

УДК 62.2:631.3 «401»

М. Денисенко, канд. техн. наук; А. Опальчук докт. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ЗНОШУВАННЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАШИН

Резюме. Досліджено підвищення довговічності деталей робочих органів ґрунтообробних машин з утворенням ефекту самозагострювання. Запропоновано для керування властивостями поверхневого шару робочих органів та створення ефекту самозагострювання використовувати точкове зміцнення.

Ключові слова: зносостійкість, робочі органи ґрунтообробних машин абразивне зношування, точкове зміцнення, ефект самозагострювання, ріжуча кромка.

М. Denysenko, A. Opalchuk

WEAR OF INCREASE DURABILITY AND ELEMENT TOOL PART OF CULTIVATOR MACHINE

The summary. Results of independent experimental researches prove the mechanical – chemical mechanism of wear process metal frictional surfaces. Features of abrasive wear process are considered. Results of researches of microstructure, hardness, phase structure, trials on wear process in conditions of abrasive environment influence are brought. Examples of application the wear-resistant coverage's are presented.

Key words: wear resistance, working organs agricultural machines, abrasive wear, hardening point, effect self – sharpening, cutting edge.

Вступ. В умовах неминучого скорочення природних ресурсів набуває вирішення проблем як з ресурсозбереженням, так і з суттєвим збільшенням термінів служби сільськогосподарських машин. Значна частка металу витрачається на виготовлення запасних частин і механізмів, які йдуть на підтримку машинно-тракторного парку України в роботоздатному стані. Спрацьовані деталі й вузли переважно йдуть у брухт, але 90% їх можливо відновити, зміцнити та повторно використати при технічному обслуговуванні й ремонті машин, збільшивши терміни їх служби. У зв'язку з інтенсивним розвитком фермерських господарств і малих сільськогосподарських підприємств виникла проблема відновлення й зміцнення деталей, що швидко зношуються в умовах дрібносерійного виробництва.

В першу чергу, до таких деталей відносяться робочі органи ґрунтообробних машин (диски борін, лапи культиваторів, лемеші плугів). В Україні гостро постала проблема підвищення ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин, тому що ні один із запропонованих методів зміцнення не вирішує це завдання, що призводить до величезних фінансових і трудових втрат у царині виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки. При зміцненні загартуванням ці деталі мають дуже низький ресурс: наробіток до заточування лемешів – 8–10 га, лапи культиваторів – через зміну. Такі часті заточування швидко призводять до їх повного спрацювання й заміну їх новими деталями. Об'ємне загартування не забезпечує ні високу зносостійкість деталей робочих органів, ні їх самозаточування.

На сьогодні спостерігається тенденція зниження якості деталей робочих органів ґрунтообробних машин, тому що їх виготовленням займаються підприємства, які раніше ніколи цим не займалися. При цьому на сучасних підприємствах сільськогосподарського машинобудування часто не дотримуються встановлених технологій їх виробництва, змінюючи геометричні параметри деталей та їх фізико-

механічні властивості. Робочі органи, які виготовляють такі підприємства, не відповідають вимогам якості й не забезпечують номінального ресурсу роботи.

Основними факторами, які визначають абразивне зношування, є абразивні властивості ґрунтів, що мають таку порівняльну зношувальну здатність: глинисті 1,0; піскові 1,5; суглинки 1,9; супіскові 2,3 [1]. Одним із факторів в абразивному зношуванні також є хімічна активність ґрунтів.

На деяких вітчизняних підприємствах налагоджено виробництво робочих органів удосконаленої конструкції. При виготовленні деталей робочих органів машин в основному використовується сталь 65 Г, а зносостійкі покриття наносять методом індукційного наплавлення. Співставлення хімічного складу і твердості, а також даних зі зміцнення робочих органів ведучих закордонних виробників із показниками вітчизняного виробництва показує, що робочі органи, які виготовляють фірми США, Великобританії, Франції, Німеччини значно переважають наші вітчизняні аналоги і володіють на 30–50% вищою зносостійкістю.

Метою даної роботи є підвищення зносостійкості деталей робочих органів ґрунтообробних машин точковим зміцненням з утворенням ефекту самозаточування.

Матеріали та методика досліджень. Теоретично доведено, що процеси тертя та зношування локалізовані в елементарному об'ємі, який складається з великої кількості мікрооб'ємів, що знаходяться в контактній взаємодії. При терті абразивних частинок по поверхні деталі в певних умовах відбувається пряме (безпосереднє) руйнування поверхневого шару шляхом зрізування або відривання. З раніше наведених даних відомо, що при зношуванні процеси прямого руйнування складають малу частку від загальної кількості контактів абразивних частинок з поверхнею деталі. Для оцінювання властивостей поверхневого шару в лабораторних умовах знайшли широке використання методи випробувань матеріалів шляхом стирання їх по поверхні абразивну. Аналіз цих методів викладено в роботі [2]. Методика випробування на зношування при терті по шкурці забезпечує точність отриманих результатів за таких умов (малі тиски і швидкості ковзання, абразивні частинки високої твердості й міцності, відсутність нагрівання, неможливість переміщення і руйнування абразивних частинок). Але ці умови не завжди відповідають умовам експлуатації деталей машин.

Ефективними заходами захисту машин від абразивного зношування є підвищення твердості поверхневих шарів їх деталей і вузлів. У роботах М.М. Хрущова М.А. Бабічева [3, 4] показано (рис. 2), що твердість матеріалів, яка залежить від енергії зв'язку атомів у кристалічній решітці, значною мірою визначає опір матеріалів абразивному зношуванню.

Поставлена мета досягається шляхом використання комплексного методичного підходу, що поєднує триботехнічні методи випробування, сучасні методи тонкого фізичного експерименту і прецизійного хімічного аналізу мікрооб'ємів сплавів деталей робочих органів машин і лабораторних зразків, а також абразивного середовища і продуктів зношування. Форми та механізми руйнування визначаються взаємодією поверхонь тертя з абразивним середовищем, сутність якого заключається в ковзанні частинок, пластичному деформуванні сплавів, у місцях контакту, руйнуванні поверхневих об'ємів без відокремлення металу або зі зняттям мікростружки.

Існують дві виразні форми прояву абразивних процесів, що відрізняються характером взаємодії частинок з поверхнею сплаву: I – з перевагою механохімічного руйнування (пластичне деформування поверхневих об'ємів, їх окислення та наступне руйнування утворених плівок) і II – перевагою механічного руйнування металу поверхневих шарів (втління абразивних частинок і руйнування поверхневих об'ємів матеріалу без відокремлення частинок основного металу або зі зняттям мікростружки). Перша форма є різновидністю механохімічного зношування, а друга відноситься до недопустимих при зовнішньому терті процесам пошкодження [5, 6, 7].

Механохімічна модель процесу абразивного зношування включає такі фази процесу: механічний контакт; пружно-пластичну деформацію; активізацію – утворення тонкого шару деформованого матеріалу; миттєва пасивація – взаємодія активованого металу з хімічно активними компонентами середовища (утворення послаблених вторинних структур); руйнування вторинних структур після наступного механічного впливу.

Значно рідше в механізмах спостерігається абразивне зношування з переважанням механічного руйнування.

Механічна модель процесу абразивного зношування включає: механічний контакт та пружно-пластичну деформацію; впровадження абразивних частинок та руйнування поверхневих об'ємів без відокремлення частинок основного металу або зі зняттям мікростружки.

Механічна форма зношування пов'язана з переходом до граничного по міцності стану металу поверхневих шарів, втілення абразивних частинок, дряпанням та відокремлюванням мікростружки. Прояви механохімічної або механічної форм цих видів руйнування залежать від співвідношення механічних властивостей абразивних частинок і поверхневих шарів зношувачого матеріалу, величини робочого навантаження на абразивні частинки, їх геометричних розмірів і фізико-хімічної активності середовища.

Механізми абразивного зношування зображено на рис. 1.

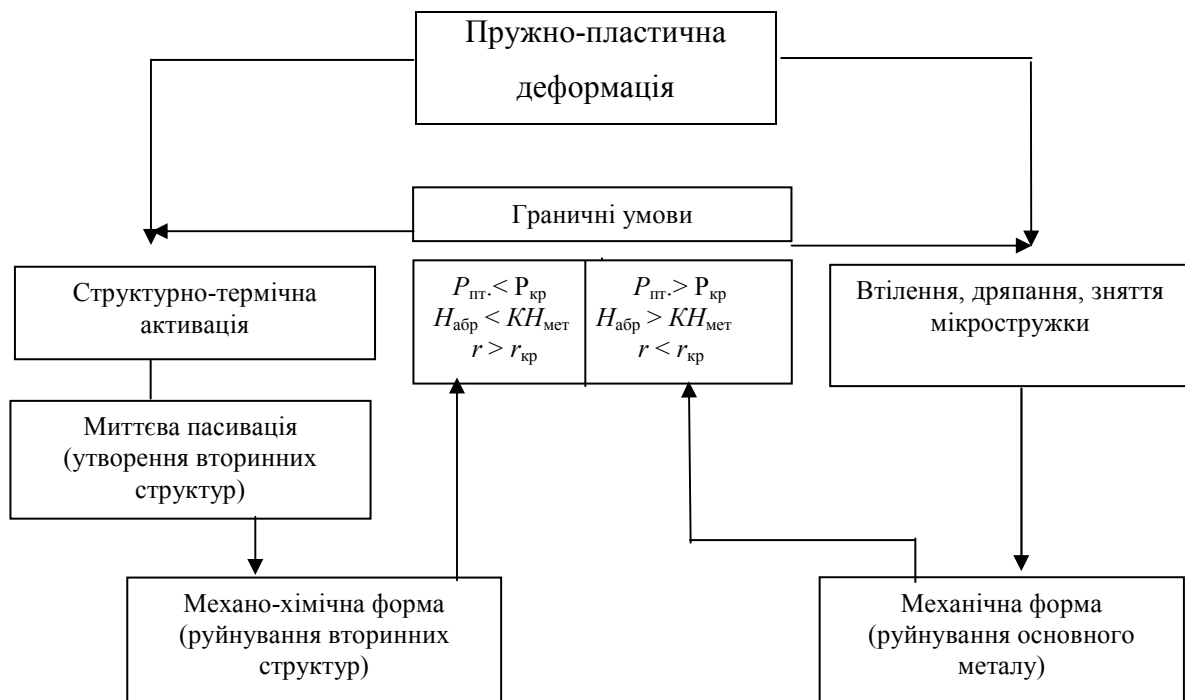


Рисунок 1. Механізми і граничні умови абразивного зношування (за даними Б.І. Костецького)

Данні про стан поверхні й поверхневих шарів сталі при пошкодженні в результаті дії абразиву наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Характеристика стану поверхні і поверхневих шарів сталі при зношуванні та пошкодженні в результаті дії абразиву (за даними Б.І. Костецького)

Критерії оцінювання процесу	Форма абразивного зношування	
	I	II
Клас чистоти	7...12	5...10
Глибина зруйнованого шару	До 200 нм	До 0,2 мм
Температура поверхневого шару	До 50°C	До 50°C
Зміна хімічного та фазового складу поверхневого шару	Утворення твердих розчинів, евтектик, окислів	-
Відносна зміна твердості поверхневого шару ($H_{зал}/H_{вих}$)	2...3	1,5
Коефіцієнт збільшення об'єму поверхневого шару	1,05...1,08	1
Напруження в поверхневому шарі	Локальний стиск або розтяг	Стиск
Руйнування поверхневого шару	Кричко-в'язке	В'язко-крихке
Швидкість процесу руйнування	До 0,5мкм /год.	0,5...50мкм /год.
Супровідні процеси	-	Низькотемпературне окислення

Абразивні процеси можуть виникати в найширшому діапазоні зовнішнього силового впливу. Утворення механохімічної або механічної форми цього виду руйнування залежить від співвідношення механічних властивостей абразивних частинок і поверхневих шарів зношуваного металу. При співвідношенні твердості металу H_m до твердості абразиву H_a більшому, ніж 0,6 ($K_T = \frac{H_m}{H_a} > 0,6$), спостерігається механохімічна форма абразивного зношування. При $K_T < 0,6$ має місце механічна форма пошкодження. У випадку тертя металеві поверхні по абразивній масі, наприклад, робочих органів ґрунтообробних, будівельних, гірничих машин та ін. переважає I форма абразивного зношування – механохімічна.

Кількісні співвідношення між зносостійкістю ϵ і твердістю H (рис. 2) дозволяють розділити окремі групи матеріалів за міцністю міжатомних зв'язків і за видами методів зміцнення (легування, фазовий та механічний наклеп і т. ін.) [8].

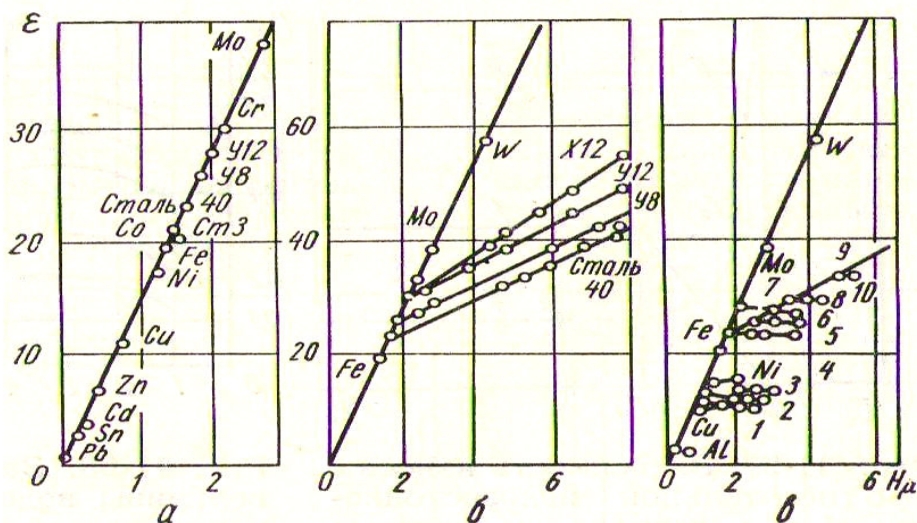


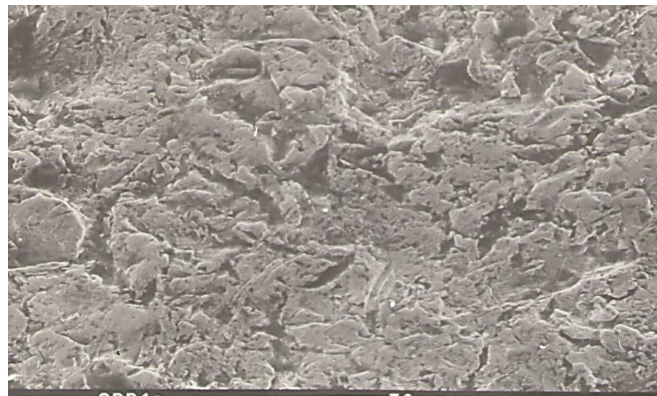
Рисунок 2. Відносна зносостійкість ϵ при зношуванні деталей по закріплених абразивних частинках залежно від твердості металів (за М.М. Хрущовим)

Для технічно чистих, відпалених матеріалів (рис. 2а) отримана залежність $\varepsilon = bH$, де b – константа; H – твердість на втискування алмазної піраміди. Залежність $\varepsilon = f(H)$ для сталей 40, У8, У12, Х12, термічно оброблених на різну твердість (загартування та відпуск при різних температурах) має лінійний характер, а прямі $\varepsilon - H$ не проходять через початок координат (рис. 2б).

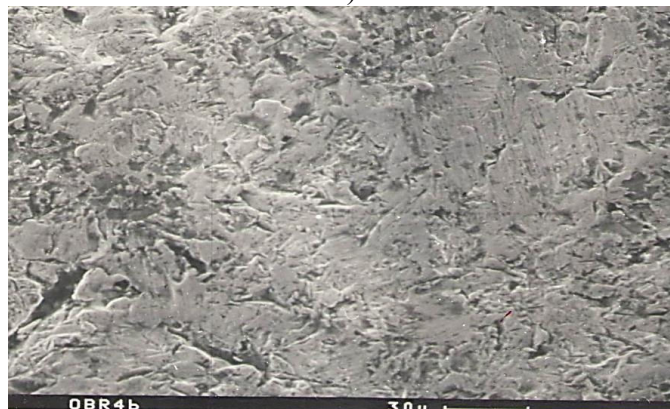
Механічний наклеп не впливає на відносну абразивну зносостійкість. Це зображено на рис. 2в для металів, для алюмінієвої бронзи (5% Al) після відпалу та наклепу, для берилієвої бронзи (2% Be), для аустенітної сталі (0,2% C, 18% Cr, 9% Ni) після наклепування, для сталі 40 після гартування, відпуску при різних температурах і наклепування, для сталі 40 – з різним ступенем наклепування після попереднього гартування та відпуску при температурі 600° С, для тієї ж сталі з відпуском при 450, 300 та 150° С, що відповідає кривим 1...10. Якщо твердість матеріалу близька або перевищує твердість абразивних частинок (у природі це частинки SiO₂ і Al₂O₃), то зносостійкість багатократно зростає. За наявності абразивного середовища в зоні тертя процеси пластичної деформації й активації металу поверхневих шарів посилюються, окислення охоплює глибші шари та протікає інтенсивніше [7].

Теоретичні дослідження проводились з використанням основних положень теорії тертя та зношування в абразивному середовищі, фізики твердого тіла, фізико-хімії поверхневих явищ, електронно-мікроскопічні дослідження, суміщені з рентгеноспектральним аналізом елементного складу.

Результати дослідження та їх обговорення. Збільшенню терміну служби робочих органів сільськогосподарських машин сприяє самозаточування лез або робочої кромки в результаті нанесення зносостійких покриттів різними методами. Але більшість використаних методів зміцнення досить трудомісткі та малоефективні.



а)



б)

Рисунок 3. Руйнування поверхні молотка подрібнювача кормів зі сталі 65Г:
а – крихкий тип руйнування; б – в'язке руйнування

Дослідженню процесів абразивного зношування металів присвячено немало робіт в Україні і за кордоном. Різні дослідники надають різні пояснення механізмів абразивного зношування. Найбільш розповсюджені уявлення абразивного зношування, як результат дряпання абразивними частинками, які викликають мікрорізання поверхні металу [9]. На рис. 3 показана фотографія зношеної поверхні молотка кормодробарки. На окремих ділянках спостерігаються сліди одиничних ударів крупних частинок ґрунту. Сліди пошкоджень поверхневого шару деталей переконують у тому, що на багатьох ділянках контакту утворюються високі напруження, причому ступінь з'єднання частинок ґрунту буде достатній для переходу пошкоджень у подряпини. Робоча поверхня лемеша вказує на протікання інтенсивних процесів направлено пластичного деформування та руйнування поверхневого шару. Деталі робочих органів ґрунтообробних машин при експлуатації зазнають механохімічної форми абразивного зношування. Процеси зношування в цих умовах характеризуються незначною пластичною деформацією поверхневих шарів металу, хімічною взаємодією з різними елементами зовнішнього середовища (волога, гумус, кисень, вуглекислий газ), утворенням і руйнуванням плівок окислів (вторинних структур). Товщина вторинних структур складає 0,01–0,05 мкм [10].

Поряд з утворенням шарів, насичених киснем та іншими хімічноактивними елементами середовища, виявлено інтенсивну дифузію вуглецю, азоту та інших менш активних елементів. Тиск ґрунту на леза робочих органів є динамічним, його можна розглядати як безперервні удари абразивних частинок [11]. В.Ф. Лоренц [12], сформулювавши поняття «абразивний знос», поділив його на дві основні групи: 1) знос фіксованими частинками абразиву; 2) знос вільними частинками абразиву. Найбільша кількість опублікованих праць присвячена дослідженню умов самозаточування лезових робочих органів (леміш плуга, лапа культиватора, диск борони).

Для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин Інститутом електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України запропоноване точкове зміцнення, дугове точкове зварювання (ДТЗ) порошковим дротом-плавким електродом. Точкове зміцнення – це мікроточкове твердого сплаву в структуру поверхонь деталей машин, які зазнають абразивного зношування. Точки зміцнення утворюються при швидкому введенні в метал виробу такої кількості теплоти, яка необхідна для проплавлення конусного кратера, заповнення його розплавом з основного металу і твердого сплаву, й утворення точки зміцнення (рис. 4).

Надійність і довговічність робочих органів ґрунтообробних машин визначаються складом, параметрами структури і механічними властивостями матеріалів, які використовуються для їх виготовлення. Деталі плугів, борін і культиваторів, виготовлені з матеріалів, з низькими показниками міцності й ударної в'язкості, швидко ламаються і деформуються, а їх інтенсивне зношування справляє вирішальний вплив на якість виконання машиною технологічного процесу, викликає порушення агротехнічних вимог, що в підсумку призводить до зниження врожайності. Особливу актуальність механічні характеристики набувають при створенні нових машин для прогресивних технологій обробки ґрунту й вирощування сільськогосподарських культур.

Наплавлювальні матеріали – самозахисні порошкові дроти типу ПП-АН170 (ПП-АН170М), що забезпечують утворення наплавленого шару твердістю HRC 60-65. Регулюванням геометрії наплавленого шару (висота, глибина, частота наплавлення), а також співвідношенням твердості наплавлених дільниць і основного металу в межах 1,5:1, 1,0:1 визначається оптимальна зносостійкість та самозаточування виробів. Леза робочих органів зі змінною геометрією наплавлення в процесі оранки, внаслідок великої різниці в зносостійкості основного і наплавленого шарів, самозаточуються і утворюють хвилясто-ступеневу форму леза, що знижує тяговий опір орного агрегату. (рис. 4).

Лемеші з точковим зміцненням (рис. 4) виготовлені зі сталевого гарячекатаного профілю для лемешів 142-620-Д53 за ГОСТом 8531-78. Наплавлення лемешів здійснюється порошковим дротом ПП-Нп-80х20 РЗТ 26101-84 (ПП-АН170). Наплавлені ділянки є конусами проплавлення, в основному, з виступом основи конуса на лицьовий бік деталі.



Рисунок 4. Леміш плуга після наробітку 49,0 га

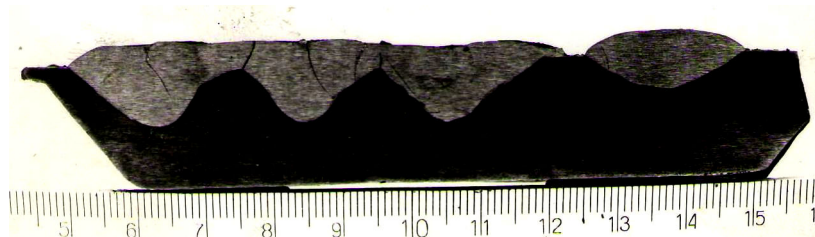


Рисунок 5. Геометричні параметри точок зміцнення

Точки наплавлення виступають над поверхнею лицьового боку деталі на величину 1...3 мм та проникають в основний метал на глибину 4...6 мм, утворюючи на поверхні лицьового боку деталі твердосплавну точку діаметром 18...25 мм і твердістю HRC 60...66 (рис. 5).

Пряма полярність струму знижує стійкість технологічного процесу, призводить до утворення бризок, зменшує глибину проплавлення і збільшує висоту точки зміцнення. Тому параметри точкового зміцнення відпрацювали на оберненій полярності. Зварний струм чинить найбільший вплив на формоутворення точки зміцнення. Наприклад, зі збільшенням зварного струму від 400 до 650А діаметр точки зміцнення зростає з 14,5 до 31 мм, висота – з 2,3 до 4,3 мм, а висота наплавлення зменшується з 3,5 до 1,2 мм.

Необхідна глибина проплавлення, як і інші параметри точкового зміцнення, досягається зміною сили зварного струму, напруги і тривалості горіння дуги. Оранка здійснювалася на глибині 25...27 см після збирання зернових культур. У процесі проведення випробувань регулярно здійснювали вимірювання параметрів робочих органів, визначали величину їх зносу. Всі робочі органи пройшли первинну технічну експертизу, промарковані. Показники умов і якості роботи визначали відповідно до ГОСТу 20915-75 і ОСТ.4.1-80.

Експериментальні лемеші з точковим зміцненням леза і носової частини встановлювалися на серійному плузі ПЛН-5-35, і агрегувалися з трактором Т-150К. З показників якості роботи експериментальні лемеші по глибині обробки і ширині захвату відповідають технічним умовам. У процесі випробувань експериментальних лемешів налипання ґрунту не спостерігалось. Експериментальні лемеші з точковим зміцненням підвищеної зносостійкості (ПНЧС-702У) відповідають вимогам із обробітку ґрунту.

Тяговий опір агрегату ПЛН-5-35 з експериментальними лемешами при швидкості руху 2,08 м/с складає 32,7 кН, що в порівнянні з еталонним агрегатом ПЛН-5-35 із серійними лемешами практично однаковий (33,5 кН).

Питомий опір ПЛН-5-35 з експериментальними лемешами при швидкості руху 2,08 м/с складає 6,27 Н/см², що на 2,5% менше (в межах похибки вимірювань), ніж ПЛН-5-35 із серійними лемешами. Так як різниця питомих показників знаходиться в межах похибки вимірювань, значення питомих показників агрегатів, що порівнюються, можна вважати однаковими. За тяговими показниками потужності трактор Т-150К в агрегаті з ПЛН-5-35 з експериментальними лемешами забезпечує стійке виконання технологічного процесу, завантаження двигуна при русі зі швидкістю 2,08 м/с склала 94,6%.

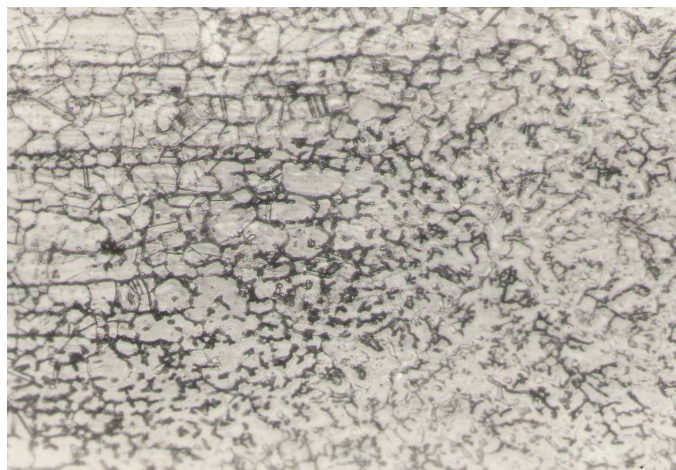


Рисунок 6. Мікроструктура точки зміцнення лемеша плуга, х 200

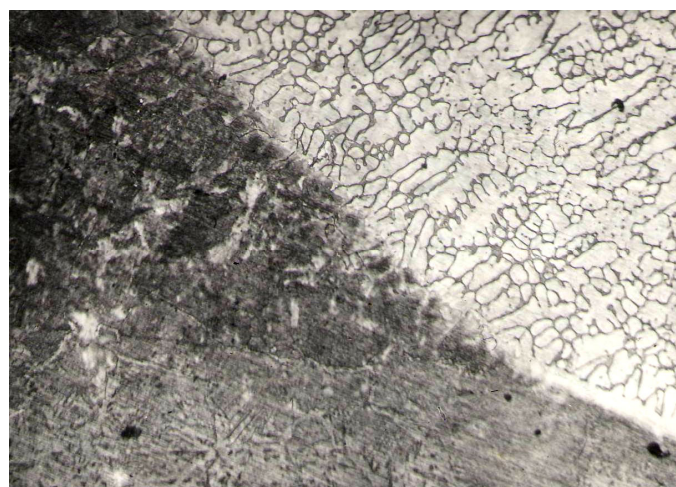


Рисунок 7. Лінія сплавлення з верхнім і середнім шарами, х 200

Висока зносостійкість експериментальних лемешів в умовах абразивного зношування передбачає наявність у структурі наплавленого шару карбідів тугоплавких металів.

Утворення карбідної фази, в основному, можливо двома шляхами: за рахунок роздільного легування карбідоутворюючими елементами і вуглецем наплавленого сплаву або за рахунок комплексного легування, коли в покриття вводяться готові карбідні з'єднання. Другий спосіб дозволяє значно спростити регулювання структури наплавленого металу. Мікроструктура точки зміцнення – це карбіди бору B_4C (рис. 6), бор знаходиться в складі шихти, в чистому вигляді. При точковому зміцненні, спостерігається (рис. 7), що бориди розподілені по границях зерен, з відсутністю загартованих структур і тріщин. При використанні таких матеріалів експлуатаційне навантаження діє в основному на включення твердої пружно-пластичної матриці, та відбувається релаксація напружень. Існують твердіші матеріали, наприклад, алмаз, карбід бору, карбід кремнію. Перевагою використання таких матеріалів для зносостійких покриттів є можливість його оптимального вибору і процентного вмісту в матриці сплаву і величини зерна залежно від умов абразивного зношування. Точкове зміцнення (дугове точкове зварювання) порошковим дротом – плавким електродом забезпечує триваліший термін експлуатації робочого органу в порівнянні з серійною технологією, індукційне наплавлення твердим сплавом ПГ-С27 (рис. 8).

У процесі зношування відбувається сегрегація атомів на поверхні тертя, тобто карбіди бору утворюються на границях зерен (рис. 6). Серійна технологія індукційного наплавлення не забезпечує досягнення передбаченої довговічності лемешів, лап культиваторів, дисків борін. При точковому зміцненні наплавлений шар не розтріскується, практично утворюється лита структура. Крім того, самозахисний порошковий дріт ПП-АН170 (ПП-АН170М) захищає зону зварювання.

Наплавлення дозволяє підвищити стійкість деталей машин проти зношування, головним чином, абразивного, електрохімічної корозії, ерозії, кавітаційного руйнування, окалиноутворення, термічної і контактної втоми. Наплавлення широко використовують для відновлення розмірів спрацьованих деталей машин, що дозволяє замінити в деталях високолеговані сталі вуглецевою, а кольорові метали – чорними. На сьогодні є велика кількість наплавлених матеріалів, що дає можливість конструктору підібрати необхідні за умовами роботи, матеріали для наплавлення поверхонь деталей машин.

Найбільший наробіток (140 га) мають лемеші з точковим зміцненням. Із 9 випробувальних лемешів тільки один леміш досяг граничного зносу на носку, решта лемешів мають 140 га наробітку і придатні до подальшої експлуатації. Поломок лемешів даного типу в процесі випробувань не було. По загальному досягнутому для всіх лемешів наробітку, лемеші з точковим зміцненням переважають серійні в 2,8 раза (рис. 8).

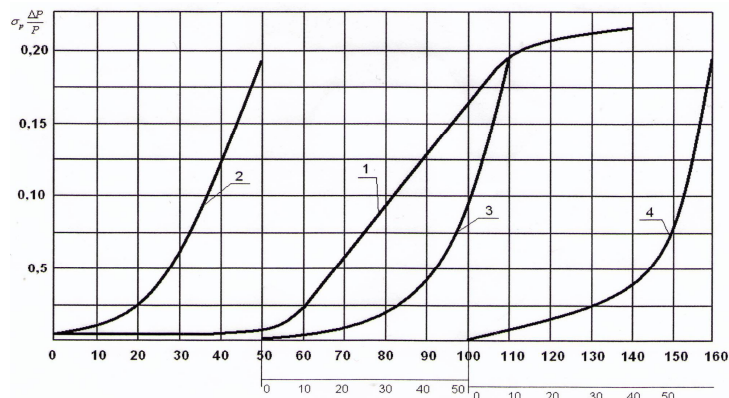


Рисунок 8. Відносний знос за масою серійного та зміцненого лемешів:
 1 – леміш з точковим зміцненням; 2 – серійний леміш (перша установка);
 3 – серійний леміш (друга установка); 4 – серійний леміш (третя установка)

Для визначення відносної зносостійкості за вагою і довжиною носка побудовані графіки (рис. 8). Відносна зносостійкість за вагою зміцненого лемеша в 2,2 раза вище серійного, і відносна зносостійкість носка в 2,8 раза вище серійного. Таким чином, леміш з точковим зміцненням може замінити по наробітку три серійних лемеші. Значення величини середньоквадратичного відхилення й коефіцієнта варіації параметрів робочих органів з точковим зміцненням свідчать про стабільність технологічних процесів їх виготовлення.

Висновки

1. Теоретично й експериментально доказано, що на утворення ефекту самозаточування та зносостійкість деталей робочих органів впливають властивості матеріалу їх виготовлення, методи зміцнення, властивості абразивного середовища і товщина зміцненого шару.

2. Висока зносостійкість в умовах абразивного зношування забезпечується наявністю в структурі наплавленого шару карбідів тугоплавких металів.

3. Застосування точкового зміцнення (дугового точкового зварювання) порошковим дротом – плавким електродом – підвищує ресурс робочих органів ґрунтообробних машин у 1,5...2,8 раза в порівнянні з серійним індукційним наплавленням.

Література

1. Боголюбов, Б.Н. Долговечность землеройных и дорожных машин [Текст] / Б.Н. Боголюбов. – М., Машиностроение, 1964. – 224 с.
2. Хрущёв, М.М. Износостойкость и структура твёрдых наплавов [Текст] / М. Хрущёв, М. Бабичев. – М.: Машиностроение, 1971. – 95 с.
3. Хрущёв, М.М. Абразивное изнашивание [Текст] / М.М. Хрущёв, М.А. Бабичев. – М.: Наука, 1970. – 272 с.
4. Хрущёв, М.М. Исследование влияния твёрдых абразивных частиц на изнашивания материалов [Текст] / М.М. Хрущёв, М.А. Бабичев. – В сб.: «Износ и антифрикционные свойства материалов» Сб. XX М. «Наука».
5. Поверхностная прочность материалов при трении [Текст] / [Костецкий Б.И., Носовский И.Г., Караулов А.К. и др.]; под общ. ред. Б.И. Костецкого. – К.: Техника, 1976. – 296с.
6. Костецкий, Б.И. Механохимические процессы при граничном трении [Текст] / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский. – М.: Наука, 1972. –170 с.
7. Костецкий, Б.И. Износостойкость и антифрикционность деталей машин [Текст] / Б. Костецкий, И. Носовский. – К.: Техника, 1965. – 206 с.
8. Хрущёв, М.М. Исследование изнашивания металлов [Текст] / М.М. Хрущёв, М.А. Бабичев. – М., Изд-во АН СССР, 1960. – 264 с.
9. Хрущёв, М.М. Классификация условий и видов изнашивания деталей машин [Текст] / М.М. Хрущёв. – М.: Изд. АН СССР. Сб. VIII 1953.
10. Костецкий, Б.И. О роли кислорода при трении скольжения [Текст] / Б.И. Костецкий, И.Г. Носовский, Л.В. Никитин. – Машиноведения. – 1965. – № 6.
11. Синеоков, Г.Н. Механизация и электрификация сельского хозяйства России [Текст] / Г. Синеоков, И. Панов. – № 9, 2003. – С. 20–22.
12. Лоренц, В.Ф. Износ деталей, работающих в абразивной среде [Текст] / В.Ф. Лоренц. – М.: Изд. АН СССР, 1959. – Выпуск №1, «Трение и износ в машинах».
13. Терешенко, В.И. Особенности дуговой точечной сварки плавящимся электродом [Текст] / В.И. Терешенко, А.Н. Шаровольский, К.А. Сидоренко. – К. Автоматическая сварка, 1983. – № 9. – С. 51–53.