

УДК 669.1:537.5

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЛАП  
КУЛЬТИВАТОРА ШЛЯХОМ МОДИФІКАЦІЇ  
БЕЗВОДНЕВИМ АЗОТУВАННЯМ У ТЛІЮЧОМУ РОЗРЯДІ**

**Микола Скиба, д. т. н., Мирослав Стечишин, д. т. н.,  
Віктор Олександренко, д. т. н., Микола Лук'янюк, к. т. н., Мирослав Ботвін**  
*Хмельницький національний університет,  
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна,  
e-mail: miro011951@gmail.com*

<https://doi.org/10.31734/agroengineering2020.24.109>

**Скиба М., Стечишин М., Олександренко В., Лук'янюк М., Ботвін М. Підвищення зносостійкості лап культиватора шляхом модифікації безводневим азотуванням у тліючому розряді**

У статті розглянуто проблему підвищення зносостійкості ґрунтообробного інструмента – лап культиватора Tiger-Mate 200. Для підвищення зносостійкості лап культиватора було застосовано як спосіб модифікації поверхневого шару лапи – безводневе азотування в тліючому розряді (БАТР). Дослідження виконували у два етапи. На першому етапі досліджено на зносостійкість зразки циліндричної форми діаметром 5 мм, довжиною 20 мм, виготовлені з матеріалу лап з використанням універсальної машини тертя 2168 УМТ з метою оптимізації технологічних параметрів БАТР, за якими надалі проводилася модифікація лап культиватора. У ході пошуку оптимальних параметрів процесу БАТР змінювалися: відсотковий вміст компонентів газової суміші (азот – аргон); температура процесу насичення; тиск газової суміші в розрядній камері та тривалість процесу насичення. У процесі досліджень визначали поверхневу твердість зразків та її розподіл за глибиною мікрошліфа, а рентгеноструктурний аналіз дифузійного шару дозволив визначити вплив структурних складових азотованого шару на трибологічні характеристики конструкційних сталей в умовах абразивного зношування.

Проаналізовано вплив технологічних режимів азотування (температури  $T$ ; тиску  $p$ ; складу газової суміші  $C$ ; часу азотування  $t$ ) на товщину нітридної зони та азотованого шару, а також розподіл мікротвердості за товщиною поверхневого зміцненого шару.

Знайдено оптимальні технологічні режими БАТР для зміцнення лап культиватора за критерієм максимальної абразивної зносостійкості, що дозволило підвищити термін роботи модифікованих лап в 1,4 – 1,5 раза.

**Ключові слова:** безводневе азотування в тліючому розряді (БАТР), зносостійкість, абразивне тертя.

**Skyba M., Stechyshyn M., Oleksandrenko V., Lukianiuk M., Botvin M. Increasing of cultivator paws wear resistance by modification by hydrogen-free nitriding in glow discharge**

In the article the problem of increasing wear resistance of the tillage tool – Tiger-Mate 200 cultivator paws is considered. To increase the wear resistance of the cultivator paws by hydrogen-free nitriding in a glow discharge (HNGD) as a method of modifying the surface layer of the paw was used. The research was performed in two stages. At the first stage, cylindrical samples with the diameter of 5 mm and length 20 mm made of paw material were investigated in terms of wear resistance by means of the universal friction machine 2168 UFM in order to optimize the technological parameters of HNGD, which were subsequently applied for modification of the cultivator paws. To determine optimal parameters of the HNGD, the researchers changed: the percentage of the gas mixture components (nitrogen – argon); saturation process temperature; the pressure of the gas mixture in the discharge chamber and saturation process duration. In the course of the research, the surface hardness of the samples and its distribution along the depth of the microsection were determined; X-ray structural analysis of the diffused layer made it possible to identify the influence of the structural components of nitrided layer on tribological parameters of constructional steels in conditions of abrasive wearability.

The influence of the technological modes of nitriding (temperature  $T$ ; pressure  $p$ ; composition of gas mixture  $C$ ; and time of nitriding  $t$ ) on the thickness of the nitride zone and the nitrided layer as well as the microhardness distribution along the thickness of the surface reinforced layer were analyzed.

The optimal technological modes of HNGD for strengthening the cultivator paws by the maximum abrasive wear resistance criterion were found. It has resulted in the increase of the service life of modified paws by 1.4 – 1.5 times.

**Key words:** hydrogen-free nitriding in glow discharge (HNGD), wear resistance, abrasive wearability.

**Постановка проблеми.** Відповідно до технічних вимог гарантійне напрацювання стрільчастих лап культиватора повинно бути не меншим 250 га, але, як показує практика експлуатації таких робочих органів, їх напрацювання на відмову на різних ґрунтах не перевищує 140 – 190 га.

Нині в Україні серійні робочі органи (РО) ґрунтообробних машин виготовляють зі сталей 65Г, 45 і Л53, які в загартованому стані (твердість 37...43 HRC) мають задовільні показники відносного видовження, але невелику межу міцності ( $\sigma_b = 880...1080$  МПа). За даними багаторічних досліджень і аналізу результатів експлуатаційних випробувань РО ґрунтообробних машин, лише за перший рік експлуатації через злам (або деформацію з наступним зломом) виходить з ладу близько 40 % лемешів і 15 % полиць, 20 % лап культиваторів і 30 % різних типів дискових робочих органів [1].

Загалом можна констатувати, що для більшості регіонів України одного комплекту деталей робочих органів ґрунтообробних машин недостатньо на поточний річний цикл (весна + осінь), а тому потрібно продовжувати пошуки нових, економічно обґрунтованих методів і способів поверхневого зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Численні дослідження [1–6] вказують на наявність різних підходів до вирішення окресленої проблеми. Так, у працях [1; 4] розглядаються питання зміцнення лез ґрунтообробних робочих органів сільськогосподарських машин з утворенням ефекту самозагострювання, а в праці [2] розрізняють конструктивні, експлуатаційні та технологічні способи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. До технологічних способів належить насамперед підбір матеріалів і термообробки, які забезпечують високу зносостійкість в умовах абразивного зношування [2; 3; 5; 6].

Автором роботи [3] рекомендовано такі матеріали для виготовлення деталей, що працюють в абразивній масі: марганцеві сталі (30Г, 50Г, 65Г, 110Г6Х3Л), сталі, леговані хромом (38ХА, 40Х, 45Х, Х12, Х12Ф1, Х6ВФ), багатокомпонентні леговані сталі і сплави (12ХН3А, 17ХГ2СФР, 08Х18Н10Т), тверді спечені сплави (ВК6, ВК8, ВК15, ВК20).

Технічні вимоги для дисків до вітчизняної техніки передбачають їх виготовлення зі сталі 65Г або її заміника – сталі М76 та сталі 45 з термообробкою на твердість 39...44 HRC. Диски

іноземних виробників виготовлені з більш зносостійких сталей, зокрема диски фірми Bellota – зі сталі 28MnB5, фірми Case – зі сталі Earth Metal. Вартість таких дисків у 2,0...2,3 раза вища від вартості вітчизняних дисків і має на 20...30 % вищу зносостійкість [2]. Використання якісних металів та сплавів є економічно недоцільним, тому вихід слід шукати у використанні методів поверхневого зміцнення робочих поверхонь.

Поверхнєве зміцнення застосовують для підвищення зносостійкості у випадках, коли не ставляться підвищені вимоги до об'ємної міцності деталей, але необхідна їх висока поверхнева міцність.

У сільськогосподарському машинобудуванні 90 % усіх робіт зі зміцнення становить індукційне наплавлення. Основним недоліком такого методу є висока вартість сплавів для наплавлення [2].

Лапи культиваторів є однією з наймасовіших деталей робочих органів сільськогосподарських машин. Внаслідок малих термінів служби витрачається велика кількість лап у вигляді запасних частин, виробництво яких потребує значної кількості якісного металу.

Дослідження [4] показує, що застосування для зміцнення лап лазерної термообробки дозволяє в 1,3...1,4 раза знизити зношування деталей різальних елементів порівняно з об'ємним гартуванням, а застосування лазерного наплавлення сплаву ПС – 14-60 + 6 % В<sub>4</sub>С – в 1,7...1,8 раза порівняно з базовою технологією індукційного наплавлення. Лазерні технології забезпечують локальне нагрівання за відсутності або за мінімальних деформацій при наступному охолодженні зміцнених виробів. Отримання високих фізико-механічних властивостей поверхневих шарів пов'язане з високою швидкістю нагрівання та охолодження, що становить  $10^4 - 10^6$  °С/с.

**Постановка завдання.** Дослідження впливу технологічних режимів безводневого азотування в тліючому розряді (БАТР) на фізико-механічні характеристики та абразивну зносостійкість конструкційних вуглецевих (сталі 20 і 45) і легованих (35Г, 40Х13 і 38ХМЮА) сталей.

**Виклад основного матеріалу.** На вітчизняних підприємствах (Шепетівській культиваторний завод) лапи культиваторів виготовляють із високовуглецевої сталі 65Г, на Красилівському підприємстві «Агромаш» – зі сталі 45. Ми досліджували лапи культиватора Tiger-Mate 200

зарубіжного виробництва з метою підвищення їх зносостійкості. Було встановлено, що лапи виготовлені з матеріалу, який відповідає вітчизняній марці легованої сталі 35Г.

З метою підвищення їх зносостійкості було проведено роботи з модифікації лап культиватора шляхом азотування їх у тліючому розряді із застосуванням безводневих технологій.

Дослідження проводили у два етапи.

На першому етапі дослідження на зносостійкість проводили на зразках, виготовлених із матеріалу лап (для чого використовували відпрацьовані лапи). Дослідження зразків циліндричної форми діаметром 5 мм і довжиною 20 мм на зносостійкість проводили на модернізованій універсальній машині тертя 2168 УМТ в умовах абразивного тертя з метою підбору параметрів азотування для досягнення оптимальних характеристик модифікованого поверхневого шару. Режим абразивного тертя застосовували ще і з метою зменшення часу для дослідження зразків.

На другому етапі дослідження виконували на натурних зразках у виробничих умовах.

Азотування зразків та лап культиватора проводили в атмосфері азоту та аргону в безводневому середовищі, в умовах лабораторії Подільського наукового фізико-технологічного центру (ПНФТЦ), у Хмельницькому національному університеті (ХНУ) на установці азотування в тліючому розряді в безводневому середовищі У-1, розробленій і виготовленій в ПНФТЦ [7; 8].

Оскільки основними фізико-механічними характеристиками іонно-азотованого шару є глибина азотування та твердість, досліджували кінетику зміни цих параметрів залежно від зміни режимів технологічного процесу. Значний вплив на глибину іонно-азотованого шару має температура ведення процесу.

Із попередніх досліджень відомо, що глибина іонно-азотованого шару збільшується з підвищенням температури азотування [9].

Максимальна мікротвердість на зразках була отримана за температури 580 °С, однак з метою недопущення процесу відпуску лап культиватора було обмежено температуру азотування до 520 °С.

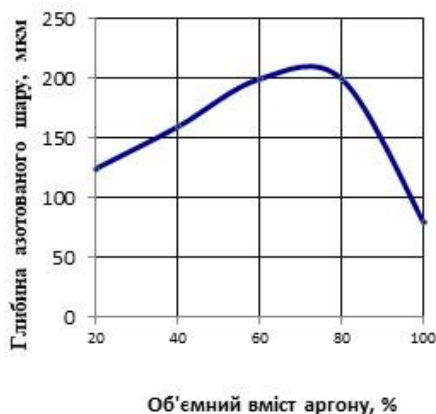
Значний вплив на глибину іонно-азотованого шару має склад насичувального середовища, а саме об'ємне співвідношення азоту та аргону в робочій суміші [10; 11].

На рис. 1 наведені залежності глибини іонно-азотованого шару від відсоткового вмісту аргону в насичувальному середовищі для сталі 35Г.

У результаті проведених досліджень на зразках зі сталі 35Г було встановлено закономірність розподілу глибини азотованого шару від тиску газової суміші, яка за результатами близька до результатів досліджень, що проводилися раніше (див. рис. 2).

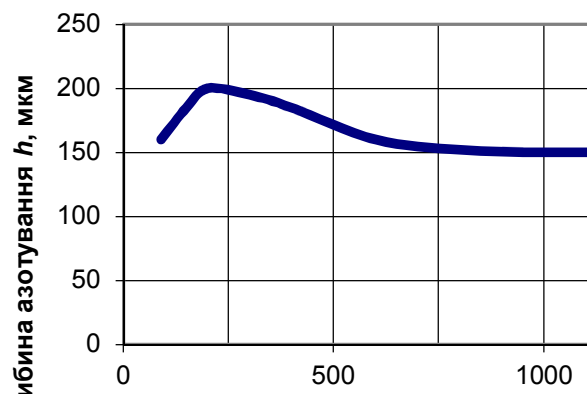
Залежність глибини іонно-азотованого шару від часу витримки має параболічний характер (рис. 3).

З рис. 3 видно, що при азотуванні в тліючому розряді найінтенсивніше зростає глибина шару в початковий період, у перші чотири години, однак шість годин процесу дають змогу досягти глибини азотування до 150 мкм.



**Рис. 1.** Залежність глибини азотованого шару від відсоткового складу насичувального середовища для сталі 35Г

**Fig. 1.** Dependence of the depth of the nitrated layer on the percentage of saturating medium for steel 35G



**Рис. 2.** Залежність глибини іонно-азотованого шару від тиску в камері для сталі 35Г

**Fig. 2.** Dependence of the depth of the ion-nitrated layer on the pressure in the chamber for steel 35G

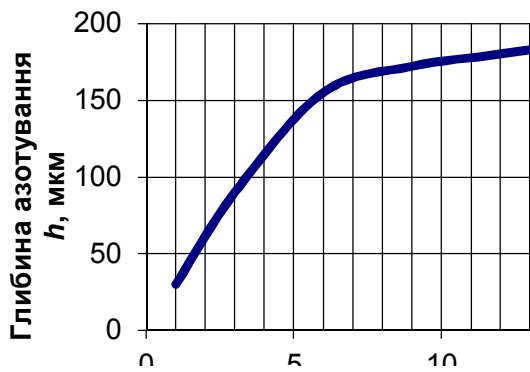


Рис. 3. Залежність глибини азотованого шару від тривалості процесу

Fig. 3. Dependence of the depth of the nitrided layer on the process duration

У результаті аналізу отриманих залежностей для проведення подальших досліджень з модифікації робочої поверхні лап культиватора процес модифікації здійснювався за режимом, що забезпечує достатньо високі пластичні властивості модифікованого шару, щоб унеможливити сколювання та викришування різального леза лапи культиватора та її затуплення в процесі роботи, із забезпеченням достатньої глибини азотованого шару: середовище – 25 %  $N_2$  + 75 %  $Ar$ ; температура азотування – 520 °C; тиск у розрядній камері – 200 Па; тривалість азотування – 6 годин.

Застосування цього процесу модифікації дозволило отримати поверхневий шар товщиною 140...150 мкм з мікротвердістю  $H_{100}$  950–980 МПа, що опирається на пружну основу (гартовану сталь 35Г після низькотемпературного відпуску, отриманого в процесі азотування,  $H_{100}$  500–600 МПа).

Мікроструктурний та рентгеноструктурний аналізи модифікованого шару, здійснені на мікроскопі МІМ-10 та рентгенустановці «ДРОН-1», показали, що він складається в основному з азотистого  $\alpha$ -твердого розчину зі зменшенням вмісту азоту від поверхні в глибину тіла зразка. На поверхні модифікованого шару чітко проглядається нітридна зона товщиною до 10 мкм, яка складається з нітридів заліза  $Fe_2N$ ,  $Fe_3N$  та  $Fe_4N$  [12]. На поверхні нітридної зони за певних умов (значна тривалість азотування та великий азотний потенціал насичувального середовища) утворюється  $\epsilon$ -фаза – твердий розчин на базі нітриду  $Fe_2N$ , яка при великій концентрації в ній азоту має велику твердість, підвищений опір зношуванню [12], високу стійкість проти корозії [13], але водночас більшу крихкість.

Внутрішня частина нітридної зони є  $\gamma'$ -фазою – твердим розчином на базі нітриду  $Fe_4N$ .

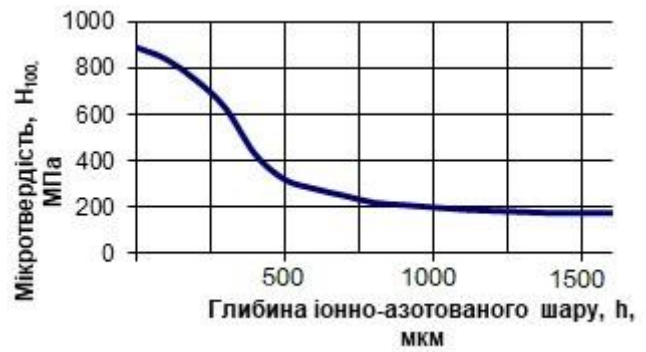


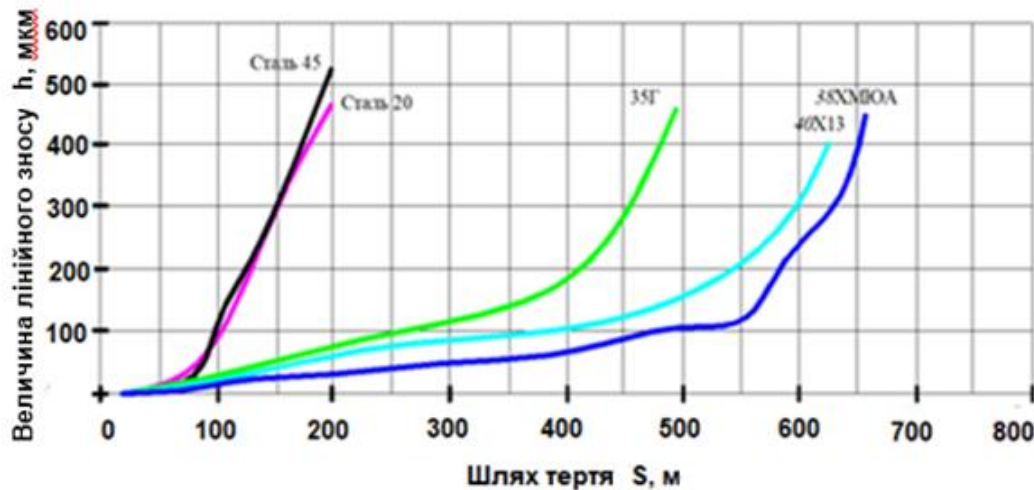
Рис. 4. Характер розподілу мікротвердості за глибиною азотованого шару

Fig. 4. The character of the microhardness distribution along the depth of the nitrided layer

Під нітридною зоною розташовується зона внутрішнього азотування,  $\alpha$ -фаза, яка має більшу товщину та є основною частиною іонно-азотованого шару. Твердість зони внутрішнього азотування поступово зменшується в напрямі від нітридної зони до матриці в міру зменшення концентрації азоту. Зона внутрішнього азотування характеризується достатньою пластичністю та зносостійкістю [14], що значно підвищує втомні характеристики сталей при циклічних навантаженнях у корозійно-активних середовищах і на повітрі [15]. Характер розподілу мікротвердості за товщиною азотованого шару показано на рис. 4.

Зразки з легованих сталей 35Г, 40Х13, 38ХМЮА та взяті для порівняння зразки вуглецевих сталей 20 і 45 після азотування в тліючому розряді за режимом ( $T = 520$  °C,  $p = 200$  Па, 75 %  $N_2$  + 25 %  $Ar$  і  $t = 6$  год), що вибрані на основі аналізу проведених викладених вище досліджень, піддавали випробуванням на зносостійкість в умовах абразивного тертя (швидкість ковзання – 0,1 м/с, тиск на фрикційному контакті – 16 МПа). Результати випробувань показані на рис. 5.

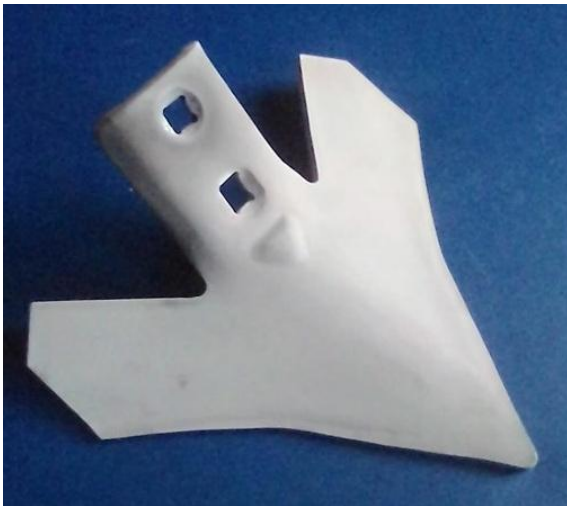
Для досягнення лінійного зношування 100 мкм шлях тертя для сталей 20 і 45 становить приблизно 200 м, для сталі 35Г – 500 м, для сталей 40Х13, 38ХМЮА – 625 та 660 відповідно. При цьому після 80 м сухого тертя зразків з вуглецевих сталей 20 і 45 починається катастрофічне руйнування їхніх поверхонь, а для легованих сталей 35Г, 40Х13 та 38ХМЮА – через 350, 500 і 550 м шляху тертя відповідно. Таким чином, сталі 40Х13 і 38ХМЮА показали найвищу зносостійкість в умовах абразивного зношування.



**Рис. 5.** Зносостійкість азотованих у тліючому розряді сталей в умовах сухого тертя

**Fig. 5.** Wear resistance of nitrided steels in the glow discharge in conditions of dry friction

Невисока зносостійкість вуглецевих азотованих сталей порівняно з легуваними пояснюється тим, що нітриди заліза відрізняються невисокою стійкістю, мікротвердістю і великою швидкістю коагуляції. Нітриди легуючих елементів мають вищу термічну стійкість і більший ступінь дисперсності, що й зумовило найвищу зносостійкість сталей 40X13 і 38ХМЮА [9; 16].



**Рис. 6.** Загальний вигляд лапи культиватора, модифікованої азотуванням у тліючому розряді

**Fig. 6.** General view of the cultivator paw modified by nitriding in a glow discharge

Немодифіковані та модифіковані лапи були встановлені й випробовувалися на культиваторі моделі Tiger-Mate 200 у виробничих умовах на

полях підприємства СТЗОВ «Гарант», Хмельницька обл. У процесі випробувань фіксували зміну розмірів лап у міру їх стирання. Результати випробувань підтвердили підвищення зносостійкості модифікованих лап порівняно з немодифікованими в 1,4...1,5 раза. Так, напрацювання немодифікованих лап на різних ґрунтах у середньому становило 160...165 га, а модифікованих – 220...250 га. Отримані результати зафіксовані актом проведених випробувань на СТЗОВ «Гарант».

Зовнішній вигляд лапи культиватора Tiger-Mate 200, модифікованої безводневим азотуванням у тліючому розряді, показаний на рис. 6.

### Висновки

1. Фізико-хімічні характеристики азотованих у тліючому розряді поверхонь сталей у широких межах змінюються залежно від технологічних параметрів режиму насичення, що дає змогу отримувати поверхневі шари з властивостями, що диктуються умовами експлуатації деталі.

2. З підвищенням ступеня легуваності сталі і виду легуючих елементів абразивна зносостійкість підвищується, а тому слід розглянути можливість виготовлення лап культиватора зі сталі 40X13, яка хоч і поступається за абразивною зносостійкістю сталі 38ХМЮА, але є значно дешевшою.

3. Зносостійкість лап культиватора зі сталі 35Г після БАТР за режимом:  $T = 793 \text{ K}$ ,  $p = 200 \text{ Па}$  у середовищі 75 %  $\text{N}_2$  і 25 %  $\text{Ar}$  протягом 6 год підвищується у виробничих умовах випробувань в 1,4...1,5 раза.

## Бібліографічний список

1. Денисенко М. І., Войтюк В. Д. Зміщення лез ґрунтообробних робочих органів сільськогосподарських машин з утворенням ефекту самозагострювання. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. № 6. С. 175–182.
2. Борак К. В. Підвищення надійності робочих органів ґрунтообробних машин. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2015. Вип. 163. С. 120–125.
3. Волков Ю. В., Волкова З. А., Кайгородцев Л. М. Долговечность машин, работающих в абразивной среде. Москва: Машиностроение, 1994. 117 с.
4. Аулін В. В., Бобрицький В. М., Тихий А. А. Теоретичні основи самозагострювання, міцності і зношування різальних елементів РОГМ та напрямки підвищення їх довговічності. *Вісник інженерної академії України*. 2010. № 1. С. 149–154.
5. Бобрицький В. М. Підвищення зносостійкості різальних елементів робочих органів ґрунтообробних машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2007. 20 с.
6. Шкрегаль О. М. Підвищення довговічності робочих органів культиваторів. *Вісник ХНТУСГ. Проблеми надійності машин та засобів механізації сільськогосподарського виробництва*. 2013. Вип. 139. С. 168–173.
7. Стечишин М. С., Лук'янюк М. В., Олександренко В. П., Лук'янюк М. М. Розробка і дослідження низькотемпературних газорозрядних технологій у Подільському науковому фізико-технологічному центрі. *Вісник ХНУ*. 2019. № 3. С. 6–12.
8. Wear resistance and physicochemical properties of 12ХН3А carbonyl / M. Ye. Skyba et al. *International Scientific Journal Problems of tribology*. 2020. № 1/95. P. 6–15.
9. Лахтін Ю. М., Коган Я. Д. Структура и прочность азотированных сплавов. Москва: Металлургия, 1992. 176 с.
10. Каплун В. Г., Каплун П. В. Ионное азотирование в безводородных средах: монография. Хмельницкий: ХНУ, 2015. 315 с.
11. Пастух И. М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. 364 с.
12. Influence of the Ionic Nitriding of Steels in Glow Discharge on the Structure and Properties of the Coatings / M. S. Stechyshyn, A. V. Martynyuk, Y. M. Bilyk, V. P. Oleksandrenko, N. M. Stechyshyna. *Materials Science*. 2017. 53 (3). P. 343 – 349.
13. Stechyshyn M. S., Stechyshyna N. M., Kur-skoi V. S. Corrosion and Electrochemical Characteristics of the Metal Surfaces (Nitrided in Glow Discharge) in Model Acid Media. *Materials Science*. 2018. Vol. 53, issue 5. P. 724–731.
14. Stechyshyn M. S., Stechyshyna N. M., Martynyuk A. V., Luk'yanyuk M. M. Strength and Plasticity of the Surface Layers of Metals Nitrided in Glow Discharge. *Materials Science: Springer (USA)*. 2018. 54 (5). P. 55–60.
15. Stechyshyn M. S., Skyba M. E., Sukhenko Yu. G., Tsepenyuk M. I. Fatigue Strength of Nitrided Steels in Corrosion-Active Media of the Food Enterprises. *Materials Science*. 2019. Vol. 55. P. 136–141.
16. Physicochemical Properties of the Surface Layers of 40Kh Steel After Hydrogen-Free Nitriding in Glow Discharge / M. S. Stechyshyn, M. E. Skyba, N. M. Stechyshyna, A. V. Martynyuk, R. S. Mardarevych. *Materials Science*. 2020. Vol. 55, issue 6. P. 892–898.

Стаття надійшла 06.11.2020