

SCIENTIFIC BASIS FOR ACHIEVING THE SELF-SHARPENING EFFECT OF THE TILLERS IMPLEMENTS

K. Borak

Zhytomyr agrotechnological college, Zhytomyr, Ukraine



Key words:

self-sharpening,
implement,
tiller,
wearing process,
longevity

Article history:

Received 10.04.2020

Accepted 26.05.2020

Corresponding author:

koss1983@meta.ua

ABSTRACT

According to the recent research materials, it has been established that it is not necessary literally to make a copy of a biological prototype in order to design self-sharpening tillers implements, as there are no prototypes in the wild-life which either work in the identical conditions or have the same objectives. While designing the self-sharpening tillers implements it is expedient to use partially the wild-life principles as well as to take into account the achievements of the engineering science. The paper suggests engineering and constructive methods for achieving the self-sharpening effect of the most widely used tillers implements with due regard to operating conditions. The basic parameters of a double-layer self-sharpening implement include: the correlation of a wear-out resistance on the one hand and of the geometric parameters of a base material and of a wear resistant covering on the other hand, the parameters correlation of a wear-resistant covering in different parts of an implement, the initial sharpening angle and the side of wear-resistant covering. The operational testing's gave evidence to the expedience of introducing the strengthened implements for achieving the sharpening effect on all soil types. The self-sharpening of tillers implements results in reducing the draw bar resistance of a device as well as in reducing the fuel consumption by 10...12%.

<https://doi.org/10.36910/agromash.vi44.296>

УДК 631.31

**НАУКОВІ ОСНОВИ ДОСЯГНЕННЯ ЕФЕКТУ
САМОЗАГОСТРЮВАННЯ РІЗАЛЬНИХ ЕЛЕМЕНТІВ
РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТООБРОБНИХ МАШИН****К.В. Борак**

Житомирський агротехнічний коледж, Житомир, Україна

На основі аналізу джерел інформації встановлено, що для розроблення самозагострювальних різальних елементів 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. При розробці самозагострювальних різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин необхідно використовувати частково принципи із живої природи та враховувати досягнення інженерної науки. У статті запропоновані технологічні та конструктивні методи для досягнення ефекту самозагострювання різальних елементів найбільш поширених робочих органів ґрунтообробних машин із урахуванням умов та режимів експлуатації. До основних параметрів двошарового самозагострювального різального елемента робочого органу відносяться: співвідношення зносостійкості і геометричних параметрів матеріалу основи та зносостійкого покриття, співвідношення параметрів зносостійкого покриття в різних зонах робочого органу, початковий кут загострення та сторона нанесення зносостійкого покриття. Експлуатаційні випробовування підтвердили доцільність впровадження зміцнення робочих органів для досягнення ефекту самозагострювання їх різальних елементів на всіх типах ґрунтів. У результаті самозагострювання різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин спостерігається зменшення тягового опору агрегату та витрати пального на 10...12%.

Ключові слова: самозагострювання, робочий орган, ґрунтообробна машина, зношування, довговічність.

Стан питання та постановка проблеми

У ґрунтообробних машинах різальні елементи (РЕ) робочих органів (РО), від яких залежить якість і ефективність виконання технологічного процесу обробітку ґрунту, мають найменшу надійність. Втрата працездатного стану РО ґрунтообробних машин

призводить до простою, що негативно впливає на валовий збір сільськогосподарської продукції. Основними причинами втрати працездатного стану РО є знос та зміна геометричних параметрів РЕ (затуплення).

Затуплення РЕ РО ґрунтообробних машин призводить до збільшення витрати пального внаслідок збільшення тягового опору агрегату та погіршення якості виконання технологічних операцій: зменшення глибини обробітку; зменшення відсотку підрізання бур'янів; погіршення подрібнення рослинних рештків тощо. Для забезпечення працездатного стану РО ґрунтообробних машин необхідно, щоб протягом усього терміну експлуатації їх РЕ зберігали форму, яка дозволить якісно виконувати технологічні операції.

Сутність ефекту самозагострювання полягає у вибіркового зношуванні неоднорідного за перерізом леза, за якого зберігається необхідна його форма і різальні властивості [1]. Інше визначення принципу самозагострювання дав А.Ш. Рабінович: лезо називається самозагострювальним, якщо в процесі зношування воно зберігає достатню за показниками міцності та зносостійкості товщину різальної кромки і оптимальний профіль, які допустимі для виконання технологічних операцій [2]. Питання реалізації ефекту самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин завжди поставало гостро перед дослідниками та практиками, які підвищували їх довговічність та зносостійкість [2 – 14].

Перші самозагострювальні РО ґрунтообробних машин були розроблені у США ще в середині XIX сторіччя [15, 16]. У нашій країні перші фундаментальні дослідження та розробка самозагострювальних РЕ РО були проведені А.Ш. Рабіновичем [2]. На його думку, для досягнення ефекту самозагострювання РЕ необхідно, щоб нижня фаска лемеша була у декілька разів твердішою за верхню. Відповідно до проведених досліджень А.Ш. Рабіновичем введено критерій самозагострювання [2]:

$$\omega = \frac{\varepsilon_2 h_2}{\varepsilon_1 h_1}, \quad (1)$$

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

Під час обробітку більшості ґрунтів для лемешів критерій самозагострювання становить $\omega = 1,5$. Товщина наплавленого шару, як правило, не повинна перевищувати 2,5 мм, а твердість повинна бути 50...58 HRC [17]. Дане твердження не є актуальним, оскільки твердість РЕ РО ґрунтообробних машин може становити 60 HRC, тому необхідне уточнення отриманої раніше умови [18].

В.М. Ткачовим [1] встановлено чотири умови самозагострювання лемішно-лапових РО:

1. Радіус затуплення R_k ріжучої крайки в процесі роботи леза не повинен перевищувати допустимого $R_{к.д.}$, обумовленого нормальним протіканням технологічного процесу різання робочої маси.

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

$$h_n = h_m K_n, \quad (2)$$

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

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

$$H_m = K H_n, \quad (3)$$

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

4. Зміцнено, як правило, повинна підлягати та грань леза, яка піддається найменшому зношуванню. Якщо ця умова не буде виконуватися, то інтенсивність зношування твердого й м'якого шарів вирівнюється, що неминуче призведе до затуплення леза.

У наукових працях [6, 7] висловлюються сумніви щодо коректності формулювання четвертої умови самозагострювання. При зміцненні поверхні, яка піддається найменшому зношуванню, несучий шар доволі швидко зношується, що призведе до виступу твердого шару. При взаємодії із твердими включеннями в ґрунті такий шар буде обломлюватися. Вибір сторони зміцнення має ґрунтуватися на фізико-механічних властивостях ґрунтів та умовах експлуатації, на це вказують рекомендації різних дослідників щодо вибору сторони зміцнення стрілчатих лап культиватора для досягнення ефекту самозагострювання їх РЕ. Так, у наукових працях [1, 14, 19 – 21] рекомендують наплавляти внутрішню сторону стрілчатої лапи, а в працях [7, 11, 22 – 25] – навпаки, зовнішню. У науковій праці [26] стверджується, що нанесення шару на внутрішню сторону сприяє самозагострюванню і підвищує ресурс стрілчатої лапи на 18% у порівнянні із нанесенням зносостійкого шару на зовнішню сторону. Але дані твердження потребують експериментальних підтверджень, оскільки не можуть базуватися на результатах досліджень проведених в умовах одного типу ґрунту. Моделювання процесу самозагострювання РЕ дозволило встановити, що наявність ефекту самозагострювання можна оцінити кількісно за допомогою безрозмірного критерію самозагострювання [27]:

$$K_c = v_{ик} \sin \beta / (v_{ин} \cos \beta + v_{иф}), \quad (4)$$

де $v_{ин}$, $v_{иф}$, $v_{ик}$ – відповідно, швидкості лінійного зношування для зміцненої поверхні (покриття), для фаски та крайки РЕ, мм/год.; β – кут загострення, град.

Проведена оцінка показує, що: за значення $K_c = 1$ спостерігається самозагострювання РЕ; за $K_c > 1$ – його затуплення; за $K_c < 1$ – його переагострювання. Останній випадок є небажаним, оскільки оголюється різальний шар, що призводить до обламування різального елемента [27].

У науковій праці [28] відзначається, що явище самозагострювання РЕ можливо тільки для визначеного діапазону співвідношень твердості шарів $H_1/H_2 = 2,6 \dots 2,9$. Якщо співвідношення твердості несучого та зміцненого шарів РЕ менше оптимального, тоді відбувається затуплення [28]. Дані твердження не є точними, оскільки твердість не є об'єктивною характеристикою зносостійкості металевих сплавів.

Один із сучасних підходів до проблеми досягнення ефекту самозагострювання РЕ або самоорганізації поверхні РО ґрунтообробних машин є використання при їх проектуванні біологічного прототипу [29 – 31]. На даний час створена ціла наука – біоніка (Bionics), яка використовує біологічні принципи при побудові технологічних систем [32]. У науковій праці [33] відзначається, що ідеальним кінцевим результатом біоніки є створення “живої” машини (“living” machine). Виникнення біоніки дозволило людству перейти від “взяття від природи” до “навчання від природи” [34]. Так, під час проектування самозагострювального інструменту для фінішної токарної обробки, за прототип було взято будову зубів морського їжака та акули [35]. У результаті було досягнуто ефект самозагострювання із набуттям зубчастої поверхні різальної кромки. Автор наукової праці [36] стверджує, що самозагострювання різального інструменту досягається в тому випадку, якщо створені умови сприяють однаковому за величиною зношуванню всієї поверхні інструменту.

Автори наукової праці [29] рекомендують для моделювання РО ґрунтообробних машин використовувати в якості біологічного прототипу риучі кінцівки землерийних комах і тварин, а також мешканців водного середовища. Вважають, що параметри РО ґрунтообробних машин необхідно приймати на основі моделювання із урахуванням біологічного прототипу [29]. Для розроблення самозагострювальних РО 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. При розробці самозагострювальних РЕ РО ґрунтообробних машин необхідно використовувати частково принципи із живої природи та урахувати досягнення інженерної науки. Найсучаснішим рішенням, що дозволяє досягнути самозагострювання РЕ РО машин або інструментів, є використання “самозагострювальних” (“self-sharpening”) матеріалів [37]. На жаль, у сучасних реаліях використовувати самозагострювальні матеріали (на основі вольфраму) при виробництві РО ґрунтообробних машин є економічно недоцільним у зв'язку із високою їх вартістю.

Під час аналізу наукових праць щодо досягнення ефекту самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин встановлено:

- більшість наукових праць присвячені вивченню ефекту самозагострювання РЕ лемішно-лапових РО;

- при розробці самозагострювальних РЕ РО ураховано тільки зношувальну здатність ґрунту в одному із його станів і не враховані можливість самоорганізації середовища ґрунту та зміна режимів експлуатації;

- рекомендації досягнення ефекту самозагострювання носять локальний характер, тобто можуть бути використанні тільки за певних умов експлуатації;

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

Мета дослідження – створення теоретичних основ та розробка науково обґрунтованих умов для досягнення ефекту самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин із урахуванням умов та режимів їх експлуатації.

Для досягнення поставленої мети мають бути вирішені такі задачі:

- розробка теоретичних моделей самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин;

- побудова цільових функцій, пропонування критеріїв оптимальності і розробка методики оптимізації фізико-механічних властивостей матеріалів та геометричних параметрів РЕ РО ґрунтообробних машин;

- запропонування технологічних та конструктивних методів для досягнення ефекту самозагострювання РЕ РО ґрунтообробних машин;
- експериментальне підтвердження теоретичних положень.

Матеріали і методи

Основний метод вирішення поставленої мети – теоретичний, початкові дані якого базуються на масиві експериментальних даних,

накопичених під час розробки і випробування самогострювальних РЕ РО ґрунтообробних машин.

Для підтвердження сформованих теоретичних положень проведені відповідні експлуатаційні дослідження. Дослідження проводили на різних типах ґрунтів в умовах аграрних підприємств Житомирської та Вінницької областей (Україна) у 2016–2018 роках. Поля, на яких проводилися дослідження, були після збирання зернових культур (озима пшениця та ячмінь). Швидкість руху для плуга варіювались в межах 10...13 км/год., для культиватора та дискового агрегату – 11...15 км/год. Масовий знос робочих органів визначався на лабораторних вагах СР 34001 S фірми “Sartorius” (Німеччина).

Дослідженню підлягали найбільш поширені РО ґрунтообробних машин: леміш, стрілочата лапа культиватора та дисковий робочий орган (типу “ромашка”). РО ґрунтообробних машин були виготовлені зі сталей 65Г, Л53, Hardox 500, 28MnB5 та зміцнені ручним наплавленням електродами Т-590, Т-620 і М-Fe6. РО виготовлені зі сталі 65Г піддавалися об’ємному загартуванню за температури +810...830°C та середньому відпуску із дуже точною витримкою за температури +460...480°C. Дослідження процесу зношування РО, які виготовлені зі сталі Л53, Hardox 500 та 28MnB5, проводили без зміни фізико-механічних властивостей матеріалу.

Результати дослідження та обговорення

Алгоритм послідовності розробки теоретичних основ забезпечення самогострювання РЕ РО ґрунтообробних машин представлено на рис. 1. У результаті аналізу початкових даних та цільових функцій були сформовані критерії оптимізації. У процесі теоретичних досліджень етапи системного аналізу та оптимізація розглянуті детально, а синтез – із точки зору загального підходу.

Форма РЕ РО ґрунтообробних машин має забезпечувати виконання технологічних операцій, зумовлюючи при цьому якомога менший опір. Визначення форми твердого тіла, що здійснює опір потоку, є класичною задачею варіаційного обчислення [17]. Розв’язуючи рівнянні Ейлера, визначимо оптимальний кут різання ґрунту:

$$\operatorname{tg} \alpha = -\frac{3}{2} f \pm \sqrt{\frac{9}{4} f + 2}, \quad (5)$$

де f – коефіцієнт тертя ґрунту по сталі.

Провівши розрахунки автор наукової праці [36] прийшов до висновку, що оптимальний кут різання α повинен бути в межах 39,3...52,7°.

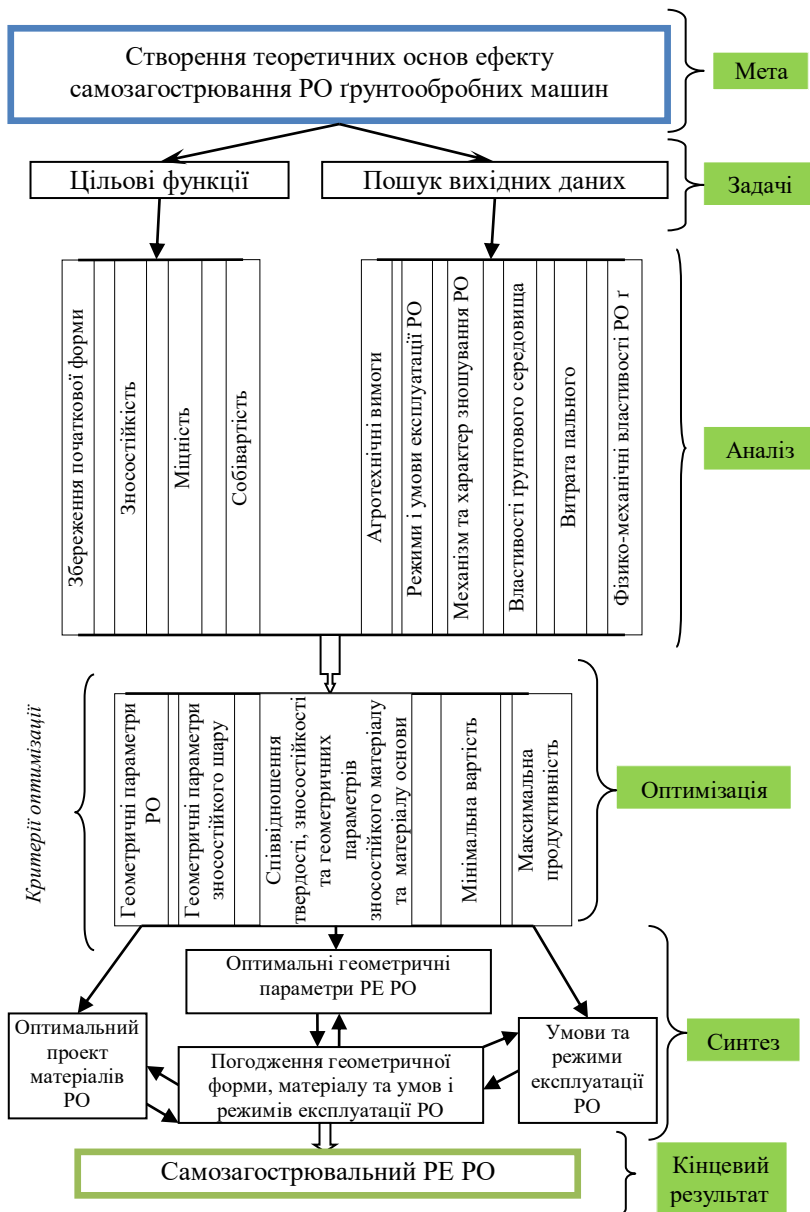


Рис. 1 – Алгоритм розробки самозагострювального РЕ РО

Це твердження узгоджується із дослідженнями А.Ш. Рабіновича [2], який встановив, що в результаті зношування РЕ кут утворений на лицевій поверхні лемеша має нахил до горизонту $48,0...52,5^\circ$.

Ці розрахунки базувалися на врахуванні тільки коефіцієнта тертя-ковзання. За взаємодії РО із ґрунтом на його поверхні одночасно відбуваються три види тертя: тертя-ковзання, тертя-кочення та тертя-кочення із проковзування. Якщо великий ступінь закріплення абразивних частинок у ґрунті, то тертя-ковзання переважає всі інші види тертя. При знаходженні ґрунту в пухкому стані перевага тертя-ковзання не настільки суттєва і нехтувати іншими видами тертя недоцільно. Зазначимо, що під час проєктування РО ґрунтообробних машин необхідно урахувати цю обставину.

Теоретично визначити оптимальних кут різання для різних станів ґрунту є складним завданням. Саме тому, проведено аналіз зношених РО, які працювали на різних типах ґрунтів і в різних станах (таблиця 1) та визначено кути, які утворюються в ріжучій частині РО (рис. 2 – 4).

Таблиця 1 – Кут загострення, який утворюється в результаті зношування серійних монометалевих РО ґрунтообробних машин

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 лемеша (змінне)	47...51	-	49...57	-	58...79	-
Стрілчата 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 за всією довжиною леза (рис. 2, рис. 3). Це можна пояснити зміною величини тиску абразивної маси на різні

частини леза. Під час розробки самогострювального РЕ РО цю закономірність (рис. 4) необхідно урахувати при обґрунтуванні співвідношення між параметрами зносостійкого шару та основного металу.



Рис. 2 – Формоутворення РЕ змінного долота лемеша (експлуатація на супіщаних ґрунтах)



Рис. 3 – Формоутворення РЕ леза лемеша (експлуатація на легкій глині)



Рис. 4 – Зміна кута загострення РЕ лезової частини лемеша за експлуатації на різних типах ґрунтів (точки *A, B, C, D* – місця проведення замірів)

У результаті експлуатації на піщаних та супіщаних ґрунтах виявлено, що РЕ РО ґрунтообробних машин, які виготовлені із матеріалу без нанесення зносостійкого покриття (одношарові), здатні до самогострювання (рис. 2). На більш важких ґрунтах (суглинках та глинах) спостерігається затуплення РЕ РО ґрунтообробних машин (рис. 3). Для інших типів РО ґрунтообробних машин спостерігається подібна закономірність зміни кута загострювання за довжиною різальної кромки залежно від типу ґрунту.

Досягнення форми природного зношування не завжди призводить до зменшення тягового опору агрегату, і, відповідно, до зменшення витрати пального (рис. 5). На рис. 5 результати представлені у відсотковому значенні, оскільки обробіток ґрунту проводився різними агрегатами. За 100% взято витрату пального при експлуатації агрегату з новими РО.

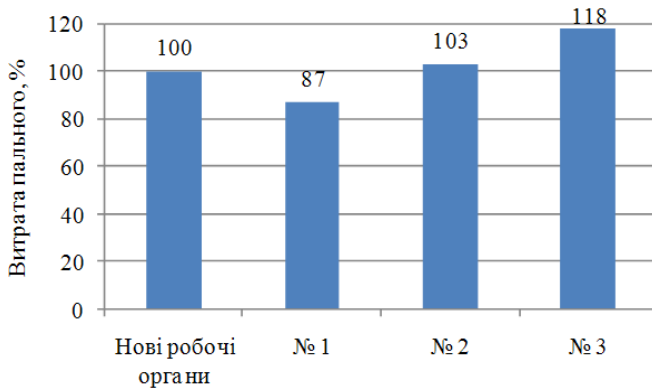


Рис. 5 – Зміна витрати пального при початковій формі і при досягненні форми природного зношування в процесі експлуатації для одношарових лемешів, які виготовлені зі сталі Hardox 500: №1 – на супіщаних ґрунтах; №2 – на суглинкових ґрунтах; №3 – на легкій глині

Як відомо із праці [6], для РО ґрунтообробних машин можливе існування двох закономірностей зношування (рис. 6). Із рис. 6 очевидно, що на піщаних та супіщаних ґрунтах зношування призводить до самоорганізації РО, яке сприяє процесу самогострювання, що, в свою чергу, призводить до зменшення витрати пального при обробітку ґрунту. На суглинкових та глиняних ґрунтах природна форма зношування призводить до затуплення лезової частини і зростання витрати пального. Саме тому, розробка самогострювальних РЕ РО для цих типів ґрунтів є найбільш актуальною. Для піщаних та супіщаних ґрунтів необхідно розробити заходи із підвищення зносостійкості зі збереженням природної форми зношування, а для суглинкових і глиняних ґрунтів треба розробити заходи, які дозволять керувати процесом зношування із можливістю досягнення ефекту самогострювання.

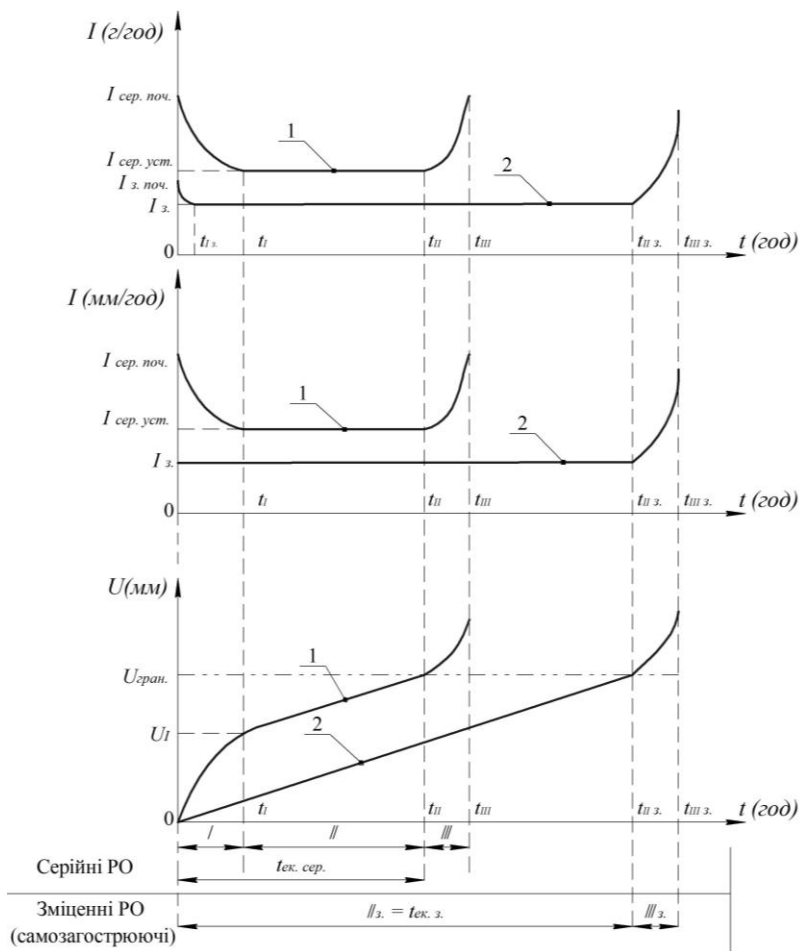


Рис. 6 – Типові криві зміни зносу та швидкості зношування РО ґрунтообробних машин із часом: 1 – серійні РО; 2 – зміцнені (здатні до самоорганізації) РО; I (мм/год.), I (г/год.) – відповідно, інтенсивність лінійного і масового зношування; U – масовий знос; I – період самоорганізації; II – період встановленого зношування; III – період критичного зношування; t – час зношування

Для серійних РО початковий етап експлуатації характеризується наявністю невідновленого перехідного режиму із високою початковою швидкістю (відрізок I , рис. 6). Тривалість початкового

періоду залежить від абразивних властивостей ґрунтів. Так, на піщаних і супіщаних ґрунтах період перехідного режиму (самоорганізації РО) проходить набагато швидше, ніж на суглинкових і глинистих ґрунтах. Після періоду самоорганізації настає період встановленого зношування (відрізок II, рис. 6), коли $I_{сер.уст} = const.$ (мм/год., г/год.) та $I = const.$ (г/год.). Після закінчення періоду встановленого зношування швидкість зношування суттєво зростає. У більшості випадків після закінчення другого періоду РО ґрунтообробних машин вибраковуються, оскільки вони перестають виконувати агротехнічні вимоги. Швидкий знос пов'язаний із зменшенням товщини різальної кромки та “втомою” матеріалу РО, що зумовлює його обломлювання або надщерблення (рис. 7).



Рис. 7 – Обломлювання носка стрілочної лапи культиватора

Період III дуже чітко спостерігається для дискових РО та стрілочних лап культиваторів і майже відсутній для лемешів і долота лемеша. Розглянемо криві 1 та 2 (рис. 6) без зон III і III_з. Порівнюючи функції зносу серійних та зміцнених (самозагострювальних) РО бачимо, що на початковому проміжку $[0; t_1]$:

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

$$U(t) = U_0 + \alpha t^\beta, \quad (6)$$

де U_0 – початковий знос; α, β – параметри, $\alpha \in (0; n)$ і $\beta \in (0; 1)$;

2) функція зносу зміцнених РО має лінійний характер і описується залежністю (без урахування зони III):

$$U(t) = U_0 + \gamma t, \quad (7)$$

де U_0 – початковий знос; γ – параметр, $\gamma \in (0; t_{II.з.})$, що дорівнює куту нахилу прямої (для проміжку $[0; t_{II.з.}]$).

Із урахуванням зони III, маємо:

$$U(t) = \begin{cases} U_0 + \gamma t, t \in [0; t_{II.3.}]; \\ U_0 + at^2 + bt + c, t \in [t_{II.3.}; t_{III.3.}]. \end{cases} \quad (8)$$

Параметр γ можна знайти із залежності (8):

$$\gamma = \frac{at_{II.3.}^2 + bt_{II.3.} + c}{t_{II.3.}^2}. \quad (9)$$

Відхилення функції зносу серійних і зміцнених РО ґрунтообробних машин оцінимо площею складної фігури, що утворена кривими в інтервалі $[0; t_1]$:

$$\begin{aligned} S &= \int_0^{t_1} (U_0 + \alpha t^\beta - U_0 - \gamma t) dt = \int_0^{t_1} (\alpha t^\beta - \gamma t) dt = \int_0^{t_1} \alpha t^\beta dt - \int_0^{t_1} \gamma t dt = \\ &= \frac{\alpha t^{\beta+1}}{\beta+1} \Big|_0^{t_1} - \frac{\gamma t^2}{2} \Big|_0^{t_1} = \frac{\alpha t_1^{\beta+1}}{\beta+1} - \frac{\gamma t_1^2}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

де t_1 – час, після якого функція зносу серійних РО набуває лінійного характеру, с.

Для досягнення ефекту самозагострювання залежність лінійного зносу РО від часу повинна мати вигляд кривої 2 (рис. 6). Це обумовлює проведення зміцнення однієї із сторін РО із забезпеченням початкової форми кромки РЕ, яка буде підтримуватися протягом всього терміну експлуатації. Із математичної точки зору для досягнення ефекту самозагострювання серійних РО необхідно розробити заходи, які дозволять досягнути $S \rightarrow 0$, а для підвищення довговічності РО необхідно, щоб параметр кривої 2 (рис. 6) $\gamma \rightarrow \min$. Період припрацювання $t_{1.3.}$ для даних РО характеризується більш інтенсивним масовим зношуванням і відсутністю такої закономірності для лінійного зношування (рис. 6). Зміни закономірності зношування серійних РО (крива 1) на закономірність самозагострювальних РО (крива 2) можна досягти за рахунок регулювання фізико-механічних властивостей матеріалу поверхонь РО із урахуванням особливостей характеру зношування залежно від абразивних властивостей ґрунтів та режимів експлуатації.

При проектуванні самозагострювальних РЕ РО одним із основних показників є співвідношення зносостійкості матеріалів РО та їх геометричних характеристик.

Для досягнення ефекту самозагострювання та забезпечення рівності РО співвідношення зносостійкості та товщини основного металу і зносостійкого шару повинно відповідати значенням, які визначені у працях [1, 2, 6] відповідно до критерію,

запропонованого А.Ш. Рабіновичем. Так, у праці [38] вказано, що для більшості ґрунтів $\omega = 1,5$. На основі аналізу зношених РО, аналізу попередніх досліджень та практичного досвіду встановлено критерій ω для різних типів РО ґрунтообробних машин із урахуванням умов експлуатації (таблиця 2).

Таблиця 2 – 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 лемешів не визначали критерію самозагострювання ω при експлуатації на пухких ґрунтах, оскільки вони не працюють у таких умовах. Зі зменшенням абразивності ґрунту та ступеня закріплення абразивних частинок в ґрунті спостерігається зменшення критерію ω для всіх типів РО ґрунтообробних машин (таблиця 2).

Для дискових РО даний критерій ω суттєво більший, що пов'язано, у першу чергу, із наявністю динамічних навантажень при роботі на твердих ґрунтах. Даний результат підтверджено суттєвим зменшенням критерію ω при зменшенні ступеня закріплення абразивних частинок у ґрунті, а отже і його твердості. За наявності кам'янистих включень у ґрунті, критерій ω повинен бути суттєво збільшений, що унеможливить обломлювання РЕ РО. У класичному розумінні, це співвідношення повинно відповідати залежності (1) за всією поверхнею РЕ РО. Ця залежність не розкриває повною мірою процеси самоорганізації РО ґрунтообробних машин, оскільки не враховує особливості зношування складових частин РО. Це співвідношення

повинно забезпечувати не тільки можливість самогострювання РЕ РО, але і забезпечити рівностійкість зношування РО. В основі запропонованих співвідношень зносостійкості і товщини нанесених зносостійких шарів РО лежать експериментальні дослідження характеру зношування РО ґрунтообробних машин залежно від абразивних властивостей ґрунту та режимів експлуатації.

На рис. 8 зображено зони нанесення зносостійкого покриття на поверхню РО ґрунтообробних машин для досягнення ефекту самогострювання та рівностійкості: 1 – зона, яка найбільш інтенсивно зношується; 2 – зона із меншою інтенсивністю зношування. Цей розподіл не є оптимальним, наприклад, леміш плуга більш доцільно поділити на чотири зони, але такий поділ ускладнить, а в деяких випадках унеможливить процес нанесення зносостійкого шару в умовах ремонтних майстерень аграрних підприємств.

Зону 2 (рис. 8) для лемешів і культиваторних лап можливо зміцнювати точково для утворення зубчастої поверхні. Форма такої поверхні сприяє якісному виконанню технологічної операції і зумовлює зменшення тягового опору на 3,2...6,4%, але, разом з тим, зменшує зносостійкість на 8,1...14,5 %. При використанні лемешів зі змінним долотом зона 1 (рис. 8) не зміцнюється.

Для досягнення ефекту самогострювання РЕ РО та рівностійкості зношування необхідно, щоб параметри зносостійкого шару мали співвідношення:

$$\chi = \frac{\varepsilon_{1z} \cdot h_{1z}}{\varepsilon_{2z} \cdot h_{2z}}, \quad (11)$$

де ε_{1z} – зносостійкість зміцнювального покриття зони 1 (рис. 8); ε_{2z} – зносостійкість зміцнювального покриття зони 2 (рис. 8); h_{1z} – товщина зміцнювального покриття зони 1 (рис. 8), мм; h_{2z} – товщина зміцнювального покриття зони 2 (рис. 8), мм.

Значення критерію χ , що характеризує співвідношення між параметрами зносостійкого шару, визначено для різних типів ґрунтів із урахуванням їх стану (таблиця 3). Швидкість руху ґрунтообробного агрегату суттєво впливає на характер зношування РО ґрунтообробних машин, а отже і на співвідношення параметрів зносостійкого шару в різних зонах РО. Дослідження критерію χ проведені на агрегатах, які працювали в діапазоні швидкостей 10...11 км/год. За подальшого зростання швидкості необхідно вводити поправочний коефіцієнт Ω :

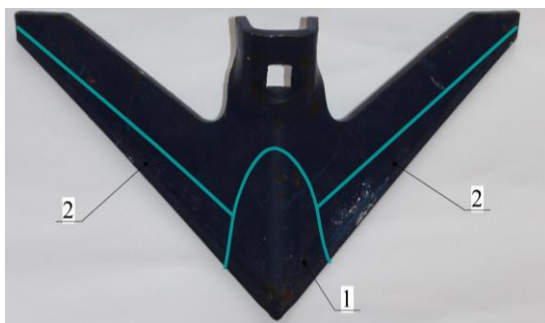
$$\Omega = (V_{роб} - V_{поч}) \times \beta, \quad (12)$$

де $V_{роб}$ – робоча швидкість агрегату, км/год.; $V_{поч}$ – початкова швидкість агрегату ($V_{поч} = 11$ км/год.), км/год.; β – поправочний

коефіцієнт, який враховує зростання інтенсивності зношування зони 1 (рис. 8) за зростання швидкості руху агрегату (для супіщаних і піщаних ґрунтів – $\beta \approx 1,03$, для суглинків – $\beta \approx 1,025$ та для глиняних ґрунтів – $\beta \approx 1,012$).

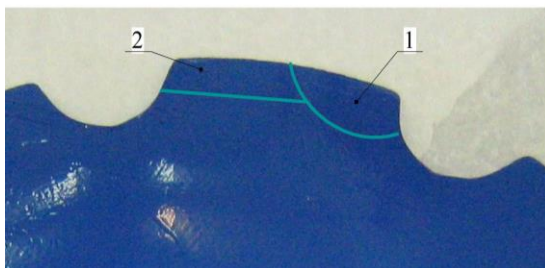


а



б

Напрямок обертання дискового РО →



в

Рис. 8 – Схеми нанесення зносостійкого покриття на РЕ РО для досягнення ефекту самозагострювання та забезпечення рівності зношування:
а – леміш; б – стрілочна лапа; в – дисковий РО:
1, 2 – зони нанесення зносостійкого шару

Таблиця 3 – Співвідношення між параметрами зносостійкого шару χ (визначено експериментально)

Ґрунт	Стан ґрунту	Критерій χ		
		Леміш	Стрілчата 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

Початковий кут загострення РО ґрунтообробних машин суттєво впливає не тільки на реалізацію ефекту самозагострювання, а також впливає і на довговічність РО. Проведений аналіз дослідних робіт та синтез їх з отриманими даними експлуатаційних досліджень дозволили встановити оптимальні кути загострення РО ґрунтообробних машин. Для лемешів оптимальний кут загострення лезової частини знаходиться в межах $8...10^\circ$, а носової частини – $20...27^\circ$. Для стрілчатих лап оптимальний кут загострення лезової частини $8...10^\circ$, а носової частини – $25...30^\circ$. Для дискового робочого органу оптимальний кут загострення – $28...34^\circ$. При зміцненні стрілчатої лапи із зовнішньої сторони, загострення крил лапи проводили із внутрішньої сторони. Загострення у всіх випадках проводили одностороннє.

В аналізі приведено суперечливі дані щодо сторони нанесення (зовнішню чи внутрішню) зносостійкого матеріалу на стрілчатую лапу, тому для проведення експериментальних досліджень лапи виготовлялися із внутрішнім і зовнішнім нанесенням зносостійкого покриття.

У результаті проведених експлуатаційних досліджень у всіх РО, які були виготовлені за рекомендаціями представленими в теоретичних досліджень, спостерігався ефект самозагострювання. Під час експлуатації стрілчатих лап із внутрішнім зносостійким шаром на

супіщаних та суглинкових ґрунтах спостерігався виступ зміцненого шару, що зумовило його обломлювання при взаємодії із твердими включеннями у ґрунті. Довговічність таких лап на цих ґрунтах була в 1,6..1,9 разів меншою, ніж серійних. На глинистих ґрунтах лапи із внутрішнім зносостійким шаром демонстрували ефект самозагострювання, а довговічність їх була на 2,8% більшою за лапи із зовнішнім зносостійким шаром.

Процес самоорганізації (самозагострювання) РО, який був досягнутий за рахунок нанесення зносостійкого шару, дозволив суттєво зменшити витрату пального за експлуатації на суглинкових і глинистих ґрунтах та підвищити довговічність на супіщаних та піщаних ґрунтах порівняно із використанням серійних РО (рис. 9).

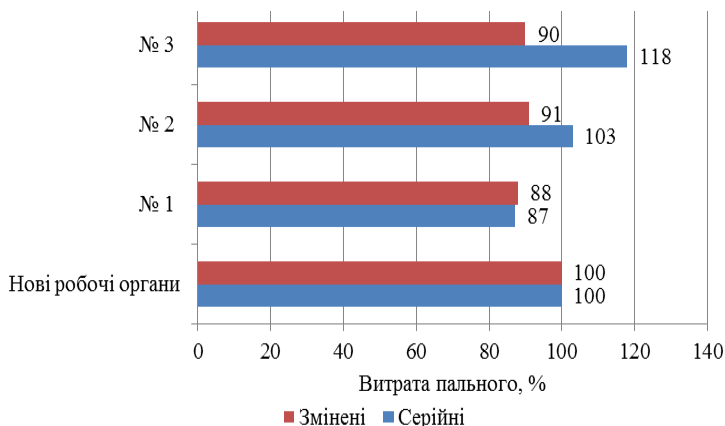


Рис. 9 – Зміна витрати пального при початковій формі і при досягненні форми природного зношування (для серійних) або процесу самозагострювання (для зміцнених) РО ґрунтообробних машин: №1 – за експлуатації на супіщаних ґрунтах; №2 – за експлуатації на суглинкових ґрунтах; №3 – за експлуатації на легкій глині

Використання зміцнених РО ґрунтообробних машин із ефектом самоорганізації (самозагострювання) дозволяє підвищити довговічність РО, покращити якість та зменшити собівартість технологічної операції.

Висновки

На основі аналізу апріорної інформації, проведених теоретичних та експлуатаційних досліджень встановлені оптимальні параметри РО ґрунтообробних машин, які дозволяють реалізувати ефект

самозагострювання із урахуванням умов та режимів експлуатації. Проведені експлуатаційні випробовування підтвердили ефективність застосування розроблених параметрів РО ґрунтообробних машин для реалізації ефекту самозагострювання.

Одержані результати теоретичних досліджень та експлуатаційних випробувань дозволяють впроваджувати самозагострювальні РЕ РО в аграрних підприємствах із урахуванням особливостей експлуатації та типів ґрунтів.

Список посилань

1. Ткачев, В. Н. Методы повышения долговечности деталей машин / В. Н. Ткачев. – М. : Машиностроение, 1971. – 272 с.
2. Рабинович, А. Ш. Самозатачивающиеся плужные лемехи и другие почворежущие детали машин / А. Ш. Рабинович. – М. : ГОСНИТИ, 1962. – 165 с.
3. Аулін, В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості і надійності робочих органів ґрунтообробних машин з різальними елементами : монографія / В. В. Аулін, А. А. Тихий. – Кропивницький : Лисенко В. Ф., 2017. – 278 с.
4. Новиков, В. С. Обеспечение долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин : монография / В. С. Новиков. – М. : ИНФРА-М, 2019. – 155 с.
5. Износ и коррозия сельскохозяйственных машин / М. М. Севернев, Н. Н. Подлекарев, В. Ш. Сохадзе; под. ред. М. М. Севернева. – Минск : Беларус. навука, 2011. – 333 с.
6. Борак, К. В. Підвищення зносостійкості робочих органів дискових ґрунтообробних знарядь методом електроерозійної обробки : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 “Тертя та зношування в машинах” / Борак Костянтин Вікторович; Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П. Василенка. – Харків, 2013. – 217 с.
7. Бобрицький, В. М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин : дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.02.04 “Тертя та зношування в машинах” / Бобрицький Віталій Миколайович; Національний транспортний університет. – К., 2007. – 182 с.
8. Ткачев, В. Н. Работоспособность деталей в условиях абразивного изнашивания / В. Н. Ткачев. – М. : Машиностроение, 1995. – 336 с.
9. Денисенко, М. І. Зміцнення лез ґрунтообробних робочих органів сільськогосподарських машин з утворенням ефекту самозагострювання / М. І. Денисенко, В. Д. Войтюк // Технічний

- сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2016. – №36. – С. 175–182.
10. Аулін, В. В. Трибофізичні основи підвищення зносостійкості деталей та робочих органів сільськогосподарської техніки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.02.04 “Тертя та зношування в машинах” / Аулін Віктор Васильович; Хмельницький національний університет. – Хмельницький, 2015. – 447 с.
 11. Виноградов, В. В. Повышение износостойкости стрелчатых лап почвообрабатывающих орудий карбовибродуговым упрочнением их режущих поверхностей : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.03 “Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве” / Виноградов Виктор Владимирович. – Орел, 2017. – 156 с.
 12. Zhang, J. Wear and draft of cultivator sweeps with hardened edges / J. Zhang, R. L. Kushwaha // Canadian Agricultural Engineering. – 1995. – Vol. 37 (1). – P. 41–47.
 13. Par, B. Wear of plowshare components in SAE 950C steel surface hardened by powder boriding / B. Par // Wear. – 2006. – Vol. 261. – P. 251–255. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.10.003>
 14. Михальченков, А. М. Стрелчатая лапа культиватора повышенной износостойкости с эффектом самозатачивания / А. М. Михальченков, С. И. Будко, Л. С. Киселева // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – Кокино, 2011. – С. 101–103.
 15. Gear, G. U. States agricultural warehouse / G. Gear, R. Wheels // The cultivator, a monthly journal, devoted to agriculture, horticulture, floriculture and to domestic and rural economy. New Series. – 1947. – Vol. IV. – P. 231.
 16. Wilson, E. Steel cultivators. / E. Wilson // The cultivator, a monthly journal, devoted to agriculture, horticulture, floriculture and to domestic and rural economy. New Series. – 1948. – Vol. V. – P. 165.
 17. Шульц В. В. Форма естественного износа деталей машин и инструментов / В. В. Шульц. – Ленинград : Машиностроение, 1990. – 208 с.
 18. Борак, К. В. Зміна поверхневої твердості лемішно-лапових робочих органів ґрунтообробних машин в процесі експлуатації. / К. В. Борак // Біоресурси і природокористування. – 2020. – Том 12 (1–2). – [Електронний ресурс]. Режим доступу до журн. : <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Bio/article/view/13870>

19. Ахметшин, Т. Ф. Повышение износостойкости и долговечности почвообрабатывающих рабочих органов / Т. Ф. Ахметшин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – Оренбург, 2013. – С. 81–84.
20. Люляков, И. В. Разработка технологии восстановления стрельчатых лап культиваторов путем замены режущей части : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.03 “Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве” / Люляков Иван Викторович. – Саратов, 2005. – 192 с.
21. Виноградов, В. В. Восстановление и упрочнение стрельчатых лап почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами / В. В. Виноградов // Молодежь и XXI век – 2016 : Материалы VI Международной молодежной научной конференции. – Курск, 2016. – С. 89–94.
22. Козаченко О. В. Польові випробування удосконалених культиваторних лап / О. В. Козаченко, О. М. Шкрегаль, В. С. Каденко, О. В. Блезнюк // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2019. – №15. – С. 31–39.
23. Собачкин, А. В. Формирование износостойких покрытий для деталей сельскохозяйственного машиностроения при электродуговой наплавке многокомпонентных механо-активированных СВС-материалов : дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.16.09 – “Материаловедение (в машиностроении)” / Собачкин Алексей Викторович; Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2013. – 150 с.
24. Шамшетов, С. Н. Повышение долговечности рабочих органов культиваторов для междурядной обработки хлопчатника : автореф. дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.20.03 “Технологии и средства технического обслуживания в сельском хозяйстве” / Шамшетов Сарсенбай Нуратдинович. – Москва, 1985. – 20 с.
25. Аулін, В. В. Фізичні основи процесів і станів самоорганізації в триботехнічних системах : монографія / В. В. Аулін. – Кіровоград : Лисенко В. Ф., 2014. – 369 с.
26. Новиков, В. С. Повышение долговечности стрельчатых лап культиваторов / В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Весник ФГОУВПО “Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина”. – 2017. – №4. – С. 49–55.

27. Аулін, В. В. Самозагострювання різальних елементів ґрунтообробних і землерийних машин в умовах зміцнення їх робочих поверхонь / В. В. Аулін, С. О. Карпушин, А. А. Тихий // *Весник ХНАДУ*. – 2012. – Вып. 57. – С. 188–194.
28. Гончаров, В. С. Упрочнение лезвийного инструмента с созданием эффекта самозатачивания / В. С. Гончаров, П. А. Мельников, А. Н. Попов, Е. В. Васильев // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. – Самара, 2013. – С. 233–235.
29. Бабицкий, Л. Ф. Развитие бионического направления в земледельческой механике / Л. Ф. Бабицкий, В. Ю. Москалевич, И. В. Соболевский // *Аграрная наука Евро-Северо-Востока*. – Киров, 2017. – №4 (59). – С. 68–74.
30. Волик, Б. А. Метод гідродинамічних аналогій в системі модельних досліджень ґрунтообробних машин / Б. А. Волик, Є. І. Лепеть, А. В. Коновий // *Інженерія природокористування*. – Харків, 2018. – №2. – С. 45–48.
31. Бабицкий, Л. Ф. Біонічні напрями розробки ґрунтообробних машин / Л. Ф. Бабицкий. – Київ : Урожай, 1998. – 162 с.
32. Ren, L. Q. Preliminary studies on the basic factors of bionics / L. Q. Ren, Y. H. Liang // *Science China Technological Sciences*. – 2014. – P. 520–530. <https://doi.org/10.1007/s11431-013-5449-1>
33. Bogatyrev N. R. A “Living” Machine / N. R. Bogatyrev // *Journal of Bionics Engineering*. – 2004. – Vol. 1(2). – P. 79–87. <https://doi.org/10.1007/BF03399464>
34. Yongxiang, L. Significance and Progress of Bionics / L. Yongxiang // *Journal of Bionics Engineering*. – 2004. – Vol. 1(1). – P. 1–3. <https://doi.org/10.1007/bf03399448>
35. Jiang, W. Bio-inspired self-sharpening cutting tool surface for finish hard turning of steel / W. Jiang. // *CIRP Annals*. – 2014. – Vol. 63. – P. 517–520. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.047>
36. Гусев, С. В. Теоретическое обоснование эффекта самозатачивания / С. В. Гусев, А. С. Гусев // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. – Владимир, 2011. – №3. – С. 44–47.
37. Liuabc, X. F. Self-sharpening” tungsten high-entropy alloy / X. F. Liuabc, Z. L. Tian, X. F. Zhang, H. H. Chen, T. W. Liu, Y. Chen, Y. J. Wang, L. H. Dai // *Acta Materialia*. – 2020. – Vol. 186. – P. 257–266. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2020.01.005>
38. Востановление деталей машин : справочник / Ф. И. Пантелеенко, В. П. Лялякин, В. П. Иванов, В. М. Константинов; Под ред. В. П. Иванова. – М. : Машиностроение, 2003. – 672 с.