

**Стечишин М.С.
Мартинюк А.В.
Корнієнко А.О.*
Медведчук Н.К.**

Хмельницький національний
університет,
*Київський національний авіаційний
університет,
м. Хмельницький, м. Київ, Україна
E-mail: av.mart@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ ПОКРИТТІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ГРУНТООБРОБНИХ МАШИН

УДК 621.891

Стечишин М.С., Мартинюк А.В., Корнієнко А.О., Медведчук Н.К. «Застосування композиційних електролітичних покриттів для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин»

У статті приведені результати досліджень впливу композиційних електролітичних покриттів (КЕП) на перспективи підвищення абразивної зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин: лап культиваторів, дискових борін, лемешів.

У даній роботі досліджено вплив розмірів частинок наповнювача SiC (карбід кремнію) та їх об'ємного вмісту в нікелевій матриці на трибологічні характеристики КЕП, нанесених на зразки із сталі 45.

Формування КЕП з Ni-SiC_{нано} і Ni-SiC₅, а також з включеннями аморфного бору проводили на вертикальному катоді з неперервним розмішуванням суспензії на розробленій нами установці. Формування КЕП з частинками SiC₂₈, SiC₅₀, SiC₁₀₀ із додаванням порошків аморфного бору здійснювали на горизонтальному катоді. Зміна вмісту частинок в матриці регулювалася зміною відношення τ_u / τ_c і (час перемішування/час седиментації) та зміною концентрації частинок SiC і В в електроліті.

Найвищу зносостійкість серед наведених покриттів мають КЕП з включеннями фракцій 28/20 та 50/40 мкм, які мають найменший знос при всіх навантаженнях. Вміст наповнювача в таких покриттях складає, відповідно, 24 та 28 об.%. При цьому дещо менший знос мають покриття з включеннями фракцій 28/20 мкм. Ваговий знос таких зразків є на порядок менший ніж для покриттів з меншими та крупнішими частинками. У порівнянні з гальванічним нікелем такі покриття мають зменшення зносу у 12, 9 та 5 разів при навантаженнях 20, 40, 60 Н, відповідно.

Аналіз результатів випробувань показав, що на коефіцієнт тертя суттєво впливають навантаження при терті та розмір частинок наповнювача SiC і чітко прослідковується така закономірність, що зі збільшенням навантаження на зразок коефіцієнт тертя зменшується. Щодо впливу розміру частинок наповнювача КЕП на коефіцієнт тертя f , можна відзначити, що коефіцієнт тертя зменшується з ростом розмірів частинок і для діапазону розмірів частинок наповнювача 40...60 мкм коефіцієнт тертя є мінімальним. Для покриттів з більшими частинками наповнювача (фракція 100/80) коефіцієнт тертя є більшим.

Отже, трибологічні дослідження показують перспективність і ефективність застосування КЕП для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Ключові слова: робочі органи ґрунтообробних машин, композиційні електролітичні покриття (КЕП), абразивне зношування

Стечишин М.С., Мартинюк А.В., Корнієнко А.О., Медведчук Н.К. Применение композиционных гальванического покрытия для повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин

В статье приведены результаты исследований влияния композиционных электролитических покрытий (КЭП) на перспективы повышения абразивной износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин: лап культиваторов, дисковых борон, лемехов.

В данной работе исследовано влияние размеров частиц наполнителя SiC (карбида кремния) и их объемного содержания в никелевой матрице на трибологические характеристики КЭП, нанесенных на образцы из стали 45.

Формирование КЭП с Ni-SiC_{нано} и Ni-SiC₅, а также с включениями аморфного бора проводили на вертикальном катоде с непрерывным размешиванием суспензии на разработанной нами установке. Формирование КЭП с частицами SiC₂₈, SiC₅₀, SiC₁₀₀ с добавлением порошков аморфного бора осуществляли на горизонтальном катоде. Изменение содержания частиц в матрице регулировалось изменением отношения и (время размешивания / время седиментации) и изменением концентрации частиц SiC и В в электролите.

Самую высокую износостойкость среди приведенных покрытий имеют КЭП с включениями фракций 28/20 и 50/40 мкм, которые имеют наименьший износ при всех нагрузках. Содержание наполнителя в таких покрытиях составляет, соответственно, 24 и 28 об.%. При этом несколько меньший износ имеют покрытия с включениями фракции 28/20 мкм. Весовой износ таких образцов на порядок меньше, чем для покрытий с меньшими и более крупными частицами. По сравнению с гальваническим никелем такие покрытия обладают большей износостойкостью в 12, 9 и 5 раз при нагрузках 20, 40, 60 Н соответственно.

Анализ результатов испытаний показал, что на коэффициент трения существенно влияют нагрузки при трении и размер частиц наполнителя SiC и четко прослеживается такая закономерность, что с увеличением нагрузки на образец коэффициент трения уменьшается. О влиянии размера частиц наполнителя КЭП на коэффициент трения f можно отметить, что коэффициент трения уменьшается с ростом размеров частиц и для диапазона размеров частиц наполнителя 40 ... 60 мкм коэффициент трения минимален. Для покрытий с большими частицами наполнителя (фракция 100/80) коэффициент трения является большим.

Итак, трибологические исследования показывают перспективность и эффективность применения КЭП для повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Ключевые слова: рабочие органы почвообрабатывающих машин, композиционные электролитические покрытия (КЭП), абразивный износ

Stechyshyn M.S., Martyniuk A.V., Kornienko A.O., Medvedchuk N.K. «Application of composite electrolytic coatings to increase wearing resistance of working bodies of grinding machines»

The article presents the results of research on the influence of composite electrolytic coatings (CEP) on the prospects of increasing the abrasive wear resistance of the working bodies of tillage machines: cultivator legs, disc harrows, plowshares.

In this work, the influence of SiC (silicon carbide) filler particle sizes and their volume content in the nickel matrix on the tribological characteristics of QES applied to steel 45 samples was investigated.

The formation of CEP with Ni-SiC₂₀ and Ni-SiC₅₀, as well as with inclusions of amorphous boron was performed on a vertical cathode with continuous stirring of the suspension on our developed installation. The formation of CEP with SiC₂₈, SiC₅₀, SiC₁₀₀ particles with the addition of amorphous boron powders was performed on a horizontal cathode. The change in the content of particles in the matrix was regulated by changing the ratio and (mixing time / sedimentation time) and changing the concentration of SiC and B particles in the electrolyte.

CEP with inclusions of fractions 28/20 and 50/40 μm , which have the lowest wear at all loads, have the highest wear resistance among the given coatings. The filler content in such coatings is, respectively, 24 and 28 vol.%. At the same time coatings with inclusions of fraction of 28/20 microns have a little less wear. The weight wear of such samples is an order of magnitude less than for coatings with smaller and larger particles. Compared to galvanic nickel, such coatings have a reduction of wear of 12, 9 and 5 times at loads of 20, 40, 60 N, respectively.

Analysis of the test results showed that the coefficient of friction is significantly affected by the friction load and the particle size of the filler SiC and there is a clear pattern that with increasing load such as the coefficient of friction decreases. Regarding the influence of the particle size of KEP filler on the coefficient of friction f , it can be noted that the coefficient of friction decreases with increasing particle size and for the range of particle sizes of filler 40... 60 μm the coefficient of friction is minimal. For coatings with large filler particles (fraction 100/80) the coefficient of friction is higher.

The highest wear resistance of coatings with inclusions of size 28... 50 μm may be due to the distribution of the load they receive. The load on the solid inclusions is equal to the actual contact pressure when their size is smaller or commensurate with the size of a single contact spot (2-10 μm). For compositions with optimal particle sizes (28 μm) there are no processes of setting, abrasive and brittle fracture and there is a normal mechanical-oxidative wear process.

Thus, tribological studies show the prospects and effectiveness of CEP to increase the wear resistance of the working bodies of tillage machines.

Keywords: working bodies of tillage machines, composite electrolytic coatings (CEP), abrasive wear.

Актуальність проблеми

Фізико-механічні характеристики КЕП на основі нікелевої матриці з наповнювачем, що містить карбід кремнію (SiC) в значній мірі визначаються не лише геометричними розмірами частинок SiC, але і їх об'ємним вмістом в нікелевій матриці. Так, в роботі [1] вказується, що є пропорційна залежність між твердістю частинок, їх

кількістю в КЕП з нікелевою матрицею і міцністю. Максимальне значення міцності досягається при оптимальному вмісті частинок в покритті, перевищення якого різко знижує фізико-механічні характеристики КЕП. Тому завданням даної роботи є знаходження оптимального співвідношення між розмірами частинок карбиду кремнію і їх об'ємним вмістом в нікелевій матриці для забезпечення максимальних характеристик міцності та зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Аналіз останніх досліджень

Проблемі підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин присвячена значна кількість наукових праць [1...4].

Чисельні дослідження вказують на наявність різних підходів для вирішення даної проблеми. Так, в роботі [1] розглядаються питання зміцнення лез ґрунтообробних робочих органів сільськогосподарських машин з утворенням ефекту самозагострювання, а в роботі [2] розрізняють конструктивні, експлуатаційні та технологічні способи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. До технологічних способів відноситься насамперед підбір матеріалів і термообробки, які забезпечують високу зносостійкість в умовах абразивного зношування [1, 2, 4].

У роботі [3] показано, що застосування за оптимальними режимами карбоазотування в без водневому тліючому розряді дозволило підвищити зносостійкість лап культиватора в 1,7...1,8 разів.

Автором роботи [4], рекомендовано наступні 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 передбачає їх виготовлення зі сталі 65Г, або її заміника – сталі М76 та сталі 45 з термообробкою на твердість 39...44 HRC. Диски іноземних виробників виготовлені із більш зносостійких сталей, зокрема диски фірми Bellota – зі сталі 28MnB5, фірми Case – зі сталі Earth Metal. Вартість таких дисків у 2,0...2,3 рази 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.

Поверхневе 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 складає індукційне наплавлення. Основним недоліком такого методу є висока вартість сплавів для наплавлення [2].

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

Відповідно до технічних вимог гарантійне напрацювання стрільчастих лап культиватора повинно бути не меншим 25 га, але як показує практика експлуатації таких робочих органів, їх напрацювання на відмову на різних ґрунтах не перевищує 14 - 19 га.

В теперішній час, в Україні серійні робочі органи ґрунтообробних машин виготовляються зі сталей 65Г, 45 і Л53, які в загартованому стані (твердість 37...43HRC) 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 по причині зламу (або деформації з наступним зломом) виходять з ладу близько 40% лемешів і 15% полиць, 20% лап культиваторів і 30% різних типів дискових робочих органів [1].

Дослідження [5] показує, що застосування для зміцнення лап лазерної термообробки дозволяє в 1,3...1,4 рази знизити зношування деталей різальних елементів у порівнянні з об'ємним гартуванням, а застосування лазерного наплавлення сплаву ПС – 14-60 + 6% В₄С в 1,7...1,8 рази у порівнянні з базовою технологією індукційного наплавлення. Лазерні технології забезпечують локальне нагрівання за відсутності або мінімальних деформацій при наступному охолодженні зміцнених виробів. Отримання високих фізико-механічних властивостей поверхневих шарів зв'язано з високою швидкістю нагрівання та охолодження, що складає 10^4 - 10^6 °С/с.

Загалом, можна констатувати, що для більшості регіонів України одного комплексу 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.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає в розробці технології зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин нанесенням композиційних електrolітичних покриттів (КЕП).

Методичний підхід в проведенні досліджень

Формування КЕП з Ni-SiC_{нано} і Ni-SiC₅, а також з включеннями аморфного бору проводили на вертикальному катоді з неперервним розмішуванням суспензії на розробленій нами установці [6]. Формування КЕП з частинками SiC₂₈, SiC₅₀, SiC₁₀₀ із додаванням порошків аморфного бору здійснювали на горизонтальному катоді. Зміна вмісту частинок в матриці регулювалася зміною відношення τ_u / τ_c і (час перемішування/час седиментації) та зміною концентрації частинок SiC і В в електrolіті.

Кількість частинок бору і кремнію в покритті визначали методами хімічного і металографічного аналізів.

Об'ємний вміст частинок наповнювача залежить від геометричних розмірів частинок. Сформовані нами КЕПи містили максимально 8 % об. для SiC_{нано} і до 13 % об. для SiC₅.

Для вивчення антифрикційних властивостей композиційних покриттів використовувалась машина тертя М22-М, що дозволяє в процесі проведення експерименту автоматично реєструвати основні характеристики процесів тертя і зношування (лінійний знос пари і коефіцієнт тертя) без зняття зразка з машини. В якості контртіла використовували ролики діаметром 40 мм, виготовлені із загартованої сталі 45 (HRC 45-48). На відстані 0,5 мм від поверхні тертя в зразок вводилась хромель-копелева термопара, що дозволяє контролювати зміну температури в зоні тертя та

судити про стабілізацію процесів тертя та зношування. Випробування зразків з покриттями проводили в умовах тертя без мащення за схемою вал-площина (рис. 2.4), навантаження при терті складали $P=20; 40; 60; 150$ Н, швидкість ковзання $V = 0,5$ м/с. Шлях тертя $L=1$ км.

Результати досліджень

Фізико-механічні характеристики КЕП на основі нікелевої матриці з наповнювачем, що містить карбід кремнію (SiC) в значній мірі визначаються не лише геометричними розмірами частинок SiC, але і їх об'ємним вмістом в нікелевій матриці. Так, в роботі [7] вказується, що є пропорційна залежність між твердістю частинок, їх кількістю в КЕП з нікелевою матрицею і міцністю. Максимальне значення міцності досягається при оптимальному вмісті частинок в покритті, перевищення якого різко знижує фізико-механічні характеристики КЕП.

Таким чином, в роботі застосовуються покриття на нікелевій основі з частинками SiC різних фракцій і для зручності будемо позначати покриття за розміром частинок наповнювача. Наприклад, нікелеві КЕП з частинками SiC фракції 5/10 мкм позначимо як Ni+SiC₅, фракції 28/20 мкм як Ni+SiC₂₈, 50/40 мкм - Ni+SiC₅₀, 100/80 - Ni+SiC₁₀₀, а покриття з наночастинками розміром близько 50 нм – Ni+SiC_{нано}. При проведенні роботи використовувались також порошки аморфного бору дисперсністю близько 1 мкм.

Дослідження показали, що розмір частинок наповнювача має значний вплив на зносостійкість покриття. За результатами експериментів найбільший лінійний знос при навантаженнях 20 і 40 Н мають зразки із сталі 45 без покриття. При нанесенні на сталь шару гальванічного нікелю, який має твердість $H_c=2,4...2,7$ ГПа, лінійний знос пари тертя зменшується в 1,4 рази, ваговий знос зразка – в 2 рази, а контртіла в 3...7,6 разів у порівнянні з випробуваннями зразків без покриття.

Зносостійкість зразків з КЕП, що містять наповнювач SiC різних фракцій вища ніж у чисто нікелевих покриттів. Так, для зразків з включеннями фракції 100/80 мкм спостерігається значний ваговий та лінійний знос, який навіть перевищує знос зразка без покриття. Твердість матриці при цьому дещо підвищилась і становить $H_c=2,8-3,0$ ГПа, тобто збільшилась на 10-15% у порівнянні з чистим нікелем за рахунок композиційного зміцнення та більших напружень у матриці. Отримані результати пояснюються тим, що розмір частинок порівняний з товщиною покриття (200-300 мкм) і в цих умовах пластична нікелева матриця не може компенсувати контактні навантаження на крупні частинки SiC, що призводить до їх крихкого руйнування та викришування. Крім того, об'ємний вміст частинок SiC₁₀₀ у покритті є найбільший у порівнянні з іншими випробуваними зразками і становить 46%. За такого вмісту карбиду виникатимуть значні напруження, які пластична матриця не може ефективно компенсувати.

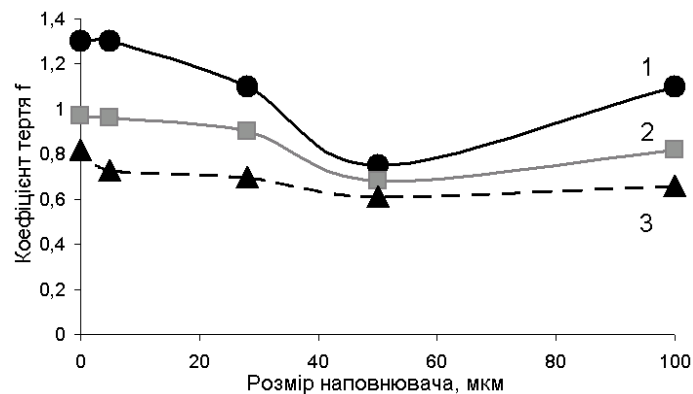
Великий ваговий знос зразка спостерігається і при застосуванні в якості наповнювача для КЕП дрібних частинок фракції менше 5 мкм та наночастинок 50 нм. Застосування таких частинок дещо збільшує зносостійкість покриття у порівнянні з гальванічним нікелем, але не суттєво (зменшення втрати ваги зразка складає 10-20%) тому, що вміст частинок SiC₅ та SiC_{нано} складав 8 та 3 об.%, відповідно, тобто він є менший ніж більш крупних частинок і такі частинки більш ефективно зміцнюють матрицю (відбувається дисперсне зміцнення) ніж підвищують зносостійкість у порівнянні з більш крупними частинками. Це пояснюється тим, що в таких композиціях розмір частинок є меншим від розмірів одиничних плям контакту, вони не можуть ефективно сприймати навантаження і тому основний вклад в зносостійкість

вносить Ni матриця, яка має невисокі механічні властивості і внаслідок виникнення значних напружень можливе виникнення тріщин [8].

Найвищу зносостійкість серед наведених покриттів мають КЕП з включеннями фракцій 28/20 та 50/40 мкм, які мають найменший знос при всіх навантаженнях. Вміст наповнювача в таких покриттях складає, відповідно, 24 та 28 об.%. При цьому дещо менший знос мають покриття з включеннями фракції 28/20 мкм. Ваговий знос таких зразків є на порядок менший ніж для покриттів з меншими та крупнішими частинками. У порівнянні з гальванічним нікелем такі покриття мають зменшення зносу у 12, 9 та 5 разів при навантаженнях 20, 40, 60 Н, відповідно.

Найвища зносостійкість покриттів з включеннями розміром 28...50 мкм може бути обумовлена розподілом навантаженням, яке вони сприймають. Навантаження на тверді включення дорівнює фактичному контактному тиску, коли їх розміри менші або сумірні з величиною одиначної плями контакту (2-10 мкм). Для композицій з оптимальними розмірами частинок (28 мкм) відсутні процеси схоплювання, абразивного і крихкого руйнування та має місце нормальний механо-окислювальний процес зношування.

Окрім зносостійкості важливим триботехнічним параметром є коефіцієнт тертя f . Аналіз результатів випробувань показав, що на коефіцієнт тертя суттєво впливають навантаження при терті та розмір частинок наповнювача SiC і чітко прослідковується така закономірність, що зі збільшенням навантаження на зразок коефіцієнт тертя зменшується (рис. 1). Це пояснюється тим, що при збільшенні нормального навантаження N сила тертя $F_{тр}$ зростає не так суттєво і, відповідно, відношення $f = F_{тр}/N$ зменшується.



**Рис. 1. Залежність коефіцієнту тертя f від розміру частинок наповнювача КЕП:
1 – навантаження 20 Н; 2 – 40 Н і 3 – 60 Н**

Щодо впливу розміру частинок наповнювача КЕП на коефіцієнт тертя f , можна відзначити, що коефіцієнт тертя зменшується і для діапазону розмірів частинок наповнювача 40...60 мкм коефіцієнт тертя є мінімальним. Для покриттів з більшими частинками наповнювача (фракція 100/80) коефіцієнт тертя є більшим. Це можна пояснити тим, що для дрібних частинок пляма контакту є більшою ніж розмір частинок і тертя відбувається по нікелевій матриці, яка має високий коефіцієнт тертя та є схильною до схоплювання. Для частинок більших ніж 10 мкм розмір плями контакту є менший ніж розмір частинок і основний вклад в тертя вносять частинки наповнювача, що сприяє зменшенню коефіцієнту тертя та підвищенню зносостійкості. Для крупних частинок можливе їх викришування та починається абразивне руйнування. Також можна відзначити, що за більших навантажень (60Н) вплив розміру частинок наповнювача на коефіцієнт тертя зменшується, при цьому спостерігається більша

різниця між коефіцієнтами тертя нікелевих покриттів ($f=0,82$) і покриттів з наповнювачем ($f=0,73$ та нижче). Напевно, при більших навантаженнях тверді частинки наповнювача починають сприймати більш ефективно навантаження, що в свою чергу позитивно впливає на процеси тертя.

Практичні рекомендації

1. Формування КЕП з частинками $\text{SiC}_{\text{нано}}$ і SiC_5 проводиться на вертикальному, а усіх інших за розміром частинок на горизонтальному катоді. При таких розмірах частинок отримуємо найвищу корозійну стійкість покриття.

2. Об'ємний вміст частинок $\text{SiC}_{\text{нано}}$ і SiC_5 в нікелі сягає максимуму в середньому біля 10%, а SiC_{100} – 46%.

3. КЕП з розмірами частинок 28/20 та 50/40 мкм дозволяють отримати найбільш зносостійкі покриття. При цьому покриття з частинками 28/20 мкм мають вищу зносостійкість, але покриття з частинками 50/40 мкм є більш технологічними при їх формуванні.

Висновки

1. Розмір частинок наповнювача має значний вплив на трибологічні характеристики КЕП, а саме зносостійкість та коефіцієнт тертя. Встановлено, що найвищою зносостійкістю та найменшими коефіцієнтами тертя характеризуються покриття, що мають у якості наповнювача порошки фракцій 28/20 та 50/40 мкм. Але вміст наповнювача в досліджуваних покриттях був різним, тому важливим є дослідити вплив вмісту наповнювача та розмірів між частинками на зносостійкість КЕП.

2. Трибологічні дослідження показують перспективність і ефективність застосування КЕП для підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин.

Список використаних джерел

1. Денисенко М.І., Войтюк В. Д. Зміцнення лез ґрунтообробних робочих органів сільськогосподарських машин з утворенням ефекту самозагострювання. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. №6, 2016. – С.175-182.

2. Борак К.В. Підвищення надійності робочих органів ґрунтообробних машин/ К.В. Борак// *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. -2015. – Вип. 163. – С. 120 – 125.

3. Стечишин М.С. Зносостійкість лап культиватора, що модифіковані азотуванням в тліючому розряді / М.С. Стечишин, М.В. Лук'янюк, В.П. Олександренко, А.В. Мартинюк, Ю.М. Білик // *Сільськогосподарські машини: Зб. наук. статей*. – Вип. 44. – Луцьк, 2020. – С.123-134.

4. Волков Ю.В. Долговечность машин работающих в абразивной среде / Ю.В. Волков, З.А. Волкова, Л.М. Кайгородцев. – М.: Машиностроение, 1994. – 117 с.

5. Аулін В.В. Теоретичні основи самозагострювання, міцності і зношування різальних елементів РОГМ та напрямки підвищення їх довговічності/ В.В. Аулін, В.М. Бобрицький, А.А. Тихий// *Вісник ін-женерної академії України*. – 2010. – № 1. – С. 149-154.

6. Пат. 55154 Україна, МПК С25D11/00; С25D15/00. Гальванічна установка для нанесення композиційних електролітичних покриттів / Стечишин М.С., Білик Ю.М. –

U201005565; заявл.07.05.2010; опубл. 10.12.2010, Бюл.№23.

7. Антропов Л.И. Композиционные электрохимические покрытия и материалы / Л.И. Антропов, Ю.Н. Лебединский. –К.: Техніка, 1986. -200 с.

8. Корнієнко А.О. Формування триботехнічних властивостей композиційних електролітичних покриттів на основі нікелю створенням градієнтних структур / А.О. Корнієнко. Автореф. дис.канд. техн. наук. –К, 2007. -21 с.

References

1. Denisenko MI, Voytiuk VD Strengthening of blades of tillage working bodies of agricultural machines with the formation of the effect of self-sharpening. *Technical service of agro-industrial, forest and transport complexes*. №6, 2016. - P.175-182.

2. Borak KV Increasing the reliability of working bodies of tillage machines / K.V. Borak // *Bulletin of the Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture*. -2015. - Vip. 163. - P. 120 - 125.

3. Stechishin MS Wear resistance of cultivator paws modified by nitriding in a glow discharge / MS Stechishin, MV Lukyanyuk, VP Олександренко, А.В. Martyniuk, Yu.M. Bilyk // *Agricultural machinery: Coll. Science. articles*. - Vip. 44. - Lutsk, 2020. - P.123-134.

4. Volkov Yu.V. Durability of machines working in an abrasive environment / Yu.V. Волков, З.А. Volkova, LM Кайгородцев. - М .: Машиностроение, 1994. - 117 с.

5. Aulin VV Theoretical bases of self-sharpening, strength and wear of cutting elements of ROGM and directions of increase of their durability / V.V. Aulin, VM Bobritsky, AA Tykhy // *Bulletin of the Engineering Academy of Ukraine*. - 2010. - № 1. - P. 149-154.

6. Patent 55154 Ukraine, IPC C25D11 / 00; C25D15 / 00. Galvanic installation for application of composite electrolytic coatings / Stechyshyn MS, Bilyk Yu.M. –U201005565; application 07.05.2010; publ. 10.12.2010, Bull.№23.

7. Antropov LI Composite electrochemical coatings and materials / L.I. Antropov, Yu.N. Лебединский. –К .: Technique, 1986. -200 p.

8. Kornienko AO Formation of tribotechnical properties of composite electrolytic coatings based on nickel by creating gradient structures / A.O. Kornienko. Author's ref. Candidate of Dissertation tech. Science. –К, 2007. -21 p.