

УДК 631.31

МЕХАНІЗМ АБРАЗИВНОГО ЗНОШУВАННЯ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН

THE MECHANISM OF ABRASIVE WEAR OF THE WORKING BODIES OF TILLAGE MACHINES

Борак Костянтин, Рябчук Олександр, Рябчук Павло

Житомирський агротехнічний фаховий коледж, вул. Покровська 96, м. Житомир, 10031

Абразивне зношування є одним з найпоширеніших видів спрацювання деталей сільськогосподарських машин, особливо робочих органів ґрунтообробних знарядь. Під час обробітку ґрунту тверді частинки ґрунту (пісок, пил та глинисті включення, каміння) діють як абразив, що призводить до інтенсивного стирання поверхонь робочих органів. За оцінками, до 75–80% випадків простоїв сільськогосподарської техніки зумовлено саме абразивним зношуванням деталей [1]. Внаслідок цього погіршується продуктивність і зростають витрати – зношування робочих органів збільшує опір та енергоспоживання агрегату. Зокрема, тертя ґрунту об робочі поверхні може складати 20–30% опору ґрунтообробних машин [2], а зі зростанням спрацювання інструментів опір руху ще більше підвищується. Зношені плуги і культиватори гірше ріжуть ґрунт, потребують більшого тягового зусилля, що веде до перевитрати палива та зниження якості обробітку. Через інтенсивний знос ресурс деталей є обмеженим: наприклад, роторні ножі фрези часто потребують заміни вже через ~80 годин роботи [2]. Таким чином, підвищення зносостійкості ґрунтообробних органів є критично важливим для сільського господарства з точки зору економії та надійності техніки. Це зумовлює значну увагу науковців до вивчення механізмів абразивного зношування і пошуку шляхів їхнього уповільнення [1].

Останнє десятиліття відзначається активними дослідженнями абразивного зношування ґрунтообробних знарядь у всьому світі – від України та Європи до Азії. В англomовній літературі узагальнений аналіз представлений у огляді Malvajerdі [3]. У цій роботі відзначено, що абразивний знос є основною проблемою для ґрунтообробних інструментів і численні дослідники досліджували вплив властивостей ґрунту, геометрії знарядь, швидкості та глибини оранки на інтенсивність зношування. Зокрема, встановлено закономірність: збільшення розміру піщаних часток ґрунту веде до підвищення інтенсивності зношування робочих органів [3]. Ряд робіт присвячено зміцненню та захисту поверхні – нанесення твердих покриттів або наплавлень може суттєво зменшувати зношування і навіть знижувати тяговий опір плуга завдяки кращому ковзанню [3]. Паралельно, багато науковців моделювали процес зношування, будуючи залежності спрацювання від параметрів інструмента і ґрунту та використовуючи методи чисельного моделювання взаємодії “ґрунт–знаряддя”.

Українські вчені Борак К.В., Аулін В.В., Дворук В.І. та інші теж зробили вагомий внесок у дослідження абразивного зношування робочих органів ґрунтообробних машин. Так, К.В. Борак досліджував вплив форми абразивних частинок ґрунту на інтенсивність зношування робочих органів [4, 5]. Встановлено, що геометрія абразиву (його коефіцієнт форми) суттєво впливає на швидкість зношування: більш гострі піщинки спричиняють сильніше дряпання і швидше стирання металу, ніж округлі частинки. Інший приклад – роботи В. Ауліна та К. Борака, опубліковані французькою мовою, де запропоновано метод підвищення зносостійкості дискових ґрунтообробних органів. В польових випробуваннях вони порівняли п’ять типів дисків та показали, що диски із сталі 65Г, зміцнені електроіскровою обробкою з одночасним заточуванням під кутом 30°, забезпечують на 76% більшу стійкість до зношування і напращування 178 га до граничного стану – проти ~100 га у стандартних дисків

[6]. Причому протягом усього ресурсу спостерігався ефект самозагострювання крайки диска, що підтверджує доцільність такої технології виготовлення [6].

Вагомий доробок у дослідження механіки зношування належить і європейським науковцям. Зокрема, міжнародна група під керівництвом А. Калачки (Угорщина) за участі бельгійських та німецьких колег дослідила зносостійкість бористої сталі 27MnB5, з якої виготовляють робочі лапи культиваторів. В їх експериментах імітували роботу клиноподібного долота у ґрунті та фіксували зміну маси, твердості і мікроструктури після зношування. Було виявлено, що знос носить зональний характер вздовж профілю лапи: на передній ріжучій крайці домінує мікрорізання, а на ділянках позаду – мікрооранка (утворення борозен). Ці спостереження узгоджені з результатами 3D-сканування та профілометрії, а також підтверджені чисельним моделюванням потоку ґрунту методом дискретних елементів (DEM) [7]. Подібні комплексні дослідження (експеримент+моделювання) ведуться і в Німеччині – зокрема, розробляються моделі прогнозування зносу плуга за даними про властивості ґрунту та матеріалу інструмента [2].

Китайські дослідники також приділяють значну увагу проблемі зношування сільгосптехніки. В роботі [8] відзначено, що абразивне спрацювання переважає серед усіх видів зношування у ґрунтообробних машинах. Більше того, вихід з ладу через знос понад половини ключових вузлів агротехніки обумовлений саме абразивним зношуванням [2]. Китайські вчені досліджували зносостійкість різних матеріалів робочих органів – від високоміцного чавуну до алюмінієвих сплавів. Наприклад, Lu та співавт., вивчали абразивне зношування високоміцного ковкого чавуну з різною мікроструктурою (феритно-бейнітна, мартенситна тощо) за допомогою лабораторних тестів «штифт-диск» та тритільного абразивного зносу [9]. Вони встановили близьку до лінійної залежність між твердістю і зносостійкістю таких чавунів. Зразки з мартенситною основою та евтектичними карбідами показали найвищу стійкість: на їх поверхні після випробувань спостерігалось лише коротке мікрорізання і дрібні поверхневі вищербини, тоді як більш м'яка бейнітна основа дала глибокі вибоїни від виламування частинок. Таким чином, сучасні наукові публікації різними мовами сходяться на тому, що підвищення твердості та оптимізація мікроструктури матеріалу значно знижують інтенсивність абразивного зношування. Водночас надмірно крихкі структури можуть руйнуватися уламково, тому баланс між твердістю і ударною в'язкістю є предметом уваги дослідників [2].

Отже, аналіз наукових джерел останніх років показує, що проблема абразивного зносу вирішується комплексно: шляхом глибшого розуміння механізмів зношування, врахування впливу факторів ґрунтового середовища та вдосконалення матеріалів і захисних покриттів робочих органів.

З погляду фізико-механічних процесів, абразивне зношування виникає при контакті твердих частинок з поверхнею матеріалу за наявності відносного руху і навантаження. Розрізняють двотільне (two-body abrasive wear) та трьохтільне (three-body abrasive wear) абразивне зношування. У випадку двотільного зношування абразив є частиною однієї з контактуючих поверхонь (наприклад, виступи шорсткості твердої поверхні дряпають м'якший метал). Трьохтільне зношування характерне для ґрунтообробних робочих органів – тверді частинки ґрунту виступають як третє тіло між робочим органом і масивом ґрунту, вільно перекочуються або проковзають, діючи як абразивний порошок. Саме трьохтільний абразивний знос переважає при роботі плугів, культиваторів та інших ґрунтообробних знарядь [10, 11, 12].

На мікрорівні абразивне зношування реалізується через кілька основних механізмів. Перший – мікрорізання (різальний знос), коли тверда частинка ковзає по більш м'якій поверхні подібно до різця, зрізуючи дрібні частки матеріалу у вигляді стружки [1]. При мікрорізанні на поверхні залишаються подовжені подряпини (скребки), а знятий матеріал утворює дрібні уламки – продукти зношування. Другий механізм – мікрооранка (абразивне борозноутворення): частинка не зрізає матеріал повністю, а втискається і пластично

переміщує його убік, утворюючи борозну з підняттям гребнів з країв [1]. Частина матеріалу при цьому залишається привареною до країв борозни у вигляді валиків. Поступово ці гребні можуть наклепуватися (ущільнюватися) і частково відламуватися – наприклад, внаслідок виникнення втомних тріщин при багаторазовому навантаженні [1]. Третій можливий механізм – крихке викришування (мікротріщини і відколювання), яке проявляється у відносно крихких матеріалах або при високих локальних напруженнях. У цьому випадку тверда зернина спричиняє зародження тріщин у приповерхневому шарі металу і шматочки матеріалу можуть вириватися цілими пластинками або лусочками [4]. На поверхні після такого механізму помітні вибоїни (ями) різних розмірів. Насправді всі ці механізми часто діють одночасно, хоча залежно від умов якийсь один домінує. Наприклад, для в'язких сталей переважають пластичні механізми (різання і пластичне борознення), тоді як для дуже твердих або крихких матеріалів більшу роль відіграє утворення тріщин і уламкове зношування [13].

Фактором, що визначає режим зношування, є співвідношення твердості абразиву і матеріалу деталі. Чим більша твердість частинок порівняно з металом, тим більше схильний метал до різального зносу з утворенням стружки [14-19]. За класичною теорією, якщо твердість інструмента H_i менш ніж в $\sim 1,3$ рази перевищує твердість абразиву H_a , то має місце інтенсивний знос за типом мікрорізання (так званий «severe abrasion»), тоді як при значно твердішому матеріалі інструмента зношування уповільнюється і частіше відбувається мікрооранка без відриву великих часток (режим «mild abrasion») [13]. Наприклад, у наведеному вище досліді з ковким чавуном було показано, що підвищення твердості матриці від бейніту до мартенситу підвищило її зносостійкість майже лінійно [2].

Тверді карбідні включення в сплаві додатково захищають від зношування, хоча можуть і самі вириватися, якщо слабо зв'язані з основою. Іншим підтвердженням ролі міцності є порівняння сталей різної мікроструктури: мартенситна сталь з твердістю ~ 45 HRC зносилася значно повільніше, ніж перлітна сталь ~ 25 HRC в однакових умовах, а шорсткість її поверхні після тесту була в 1,3–1,9 рази нижчою [20]. Отже, твердість і мікроструктура матеріалу визначають переважний механізм його спрацювання – через пластичну деформацію чи через крихке руйнування. Схема механізму абразивного зношування (утворення борозни при «мікрооранці» та формування частинок зносу внаслідок відламу гребня і розвитку тріщин). Частинки абразиву, рухаючись по поверхні (стрілка – напрямок ковзання), утворюють борозну із підняттям гребнів матеріалу. В наступних циклах гребінь сплющується і частково ламається, утворюючи дрібні пластинчасті частки зносу.

За типових умов роботи ґрунтообробних органів має місце багаточисельне повторне дряпання поверхні потоком абразивних зерен. Це призводить до поступового наклепу (зміцнення) поверхневого шару у разі пластичного деформування або до накопичення мікротріщин у разі крихкого режиму. На сталі після певного періоду експлуатації часто формується тонкий зміцнений шар із втисненими залишками абразиву чи оксиду – так званий трибошар, який частково захищає основу [7]. Інтенсивність зношування загалом пропорційна навантаженню і пройденій дистанції тертя. В лабораторних випробуваннях на абразивне стирання (наприклад, стандартизованих тестах типу «ролик-гума-абразив» або «штифт-диск з абразивним порошком») зазвичай спостерігається лінійна залежність втрати маси від шляху тертя [21]. У польових умовах через складність процесу ця лінійність може порушуватися, але загалом більший пробіг знаряддя і більша швидкість руху призводять до більшого зносу. Деякі дослідження відзначають цікавий ефект стабілізації зношування: наприклад, на початку роботи нового плуга швидко зростає шорсткість поверхні (формуються борозни), але надалі знос наче уповільнюється – можливо, через утворення захисного окисного шару або пристосування мікрорельєфу [13]. Таким чином, механізм абразивного зношування є багатостадійним: початкова притирка, стабілізований знос і за високих навантажень, перехід до прискореного руйнування.

Робочі органи різних ґрунтообробних знарядь (плуги, культиватори, борони, чизелі, фрези тощо) відрізняються конструкцією та режимами роботи, однак усі вони піддаються

інтенсивному абразивному зношуванню при контакті з ґрунтом. Характер спрацювання може дещо різнитися в залежності від типу знаряддя:

Плуги (лемеші і полиці) – працюють у режимі постійного ковзання по ґрунту. Леміш плуга розрізає ґрунт, беручи на себе основний абразивний удар. Тому найбільш зношується леміш – його носок (вістря) сточується і втрачає форму, довжина леміша поступово зменшується. Також з часом стирається полиця плуга – поверхня, яка перевертає пласт землі: вона шліфується ґрунтом до блиску. Польові дослідження показують, що швидкість зношування плуга сильно залежить від властивостей ґрунту. Наприклад, в сухому піщаному ґрунті знос плужних ножів майже втричі інтенсивніший, ніж у вологому ґрунті [22]. Це пояснюється тим, що волога діє як мастило і пом'якшує контакт у глинистих ґрунтах [20], тоді як у сухому піску вода не відіграє змащувальної ролі, а лише збільшує щільність абразиву. Водночас надлишкова вологість може викликати налипання ґрунту і теж змінювати характер зношування. Зношування леміша найчастіше проявляється у вигляді сточування носка та леза. При низькій вологості помічено прискорений знос нижньої (підшви) грані леміша і його потиличної частини [20] – фактично леміш “підрізається” знизу піском, скорочуючи довжину. Натомість у вологих важких ґрунтах більш інтенсивно тоншає сам леміш (втрачає товщину), що приводить до прогинання і навіть поломки. Таким чином, форму і розміри плужних органів доводиться відновлювати або міняти леміші після певної площі обробітку, адже геометрія різального органу помітно змінюється через спрацювання [23].

Культиватори. Робочі органи культиваторів можуть бути різних типів – лапи, долота, стрілчасті плоскі лапи тощо. Всі вони призначені для подрібнення і перемішування ґрунту і теж зазнають абразивного сточування, переважно по передніх ріжучих кромках. Стрілчасті лапи культиватора стираються по своїх крилах; їх ріжуча крайка тупиться і вкорочується. Чим твердіша сталь лапи, тим довше вона тримає заточку – тому часто лапи виготовляють із бористої сталі і термічно обробляють. Наприклад, в одному з досліджень лапи з бористої сталі 27MnB5 показали доволі високу зносостійкість, причому спрацювання в основному відбувалося за рахунок утворення системи паралельних дрібних подряпин (мікрорізання) на передній поверхні [7]. Для підвищення ресурсу культиваторних лап у практиці широко застосовують наплавлення твердими сплавами (наприклад, наплавка твердим сплавом по кромці лапи) або установку змінних твердосплавних наконечників. Це дозволяє зменшити швидкість зношування. Дослідження показують, що наплавлені/зміцнені лапи можуть служити у кілька разів довше. Зокрема, наплавлення твердим сплавом на носок чизельної лапи зменшило знос на ~40% порівняно зі звичайною в умовах важкого ґрунту [3]. При зносі культиваторних органів також зростає тяговий опір – Bobobee та ін. відзначали, що затуплення лапи плуга підвищує необхідне зусилля тяги і негативно впливає на продуктивність тяглових тварин [3]. Тому в економічному сенсі вигідніше мати зносостійкі робочі органи, які довше зберігають гостру форму.

Дискові борони і плуги. Робочим органом тут є круглий диск (різальний або ґрунторозпушувальний). Диски виготовляють зі сталі підвищеної твердості (~45–50 HRC) і встановлюють під кутом до напрямку руху. При обертанні диск одночасно ріже і котиться по ґрунту. Абразивне зношування дисків проявляється у поступовому зменшенні діаметра і маси диска. Край диска затуплюється, хоча часто спостерігається ефект самозагострення: диск зношується таким чином, що його край постійно залишається відносно гострим під дією різниці швидкостей на зовнішній і внутрішній сторонах. Як зазначалося, спеціальне зміцнення і підточування дисків може значно збільшити їх ресурс [6]. У випробуваннях, де стандартний диск борони служив близько 100 га, модернізований диск (з електроіскровим зміцненням) працював 178 га без додаткового загострення [6]. Це пов'язано з тим, що зміцнений диск зберігав форму і не потребував загострення – знос відбувався рівномірно, зберігаючи профіль ріжучої крайки (самозагострювався). Звичайні диски нерідко доводиться періодично загострювати, щоб відновити кут різання. В сухих піщаних ґрунтах диски зношуються

швидше (дрібний пісок діє як абразивний порошок), тоді як у вологому ґрунті і на чорноземах ресурс дисків вищий.

Чизелі, глибокорозпушувачі. Їх робочі органи – долота або стійки, що працюють на значній глибині. Вони піддаються великим навантаженням і зносу не менше, ніж леміші плуга. Знос чизельного долота зазвичай проявляється у зношуванні його носка, який приймає на себе основний удар об тверді включення (камінці). Часто верхній шар металу стійки зміцнюють наплавкою або термічним способом, щоб протистояти як абразивному зносу, так і ударним навантаженням. При значному спрацюванні долота або стійки (зменшенні його розмірів) погіршується глибина обробітки, тому такі деталі теж підлягають періодичній заміні або відновленню.

Ротаційні фрези (мотоблоки, ротаційні культиватори). Мають набори ножів, що швидко обертаються і рубають ґрунт. Режим роботи – ударно-абразивний: ножі з великою швидкістю врізаються в ґрунт, піддаючись як тертю об частинки, так і удару об грудки та каміння. Тому їх зношування поєднує інтенсивне зношування крайок і можливе викришування або вигинання лез. Ножі фрез виготовляють зі середньовуглецевих сталей і гартують, але навіть так їхній строк служби невеликий (десятки годин роботи [2]). Наприклад, на вітчизняних ротаційних машинах ножі потребують заміни кілька разів за сезон при обробці твердих ґрунтів. Абразивне зношування ножа проявляється у завалюванні кромки – гостра кромка округлюється, товщає; сам ніж може втрачати довжину і товщину. Для підвищення ресурсу експериментують з наплавленням зносостійкого шару або виготовленням ножів з бористих сталей. Відомо також, що зменшення швидкості обертання (тобто робота з меншою окружною швидкістю ножа) дещо знижує знос, але погіршує продуктивність, тому оптимізація режимів – теж актуальне завдання.

Таким чином, усі типи ґрунтообробних органів мають свою специфіку зношування, але спільним є поступова втрата маси і зміна форми внаслідок тривалого контакту з абразивним ґрунтом. Це призводить до погіршення робочих характеристик – наприклад, затуплення леміша вимагає більшої тяги і погіршує кришення ґрунту [3]. Тому виробники намагаються підвищити зносостійкість матеріалів (легуванням, гартуванням), наносити захисні покриття (наприклад, твердосплавні наплавки) та конструктивно забезпечити самозагострювання органів (як у випадку двохшарових дисків або комбінованих ріжучих елементів). Правильний вибір типу знаряддя під конкретні ґрунтові умови теж важливий: у піщаних ґрунтах краще працюють інструменти з підвищеною твердістю і зменшеною площею контакту (щоб зменшити тертя), тоді як у важких глинистих – інструменти з хорошою ударною в'язкістю і протиприлипальними властивостями.

При деталізованому розгляді процесу зносу безпосередньо на робочій поверхні знаряддя можна виділити кілька стадій і характерних ознак. Робоча поверхня нового інструменту спочатку має певну мікрогеометрію (шорсткість від обробки). На перших годинах роботи відбувається притирання – нерівності згладжуються абразивом, на поверхні з'являються хаотичні подряпини. Після цього встановлюється більш стабільний режим зношування, коли рельєф поверхні пристосовується до дії потоку частинок. Основний механізм, як згадувалося, – це утворення численних дрібних подряпин і борозен вздовж напрямку відносного руху ґрунту. Дослідження шорсткості реально напрацьованих плугів показало, що на їх робочій поверхні переважають поздовжні риски, причому середня глибина подряпин (R_a) приблизно в 2,7 рази перевищує висоту гребнів (R_p) [1]. Це означає, що матеріал здебільшого видаляється у вигляді стружки, а не нагромаджується на поверхні. Під мікроскопом (SEM) зношена поверхня ґрунтообробного знаряддя виглядає як “пейзаж” з паралельних канавок різної ширини і глибини, з окремими залисинами і вибоїнами. Наприклад, на рисках леміша, що працював у піщаному ґрунті, були помітні як вузькі глибокі подряпини, так і ширші борозни з підняттям губок металу по краях [1]. На краях деяких борозен спостерігалися дрібні тріщини, а місцями – відламані шматочки гребнів, утворюючи дрібні ямки. В цих ямках нерідко залишаються зерна ґрунту – абразив, що застряг у матеріалі після удару. Також були

зафіксовані поодинокі округлі заглибини – пінхоли, які виникли від ударів більших камінчиків під крутим кутом. Навколо таких вибоїн видно не деформований пластичний край, що свідчить про крихке руйнування (відколювання) матеріалу в цих точках. У більш дрібнозернистому ґрунті картина дещо інша: подряпини дрібніші і менш глибокі, зате їх більше; широких борозен майже немає. Натомість число дрібних вибоїн-пінхолів більше і багато з них теж заповнені часточками абразиву. Це вказує, що при переважанні дрібного абразиву матеріал зношується радше шляхом мікрорізання (стирання порошком), а великі зерна, якщо трапляються, влучають рідко, але все ж створюють локальні глибші пошкодження. Цікаво, що для обох типів ґрунту не було виявлено принципової різниці в механізмах зносу різних частин плуга (леміш і полиця зношувалися подібно) – визначальним фактором є саме склад ґрунту, а не геометрія цієї площини [1].

На мікрорівні можна побачити також вплив мікроструктури матеріалу на характер зносу. Наприклад, у випадку згаданого досліду з плугами із різних сталей: на мартенсінній сталі утворилися вужчі і дрібніші риски (нижча шорсткість), тоді як м'якша перлітна сталь мав більш рельєфну поверхню після того ж напрацювання [20]. Це узгоджується з тим, що твердіший матеріал більше чинить опір врізанню абразиву – замість глибоких борозен утворюються дрібніші подряпини і частина зерен швидше ковзає, не залишаючи сліду. Натомість м'який метал легко прорізається навіть дрібними частками, звідси вища шорсткість. Крім того, в перлітній сталі спостерігалось більше явищ «мікрооранки» – гребені з деформованого фериту, які з часом можуть відламуватися, створюючи додаткові частки зносу.

Окремо варто згадати вплив динамічних навантажень. Робочі органи зазнають не тільки постійного тертя, а й ударних імпульсів (натраплення на каміння, грудки). Такі ударні навантаження викликають локальне пластичне деформування та втому матеріалу. На поверхні це проявляється утворенням втомних тріщинок, які при перетині з поверхнею утворюють лусочки, що можуть відшаровуватися. Саме тому на зношених поверхнях інколи видно луски металу – сліди поверхневого втомного руйнування. В літературі це називають *flake wear* – лускове спрацювання. Його інтенсивність зростає при високих контактних тисках і відсутності мастила [2]. При значних ударних навантаженнях можливі й макроскопічні тріщини і сколи матеріалу – наприклад, уламки різальних кромок.

Отже, механізм абразивного зношування робочих поверхонь являє собою сукупність процесів мікрорізання, «мікрооранки», утворення тріщин та виривання часток матеріалу. На робочій поверхні після напрацювання спостерігається характерний мікрорельєф: паралельні подряпини і борозни, подекуди дрібні вибоїни та наклепані ділянки, а також може бути помітне вкраплення абразивних зерен у метал [1]. Такий рельєф і структура поверхневого шару суттєво впливають на подальшу роботу органу – з одного боку, збільшують шорсткість і тим самим підвищують тертя (причина росту тягового опору до 30% [2]), з іншого – можуть частково захищати глибші шари від подальшого зносу (за рахунок наклепу чи окисної плівки). Розуміння цих процесів на мікрорівні дозволяє шукати шляхи підвищення довговічності – зокрема, через створення матеріалів з оптимальною твердою мікроструктурою, здатних протистояти дряпанню або нанесенню покриттів, що зменшують тертя та перешкоджають утворенню тріщин. У підсумку, боротьба з абразивним зношуванням робочих органів ґрунтообробних машин вимагає комплексного підходу – від вибору матеріалу і способу його зміцнення до конструктивних рішень і режимів експлуатації, які мінімізують дію руйнівного абразиву.

Література

1. Stawicki T., Kostencki P., Białobrzaska B. Roughness of Ploughshare Working Surface and Mechanisms of Wear during Operation in Various Soils. *Metals*. 2018. 8. 1042. doi:10.3390/met8121042.
2. Ying Wang, Dong Li, Cheng Nie, Pan Gong, Junsheng Yang, Zhigang Hu, Bin Li, Ming Ma. Research Progress on the Wear Resistance of Key Components in Agricultural Machinery. *Materials*. 2023. 16. 7646. <https://doi.org/10.3390/ma16247646>.
3. Malvajerdi A. S. Wear and coating of tillage tools: A review. *Heliyon*. 2023 Jun 1;9(6):e16669. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e16669.

4. Ying Wang, Dong Li, Cheng Nie, Pan Gong, Junsheng Yang, Zhigang Hu, Bin Li, Ming Ma. Research Progress on the Wear Resistance of Key Components in Agricultural Machinery. *Materials* (Basel). 2023 Dec 14;16(24):7646. doi: 10.3390/ma16247646
5. Borak K.V. Impact of the Form Factor of the Abrasive Particles of the Soil on the Intensity of the Tilling Machines Tools Wear. 2020. [(accessed on 2 April 2023)]. Available online: <https://works.vntu.edu.ua/index.php/works/article/view/560>.
6. Aulin V., Arifa W., Borak K. Amélioration de la résistance à l'usure des outils de travail des machines aratoires à disques. *Journal of Applied Biosciences*. 83:7545–7553
7. Kalácska Á, Baets P., Fauconnier D. Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines. *WEAR*, vol. 442, 2020, doi:10.1016/j.wear.2019.203107.
8. Refai M., Hamid Z.A., El-kilani R.M., Nasr G.E. Electrodeposition of Ni–ZnO Nano-Composite for Protecting the Agricultural Mower Steel Knives. *Chem. Papers*. 2021;75:139–152. doi: 10.1007/s11696-020-01291/
9. Lu Z.-L., Zhou Y.-X., Rao Q.-C., Jin Z.-H. An Investigation of the Abrasive Wear Behavior of Ductile Cast Iron. *J. Mater. Process. Technol.* 2001;116:176–181. doi: 10.1016/S0924-0136(01)01013-5.
10. Refai M., Hamid Z.A., El-kilani R.M., Nasr G.E. Electrodeposition of Ni–ZnO Nano-Composite for Protecting the Agricultural Mower Steel Knives. *Chem. Papers*. 2021;75:139–152. doi: 10.1007/s11696-020-01291-2.
11. Kostencki P., Stawicki T., Królicka A. Wear of Ploughshare Material with Regards to the Temperature Distribution on the Rake Face When Used in Soil. *J. Tribol.* 2022;144:041704. doi: 10.1115/1.4053586.
12. Vidaković I., Heffer G., Grilec K., Samardžić I. Resistance of Modified Material Surfaces for Agricultural Tillage Tools to Wear by Soil Particles. *Metalurgija*. 2022;61:355–358.
13. Zamri Bin Yusoff, Shamsul Baharin Jamaludin. Tribology and Development of Wear Theory: Review and Discussion. *International Journal of Current Research and Review*. Vol. 03 issue 02 Feb 2011. P. 13-26.
14. Pirso, J.; Viljus, M.; Letunovitš, S.; Juhani, K.; Joost, R. Three-Body Abrasive wear of Cermets. *Wear* 2011, 271, 2868–2878.
15. Engqvist, H.; Axén, N. Abrasion of Cemented Carbides by Small Grits. *Tribol. Int.* 1999, 32, 527–534.
16. Tjong, S.; Lau, K. Abrasion resistance of stainless-steel composites reinforced with hard TiB₂ particles. *Compos. Sci. Technol.* 2000, 60, 1141–1146.
17. Larsen-Basse, J.; Koyanagi, E.T. Abrasion of WC-Co alloys by quartz. *J. Lubr. Technol.* 1979, 101, 208–211.
18. Tabor, D. The physical meaning of indentation and scratch hardness. *Br. J. Appl. Phys.* 1956, 7, 159.
19. Wahl, H. Verschleiß probleme in Braunkohlenbergbau. *Braunkohle Wärme Energie* 1951, 3, 75–87.
20. Stawicki T., Białobrzeska B., Kostencki P. Tribological Properties of Plough Shares Made of Pearlitic and Martensitic Steels. *Metals* 2017, 7(4), 139; <https://doi.org/10.3390/met7040139>.
21. Zygmunt Owsiak. Wear of symmetrical wedge-shaped tillage tools. *Soil and Tillage Research*. Volume 43. Issue 3-4. P. 295-308 DOI: 10.1016/s0167-1987(97)00020-2.
22. Jagseer Singh, Sukhpal Singh Chatha, Buta Singh Sidhu. Abrasive wear characteristics and microstructure of Fe-based overlaid ploughshares in different field conditions. *Soil and Tillage Research*. Volume 205. January 2021. Page 104771.
23. Novák P., Müller M., Hrabě P. Application of overlaying material on surface of ploughshare for increasing its service life and abrasive wear resistance. *Agronomy Research* 13(1), 158–166, 2015.