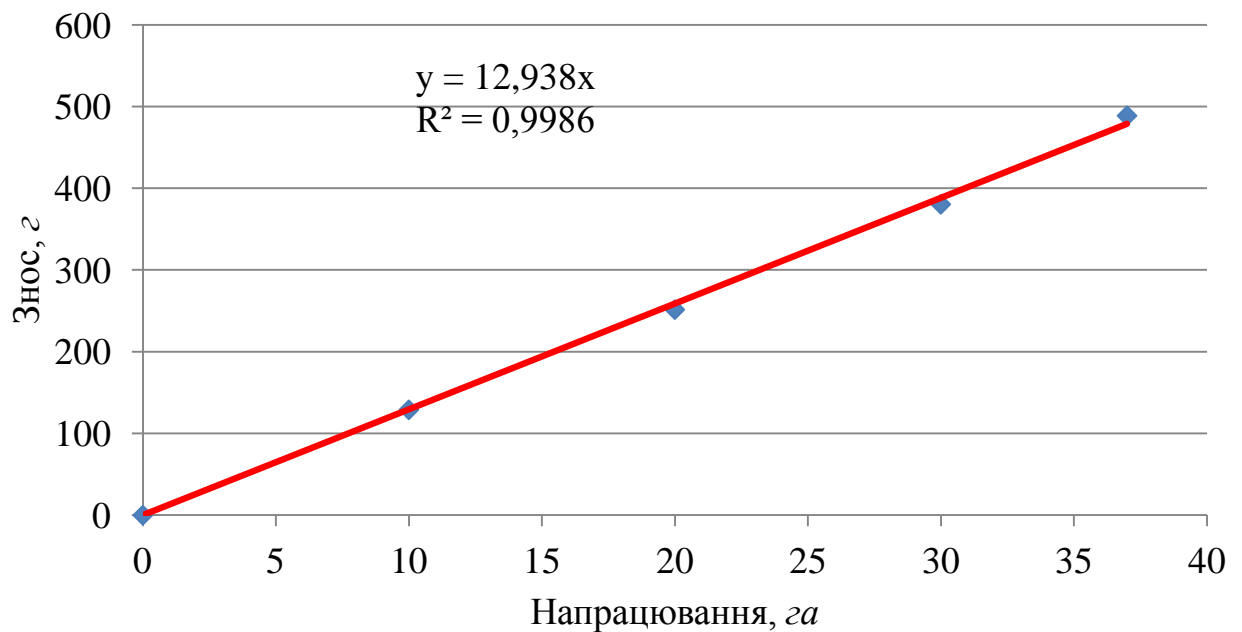


Рис. В 10. Зношування стрічатої лапи виготовленої зі сталі 65Г+М-Fe6 під час експлуатації в умовах середнього суглинку

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

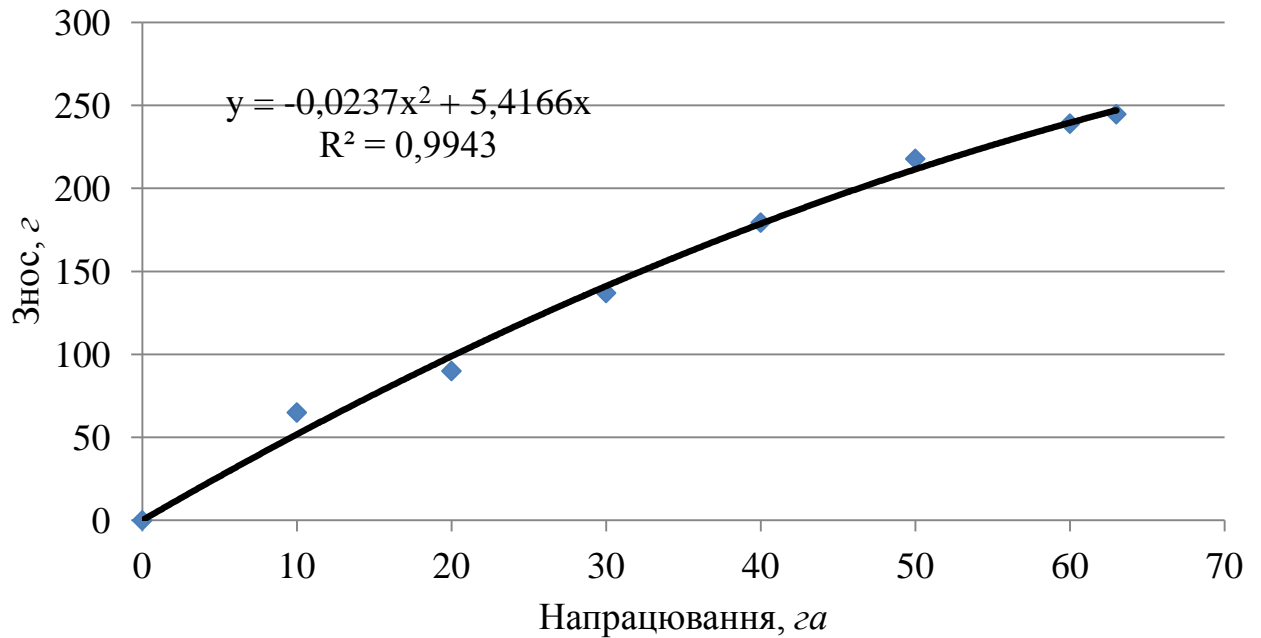


Рис. В 11. Зношування стрічатої лапи виготовленої зі сталі 28MnB5 під час експлуатації в умовах легкої глини.

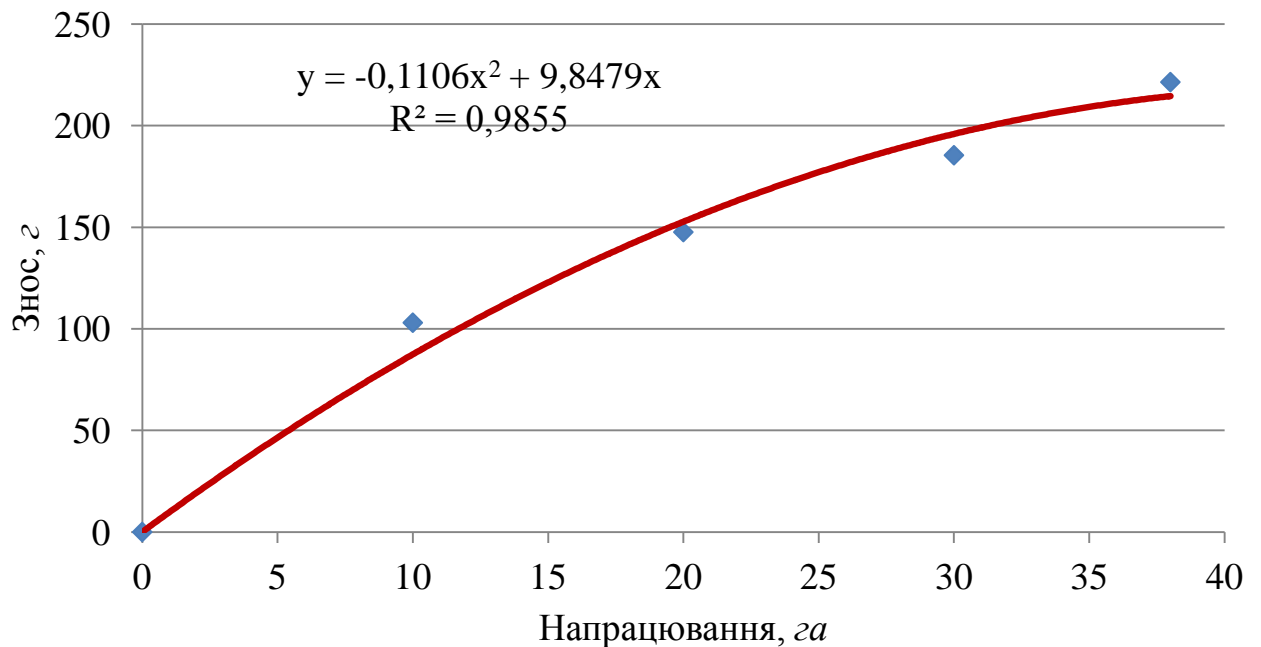


Рис. В 12. Зношування стрічатої лапи виготовленої зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах легкої глини

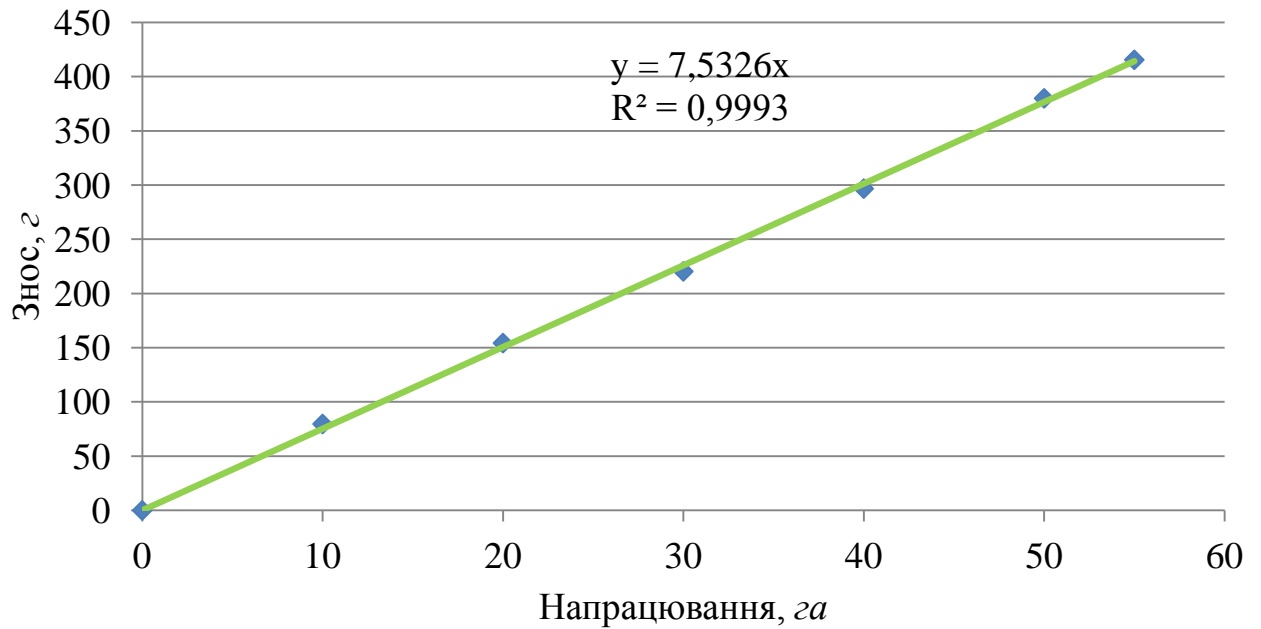
Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Рис. В 13. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах легкої глини

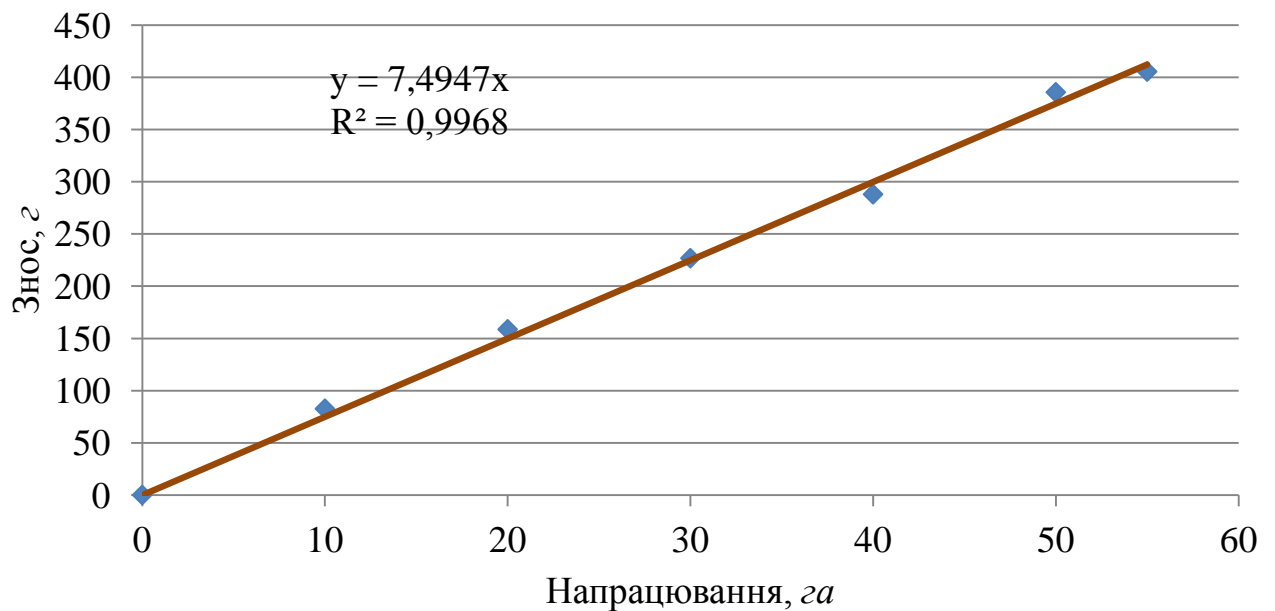


Рис. В 14. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г+Т-590 під час експлуатації в умовах легкої глини

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

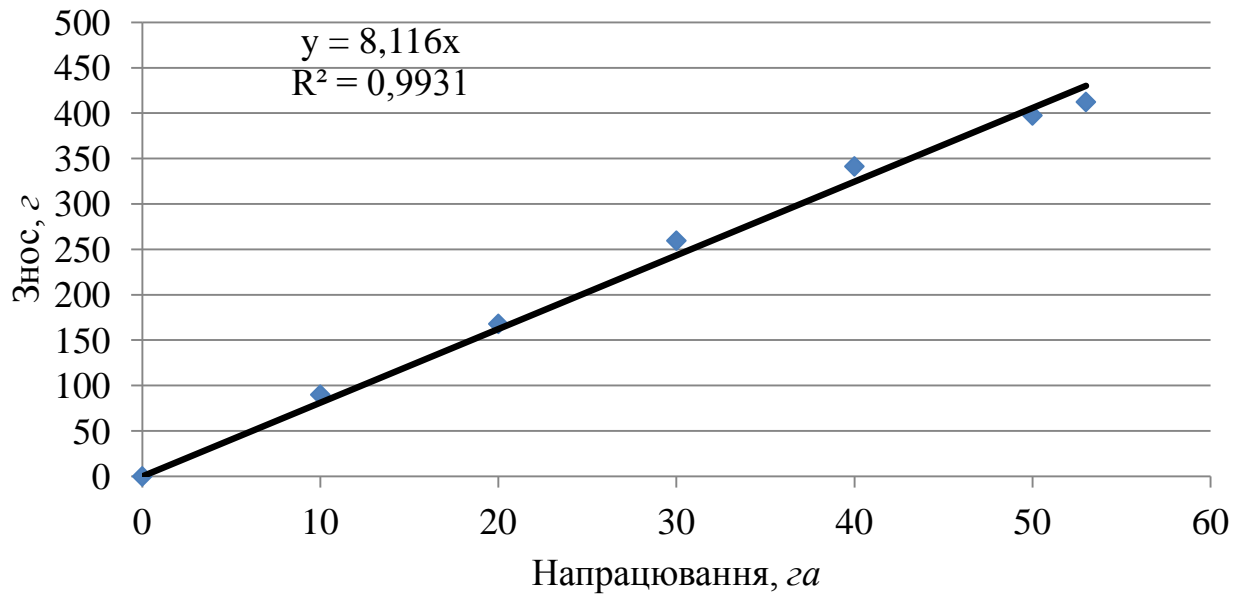


Рис. В 15. Зношування стрілкової лапи виготовленої зі сталі 65Г+ М-Fe6 під час експлуатації в умовах легкої глини

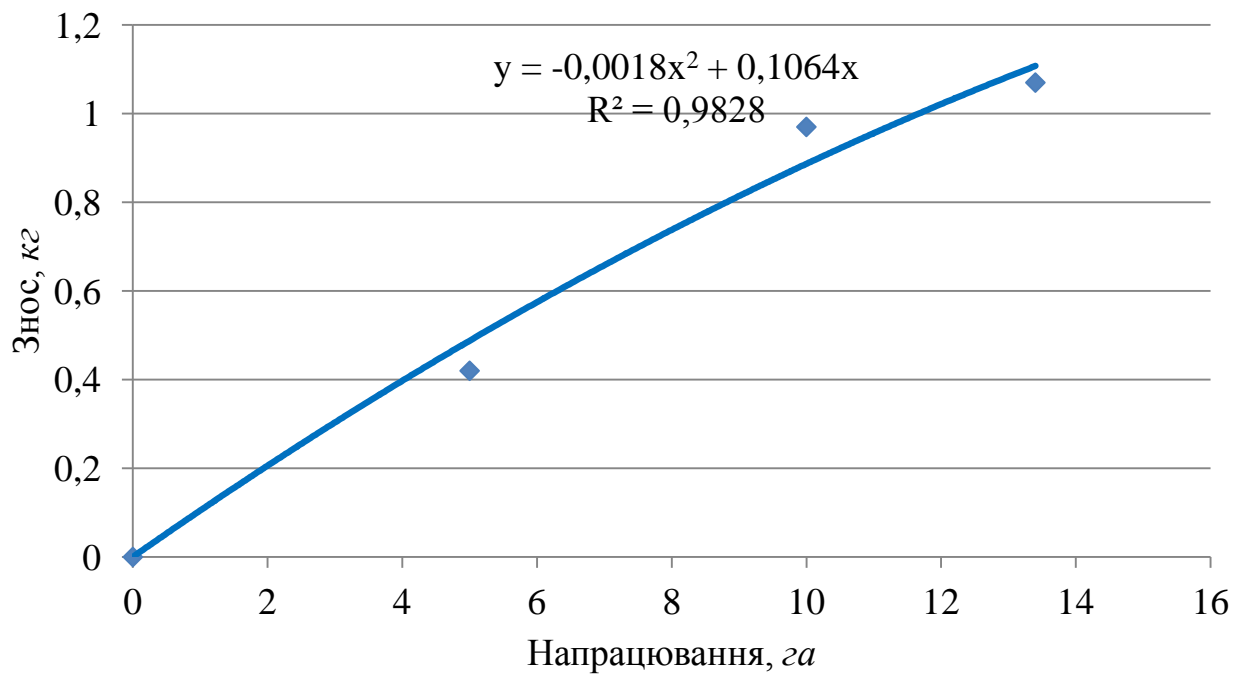


Рис. В 16. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

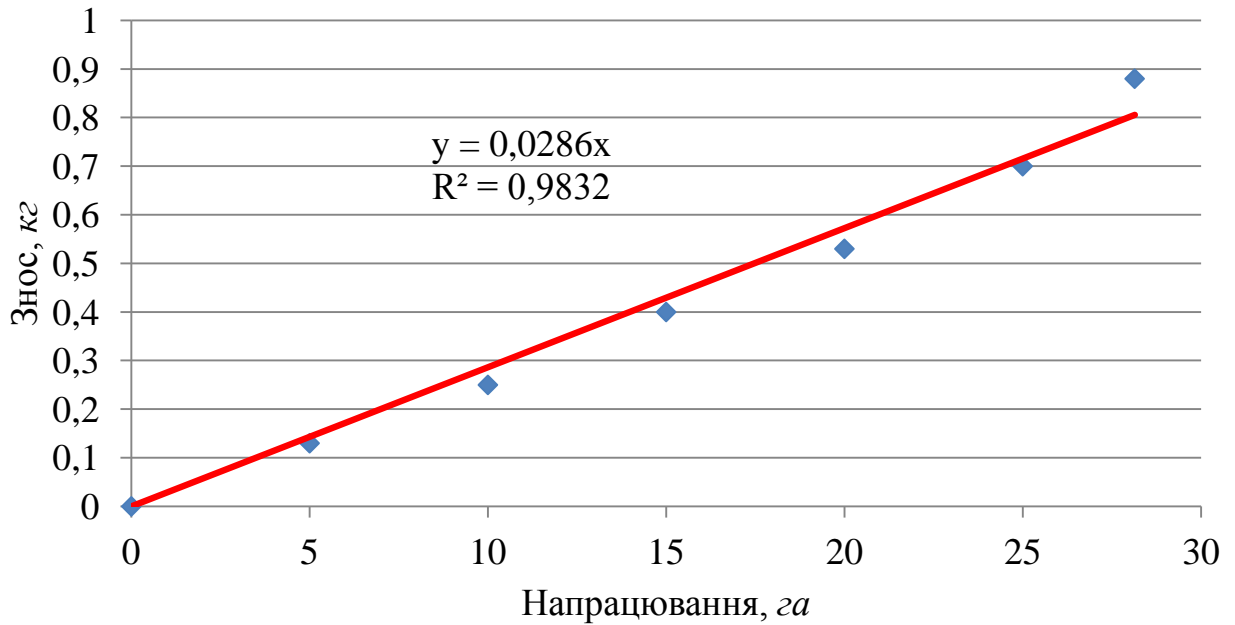
Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Рис. В 17. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+Т590 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

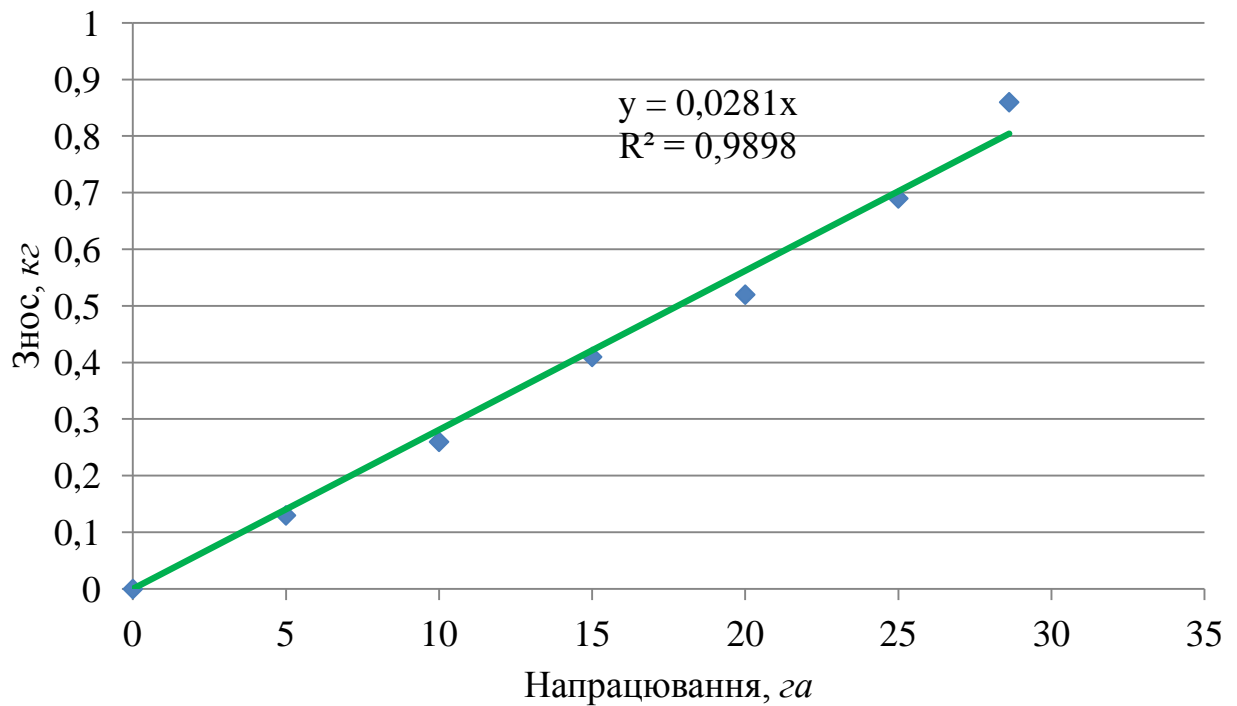


Рис. В 18. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

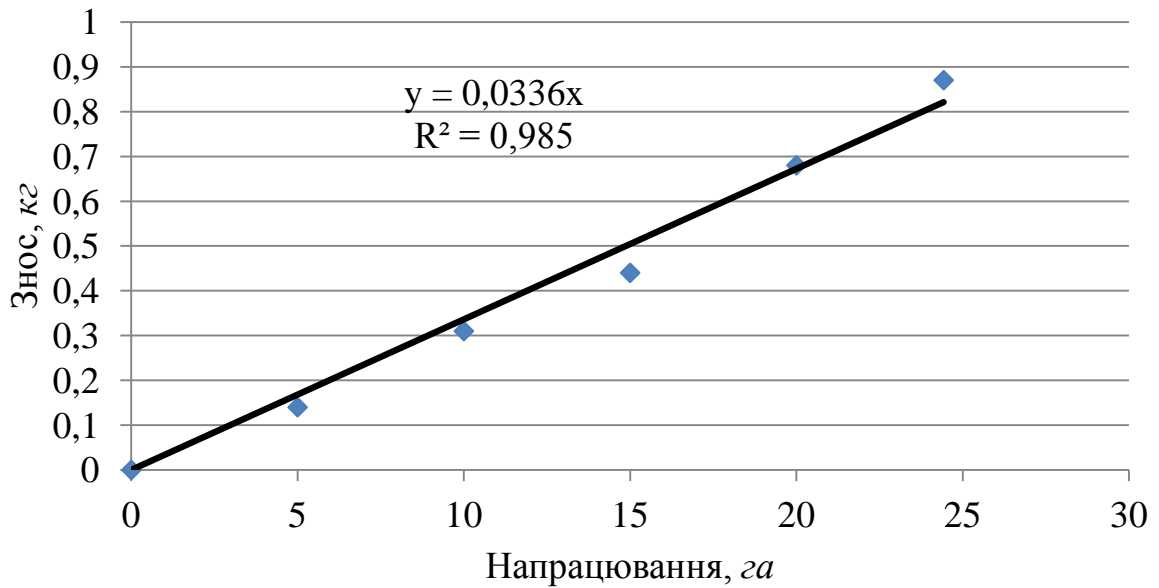


Рис. В 19. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+ М-Fe6 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

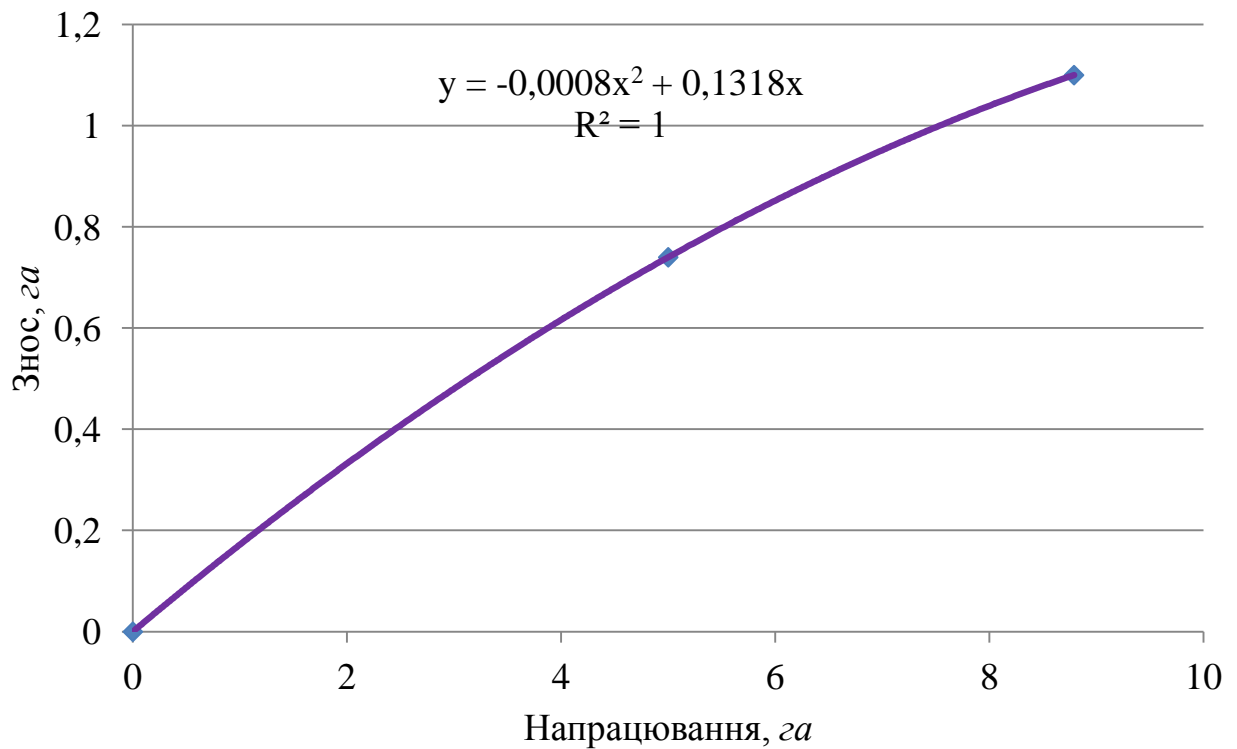


Рис. В 20. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі Л 53 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

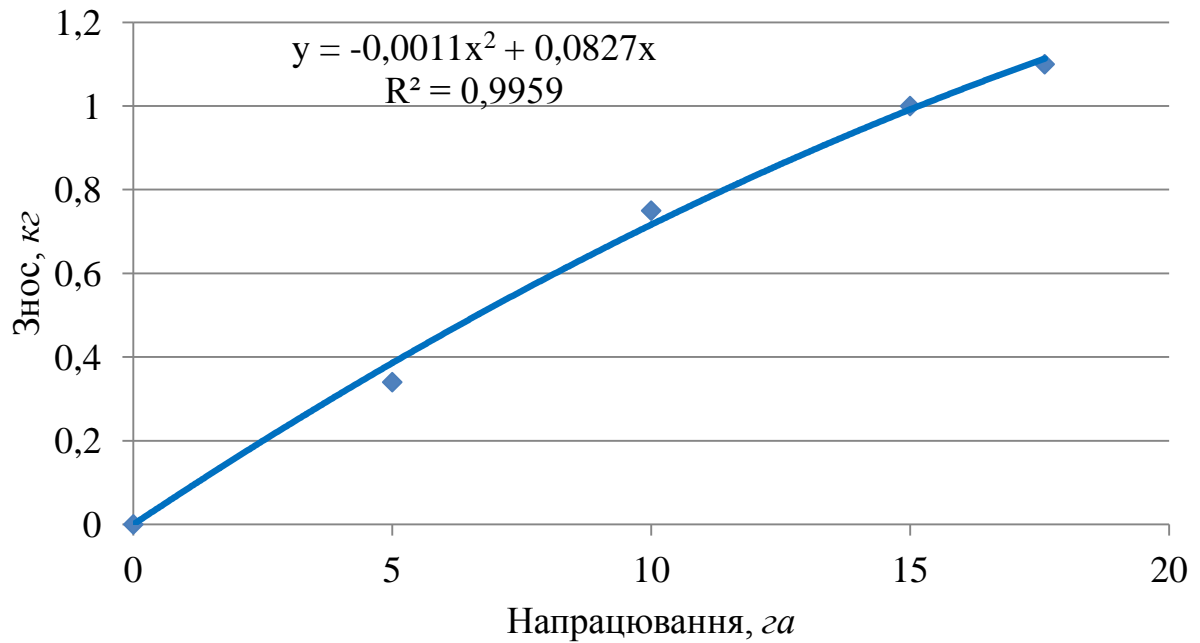


Рис. В 21. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі Hardox 500 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

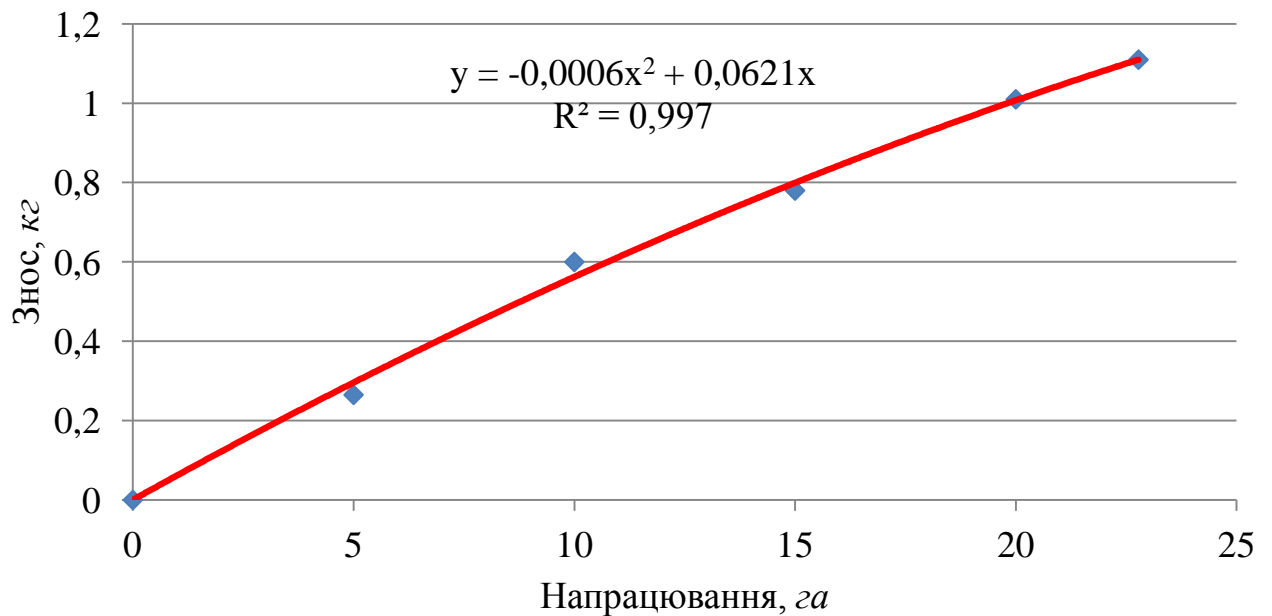


Рис. В 22. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах середнього суглинка

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

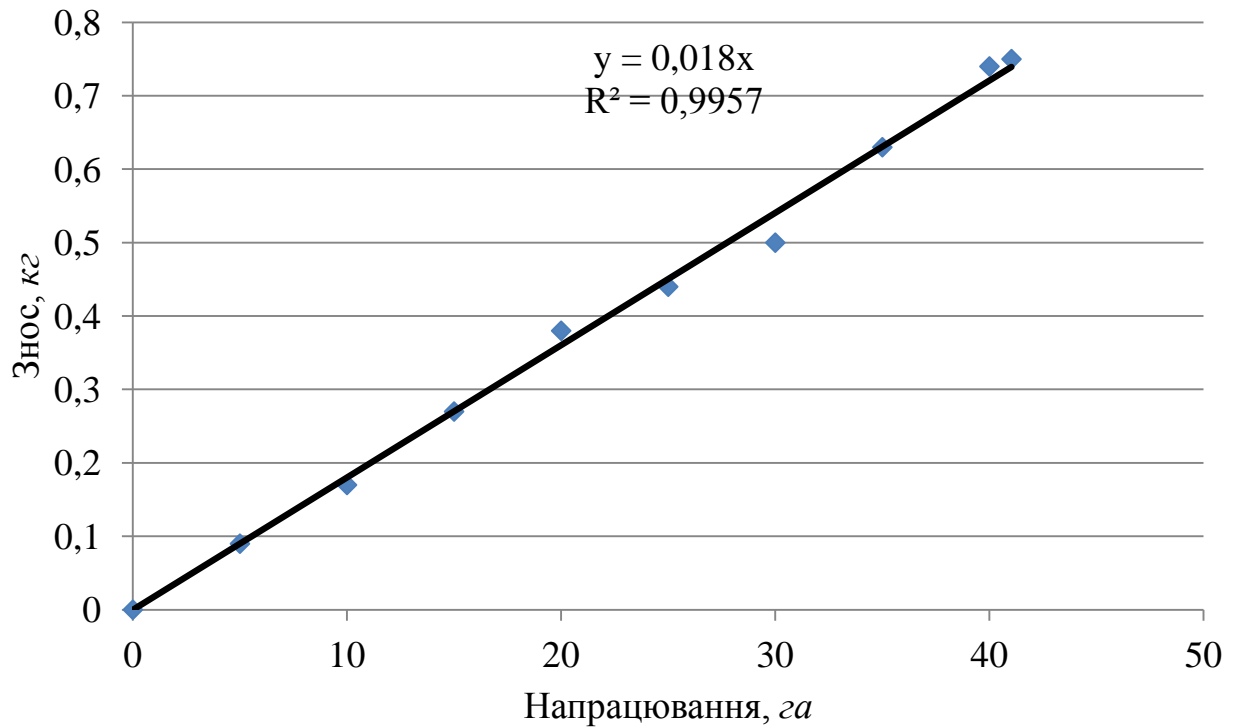


Рис. В 23. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+Т-590 під час експлуатації в умовах середнього суглинка

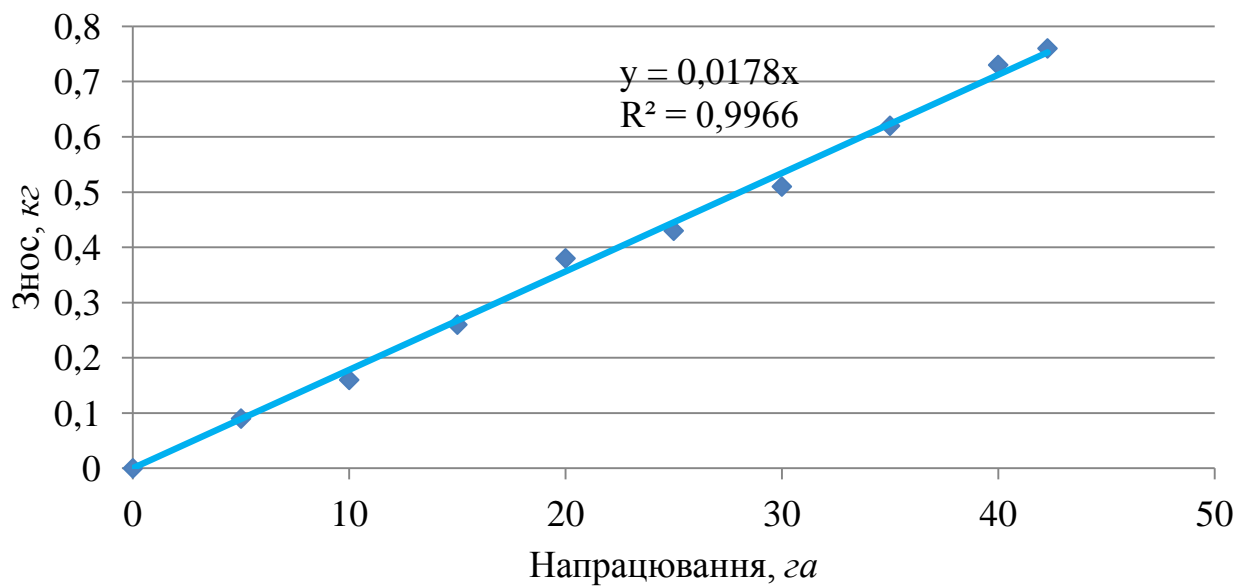


Рис. В 24. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах середнього суглинка

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

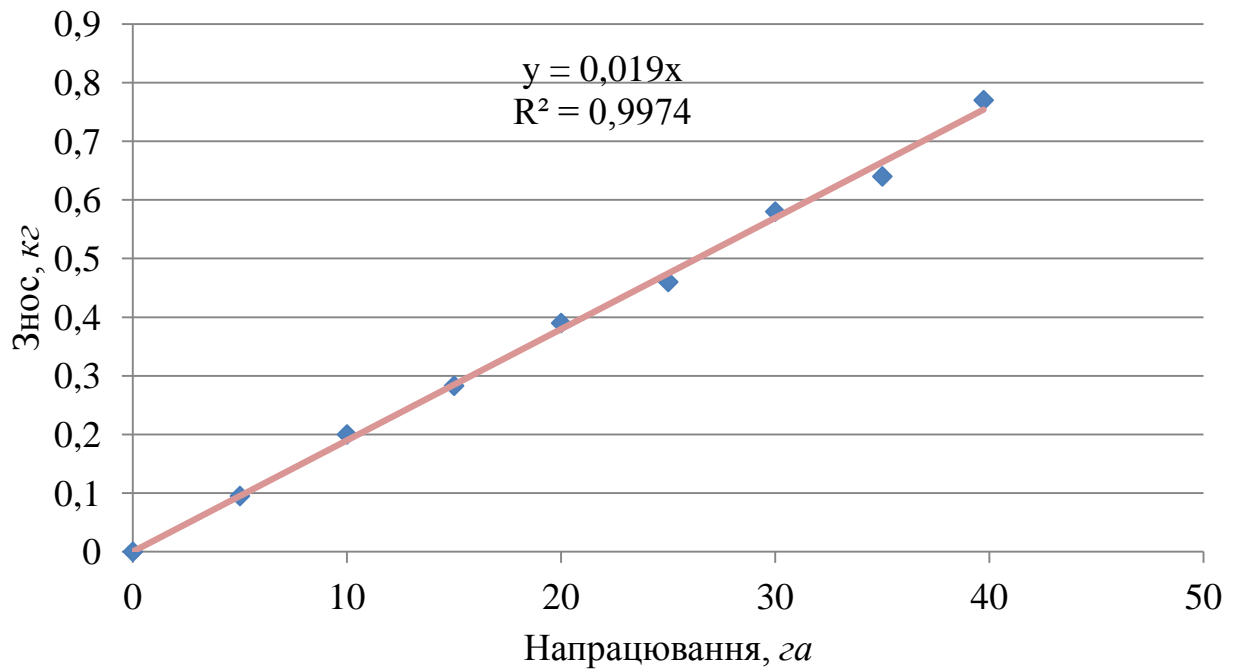


Рис. В 25. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+ М-Fe6 під час експлуатації в умовах середнього суглинка

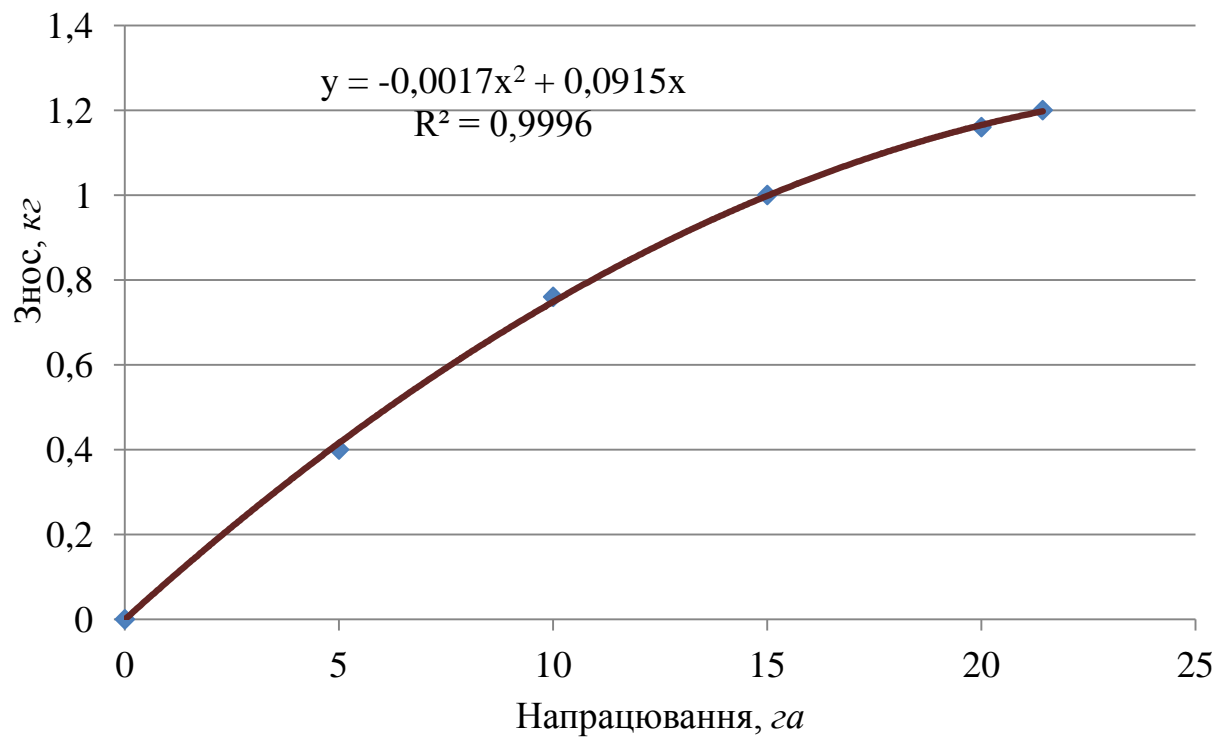


Рис. В 26. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі Л-53 під час експлуатації в умовах середнього суглинка

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

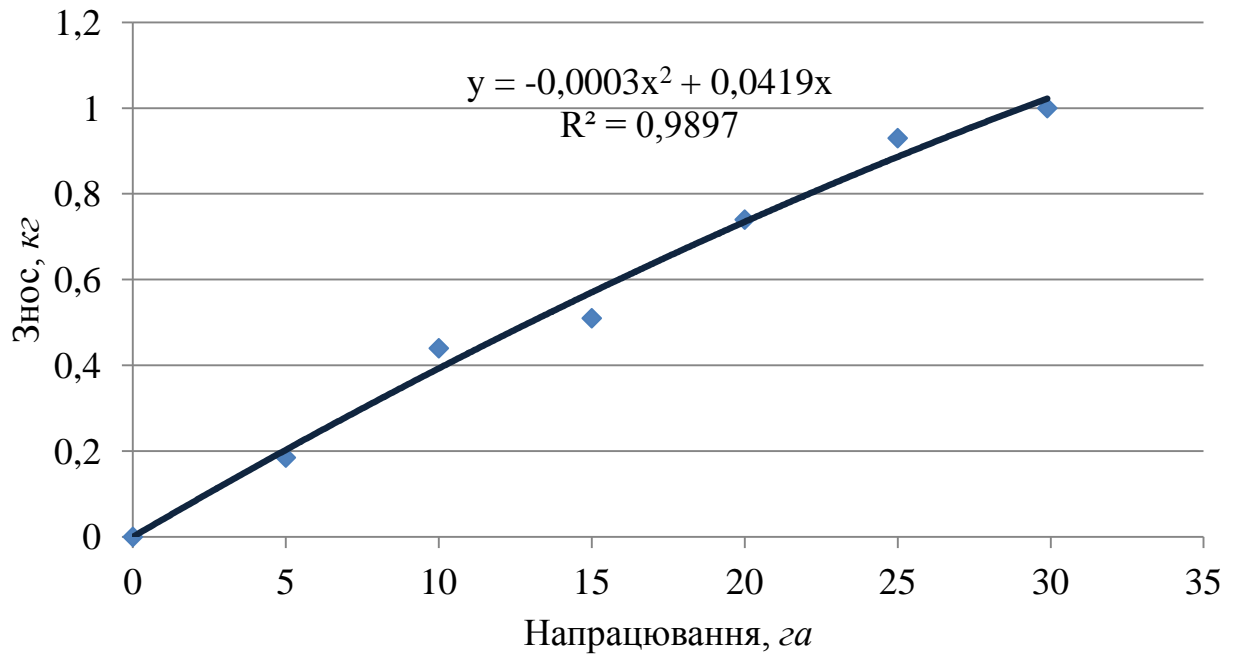


Рис. В 27. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі Hardox 500 під час експлуатації в умовах середнього суглинку

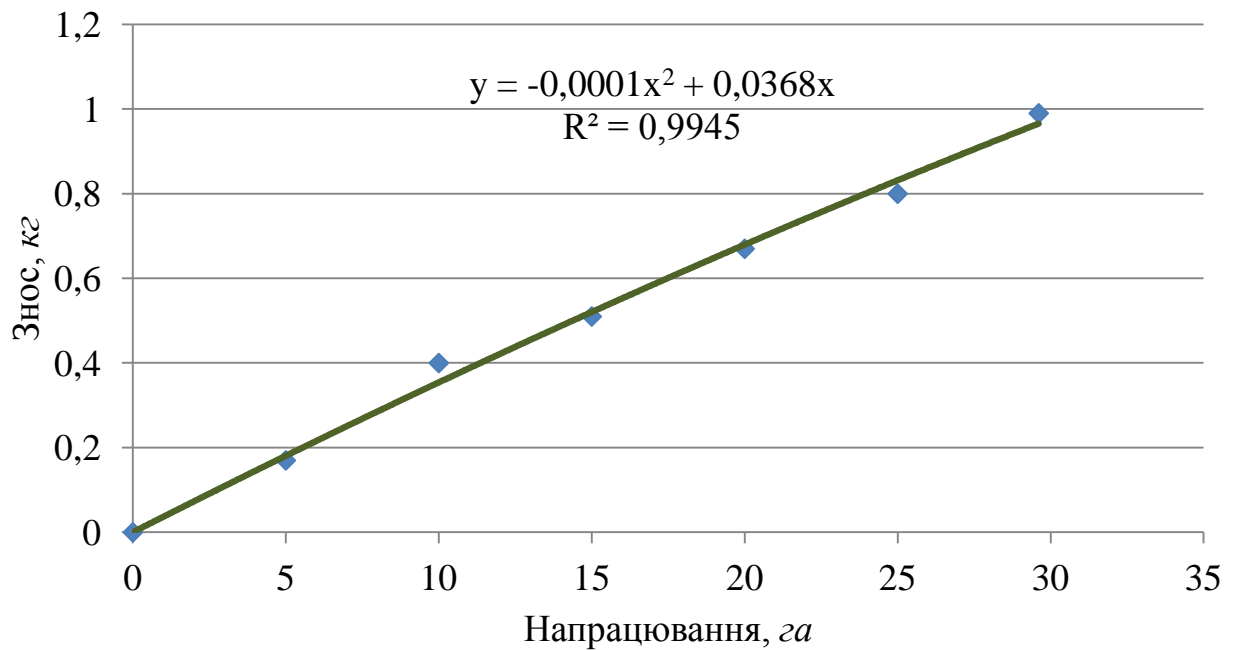


Рис. В 28. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах легкої глини

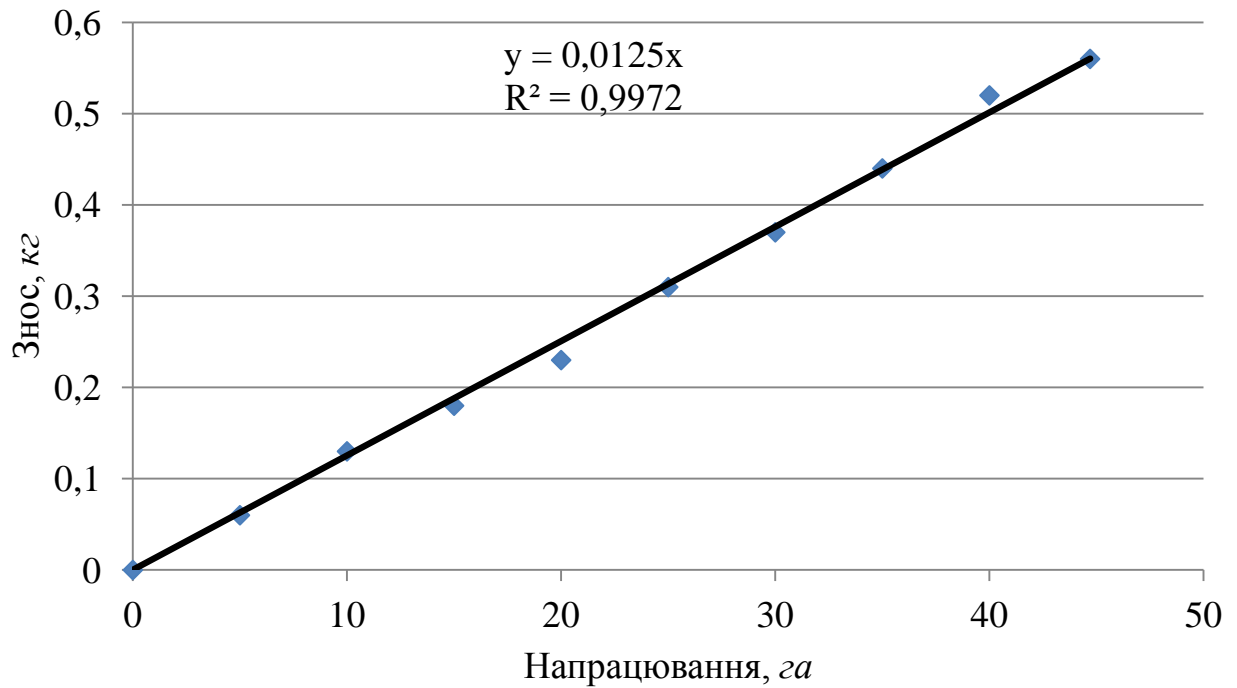
Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Рис. В 29. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+Т-590 під час експлуатації в умовах легкої глини

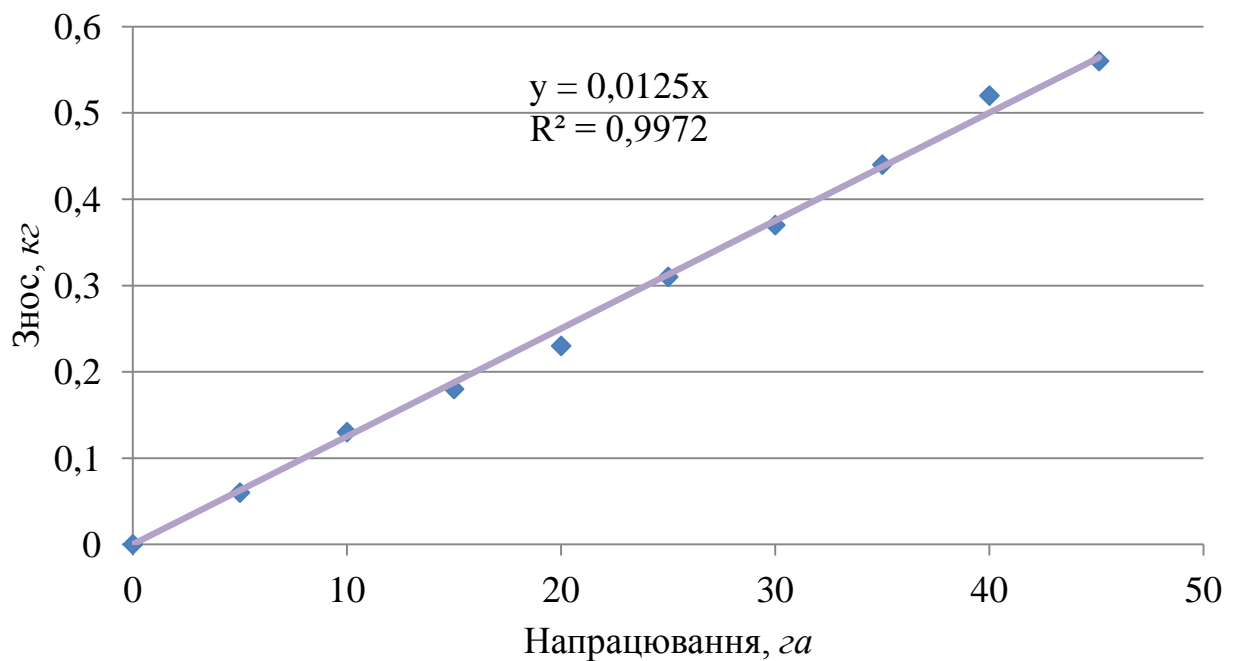


Рис. В 30. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах легкої глини

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

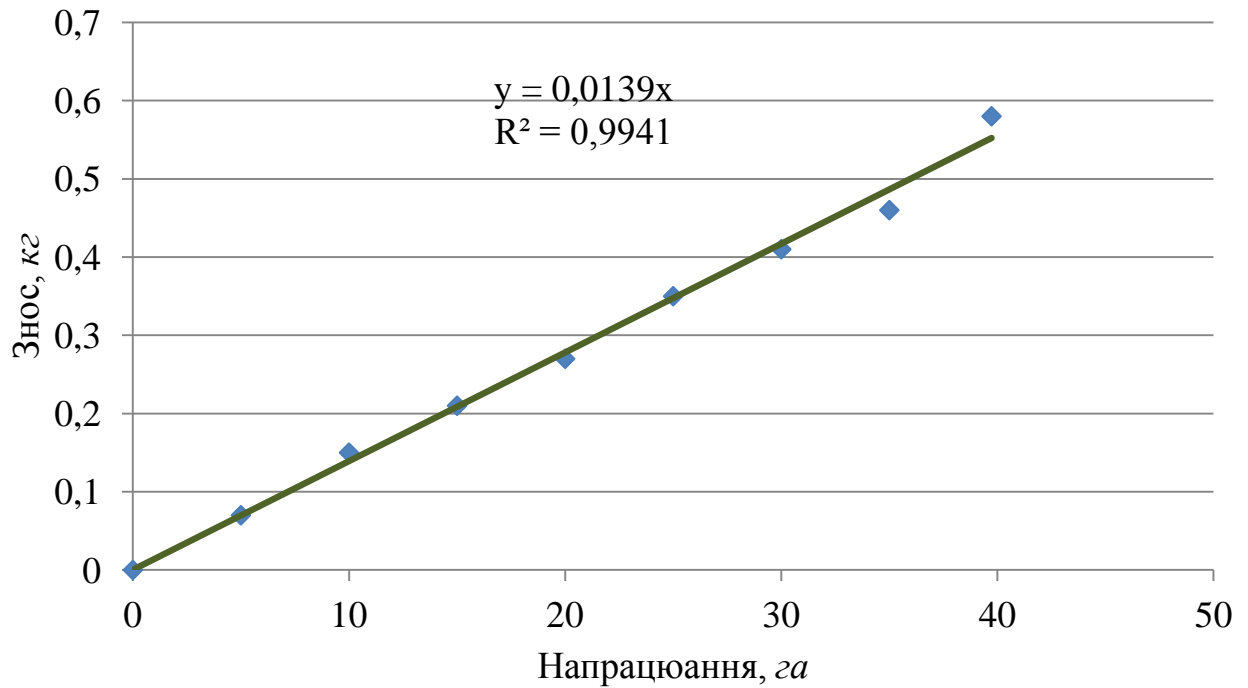


Рис. В 31. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі 65Г+ М-Fe6 під час експлуатації в умовах легкої глини

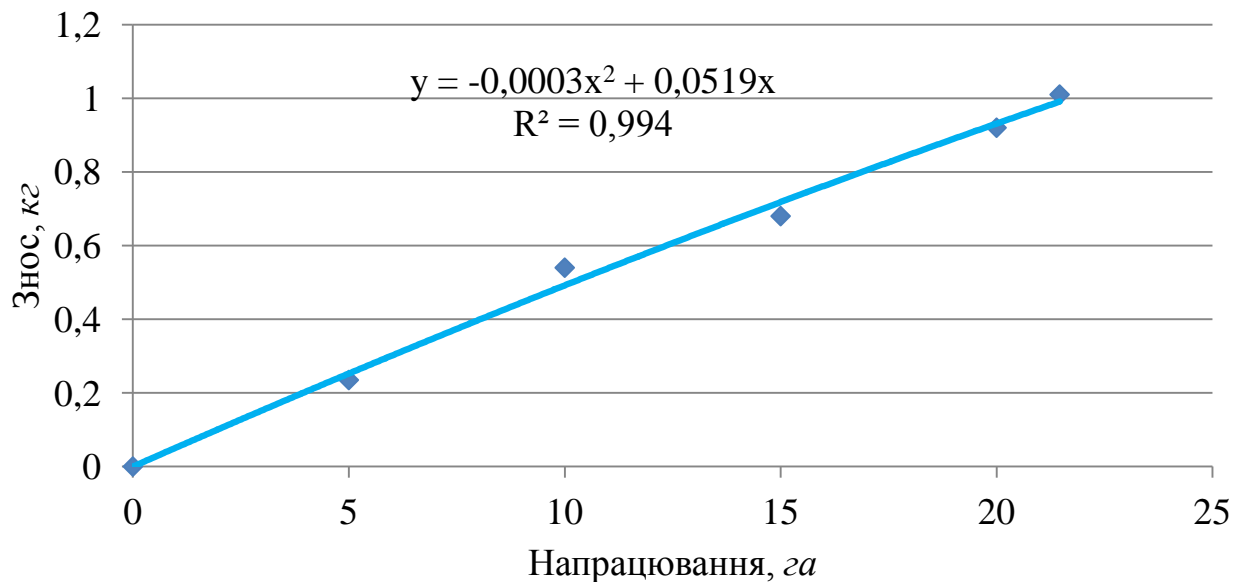


Рис. В 32. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі Л-53 під час експлуатації в умовах легкої глини

Продовження додатку В

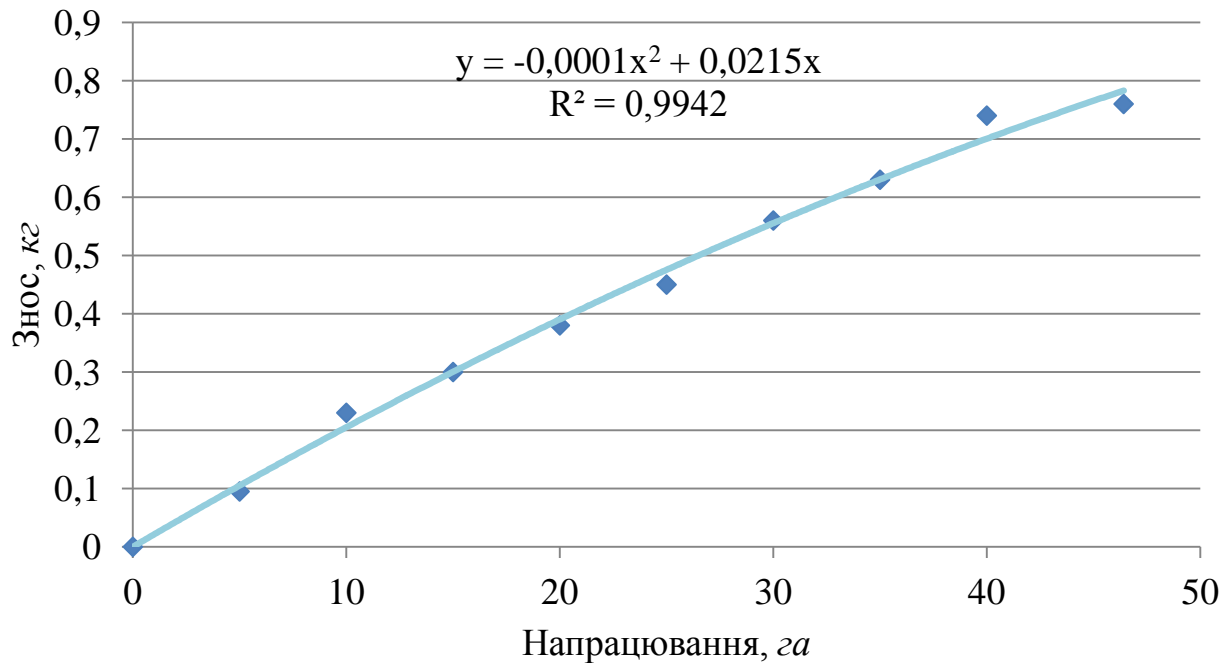
Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

Рис. В 33. Зношування леміша плуга виготовленого зі сталі Hardox 500 під час експлуатації в умовах легкої глини

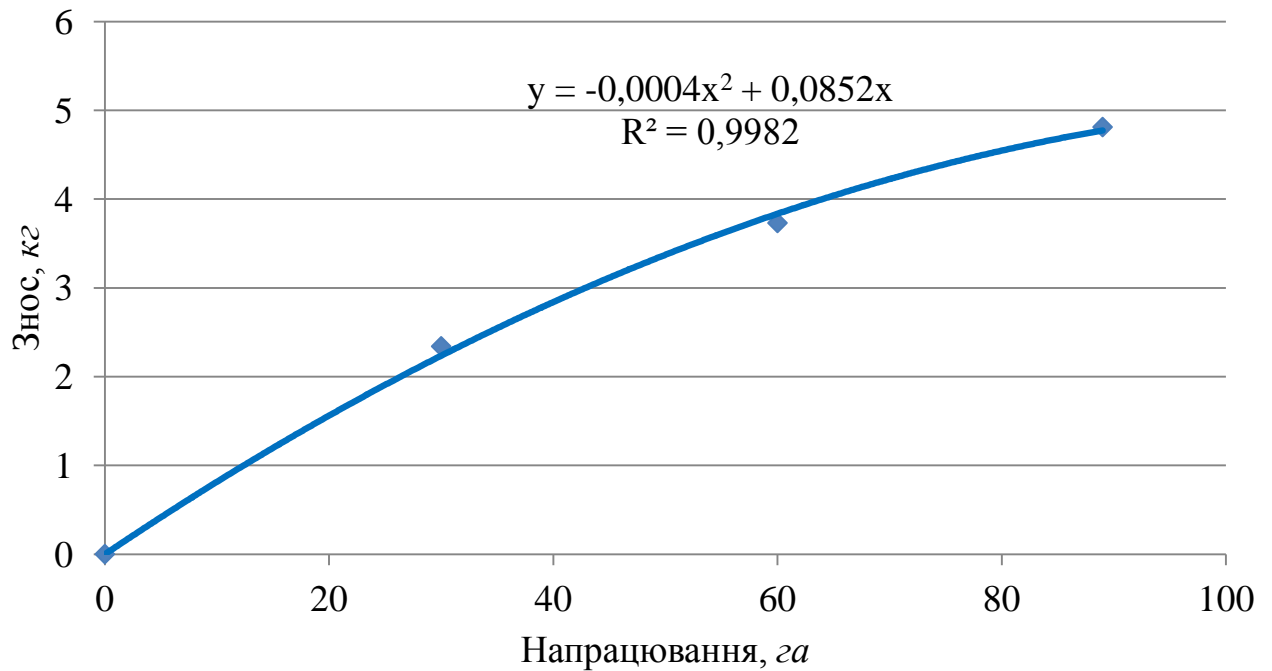


Рис. В 34. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 28MnB5 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

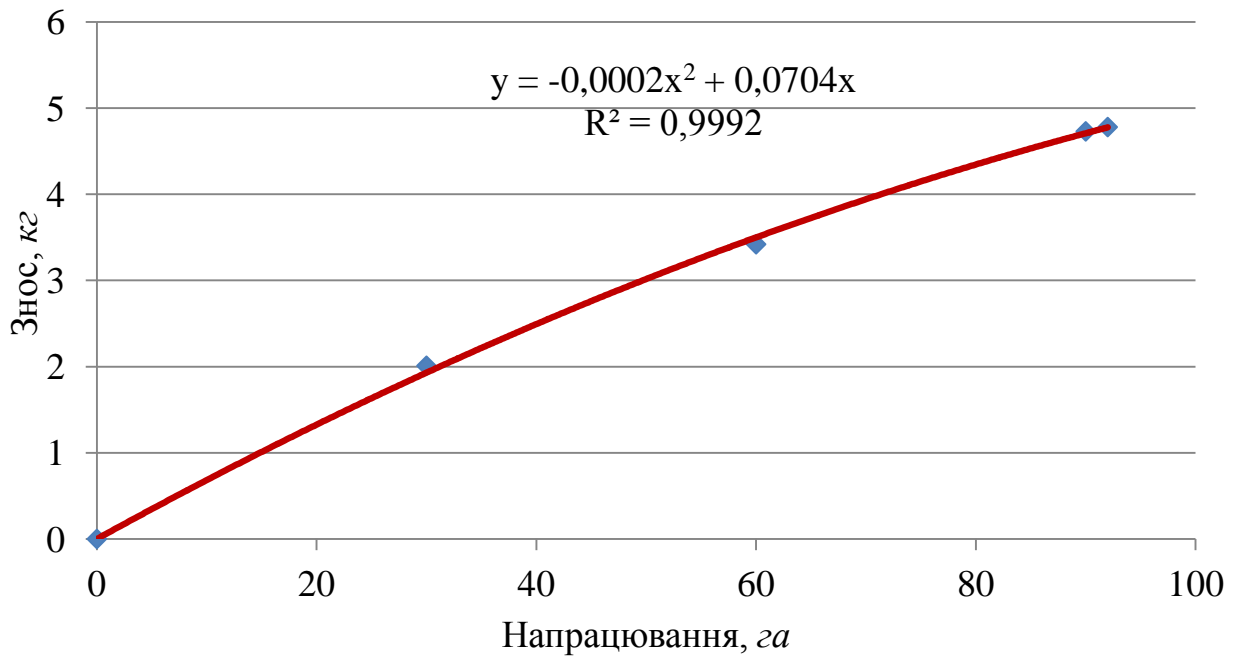


Рис. В 35. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

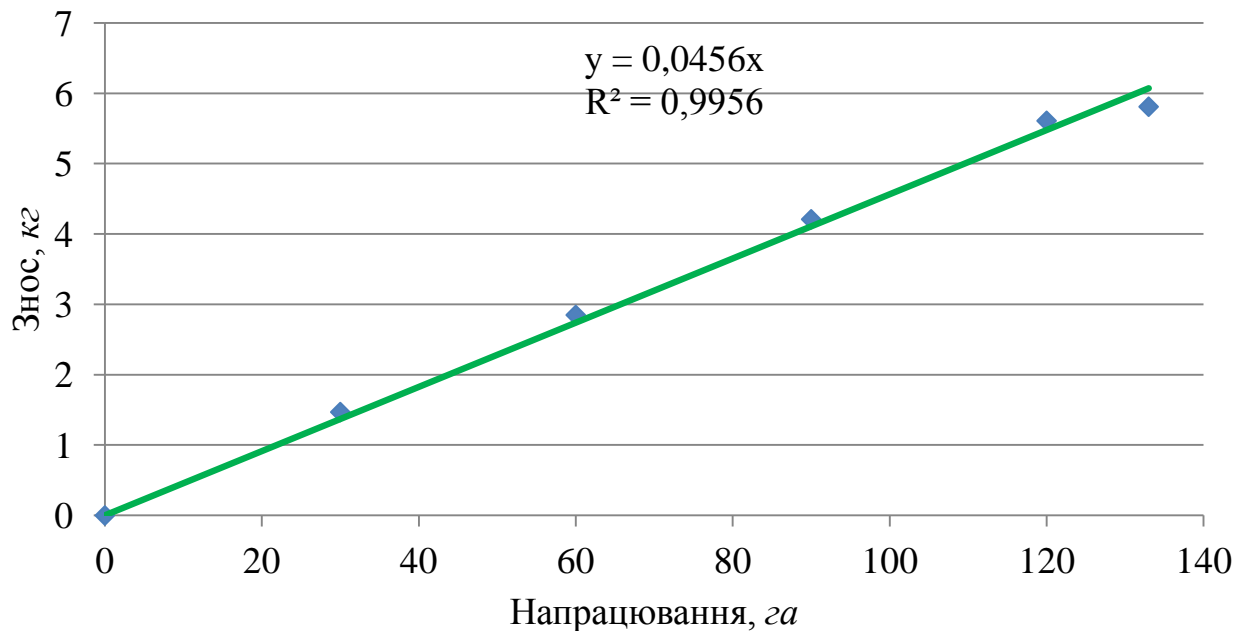


Рис. В 36. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

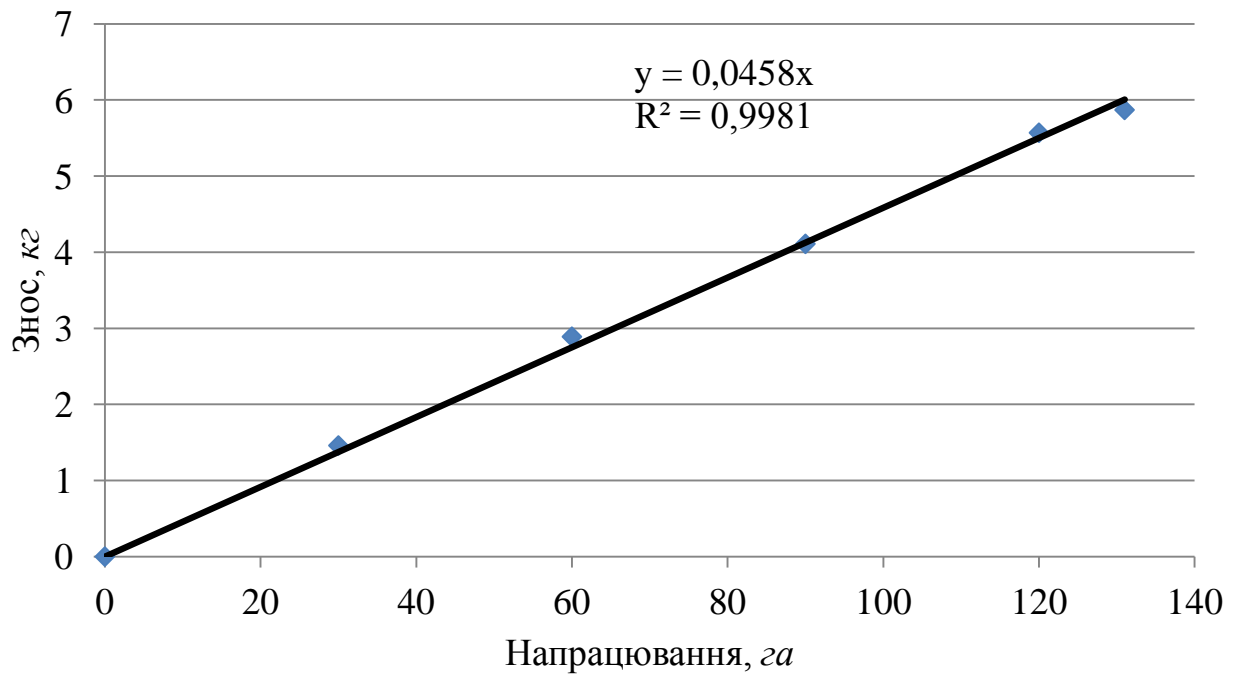


Рис. В 37. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+Т-590 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

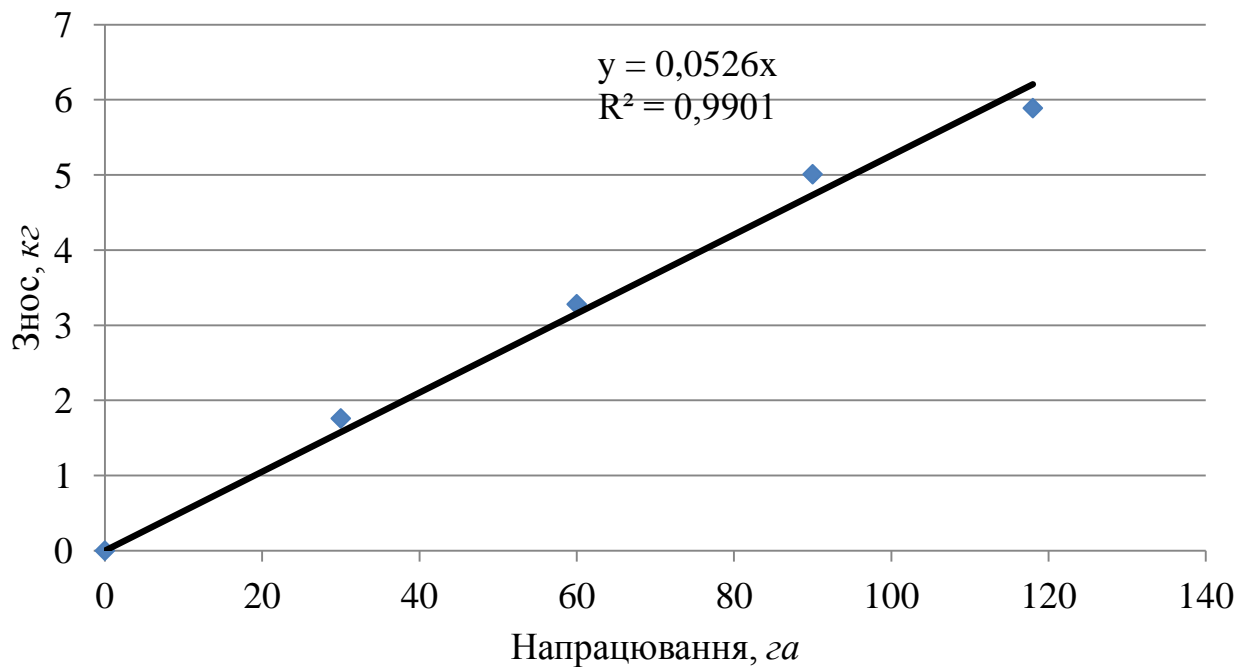


Рис. В 38. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+М-Fe6 під час експлуатації в умовах супіщаного ґрунту

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

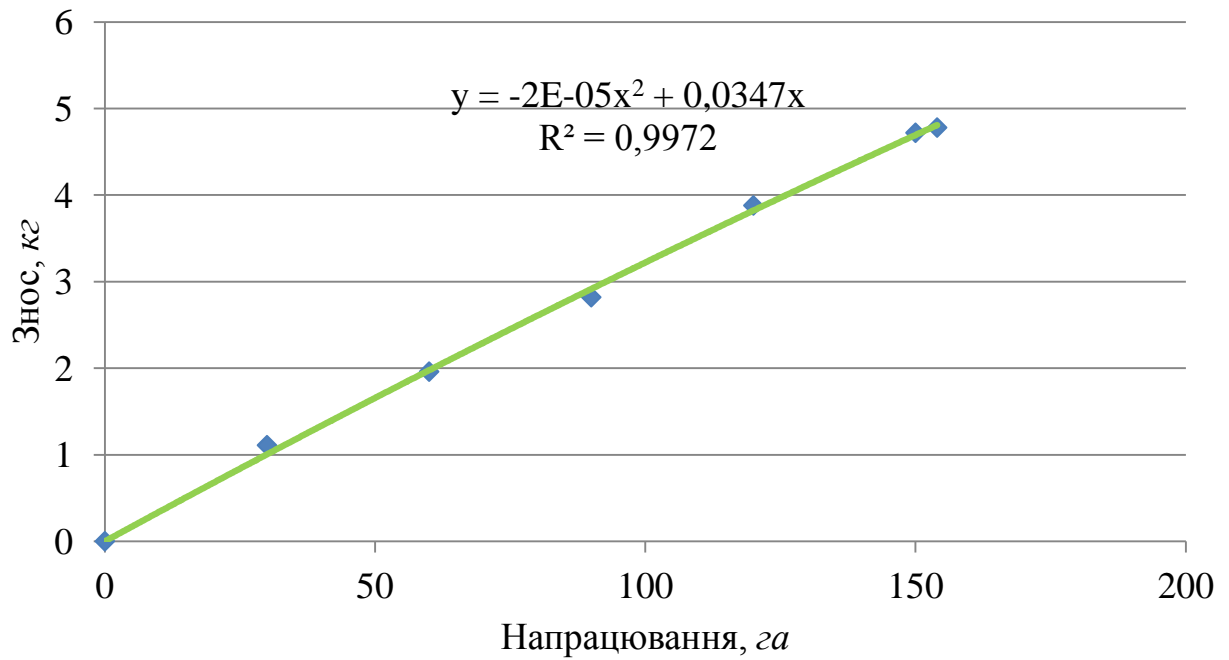


Рис. В 39. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 28MnB5 під час експлуатації в умовах середнього суглинка

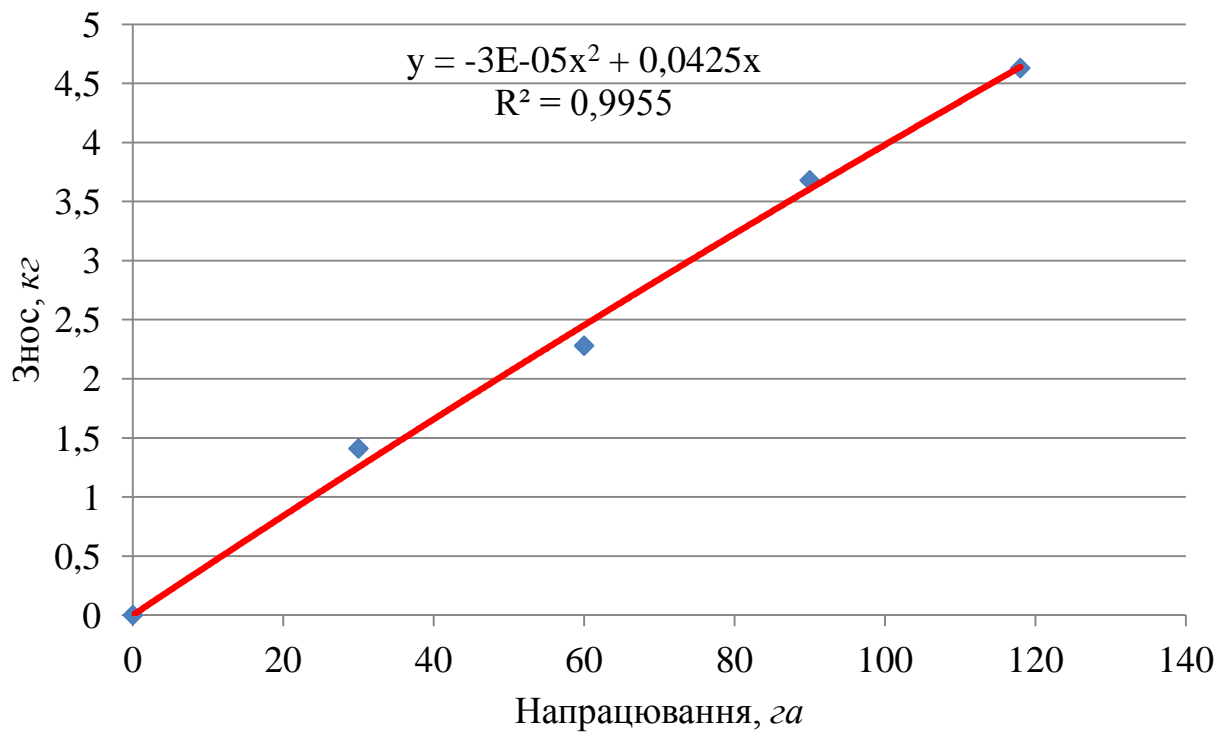


Рис. В 40. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах середнього суглинка

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

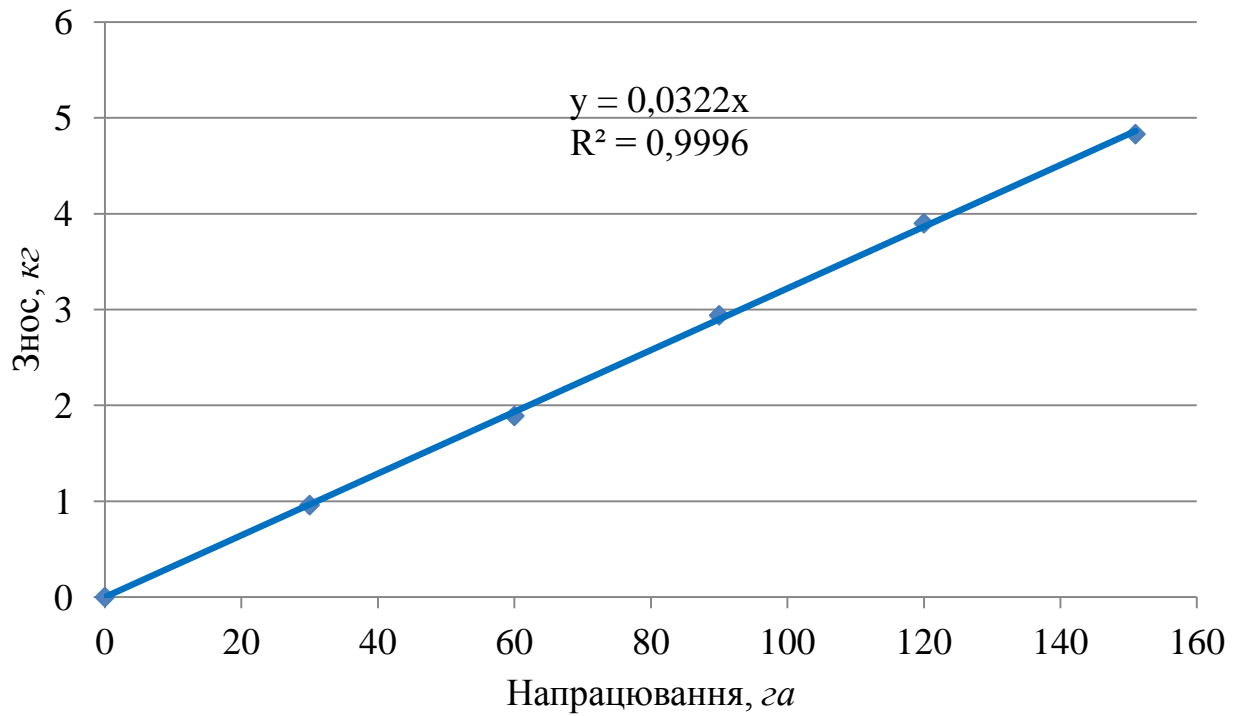


Рис. В 41. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах середнього суглинку

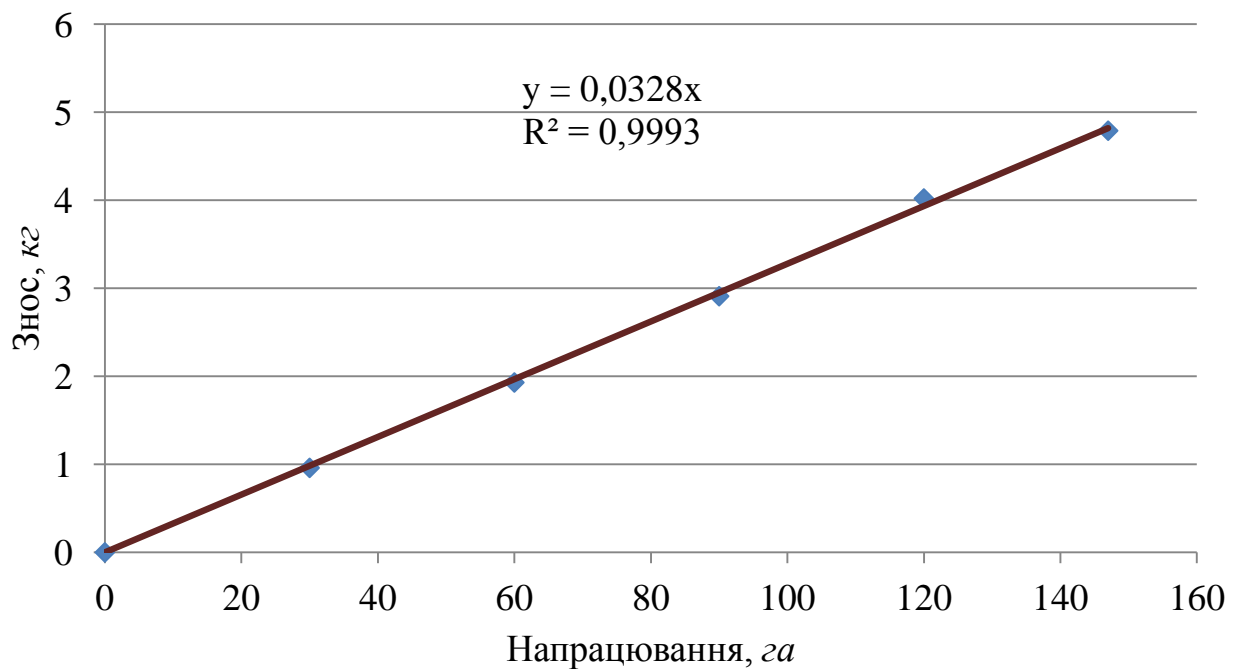


Рис. В 42. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+Т-590 під час експлуатації в умовах середнього суглинку

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

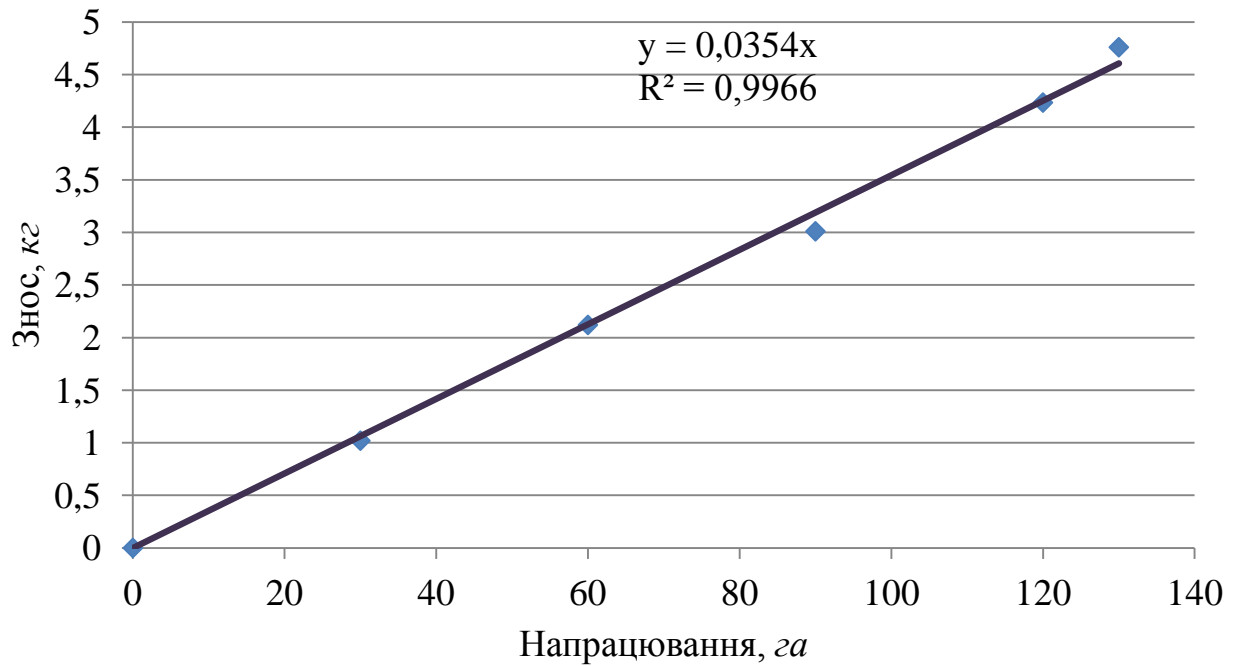


Рис. В 43. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+М-Fe6 під час експлуатації в умовах середнього суглинка

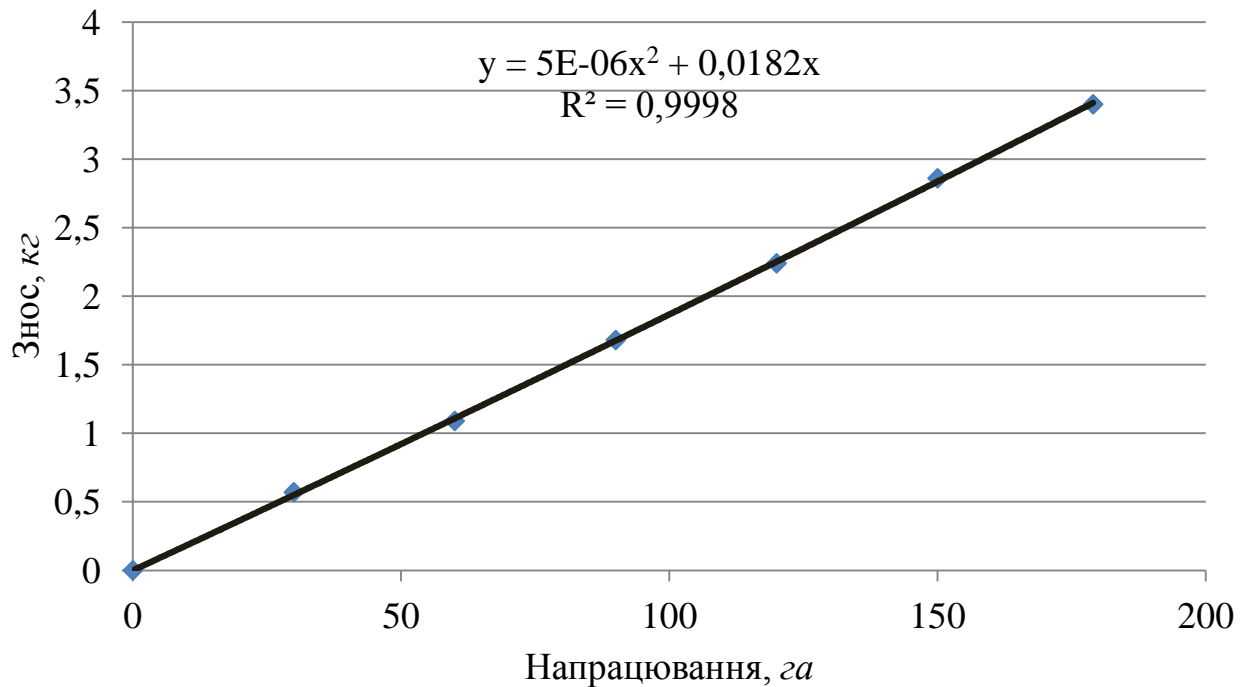


Рис. В 44. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 28MnB5 під час експлуатації в умовах легкої глини

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

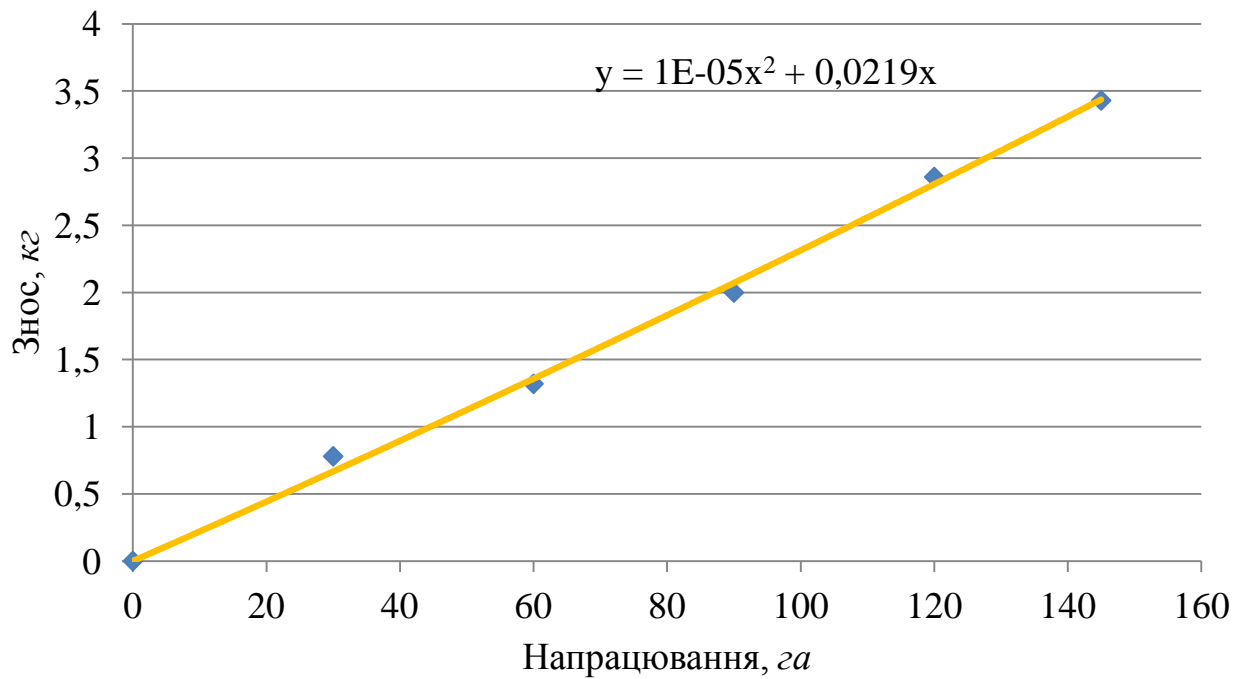


Рис. В 45. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г під час експлуатації в умовах легкої глини

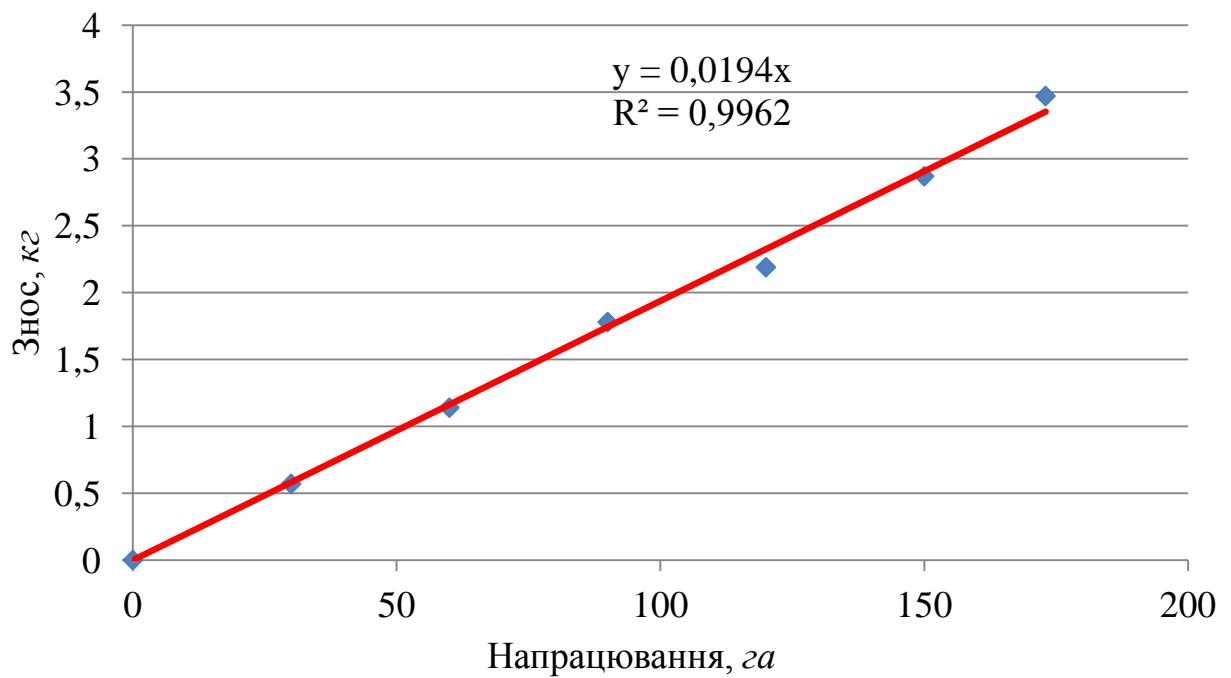


Рис. В 46. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+Т-620 під час експлуатації в умовах легкої глини

Динаміка зношування робочих органів ґрунтообробних машин

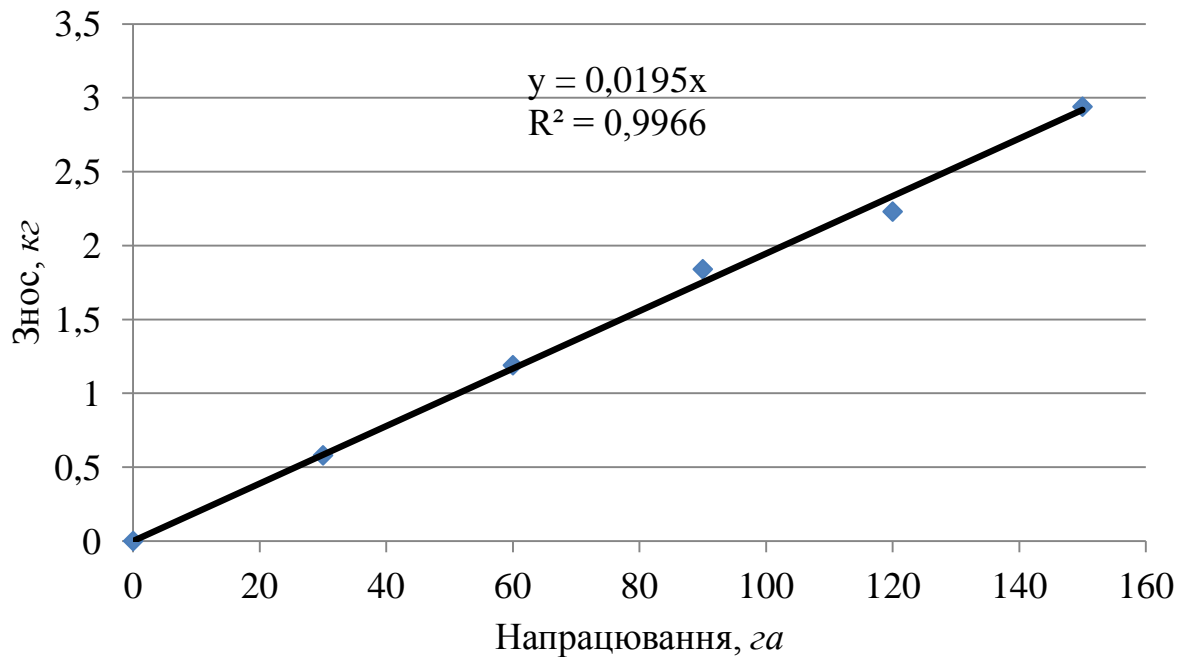


Рис. В 47. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+Т-590 під час експлуатації в умовах легкої глини

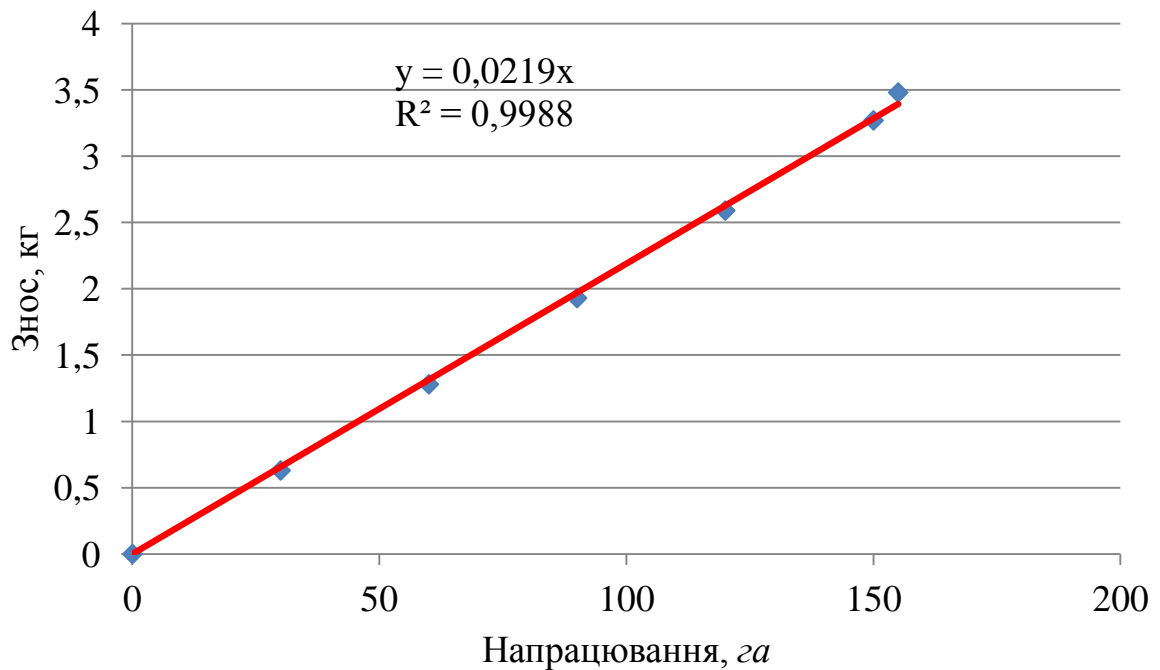


Рис. В 48. Зношування дискового робочого органу виготовленого зі сталі 65Г+М-Fe6 під час експлуатації в умовах легкої глини

Таблиця Г 1

Інтервали значень коефіцієнтів K_1 , K_2 , K_3 , K_4 для серійних стрілчастих лап

Коефіцієнт	Супіщаний	Середній суглинок	Глина легка
K_1	0,65...0,77	0,6...0,76	0,62...0,73
K_2	0,02...0,03	0,02...0,03	0,02...0,03
K_3	0,19...0,29	0,15...0,27	0,16...0,24
K_4	0,02...0,03	0,07...0,10	0,09...0,11
$\sum_{i=1}^4 K_{i4}$	1	1	1

Таблиця Г 2

Інтервали значень коефіцієнтів K_1 , K_2 , K_3 , K_4 для серійних дискових робочих органів

Коефіцієнт	Супіщаний	Середній суглинок	Глина легка
K_1	0,69...0,84	0,62...0,79	0,59...0,74
K_2	0,02...0,03	0,02...0,03	0,02...0,03
K_3	0,10...0,18	0,13...0,23	0,14...0,24
K_4	0,04...0,10	0,06...0,12	0,1...0,14
$\sum_{i=1}^4 K_{i4}$	1	1	1

Таблиця Г 3

Інтервали значень коефіцієнтів K_1, K_2, K_3, K_4 для серійних лемішів

Коефіцієнт	Супіщаний	Середній суглинок	Глина легка
K_1	0,62...0,82	0,61...0,8	0,67...0,78
K_2	0,02...0,04	0,02...0,04	0,02...0,04
K_3	0,14...0,19	0,16...0,19	0,16...0,21
K_4	0,02...0,05	0,02...0,06	0,04...0,08
$\sum_{i=1}^4 K_{i4}$	1	1	1

Таблиця Г 4

**Інтервали значень коефіцієнтів K'_1, K'_2, K'_3, K'_4 для зміцнених стрілчастих
лап**

Коефіцієнт	Супіщаний	Середній суглинок	Глина легка
K'_1	0,69...0,83	0,64...0,79	0,61...0,74
K'_2	0,03...0,05	0,03...0,05	0,03...0,05
K'_3	0,17...0,23	0,12...0,20	0,13...0,21
K'_4	0,02...0,03	0,06...0,11	0,1...0,13
$\sum_{i=1}^4 K_{i4}$	1	1	1

Таблиця Г 5

Інтервали значень коефіцієнтів K'_1, K'_2, K'_3, K'_4 для зміцнених дискових робочих органів

Коефіцієнт	Супіщаний	Середній суглинок	Глина легка
K'_1	0,63...0,78	0,59...0,74	0,54...0,66
K'_2	0,06...0,09	0,06...0,08	0,04...0,06
K'_3	0,11...0,18	0,12...0,21	0,15...0,22
K'_4	0,05...0,10	0,08...0,12	0,15...0,18
$\sum_{i=1}^4 K_{i4}$	1	1	1

Таблиця Г 6

Інтервали значень коефіцієнтів K'_1, K'_2, K'_3, K'_4 для зміцнених лемішів

Коефіцієнт	Супіщаний	Середній суглинок	Глина легка
K'_1	0,72...0,84	0,70...0,82	0,69...0,79
K'_2	0,02...0,04	0,02...0,04	0,02...0,04
K'_3	0,11...0,16	0,12...0,18	0,14...0,18
K'_4	0,03...0,08	0,04...0,08	0,05...0,09
$\sum_{i=1}^4 K_{i4}$	1	1	1

Впровадження результатів докторської роботи

**Міністерство освіти і науки України
Житомирський агротехнічний коледж**

Р/р UA5382017203442210014200005109

Код. 00727966

КПКВК 0611120

ДКС України м.Київ

10031 м. Житомир, вул. Покровська, 96

Тел. факс. (0412) 25-31-06

E-mail: info@zhatk.zt.ua

http://zhatk.zt.ua

№ 81«17» квітня 2020 р.**АКТ****Про впровадження/використання результатів
докторської дисертаційної роботи
у навчальний процес**

Даним актом стверджується, що результати дисертаційної роботи на тему «Наукові основи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва виконаної Бораком Костянтином Вікторовичем впроваджені у навчальну програму при викладанні дисциплін:

- «Технічний сервіс та ремонт машин і обладнання в АПК» використані матеріали, що стосується оптимізації методів зберігання сільськогосподарських машин;

- «Машини і обладнання АПВ» використані матеріали, що стосується проектування самогоструювальних робочих органів ґрунтообробних машин;

- «Матеріалознавство і ТКМ та ВСТВ» використані матеріали, що стосується дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин та зносостійких покриттів, які застосовуються для підвищення їх довговічності;

на кафедрі «Агроінженерія» у підготовці фахівців ОС «Бакалавр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» у Житомирському агротехнічному коледжі.

Директор, д.е.н., доц.



М.М. Тимошенко

Продовження додатку Д

Впровадження результатів докторської роботи

Міністерство освіти і науки України
ЖИТОМИРСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
10008, м. Житомир, бульвар Старий, 7
тел. (0412) 22-85-97
факс: (0412) 22-14-02
e-mail: znau_dilovod@i.ua
www.znau.edu.ua
код ЄДРПОУ 00493681



Ministry of Education and Science of Ukraine
ZHYTOMYR NATIONAL
AGROECOLOGICAL UNIVERSITY
7, Staryi Blvd, Zhytomyr, 10008
phone: +380 (412) 22-85-97
fax: +380 (412) 22-14-02
e-mail: znau_dilovod@i.ua
www.znau.edu.ua
USREOU 00493681

Від 30.04.12 № 715/01-17
на № _____ від _____

АКТ

**Про впровадження/використання результатів
докторської дисертаційної роботи
у навчальний процес**

Даним актом стверджується, що результати дисертаційної роботи на тему «Наукові основи підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин», що представлена на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.11 – Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва виконаної Бораком Костянтином Вікторовичем впроваджені у навчальну програму при викладанні дисциплін:

- «Надійність машин та обладнання АПБ» використанні матеріали, що стосуються підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин;
 - «Технічний сервіс в АПК» використанні матеріали, що стосуються оптимізації методів зберігання сільськогосподарських машин;
 - «Сільськогосподарські машини» використанні матеріали, що стосуються проектування самогоструючих робочих органів ґрунтообробних машин;
 - «Матеріалознавство і ТКМ» використанні матеріали, що стосуються дослідження фізико-механічних властивостей матеріалів робочих органів ґрунтообробних машин та зносостійких покриттів, які застосовуються для підвищення їх довговічності;
- на кафедрах процесів, машин і обладнання в агроінженерії та машиновикористання та сервісу технологічних систем у підготовці фахівців ОС «Бакалавр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» у Житомирському національному агроєкологічному університеті.

Декан факультету
інженерії та
енергетики



Ректор.....

(Signature)
(Signature)

доц. Ярош Я.Д.

проф. Скидан О.В.

Продовження додатку Д

Впровадження результатів докторської роботи

Затверджую
Ректор Поліського
національного університету

О. В. Скидан
2020р.



Затверджую
Голова СФГ «Шар» Козятинський
район Вінницька область

С. В. Шнайдрок
2020р.



АКТ

про експлуатаційні випробовування та впровадження результатів
докторської роботи у виробництво

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри машиновикористання та сервісу технологічних систем Поліського національного університету, кандидат технічних наук, доцент Савченко В. М., доцент кафедри машиновикористання та сервісу технологічних систем Поліського національного університету, кандидат технічних наук Борак К. В. та представник від СФГ «Шар» Козятинського району Вінницької області інженер Шемотюк В. І. склали цей акт в тім, що в умовах земель СФГ «Шар» проведені експлуатаційні випробовування зміцнених та серійних робочих ґрунтообробних машин органів (стрілчастих лап, дискових робочих органів та лемешів), проведені дослідження впливу способу зберігання на зносостійкість та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин та впроваджено у виробництво запропонований комплексний підхід підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів ґрунтообробних машин, який включав у себе спектр технологічних, конструктивних та експлуатаційних методів.

Впровадження комплексного підходу в підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, умовах СФГ «Шар» Козятинського району Вінницької області, дозволило підвищити довговічність дискових робочих органів універсального дискового агрегату в 1,97 раз.

Від Поліського національного університету

Завідувач кафедри МСТС

Доцент кафедри МСТС

Від СФГ «Шар»:

Інженер

В. М. Савченко

К. В. Борак

В. І. Шемотюк



Продовження додатку Д

Впровадження результатів докторської роботи

Затверджую
Ректор Поліського
національного університету

О. В. Скидан
2020р.

Затверджую
Керівник ТОВ «ВП Полісся»
Овруцький район Житомирська область

Т. Ю. Тростинюк
2020р.

АКТ

про експлуатаційні випробовування та впровадження результатів
докторської роботи у виробництво

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри машиновикористання та сервісу технологічних систем Поліського національного університету, кандидат технічних наук, доцент Савченко В. М., доцент кафедри машиновикористання та сервісу технологічних систем Поліського національного університету, кандидат технічних наук Борак К. В. та заступник керівника з механізації ТОВ «ВП Полісся» Овруцького району Житомирської області Непомнющий В. В. склали цей акт в тім, що в умовах земель ТОВ «ВП Полісся» проведені експлуатаційні випробовування зміцнених та серійних робочих ґрунтообробних машин органів (стрілчастих лап, дискових робочих органів та лемешів), проведені дослідження впливу способу зберігання на зносостійкість та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин та впроваджено у виробництво запропонований комплексний підхід підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів ґрунтообробних машин, який включав у себе спектр технологічних, конструктивних та експлуатаційних методів.

Впровадження комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, в умовах ТОВ «ВП Полісся» Овруцького району Житомирської області, дозволило підвищити довговічність стрілчастих лап у 1,84 рази та лемешів плуга в 2,51 рази.

Від Поліського національного університету

Завідувач кафедри МСТС

Доцент кафедри МСТС

Від ТОВ «ВП Полісся»:

Заступник з механізації

В. М. Савченко

К. В. Борак

В. В. Непомнющий

Продовження додатку Д

Впровадження результатів докторської роботи

Затверджую
Ректор Поліського
національного університету

О. В. Скидан
_____ 2020р.

Затверджую
Директор ТОВ «Аграрні Системні
Технології»

В. Л. Постойчук
_____ 2020р.

АКТ

про експлуатаційні випробовування та впровадження результатів
докторської роботи у виробництво

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедру машиновикористання та сервісу технологічних систем Поліського національного університету, кандидат технічних наук, доцент Савченко В. М., доцент кафедри машиновикористання та сервісу технологічних систем Поліського національного університету, кандидат технічних наук Борак К. В. та представник від ТОВ «Аграрні Системні Технології» Савіцький О. В. склали цей акт в тім, що в умовах земель ТОВ «Аграрні Системні Технології» проведені експлуатаційні випробовування зміцнених та серійних робочих ґрунтообробних машин органів (стрілчастих лап, дискових робочих органів та лемешів), проведені дослідження впливу способу зберігання на зносостійкість та довговічність робочих органів ґрунтообробних машин та впроваджено у виробництво запропонований комплексний підхід підвищення зносостійкості та довговічності робочих органів ґрунтообробних машин, який включав у себе спектр технологічних, конструктивних та експлуатаційних методів.

Впровадження комплексного підходу підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин, в умовах ТОВ «Аграрні Системні Технології», дозволило підвищити довговічність лемешів плуга в 1,89 рази.

Від Поліського національного університету

Завідувач кафедру МСТС

В. М. Савченко

Доцент кафедри МСТС

К. В. Борак

Від ТОВ «Аграрні Системні Технології»

Головний інженер

О. В. Савіцький