

УДК 631.31:621.791.75

## ВІДНОВЛЕННЯ РЕСУРСУ РОБОЧИХ ОРГАНІВ ҐРУНТОБРОБНИХ МАШИН НАНЕСЕННЯМ ЗНОСОСТІЙКИХ ПОКРИТЬ

Ю. Б. Паладійчук<sup>1</sup>, Ю. М. Мельник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Вінницький національний аграрний університет, Україна.

<sup>2</sup>Відокремлений структурний підрозділ "Чернятинський фаховий коледж" Вінницький національний аграрний університет, Україна.

*Стаття з спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.*

*Кореспонденція авторів: [rewet@vsau.vin.ua](mailto:rewet@vsau.vin.ua).*

*Історія статті: отримано – червень 2021, акцептовано – листопад 2021, опубліковано – 17 грудня 2021 року. Бібл. 10, рис. 7, табл. 8.*

**Анотація.** Інтенсивне ущільнення ґрунту, що спричинене застосуванням сучасних потужних тракторів із великою вагою та наявністю у них більших робочих швидкостей, і як наслідок зменшується термін експлуатації ґрунтообробної техніки. Складні погодні умови викликають збільшення навантаження на робочі органи ґрунтообробних машин (леміші плуга, культиваторні лапи).

У статті розглядається проблема відновлення ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин за рахунок нанесенням зносостійких покриттів. Проаналізовано види зношування та вплив абразивних матеріалів на робочі органи ґрунтообробних машин. Визначинні оптимальні матеріали та методи підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин. Розглянуто особливості формування металізаційного покриття, що відображається в його структурі та характер дефектів, які можуть відрізнятися за розмірами, щільності, морфології і орієнтації. Обґрунтовано залежність властивостей покриттів від системи легування матеріалу. Наведено устаткування і матеріали для нанесення покриттів.

З врахуванням отриманої інформації, зробленні висновки та проведений аналіз технології нанесення зносостійких покриттів для відновлення ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин.

**Ключові слова:** ґрунтообробна техніка, технічне обслуговування, обробіток ґрунту, металізація, наплавка, порошковий дріт, дугова металізація, напилення.

### Постановка проблеми

Річна потреба сільськогосподарства України в робочих органах до плугів та інших ґрунтообробних машин доволі значна і не піддається численній оцінці. Для підтримки працездатності сільськогосподарської техніки щорічно випускається значна кількість запасних частин.

При обробці ґрунту (оранка, культивація) енергоємність процесу різко зростає через затуплення робочих органів внаслідок абразивного зносу [3].

Робочі органи ґрунтообробних машин піддаються ударно-абразивному характеру зносу, який виникає через контакт з частинками ґрунту і камінням. На знос впливають супутні фактори такі як: механічний склад ґрунту; вологість; твердість; структура матеріалу; тиск і швидкість відносного переміщення ґрунту по поверхні робочих органів ґрунтообробних машин.

В таблиці 1 наведена орієнтовна класифікація ознак всього різноманіття процесів зношування, які є наслідком протікання складних процесів на поверхневому шарі металу при зношуванні, відмінності умов та режимів роботи пар тертя.

**Таблиця 1.** Класифікація видів зношування.  
**Table 1.** Classification of types of wear.

Види зношування	Механічні
	Абразивне
	Гідроабразивне (газоабразивне)
	Гідроерозійне (газоерозійне)
	Кавітаційне
	Втомлюване
	Прифретинг
	Адгезійне
	Корозійно-механічне
	Окислюване

Абразивне зношування є основним видом контактної взаємодії при зовнішньому терті. При роботі сполучень робочих органів сільськогосподарських та інших машин присутнє абразивне зношування, що є головним чинником, який

обмежує технічні характеристики і ресурс машин, механізмів і обладнання [4].

На цей вид зносу припадає від 50 до 80% випадків відмов робочих органів машин, зокрема будівельних, дорожніх, транспортних, сільськогосподарських, машин для тваринництва і кормовиробництва [3].

В ґрунтах присутні абразивні частинки такі як, кварц (HV 10,5-12,5 ГПа) і польовий шпат (HV 6,5-7,2 ГПа). Наявність цих мінералів, в основі піщаних і супіщаних ґрунтів, пояснюють швидкий знос робочих органів. На рисунку 2 показаний характерний профіль зносу робочих органів ґрунтообробних машин.



**Рис. 1.** Робочі органи ґрунтообробних машин.  
**Fig. 1.** Working bodies of tillage machines.

Виготовлення робочих органів ґрунтообробних машин (лемешів плугів, культиваторних лап, дисків борін) повинно мати підвищені вимоги до матеріалу, методів підвищення зносостійкості, технології виготовлення [4, 5].

Абразивний вид зношування поділяється на основні чотири види:

1. руйнування матеріалу різанням;
2. руйнування матеріалу шляхом відриву (крихке руйнування);
3. руйнування матеріалу при багаторазовому деформуванні мікрооб'ємів поверхневого шару (утомлююче руйнування);
4. полідеформаційний процес руйнування матеріалів (спільний прояв трьох вищезазначених руйнувань, включаючи руйнування в результаті перенаклепування) [3].

Вологість, механічна структура ґрунту, швидкість відносного переміщення та інші фактори впливають на абразивне зношування робочих органів ґрунтообробних машин [3-6].

Вміст абразиву так званого кварцового піску в ґрунті має основний вплив на абразивний знос робочих органів ґрунтообробних машин. Окрім абразиву, що дряпає або знімає мікростружку з поверхні робочих органів ґрунтообробних машин, на швидкість зносу впливає присутня в ґрунті волога, яка має певну кислотність рН. Зі збільшенням вологості ґрунту і

фракції абразиву (0,25–1,00 мм) величина зносу збільшується на 25-50%.



**Рис. 2.** Форма робочого органу культиватора.  
**Fig. 2.** The shape of the working body of the cultivator.

Абразивний знос переважає над іншими видами зносу, в разі якщо твердість абразиву перевищує твердість матеріалу робочого органу ґрунтообробних машин.

### Мета досліджень

Відновлення ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин за рахунок нанесенням зносостійких покриттів.

Для досягнення поставленої мети потрібно розв'язати такі завдання:

1. Проаналізувати види зношування та вплив абразивних матеріалів на робочі органи ґрунтообробних машин;
2. Визначити оптимальні матеріали та методи підвищення зносостійкості;
3. З врахуванням отриманої інформації, зробити висновки та провести аналіз технології нанесення зносостійких покриттів для підвищення ресурсу робочих органів ґрунтообробних машин.

### Результати досліджень

Матеріали і методи підвищення зносостійкості. Підвищення зносостійкості робочих органів ґрунтообробних машин у сільськогосподарському машинобудуванні відбувається завдяки:

- використанню зносостійкого матеріалу і багатшарового прокату;
- розробці складових робочих органів;
- термічній і термохімічній обробці;
- наплавленню і напиленню зносостійких матеріалів.

Під час, вибору методу зміцнення в залежності від типу ґрунтів слід враховувати не тільки технологічні та економічні показники, а й необхідність реалізації ефекту самозаточування робочих органів.

Сутність ефекту самозаточування полягає у вибіркового зносі неоднорідного по перерізу леза, при якому зберігаються необхідна форма і ріжучі властивості робочого органу [4, 5-7].

Виготовлення біметалічних лемешів трапецеподібної форми з двошаровою катаною

частиною леза зі сталі Х6Ф1 (нижній шар) і Л-53 (верхній шар), дає змогу підвищити термін служби і забезпечити ефект самозаточування. Дані леміші мають підвищений термін служби, але для їх відновлення необхідне виготовлення спеціалізованого оснащення для обробки металів тиском [4].

Однією з найпоширеніших технологічних операцій для зміцнення є термічна обробка. Завдяки термічній обробці твердість металу для сталі 45 становить HRC 40-46, а для сталі 65Г і легованих сталей – HRC 55-61. Зносостійкість таких робочих органів менша в порівнянні з деталями, виготовленими зі спеціальних матеріалів, але при застосуванні таких робочих органів на суглинкових ґрунтах не спостерігається самозаточування [6].

Знос культиваторних лап з індукційним загартовуванням (ширина шару загартовування – 8-10 мм, HRC 48-52) за сезон складе 30 мм, при цьому не забезпечується якість обробки [6].

Застосування лазерної термообробки для зміцнення робочих органів в 1,5 рази знижує знос в порівнянні з об'ємним гартуванням. Лазерна наплавка сплавом ПС-14-60 + 6% В4С знижує знос в 1,7-1,8 рази в порівнянні з індукційним загартовуванням [4].

Підвищити зносостійкість деталей машин можливо за рахунок наплавлення.

Наплавлювальні матеріали це – самозахисні порошкові дроти типу ПП-АН170 (ПП-АН170М), забезпечують утворення наплавленого шару твердістю HRC 60-65.

Оптимальна зносостійкість і самозагострювання визначається регулюванням геометрії наплавленого шару (висота, глибина, крок наплавлення), а також співвідношенням твердості наплавлених ділянок і основного металу в межах 1,5; 1,0; 1,0; 1,0 [7].

Композиційні матеріали в основному отримують методом порошкової металургії. Крім цього існують інші методи, наприклад, метод безпосереднього введення наповнювача в рідкий метал або сплав перед розливом. В останньому випадку для очищення від жирових та інших забруднень, покращення змочування частин рідким металом і рівномірного розміщення їх в матриці застосовують ультразвукову обробку рідкого розплаву.

Застосування композиційних матеріалів (міцна, пластична основа - зносостійке покриття), відповідає критерієм «ціна-якість» та є кращим для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин. При виготовленні великих партій робочих органів ґрунтообробних машин, повинні застосовуватися зміцнюючі технології на стадії виготовлення. Технології, щодо підвищення ресурсу повинні відповідати певним вимогам: виду виробництва, бути продуктивними, економічними та забезпечувати задану товщину і зносостійкості покриттів.

Забезпечити великий термін служби робочих органів, скоротити час проведення робіт по зміцненню і знизити їх вартість, дозволяє метод газотермічного напилення.

Процес у газотермічне напилення відбувається наступним чином: матеріал розпилюється у вигляді порошку або дроту подається в зону нагріву; газ розпилює нагріті частинки і надає їм прискорення в

осьовому напрямку; у зоні нагріву при подачі дроту розпилюючий газ диспергує розплавлений матеріал, а також він виконує і функцію нагріву; частинки, що надходять на поверхню, мають велику швидкість зіткнення, при цьому утворюються міцні міжатомні зв'язки та створюються умови для адгезії розпленого матеріалу за рахунок активації поверхневого контакту [4-7].

Класифікація методів газотермічних напилень за видом використовуваної енергії і джерела теплоти.

По виду енергії діляться на:

➤ газоелектричні, в яких використовуються електроенергія:

➤ газополум'яневі методи, де теплова енергія утворюється за рахунок згоряння горючих газів.

Щоб нагріти розпилений матеріал застосовують такі види джерела теплоти:

- дуга;
- плазма;
- газове полум'я.

Методи напилення поділяються на види:

- дугова металізація;
- плазмове напилення;
- газополум'яне напилення;
- детонаційне-газове напилення.

До газоелектричних відносяться перші два методи, останні – до газополум'яних [4, 5-7].

Коефіцієнт використання енергії, що підводиться, коефіцієнт використання напилюваного металу, продуктивність, якість покриттів і вартість їх нанесення визначає ефективність методів газотермічного напилення. Переважаючим методом газотермічного напилення по тепловій ефективності, продуктивності та вартості покриттів є дугова металізація.

При застосуванні дугової металізації частка енергії, що підводиться, йде безпосередньо на нагрівання і плавлення порошкового матеріалу, дозволяє підвищити ефективний ККД нагріву до 60%. Низькі теплові втрати обумовлені фізичними особливостями процесу.

Процес дугової металізації відбувається за рахунок розпилення дроту в дугу, що горить між ним, і порошком, який транспортується газом, а утворювані частинки прискорюються і при попаданні на поверхню формують покриття. Висока теплова ефективність дугової металізації обумовлена прямою передачею енергії від дуги до дроту. Частка введеної теплової енергії від дуги, що йде на розплавлення порошкового матеріалу, становлять 60-70%, що в 7-10 разів більше, ніж для інших способів газотермічного напилення. Продуктивність дугової металізації досить велика – до 18 кг/год при розпилюванні сталі. Ціна дроту 2-3 рази дешевше порошоків, застосовуваних для інших способів газотермічного напилення.

Рівень міцності залежить від об'ємного складу зміцнюючої фази, рівномірності її розміщення, ступеня дисперсності і розташування між частинками. Згідно з формулою Орована, опір зрушенню збільшується зі зменшенням відстанні між частинками:

$$\sigma = \frac{Gb}{l} \quad (1)$$

де  $G$  – модуль зсуву;  $b$  – міжатомна відстань;  $l$  – відстань між частинками.

Вигорання легуючих елементів в матеріалі який наноситься і насичення порошкового металу газами з атмосфери в зоні горіння дуги є фізико-хімічними особливості процесу дугової металізації, які спричиняють складність отримання якісних покриттів. Обладнання для процесу дугової металізації характеризується широким кутом розпилу, до  $70^\circ$ , невисоким  $0,5-0,6$ , коефіцієнтом використання металу, зниженням концентрації легуючих елементів і надмірним вмістом оксидів в покритті.

Обладнання активованої дугової металізації, створене для усунення зазначених недоліків, яке відрізняється від типового тим, що використовуються продукти згорання (пропаноповітряна суміш) в якості транспортера газу [9].

Матеріалами для нанесення зносостійких покриттів при плазмовому напиленні і дуговій металізації виступають дорогі порошки сплавів, на основі нікелю [4]. Для дугової металізації поширення набули економно леговані порошкові дроти на основі заліза типу Fe-Cr-B, що дозволяють, на відміну від суцільних дротів, простіше отримати зносостійкі покриття необхідної системи легування, що необхідно для варіювання складу покриття при різних режимах зношування.

Покриття із зазначених порошкових дротів забезпечують підвищення зносостійкості сталей в 2-5 разів та роблять метод дугової металізації переважачим при напиленні на робочі органи сільськогосподарських машин [5].

Найбільшу небезпеку становить знос за механізмом внутрішнього тертя, при підвищених контактних навантаженнях і наявності ударів. Для покриттів він обумовлений, ймовірно, виникненням і розвитком мікротріщин по оксидним плівкам. Оксидні плівки і тим більші пори можуть сприяти відшаровуванню металу за механізмом внутрішнього тертя, збільшуючи швидкість механічного зносу металевго покриття.

Отже, необхідно розглянути особливості формування металізаційних покриттів і методи вдосконалення технології їх нанесення, що дозволяють забезпечити зносостійкість покриттів при ударно-абразивному зношуванні, характерному для умов експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин [4, 8].

Металізаційне покриття утворюється з шаруватих елементів, сформованих при високошвидкісному ударі об холодну поверхню, що в подальшому призводить до затвердіння частинок. Частинки розплавляються до пластичного стану та рівномірно розподіляються по поверхні. Контакт частинок між собою відбувається після зачеплення їх по нерівній поверхності.

Під час напилювання відбувається окислення частинок, що призводить до утворення оксидної плівки, яка потрапляє в покриття. Оксидна плівка потрапляючи на покриття чинить на нього негативний вплив:

1. перешкоджає дифузії частинок;
2. знижує міцність зчеплення;
3. зменшує твердість покриття.

На останнім напиленні шар наноситься фракція у вигляді пилу розплавленого матеріалу або його оксидів і адсорбції газів.

Висока швидкість при напиленні призводить до розтікання і кристалізація частинок, які контактують з раніше нанесеною поверхнею, це спричиняє дефекти, порожнини, мікропорожнечі наповненні газом.

Перегрів частинок призводить до їх випаровування і осідання в паровій фазі [5, 9].

Формування одержуваних покриттів, які утворенні з нерозплавлених частинок, оксидів, пор, тонких пластин з'єднаних між собою або звареними ділянками, або шляхом «схоплювання» утворених під час кристалізації і затвердіння.

Покриття має нижчу міцність і щільність, ніж у основного матеріалу, тому що зварні ділянки не заповнюють всю площу контакту між нанесеними частинками.

У насенному покритті виділяють границі між шарами і частинками, які визначають міцність зчеплення між покриттям і підкладкою:

1. когезія;
2. пошарові границі;
3. границя між шаром і частинками. [4-9].

Міцність покриття забезпечується адгезією та характеризується наступними механізмами:

- нанесенні частини мають входити в механічне зчеплення з поверхнею підкладки або з попередньо осадженим шаром;

- наявність металургічного з'язка свідчить про наявність хімічних реакцій в зоні частинки і підкладки, що призводить до дифузії взаємної переплавки;

- фізична взаємодія між частинками і основою в результаті зближення атомів на відстань порядку розмірів атомів, свідчить про наявність ван дер Вальсових сил в даному процесі.

На властивості нанесеного покриття впливають процеси, що відбуваються в двофазному потоці. До особливостей напиленого матеріалу відносять: здатність змінювати склад частинок при взаємодії з навколишнім середовищем; при ударі частинок відбувається швидка кристалізація і деформація; характер контактів між частинками в покритті.

Структура та характер дефектів відображає особливості формування металізаційного покриття та відрізняється за розмірами, щільністю, морфологією і орієнтацією.

У дослідженні металізаційного покриття на прикладі сталі 30X13 описно склад напилюваного шару. Вона має дуже тонкі по черзі розміщені хвилеподібні прошарки білого і сіро-блакитного кольору, що являються затверділим металом і оксидами. Наявність металу і оксидів свідчить про присутність ділянок змішаної структури. Окремі частинки металу мають більш округлу форму та глобулярну, в свою чергу пори мають глобулярну і дископодібну форми [10].

Недостатність пошарового змочування крапель є причиною утворення дископодібних пори, що формуються між шарами. Глобулярні пори виникають в результаті недостатнього заповнення твердіючого шару.

Травлення зразків дало змогу виявити швидкість проявлення, на тонких шарах металу проявлення відбувалося швидше ніж у більш товстих шарах і великих частках. Високий вміст хрому в структурних складових спричиняє слабе травлення у порівнянні із світлим ділянками.

Пошаровий хімічний аналіз покриттів, напилених ДМ-апаратом, показав, що вміст елементів практично однаковий по глибині напилюваного шару, але в процесі напилення відбувається їх вигорання в порівнянні з вихідним вмістом [10].

Щоб визначити вплив складу атмосфери транспортного газу на особливості формування металізаційного покриття, було відібрані зразки із застосуванням різних варіантів металізації. Серійний апарат ЕМ-14 став базовим для порівня. В апараті АДМ-10 для розпилення застосовуються продукти згорання пропаноповітряної суміші.

Припустивши, що округлі частки металу потрапили в покриття вже у затверділому стані, з розміром частинок менше 30 мкм. Тому покриття отримані при розпилюванні в повітряному середовищі мають грубу неоднорідну структуру з витягнутими по шарам порами і великими частками.

Використання пропаноповітряного середовища дало змогу отримати покриття з більш тонкою структурою, пор і пустот значно менше і вони дрібніші. У структурі мала кількість оксидів, а оксидні плівки тонші. Тому при застосуванні АДМ-апарата із використанням пропаноповітряного середовища, отримані покриття являються є більш кращими.

Дослідження, при використанні відновлювальної атмосфери, одержуваної з застосуванням пропаноповітряного середовища показали, що мікротвердість покриттів значно вище. Відбувається зниження пористості покриттів та підвищення мікротвердості у різних структурних складових становить 6-12%. Збільшення пористості покриттів, збільшення числа і розмірів прошарків оксидів, відбувається за рахунок кисню, що міститься у складі транспортного газу. Підвищення пористості знижує когезійну міцність, тому що пори - це порожнечі з нульовою міцністю.

Порівнюючи покриття напилене апаратом ЕМ-14 без застосування відновлювальної атмосфери із покриттям, нанесеним апаратом АДМ-10, було виявлено, що стійкість покриттів та ударно-абразивний знос збільшується в кілька разів при зниженні ступеня окислення крапель, і як результат - ступеня окислення покриття.

Випробування матеріалів 10ХГСА, 45Г, 50ХФА, 30Х13 показало, що покриття зі сталі 30Х13 має найкращі результати: зносостійкість в 2-5 разів вище, ніж у покриттів з інших матеріалів; є відпущений мартенсит і структурні перетворення в ньому будуть супроводжуватися напруженнями стиску, сприятливими для експлуатаційних навантажень.

В подальшому для дослідження в якості еталону при випробуваннях зносостійкості покриттів був прийнятий зразок активної дугової металізація-покриттів з суцільного дроту 30Х13.

Отже, для підвищення властивостей покриттів, необхідно створити захисну атмосферу, особливо в

зоні горіння дуги, а також легування порошкового металу елементами – розкислювачами, це дасть змогу зменшити кількість оксидної плівки на поверхні частинки [4, 8-9].

Залежність властивостей покриттів від системи легування матеріалу. Вибір системи легування розпилюваного матеріалу, через моделювання процесу надходження кисню в частки, що розпилюються дає можливість, отримати необхідну кількість оксидів в металізаційному покритті і необхідні показники його властивостей. Технологічні параметри дугової металізації доцільно оптимізувати по незалежному критерію, який визначає працездатність покриттів при експлуатації. Адгезійна міцність покриттів є критерієм в умовах ударно-абразивного зношування, що показує їх здатність чинити опір відшарування від основи.

При оцінці залежності властивостей покриттів від складу розпилюваного матеріалу прийнята модель окислення частинок при дуговій металізації, представлена в роботах [4, 9-10].

В роботах описано процес дугової металізації, що складається з трьох зон, які відрізняються особливістю взаємодії розпилюваного металу з киснем в кожній зоні. Перша стадія описує поведінку металу на торці електрода. Друга стадія характеризує метал в зоні горіння дуги. Третя стадія описує політ крапель по дистанції напилювання.

Устаткування і матеріали для нанесення покриттів. Установка активної дугової металізації АДМ-10, призначена для нанесення зносостійких і антикорозійних покриттів з дротяних матеріалів способом термічного напилення. Установка експлуатується в умовах, на які розраховані виробники виконання У, категорії 3, відповідно до ГОСТ 15150-69.

Установка працює від трьохфазної мережі змінного струму напругою 380/220 В, частотою 50 Гц. Для роботи установки необхідна наявність мереж підведення стисненого повітря, пропану, а також зварювального джерела харчування з жорсткою характеристикою ВДУ-506.

Процес плавлення дротів електричною дугою і розпорошення розплавленого металу високошвидкісним струменем транспортного газу є основою роботи установки.

Робота установки відбувається наступним чином:

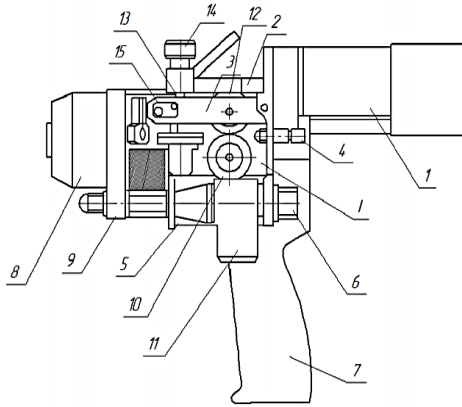
1. на два дроти, які виконують роль електродів, подається напруга;

2. дроти з постійною швидкістю надходять в розпилювальну головку металізатора, де в результаті зближення між ними виникає електрична дуга і відбувається плавлення;

3. транспортний газ (стиснене повітря і пропан) здуває частки розплавленого металу з торців дротів, підхоплює їх, розганяє до високої швидкості і забезпечує доставку до поверхні оброблюваної деталі.

Для виконання роботи установці потрібне підведення:

- стисненого повітря;
- пропану;
- напруги від зварювального джерела живлення.



а



б

**Рис. 3.** Загальний вигляд металізатора: а – пристрій металізатора; б – установка в роботі; черв'ячного редуктора – І; електродвигун – 1; кронштейн механізму притискання роликів – 2; важелі – 3; передні і задні направляючі – 4; піддон картера – 5; струмопроводи – 6; ручка – 7; розпилювальна головка – 8; плита – 9; подавальні ролики – 10; кран – 11; притискні ролики – 12; пружини – 13; гайки – 14; важелі – 15.

**Fig. 3.** General view of the metallizer: a – metallizer device; b – installation in operation; worm reducer – I; electric motor – 1; bracket of the mechanism of pressing of rollers – 2; levers – 3; front and rear guides – 4; crankcase tray – 5; power lines – 6; handle – 7; spray head – 8; plate – 9; feed rollers – 10; crane – 11; clamping rollers – 12; springs – 13; nuts – 14; levers – 15.

При дослідженні нанесення покриттів були використані: суцільна дрот марки 30X13 системи легування Fe-Cr і порошкові дроту базової системи легування Fe-Cr-B різних марок: 45X13P10CI системи легування Fe-Cr-B-C-Y; 40X18P10C5I системи легування Fe-Cr-B-Si-Y; 40X18P5IЮ5CI системи легування Fe-Cr-B-Al-Y діаметром 2,0 мм (таблиця 2).

Під час виконання процесу дугової металізації за допомогою установки АДМ-10 використовувалося допоміжне обладнання:

- касети з електродним дротом;
- пристрій для установки касет, що виключає можливість торкання дротів при розмотування щоб уникнути короткого замикання;
- мережа стисненого повітря;
- мережа (балон) пропану.

**Таблиця 2.** Розрахунковий хімічний склад використовуваних дротів.

**Table 2.** Estimated chemical composition of the wires used.

Марка дротів	Масова доля елементів, %						
	C	Cr	B	Al	Si	Y	Fe
СП 30X13	0,16-0,25	12-14	-	-	До 0,6	-	Основна
ПД 45X13P5CI	0,6	13	5	0,2	1	1	Основна
ПД 20X11P5C5I	0,2	11	5	0,2	4,5	1	Основна
ПД 20X11P5Ю3CI	0,2	11	5	3	1	1	Основна

Напилення покриттів проводилось на поверхню пластин, виготовлених зі сталі 40 по ГОСТ 1050-88, товщина напилення становить 2,5 мм. Підготовку поверхні зразків під напилення покриттів здійснювали відповідно до ГОСТ 9.304.

Перед напиленням поверхня пластин була знежирена ацетоном по ГОСТ 2768-84. Поверхня піддавалася продуванню стисненим повітрям і струменево-абразивній обробці. Температура повітря при підготовці поверхні під напилення проводили становила не нижче плюс 5 °C з метою виключення конденсації вологи на зразках.

Покриття наносили не пізніше 2 годин після струменево-абразивної обробки за допомогою установки активованої дугової металізації АДМ-10.

Зразки для досліджень були вирізані на електроерозійному верстаті AGIE CHARMILLES CUT 20 з пластин з напиленням активованої дугової металізації покриттям.

Підготовка мікро- і макрошліфів зразків для досліджень структури, фізико-механічних і експлуатаційних властивостей зразків покриттів здійснювалася з використанням азотної кислоти (HNO<sub>3</sub>) - ГОСТ 4461-77, етилового технічного спирту (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) - ГОСТ 18300-87, дистильованої води (H<sub>2</sub>O) - ГОСТ 6709, пасти ГОІ № 2 (ТУ 6-18-36) і алмазної пасти НОМ 60/40 (ГОСТ 25593).

Результати оптимізації режимів дугової металізації. В таблицях 3 і 4 наведені результати визначення режимів дугової металізації методом планування експерименту за критерієм максимальної адгезійної міцності покриттів з порошкового дроту 20X11P5IЮ3CI, що визначає їх здатність чинити опір відшаровуванню в умовах експлуатації робочих органів ґрунтообробних машин.

**Таблиця 3.** Оцінка статистичної значущості коефіцієнтів\*.

**Table 3.** Estimation of statistical significance of coefficients\*.

Фактори	Beta	t (3)	p – level
I, A	0,55	8,78	0,005
U, B	0,07	1,38	0,287
T, мм	0,73	12,59	0,002
S, мм	-0,4	-5,05	0,018

\* Beta - коефіцієнт регресії; p - рівень значущості; t - Критерій Стьюдента.

Лінійне рівняння регресії адекватно експериментальними даними за критерієм Фішера. Всі коефіцієнти рівняння регресії, крім визначального вплив напруги дуги, статистично значущі за t-критерієм Стьюдента для заданого р-рівня значущості.

**Таблиця 4.** Оцінка адекватності лінійної моделі \*

**Table 4.** Assessment of the adequacy of the linear model \*

Factor	SS	сс	MS	F	p
I, A	90,64	1	89,06	78,06	0,004
U, В	2,18	1	2,14	1,84	0,267
T, мм	184,16	1	184,16	159,45	0,001
S, мм	28,95	1	29,95	25,20	0,015
Error	3,46	3	1,16		
Total SS	308,33				

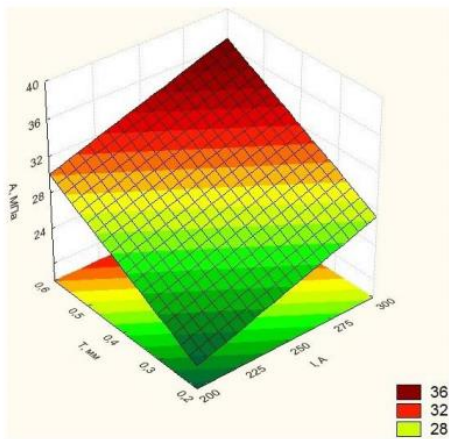
\* SS – сума квадратів; сс – ступінь свободи; MS – середнє квадратичне; F – критерій Фішера; p – рівень значущості.

Оцінити залежність адгезійної міцності покриття від параметрів ДМ можна за результатами регресійного аналізу:

$$y = 0,52x_1 + 0,74x_3 - 0,34x_4 \quad (2)$$

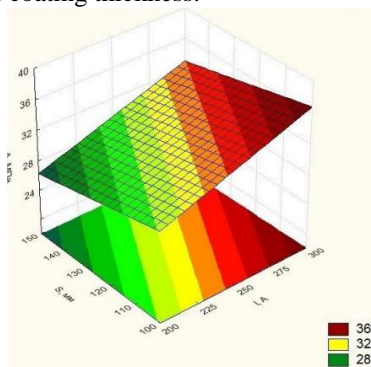
де  $x_1$  - струм дуги, А;  $x_3$  - товщина покриття, мм;  $x_4$  - дистанція напилювання, мм.

Отримані результати виконані за допомогою графіків поверхні (рис. 4 і рис. 5).



**Рис. 4.** Графік поверхні для факторів струму дуги і товщини покриття.

**Fig. 4.** Graph of the surface for the factors of arc current and coating thickness.



**Рис. 5.** Графік поверхні для факторів струму дуги і дистанції напилювання.

**Fig. 5.** Graph of the surface for the factors of arc current and spraying distance.

Аналіз наведених даних дозволяє зробити висновок, що адгезія металізаційних покриттів зростає зі збільшенням їх товщини, струму дуги, а також зменшенням дистанції напилювання (впорядку зменшення ефекту чинників), вплив напруги дуги статистично значимий.

При ДМ збільшення струму дуги призводить до підвищення температури частинок, розвитку взаємодії в контакті «частинка-підкладка» і підвищенню адгезійної міцності покриття. Збільшення напруги дуги, незважаючи на підвищення температури частинок, призводить до зниження коефіцієнта використання металу частинок і його вигорання за рахунок збільшення довжини дуги [4], що, мабуть, обумовлює малий вплив цього фактора на адгезію металізаційного покриття. Отримані в даній роботі закономірності збігаються з даними інших авторів [3, 4]. При ДМ питома енергія, що витрачається на плавлення, перегрів і випаровування металу, з ростом потужності дуги збільшується, а отже, збільшується і температура розпилюються частинок. Збільшення температури розпилюються частинок в свою чергу призводить до підвищення міцності зчеплення, щільності і розвиненості поверхні одержуваних покриттів.

При виборі режиму слід прагнути до мінімальних значень напруги дуги без порушення стабільності процесу, а необхідну для перегріву напилюваних частинок величину потужності встановлювати за допомогою зміни сили струму [7].

Для оптимізації технологічних параметрів дугової металізації за критерієм максимальної міцності напилюваних покриттів застосовували метод крутого сходження, таблиця 4 [7].

В результаті визначені оптимальні параметри дугової металізації покриттів з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ:  $I = 320 \pm 15$  А;  $U = 34 \pm 1,5$  В;  $S = 0,7 \pm 0,05$  мм;  $L = 95 \pm 5$  мм, це металізаційне покриття виявилось найбільш зносостійким, тому можна констатувати, що воно і має найбільшу адгезійну міцність.

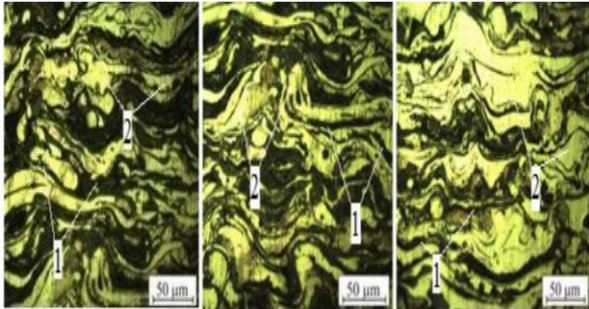
**Таблиця 5.** Оптимізація режимів дугової металізації методом крутого сходження.

**Table 5.** Optimization of arc metallization modes by steep ascent.

Характеристика	Фактор		
	$x_1$ , А	$x_3$ , мм	$x_4$ , мм
Нульовий рівень $x_{i0}$	300	0,8	100
Інтервал варіювання $\Delta x_i$	50	0,2	25
Коефіцієнт $b_i$	0,54	0,75	-0,30
Добуток $b_i \Delta x_i$	27	0,15	7,5
Крок $h_a$ при зміні базового фактору $x_i$ на 10	10	0,054	2,778
Округлення кроку варіювання	10	0,05	2,8
Змінна стану	Крутий ріст		
$\bar{y}$	310	0,65	97,2
36,97	310	0,65	97,2
42,76	320	0,7	94,4
31,18	330	0,75	91,6

Отримані металізаційні покриття (рис. 6) мають характерну для методів газотермічного напилення ламелярно-пористу структуру, де світлі ділянки - металева основа, яка формується з крапель розплавленого металу, а темні - прошарку оксидів, що утворюються при окисненні крапель на дистанції напилювання. Покриття відрізняються значною нерівномірним сплавом окремих напилених часток один з одним. Ймовірно, мікрогетерогенність структури покриттів обумовлена наявністю в ПП тугоплавких борвмісних компонентів.

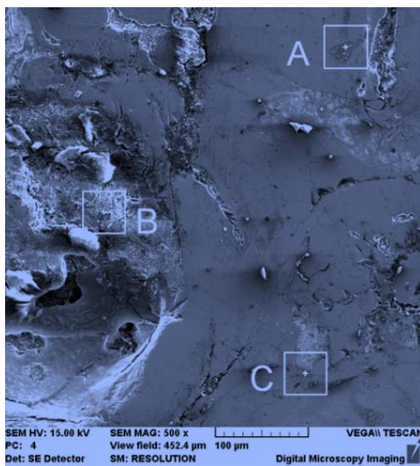
Покриття з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ (рис.6, в) мають меншу мікрогетерогенність, їх структура тонша, оксидних плівок менше, і вони дрібніші, що, ймовірно, пов'язано з меншим ступенем окислення покриттів.



а) б) в)

**Рис. 6.** Структура на поперечних шліфах покриттів: а – порошковий дріт 45X13P5СІ; б – порошковий дріт 20X11P5С5І; в – порошковий дріт 20X11P5Ю3СІ 1 – оксидні плівки; 2 – метал.

**Fig. 6.** Structure on cross sections of coatings: а – flux-cored wire 45X13P5СІ; б – flux-cored wire 20X11P5С5І; in – flux-cored wire 20X11P5Ю3СІ 1 – oxide films; 2 – metal.



**Рис.7.** Мікроструктура покриття з порошковим дротом 20X11P5Ю3СІ: А, В, С – ділянки мікроструктури з різним складом.

**Fig.7.** The microstructure of the coating with flux-cored wire 20X11P5Ю3СІ: А, В, С - areas of the microstructure with different composition.

Раніше зазначалось [11], що оксидні плівки сприяють відшарування металу за механізмом внутрішнього тертя, збільшуючи швидкість механічного зносу

покриття. Сприятлива мікроструктура покриття з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ з мінімальною кількістю оксидних плівок в кінцевому підсумку може обумовлювати високі показники його фізико-механічних і експлуатаційних властивостей.

За результатами визначення пористості покриття з порошкового дроту 45X13P5СІ максимальний розмір пор становить 24,2 мкм, мінімальний - 1,2 мкм, при цьому число пор з розміром до 10 мкм оцінюється в 92,8%, площа зазначених пор становить 69,7%, обсяг - 46,7% (таблиця 6).

**Таблиця 6.** Розподіл часу покриття з порошковим дротом 45X13P5СІ за розмірами, площі і обсягу.

**Table 6.** Distribution of coating time with flux-cored wire 45X13P5СІ by size, area and volume.

D, мкм	0,-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Σ
n, %	30,0	43,5	12,0	4,4	1,8	91,7
A, %	5,4	22,6	19,8	13,12	9,8	70,72
V, %	1,12	8,3	12,92	12,4	11,56	46,3

**Таблиця 7.** Розподіл часу покриття з порошковим дротом 20X11P5С5І по розмірам, площі і об'єму.

**Table 7.** Distribution of coating time with flux-cored wire 20H11R5S5І by size, area and volume.

D, мкм	0,-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Σ
n, %	30,2	42,5	12,8	5,5	2,3	93,3
A, %	5	20,8	17,9	14,8	11,8	70,3
V, %	1,01	8,5	11,75	13,8	14,1	49,16

**Таблиця 8.** Число пор з розміром до 10 мкм.

**Table 8.** The number of pores up to 10 μm.

D, мкм	0,-2	2-4	4-6	6-8	8-10	Σ
n, %	31,8	43,9	13,5	5,7	2,8	97,7
A, %	5,3	21,7	18,9	15,9	12,7	74,5
V, %	1,15	8,8	12,7	14	13,9	50,55

Для покриття з порошкового дроту 20X11P5С5І максимальний розмір пор становить 27,7 мкм, мінімальний - 1,2 мкм, при цьому число пор з розміром до 10 мкм оцінюється в 92,5%, площа зазначених пор складає 69,4%, обсяг - 47,9% (таблиця 7). Для покриття з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ максимальний розмір пор становить 28,3 мкм, мінімальний - 0,5 мкм, при цьому число пор з розміром до 10 мкм оцінюється в 96,2%, площа зазначених пор складає 72,2%, обсяг - 49,8% (таблиця 8).

Число великих пор з розмірами більше 10 мкм для покриттів порошкового дроту 45X13P5СІ, 20X11P5С5І, 20X11P5Ю3СІ оцінюється в 2,2; 2,5 і 2,6%, що дозволяє зробити припущення про їх незначну роль в зниженні стійкості покриттів до ударно-абразивного зносу. дрібнопориста структура покриттів свідчить про стабільність процесу розпилення порошкового дроту. При цьому найменша пористість у покриття з порошковим дротом 20X11P5Ю3СІ (2,8%), а найбільша – у покриття з порошковим дротом 45X13P5СІ (3,5%).

## Висновки

1. Отже, Впровадження технології газотермічного напилення для зміцнення робочих органів ґрунтообробних машин, дає змогу розкрито вплив складу напилюваних матеріалів і режимів їх нанесення на процес при напиленні окисленні покриттів, що визначає їх фізико-механічні і експлуатаційні властивості, зокрема стійкість до ударно-абразивного зносу, характерного для умов роботи робочих органів ґрунтообробних машин.

2. Під час проведення дослідження було встановлено, залежність фізико-механічних і експлуатаційних властивостей металізаційних покриттів з порошкових дротів від їх системи легування. Мікротвердість покриттів з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ в середньому в 1,35 рази вище, пористість в 1,45 рази нижче, а зносостійкість в 1,15 рази вище, ніж для покриттів з порошкового дроту 60X13P5СІ. Металографічні дослідження показали, що структури металізаційних покриттів з порошкових дротів 60X13P5СІ, 20X11P5С5І, 20X11P5Ю3СІ відрізняються.

3. Експлуатаційні дослідження розпушувачих лап з покриттям з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ показали, що відносна зносостійкість зміцнених крилоподібних лемішів склала 2,18-2,66 рази, для двостороннього долота - 1,97-2,45 рази по відношенню до серійних, що обумовлено високими показниками фізико-механічних і експлуатаційних властивостей металізаційних покриттів. Розроблено технологічний процес дугової металізації зносостійких покриттів з порошкового дроту 20X11P5Ю3СІ, що дозволяє підвищити зносостійкість робочих поверхонь розпушувачими лапами культиватора і їх ресурс в 1,8 рази.

## Список літератури

1. Ринок сільгосптехніки України очима її дилерів: веб-сайт. URL: <http://www.agroprofi.com.ua/statti/1726-rynok-silhosptekhniky-ukrayiny-ochyma-yiyi-dyleriv> (дата звернення 01.10.21 р.).

2. *E. Posviatenko, N. Posviatenko, R. Budyak, L. Shvets, Y. Paladiichuk, P. Aksom, I. Rybak, B. Sabadach, V. Hryhorychen.* Influence of a material the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2018. № 5/12 (95). ISSN 1729-3774. P. 48-56.

3. *Шкільов О. В.* Стан матеріально-технічної бази сільського господарства та джерела її оновлення. Формування і реалізація державної політики розвитку матеріально-технічної бази агропромислового комплексу в Україні. Київ. ІАЕ УААН, 2003. С. 398-400ю

4. Ринок техніки 2020: чи буде трактор у полі: веб-сайт. URL: <https://agroportal.ua/ua/views/blogs/rynok-tekhniki-2020-budet-li-traktor-v-pole>.

5. *Нечопатенко А. В.* Вплив рівня зносу машинотракторного парку на основні результативні показники діяльності сільськогосподарських підприємств. Економіка та управління АПК. Біла Церква. 2012. Вип. 9 (97). С. 9-12.

6. *Paladiichuk Y.* Desining the structures of solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020. № 3 (7-105). P. 57-65.

7. *Добровольський А. Г.* Абразивна зносостійкість матеріалів: довідковий посібник. Київ: Техніка. 1989. 128 с.

8. *Сідашенко О. І.* Ремонт машин та обладнання: підручник. Харків. Міськдрук. 2010. 744 с.

9. *Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnyckyj T., Pokhmurskii V.* Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. Surface & Coatings Technology. 2013. Vol. 220. P. 27-35.

10. *Будко С. І.* Методи підвищення ефективності зміцнення деталей лемішно-відвальних плугів дуговим наплавлення твердими сплавами: автореф. дис. ... канд. техн. наук. 2009. 20 с.

11. *Молодецька Т. І.* Дослідження напружено-деформованого стану процесу згину покритих матеріалів. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Фізика». 2021. Вип. 50. С.15-24. doi: 10.24144/2415-8038.2021.50.15-24

## References

1. The market of agricultural machinery of Ukraine through the eyes of its dealers: website. URL: <http://www.agroprofi.com.ua/statti/1726-rynok-silhosptekhniky-ukrayiny-ochyma-yiyi-dyleriv>.

2. *E. Posviatenko, N. Posviatenko, R. Budyak, L. Shvets, Y. Paladiichuk, P. Aksom, I. Rybak, B. Sabadach, V. Hryhorychen.* (2018). Influence of a material the technological factors on improvement of operating properties of machine parts by reliefs and film coatings. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 5/12 (95). ISSN 1729-3774. 48-56.

3. *Shkilov O. V.* (2003). The state of the material and technical base of agriculture and the sources of its renewal. O.B. Schools. Formation and implementation of the state policy of development of material and technical base of the agro-industrial complex in Ukraine. IAE UAAS. 398-400.

4. Machinery market 2020: will the tractor be in the field: website. URL: <https://agroportal.ua/en/views/blogs/rynok-tekhniki-2020-budet-li-traktor-v-pole>.

5. *Nepochatenko A. V.* (2012). The influence of the level of wear of the machine-tractor fleet on the main performance indicators of agricultural enterprises. Economics and management of agro-industrial complex: coll. Science. wash. Bila Tserkva. 9(97). 9-12.

6. *Paladiichuk Y.* (2020). Desining the structures of solid-alloy elements for broaching the holes of significant diameter based on the assessment of their strength Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 3(7-105). 57-65.

7. *Dobrovolsky A. G.* (1989). Abrasive wear resistance of materials: a reference guide. Kyiv. Tehnika. 128.

8. *Sidashenko O.I.* (2010). Repair of machinery and equipment: Textbook. Miskdruk. 744.

9. *Wielage B., Pokhmurska H., Student M., Gvozdeckii V., Stupnyckyj T., Pokhmurskii V.* (2013). Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures. Surface & Coatings Technology. 220. 27-35.

10. *Budko S. I.* (2009). Methods for increasing the efficiency of strengthening the parts of ploughshare-dump plows by arc surfacing with hard alloys: author's ref. dis. ... cand. tech. Science. 20.
11. *Molodetska T. I.* (2021). Investigation of the Stress-Strain State of the Bending Process of Coated Materials. Scientific Herald of Uzhhorod University. Series "Physics", (50), 15-24. doi: 10.24144/2415-8038. 2021.50.15-24

#### ВОССТАНОВЛЕНИЕ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ МАШИИ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

*Ю. Б. Паладійчук, Ю. М. Мельник*

**Аннотация.** Интенсивное уплотнение почвы, вызванное применением современных мощных тракторов с большим весом и наличием в них больших рабочих скоростей, и как следствие уменьшается срок эксплуатации почвообрабатывающей техники. Сложные погодные условия вызывают увеличение нагрузки на рабочие органы почвообрабатывающих машин, при этом происходит износ поверхностей рабочих органов сельскохозяйственных агрегатов.

В статье рассматривается проблема повышения ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин за счет нанесением износостойких покрытий. Проанализированы виды износа и влияние абразивных материалов на рабочие органы почвообрабатывающих машин. Вызначенны оптимальные материалы и методы повышения износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин. Рассмотрены особенности формирования металлизационного покрытия, отражается в его структуре и характере дефектов, которые могут отличаться по размерам, плотности, морфологии и ориентации. Обгрунтованно зависимость свойств покрытий от системы легирования материала. Наведение оборудование и материалы для нанесения покрытий.

С учетом полученной информации, сделанной выводы и проведен анализ технологии нанесения износостойких покрытий для повышения ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин.

**Ключевые слова:** почвообрабатывающая техника, техническое обслуживание, обработка почвы, металлизация, наплавка, порошковая проволока, дуговая металлизация, напыления.

#### RESTORATION RESOURCE OF WORKING BODIES OF SOIL TREATMENT MACHINES BY APPLYING WEAR-RESISTANT COATINGS

*Yu. B. Paladiychuk, Ju. M. Melnik*

**Abstract.** Intensive soil compaction, which is caused by the use of modern powerful tractors with high weight and the presence of higher working speeds, and as a result reduces the service life of tillage equipment. Difficult weather conditions cause an increase in the load on the working bodies of tillage machines, with the wear of the surfaces of the working bodies of agricultural units.

The article considers the problem of increasing the resource of the working bodies of tillage machines due to the application of wear-resistant coatings. The types of wear and the influence of abrasive materials on the working bodies of tillage machines are analyzed. Determined optimal materials and methods to increase the wear resistance of the working bodies of tillage machines. Features of formation of a metallization covering which is reflected in its structure and character of defects which can differ in the sizes, density, morphology and orientation are considered. The dependence of the properties of coatings on the material doping system is substantiated. Equipment and materials for coating are given.

Taking into account the received information, conclusions are made and the analysis of technology of drawing wear-resistant coverings for increase of a resource of working bodies of tillage machines is carried out.

**Key words:** tillage equipment, maintenance, tillage, metallization, surfacing, flux-cored wire, arc metallization, spraying.

**Ю. Б. Паладійчук** ORCID 0000-0003-4257-9383.

**Ю. М. Мельник** ORCID 0000-0002-0827-5135.