

САМООРГАНІЗАЦІЯ ТРИБОСИСТЕМИ «РОБОЧИЙ ОРГАН – ҐРУНТ»

Борак К. В., д.т.н. професор, заступник директора з навчальної роботи,
Житомирський агротехнічний фаховий коледж, Україна,
koss1983@meta.ua

Умінський О. В., здобувач ОС «Доктор філософії», Поліський
національний університет, Україна, uminskyi.s@gmail.com

В роботі проаналізовано умови, за яких можливе самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин. Розглянуто матеріали та геометричні параметри, що забезпечують самозагострювання лез під час експлуатації включно з твердістю, структурою та кутом загострення. Зроблено висновки щодо оптимальних умов експлуатації та надано рекомендації для конструювання та вибору матеріалів робочих органів з ефектом самозагострювання.

Ключові слова: самозагострювання, знос різальних елементів, ґрунтообробні машини, робочі органи, абразивний знос.

Зношування ґрунтообробних знарядь є однією з основних причин втрати ефективності сільськогосподарської техніки. Через інтенсивний абразивний вплив ґрунтових частинок лемеші, лапи культиваторів, диски борін та інші різальні елементи швидко тупляться і спрацьовуються. Це призводить до зростання тягового опору та витрат пального при обробі ґрунту, а також до погіршення якості роботи (неповний підріз шарів, залишення необроблених ділянок, гірше подрібнення рослинних решток). Зношені, затуплені робочі органи потребують частого ремонту або заміни, що викликає простої техніки і додаткові витрати. За оцінками дослідників, заміна зношених деталей та пов'язані втрати часу негативно впливають на економіку господарства. Наприклад, встановлено, що в умовах кам'янистих ґрунтів інтенсивність абразивного зносу сталевих робочих органів може бути до 20 разів більшою, ніж у піщаних ґрунтах. В глинистих ґрунтах знос теж значно вищий, приблизно у 7 разів відносно піщаного, через тверді мінерали у їхньому складі. Таким чином, у важких умовах типовий ресурс лемешів чи дисків може обмежуватися обробітком декількох десятків гектарів, після чого необхідно проводити їх заточування або заміну [1].

Забезпечення гостроти різальних елементів безперервно протягом роботи є критично важливим для підтримання продуктивності та якості

обробітку. Гострі леза знижують опір руху в ґрунті та витрати енергії, а також сприяють кращому перевертанню скиби й підрізанню бур'янів. За тупих лез спостерігається збільшення тягового зусилля трактора і, як наслідок, перевитрата пального. Крім того, погіршується умови праці (необхідність додаткових зусиль або повторних проходів) і знижується ресурс агрегатів трансмісії через підвищене навантаження. Таким чином, проблема підвищення зносостійкості і збереження гостроти різальних органів є актуальною як з економічної, так і з технологічної точки зору.

Концепція самозагострювання різальних елементів є перспективним напрямом вирішення цієї проблеми. Якщо лезо інструмента під час роботи самотійно відновлює або зберігає гострий профіль за рахунок особливостей зносу, це усуває потребу в частому додатковому заточуванні та заміні деталей. Це не лише знижує експлуатаційні витрати, але й забезпечує стабільно високу якість обробітку протягом тривалого часу. Технології, що дозволяють досягти самозагострювання, сприяють збільшенню ресурсу деталей та підвищенню надійності роботи машинного агрегату. Таким чином, дослідження умов, які забезпечують самозагострювання різальних елементів ґрунтообробних машин, має важливе наукове та практичне значення для сільськогосподарського машинобудування.

Знос різальних елементів ґрунтообробних знарядь відбувається переважно за механізмом абразивного стирання, коли тверді мінеральні частинки ґрунту діють як різці на металеву поверхню леза. У звичайних умовах це призводить до поступового притуплення леза: робоча крайка закруглюється, кут різання збільшується, і ефективність інструмента падає. Проте існує явище, за якого в процесі зношування інструмент зберігає гостру форму крайки або навіть відновлює її. Це явище називають самозагострюванням леза [2, 3, 4].

Аналогічні механізми самозагострювання спостерігаються в природі. Наприклад, різці-зуби бобра мають шарувату будову: зовнішній шар емалі дуже твердий, тоді як внутрішній шар дентину м'якший. Під час гризіння м'який шар стирається швидше, ніж твердий, завдяки чому край зуба постійно залишається гострим [5]. Подібний принцип виявлено і у зубах морських їжаків, що самозагострюються завдяки особливій мікроструктурі матеріалу. Ці біологічні приклади надихають інженерів на створення штучних матеріалів та конструкцій з ефектом самозагострювання.

Ідея самозагострюваних ґрунтообробних інструментів полягає в тому, щоб за рахунок особливої комбінації матеріалу та геометрії забезпечити диференційований знос: менш важливі частини леза

стираються швидше, ніж крайка, таким чином профіль різальної кромки постійно відновлюється гострим. Для досягнення цього ефекту використовують різні підходи. Один з них – застосування багатошарових або композиційних матеріалів, де твердіша зовнішня зона та більш в'язка (м'якша) внутрішня частина леза зношуються нерівномірно. Інший підхід – спеціальна теплова чи хіміко-термічна обробка, що підвищує твердість саме робочої поверхні леза, залишаючи серцевину більш пластичною. Також важливим є початковий кут загострення та форма леза: застосування симетричних клиноподібних форм сприяє рівномірному зносу і самозагострюванню [6].

З метою підвищення зносостійкості робочих органів історично використовувалися тверді високовуглецеві сталі та наплавлення твердих сплавів. Проте просто підвищення твердості не гарантує збереження гостроти – надто тверді однорідні матеріали можуть довго не зношуватися, але їх крайка все ж тупиться, а врешті може ламатися крихкими сколами. Тому сучасні дослідження зосереджені на пошуку таких комбінацій матеріалу та структури, які б забезпечували сприятливий характер зносу. Прикладом є наплавлення кромek культиваторних лап частками карбіду вольфраму: м'яка сталь основи стирається, а надтверді зерна WC виступають, утворюючи своєрідні "зубці" на лезі, що ріжуть ґрунт. Інший приклад – леза з градієнтною твердістю, виготовлені компанією Busatis (Австрія) за допомогою лазерного наплавлення перехідного шару: такі леза постійно самозагострюються в роботі й відзначені високою продуктивністю [4]. Отже, феномен самозагострювання різальних елементів ґрунтообробних машин ґрунтується на керуванні процесом зносу через матеріал і конструкцію. На сьогодні накопичено суттєвий досвід у цій сфері – як вітчизняними, так і зарубіжними дослідниками розроблено низку рішень, що дозволяють суттєво підвищити ресурс і ефективність ґрунтообробних інструментів за рахунок ефекту самозагострювання.

Проблематика зносу та підвищення довговічності ґрунтообробних інструментів широко висвітлена у світовій літературі [2-7]. Огляд літератури показує, що поєднання спеціальних матеріалів (шаруватих, градієнтних, композиційних) та оптимальної геометрії різальних органів дає змогу досягти ефекту самозагострювання. Як вітчизняні, так і закордонні дослідження демонструють значне збільшення строку служби і стабільності роботи таких інструментів.

Аналіз наукових і практичних даних показує, що ключовою умовою самозагострювання є різна зносостійкість окремих зон різального

елемента. Найефективніше цього досягають шляхом використання матеріалів з градієнтом твердості або композиційних структур. Твердіший зовнішній шар (безпосередньо різальна крайка) повільніше зношується, тоді як відносно м'якша основа сточується швидше. У результаті крайка завжди виступає і залишається гострою. Прикладом є описані вище дискові ножі із сталі 65Г з електроіскровим зміцненням: їхня поверхнева твердість становила ~56–60 HRC, тоді як серцевина залишалась менш твердою (~30 HRC). Під час роботи в абразивному середовищі такий диск зношується переважно у внутрішніх зонах, зберігаючи гостре тверде лезо на периферії. Інший приклад – наплавлені тверді сплави на кромках культиваторних лап. Частки карбіду вольфраму (WC) мають надвисоку твердість (близько 90 HRC), впроваджуються в металеву матрицю. У процесі зношування основний метал (матриця) стирається, оголюючи зерна WC, які створюють різучі мікро-рельєфи на крайці. Таким чином, навіть якщо загальна форма лапи змінюється, на її передньому ребрі завжди присутні тверді гострі фрагменти, що виконують функцію різців. Подібні рішення під комерційними назвами "самозаточувальні лапи" пропонуються фірмами-виробниками запасних частин

Крім твердості, на самозагострювання впливає в'язкість і структура матеріалу. Матеріал повинен бути достатньо пластичним, щоб під навантаженням не обламуватися цілими фрагментами. У наведеному прикладі сталь 65Г після належної термічної обробки має комбінацію твердості та ударної в'язкості, що запобігає крихкому руйнуванню леза. Якщо застосувати занадто крихкий матеріал (наприклад, чавун або надмірно загартовану сталь без належної витримки), при ударі об каміння лезо може виломитися, втративши гостроту. Тому умова самозагострювання – це не лише висока твердість крайки, а й достатня міцність та в'язкість матеріалу. Останні матеріалознавчі тенденції включають використання градієнтних сплавів і дифузійно насичених шарів. Наприклад, технологія BOR + N + C (борування, нітроцементация з додаванням рідкісноземельних елементів) дозволяє отримати на 40Cr сталі поверхневий шар складної боридно-нітридної структури з твердістю понад 60 HRC, яка поступово зменшується вглиб матеріалу. Випробування таких градієнтних лез показало, що вони зберігають гостроту значно довше порівняно зі звичайною сталлю 65Г. Це підтверджує ефективність принципу диференційованої твердості.

Матеріал є необхідною, але недостатньою умовою самозагострювання. Важливу роль відіграє також геометрія різального елемента – кут загострення, товщина леза, симетричність профілю.

Дослідження показують, що початкове заточення леза під малим кутом (близько $25\text{--}30^\circ$) є критично важливим для подальшого самозагострювання. Якщо лезо спочатку тупе (великий кут), то навіть при зношуванні воно може залишатися тупим профілем. У польових випробуваннях диски із заводським кутом $\sim 50^\circ$ втрачали ріжучу здатність вже після перших десятків гектар, тоді як диски, заточені до 30° , продовжували ефективно різати ґрунт без заточування. Симетричність профілю також впливає на характер зносу. Симетрично заточені леза (двосторонній клин) зношуються рівномірніше, тоді як однобічно заточені можуть деформуватися з перекосом.

Товщина різальної частини впливає двояко. З одного боку, більш тонке лезо легше входить в ґрунт і його простіше підтримувати гострим. З іншого боку, надто тонкий край швидше зношується і може перегріватися чи загинатися. Практика показує, що оптимальною є така товщина і профіль, при яких лезо одразу позаду крайки трохи товщає, забезпечуючи міцність, але не настільки, щоб заважати проникненню в ґрунт. Приклад – дискові ножі: зазвичай їх товщина 5–6 мм, але останні 1–2 мм крайки мають скіс, формуючи гострий край. При зносі цей скіс поступово відступає вглиб, але завдяки твердій поверхні край залишається відносно гострим.

Ефект самозагострювання проявляється лише за певних умов експлуатації. По-перше, необхідна наявність абразивного середовища, яке фактично виконує роль "точильного каменю" для леза. В сухих піщаних або супіщаних ґрунтах, що містять значну кількість кварцових часток, самозагострювання проявляється найкраще – гострі краї постійно підточуються дрібним абразивом. Водночас загальний знос у таких умовах дуже інтенсивний, і ресурс інструменту може вичерпуватися швидко. Навпаки, у вологих глинистих ґрунтах абразивна дія слабша, і лезо швидше "полірується" ніж сточується. Досліди показали, що збільшення вологості ґрунту істотно зменшує знос, навіть більше, ніж зміна гранулометричного складу. Тому в вологих умовах інструмент служить довше, але якщо він вже затупився, то ґрунт може не забезпечити його повторного загострення.

Механічний склад ґрунту теж важливий. У піщаних ґрунтах знос рівномірний, але швидкий. У дрібнодисперсних (глина, суглинок) – повільніший, та крайки схильні до заокруглення за рахунок пластичних деформацій металу і налипання ґрунту. В кам'янистих ґрунтах спостерігаються удари і сколювання: лезо може покриватися вибоями, що теж певною мірою утворюють зубчасту форму, проте такі умови є вкрай

жорсткими і часто призводять до поломки інструменту. Отже, самозагострювання найкраще реалізується на помірно абразивних ґрунтах без надлишку крупного щебеню.

Режими роботи також впливають. Збільшення швидкості руху агрегату підсилює абразивний знос (частинки вдаряють у лезо з більшою енергією), але надмірна швидкість може призвести до перегріву і прискореного зносу. Глибина обробітку визначає площу контакту леза з ґрунтом: на більшій глибині знос сумарно більший, хоча крайка може рівномірніше сточуватися. Встановлено, що при однаковому напрацюванні різні частини леза зношуються по-різному: наприклад, у крилатих лап максимальний знос спостерігається на крилах, тоді як носок сточується менше. Це можна врахувати, зміцнюючи найбільш навантажені зони.

В цілому для підтримання самозагострювання бажано уникати режимів, що призводять до надмірного локального перегріву або пластичного деформування крайки (наприклад, надто висока швидкість на твердому сухому ґрунті без достатнього охолодження).

Ще одним фактором є корозійне середовище. Робота на кислих ґрунтах або з добривами може спричиняти корозійно-механічний знос, внаслідок чого метал крайки роз'їдається і крихко відламується, а не рівномірно сточується. Тому для самозагострюваних елементів важливо мати певну корозійну стійкість (наприклад, легування хромом або нікелем), щоб знос залишався переважно абразивним. Отже, оптимальні умови експлуатації для прояву самозагострювання включають: помірно сухий абразивний ґрунт, відсутність великих каменів, помірні швидкість і глибину обробітку, а також початково гостру та зміцнену крайку інструменту. Виконання цих умов дозволяє максимально реалізувати переваги самозагострюваних різальних елементів у польових умовах.

Самозагострювання різальних елементів є досяжним за умови правильного добору матеріалів і геометрії. Необхідно забезпечити диференційований знос: різальна крайка повинна зношуватися повільніше, ніж прилеглі ділянки леза. Цього можна досягти шляхом зміцнення (гартування, наплавлення) крайки або застосуванням композиційного матеріалу з твердою зовнішньою зоною і в'язкою основою.

Оптимальний кут загострення леза для самозагострювання становить $\sim 30^\circ$. Гостріше лезо забезпечує краще проникнення і форму клина, яка підтримується в процесі зносу. Занадто тупий початковий кут не дозволить виникнути ефекту самозаточування.

Матеріал леза повинен мати високу твердість поверхні (не менше 55–60 HRC на крайці) при достатній в'язкості серцевини, щоб уникнути крихкого сколювання. Градієнтні сталі, тверді сплави на основі карбідів, багат шарові покриття – ефективні рішення, які демонструють збільшення ресурсу в 1,5–3 рази за рахунок самозагострювання.

Геометрія і форма повинні сприяти рівномірному зносу. Симетричні клиноподібні профілі та наявність зубцюватих елементів (як "бобровий зуб") покращують самозаточування. Товщина леза має бути мінімальною, достатньою для міцності, але не створювати зайвого опору.

Умови експлуатації суттєво впливають на прояв самозагострювання. Ефект найкраще проявляється в абразивних (але не надмірно кам'янистих) ґрунтах при помірній вологості. Сухий піщаний ґрунт слугує природним середовищем для постійного підточування леза, тоді як у вологому ґрунті знос менший і заточування може не відбуватися. В екстремальних умовах (каміння, високі швидкості, агресивне середовище) навіть самозагострювані інструменти можуть швидко втрачати ефективність.

Практичний ефект від впровадження самозагострюваних різальних елементів – це збільшення інтервалів між технічним обслуговуванням, зниження витрат на заміну деталей, стабільно висока якість обробітку ґрунту та зменшення енергетичних витрат. За даними польових досліджень, ресурс дискових ножів із самозагострюваним лезом на 30–70% перевищує ресурс стандартних аналогів, а тяговий опір при цьому залишається незмінно нижчим завдяки гострій крайці.

В цілому, розвиток напрямку самозагострюваних різальних елементів відповідає сучасним тенденціям підвищення ефективності та надійності сільськогосподарської техніки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Jagseer Singh, Sukhpal Singh Chatha, Buta Singh Sidhu. Influence of Soil Conditions on Abrasion Wear Behaviour of Tillage Implements. *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology Special Issue AFTMME-2017*. pp. 258-263. Веб-сайт: URL : https://www.ijltet.org/pdfviewer.php?id=925&j_id=4263
2. Борак К. В. Комплексний підхід підвищення довговічності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин : дис. ... д-ра. техн. наук : 05.05.11 / Поліський національний університет, м. Житомир. 2021. 380.