

УДК 621.9.048.7:621.373.826:631.37

DOI: 10.37128/2520-6168-2022-1-3

**ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В АПК
ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ**

Ковальчук Юрій Олексійович, к.т.н., доцент
Пушка Олександр Сергійович, к.т.н., доцент
Войтік Андрій Володимирович, к.т.н., доцент
Уманський національний університет садівництва
Ковальчук Андрій Олексійович, к.т.н., доцент
Харківський національний університет повітряних сил імені Івана Кожедуба

Yuriy Kovalchuk, Ph.D., Associate Professor
Olexandr Pushka, Ph.D., Associate Professor
Andriy Voitik, Ph.D., Associate Professor
Uman National University of Horticulture
Andriy Kovalchuk, Ph.D., Associate Professor
Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University

В даній роботі досліджувався вплив лазерного оплавлення та легуючих елементів (TaB, MoB, B₄C) на коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування плазмових покриттів деталей автомобільного транспорту в АПК в умовах тертя як без мастильного матеріалу, так із мастильним матеріалом.

В умовах тертя без мастильного матеріалу основними факторами, що визначають зносостійкість деталі, є твердість легуваного шару та його хімічний склад. Сприятливий вплив на коефіцієнт тертя, а отже, на експлуатаційні характеристики поверхні здійснює вміст у поверхневому шарі боридів молібдену, танталу й карбиду бору, що забезпечують утворення вторинних структур, які розділяють поверхні тертя.

В результаті досліджень виявлена наступна тенденція: покриття, що мають менший коефіцієнт тертя, мають також і найменше вагове зношування та є найбільш зносостійкими. Легування боридом танталу збільшує теплостійкість покриттів, призводить до здрібнювання в них зерна й підвищення мікротвердості. Тому дане покриття можна рекомендувати для роботи в умовах тертя без мастильного матеріалу й підвищених тисків.

Дослідження показали, що на зносостійкість покриттів впливають режими лазерної обробки, контактне навантаження, спосіб оплавлення газотермічного покриття, а також його хімічний склад. Вибір режимів лазерної обробки забезпечує управління структурою й властивостями покриттів, а також впливає на їх зношування.

Також в результаті досліджень в умовах тертя з мастильним матеріалом було визначено, що найменший коефіцієнт тертя та найвищу зносостійкість має покриття після лазерного легування боридом молібдену. Поясненням цьому може послужити те, що лазерне легування покриттів на залізній основі боридом молібдену збільшує їхню теплостійкість. Це має значення при підвищених навантаженнях на досліджуваний зразок. Крім того, молібден, взаємодіючи з киснем повітря та мастилом, утворює оксид молібдену, що додатково знижує коефіцієнт тертя. Отже, покриття після лазерного легування боридом молібдену можна рекомендувати для роботи в умовах тертя з мастильним матеріалом при підвищених тисках.

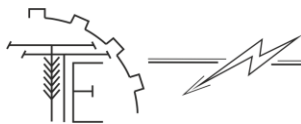
Ключові слова: лазерне зміцнення, наплавлення, коефіцієнт тертя, зносостійкість, деталі сільськогосподарської техніки.

Рис. 5. Літ. 11.

1. Постановка проблеми

Зараз у різних сферах життєдіяльності людини широко використовуються лазерні технології. Наприклад, однією із сфер їх застосування є розвідка [1].

Використання можливостей впливу лазерного випромінювання на залізобетонні сплави є актуальним також і в галузі сільського господарства, зокрема для зміцнення різних деталей автомобільного транспорту.



Одним із методів, що дозволяє значно збільшувати зносостійкість нових та відновлюваних деталей машин, є лазерне наплавлення, що забезпечує високі показники ефективності за рахунок створення на поверхні деталей спеціальних зносостійких покриттів.

Зносостійкість є найбільш важливим показником лазерного зміцнення та наплавлення. Процес зношування залежить від ряду факторів – поєднання фізико-механічних властивостей пар тертя, мікрогеометрії контактних поверхонь та їх твердості, питомих тисків, змащення тощо.

Тому доцільним буде дослідження впливу лазерного оплавлення та легуючих елементів на коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування покриттів деталей автомобільного транспорту в АПК в умовах тертя.

2. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вирішення задач, пов'язаних з визначенням властивостей сталей, що зазнають впливу лазерного випромінювання, привертає увагу багатьох науковців та вчених. Зокрема, цими питаннями займалися О.Г. Григор'янц, В.С. Черненко, Е.В. Харанжевський та інші, які вивчали вплив лазерного випромінювання на поверхню сталевих зразків у різних випадках та для різних матеріалів [2-4].

Зміцненням різних деталей техніки у сільському господарстві за допомогою лазерного випромінювання в останні роки займалися Д. Рутковський, І.Ф. Буханова, В.В. Дивинський та інші [5-9].

На даний час потребує більш глибокого та різностороннього дослідження вплив лазерного наплавлення різних покриттів на деталі автомобільного транспорту в АПК з метою підвищення їх зносостійкості. Питанням лазерного наплавлення покриттів займалися в своїх працях такі науковці, як В.П. Бірюков, О.Г. Девоїно, М.А. Кардаполова, А.С. Калиниченко та інші [10-11].

3. Мета досліджень

Метою даної роботи є дослідження впливу лазерного оплавлення та легуючих елементів (TaB, MoB, B₄C) на коефіцієнт тертя та інтенсивність зношування плазмових покриттів деталей автомобільного транспорту в АПК в умовах тертя як без мастильного матеріалу, так із мастильним матеріалом.

4. Викладення основного матеріалу

Досліджувались плазмові покриття, оплавлені газовим ацетиленовим пальником, лазером без легування й леговані MoB, TaB та B₄C.

Покриття на основі заліза мають високий опір зношуванню. Нижче наведені результати дослідження зносостійкості покриттів в умовах тертя без мастильного матеріалу (рис. 1) [11].

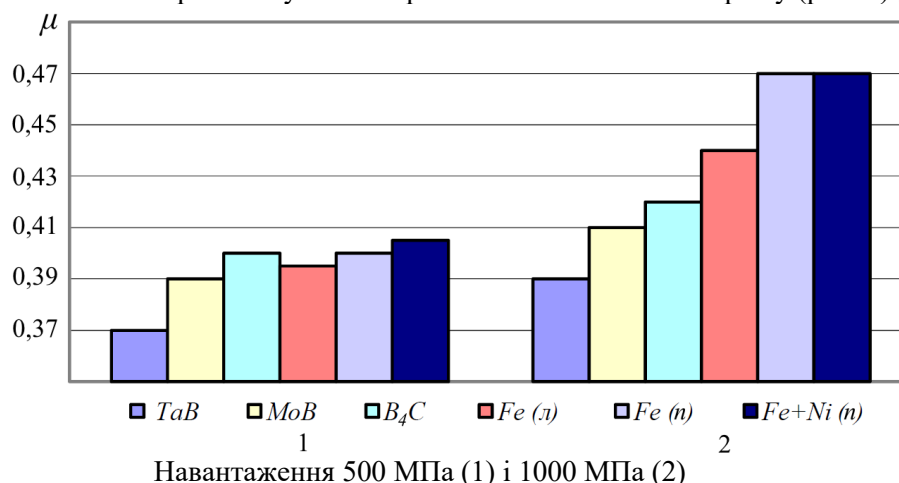


Рис. 1. Коефіцієнт тертя зразків для режиму без мастильного матеріалу:

TaB – після лазерного легування TaB; MoB – після лазерного легування MoB; B₄C – після лазерного легування B₄C; Fe (л) – після лазерного оплавлення порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф; Fe (п) – після оплавлення пальником порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф; Fe+Ni (п) – після оплавлення пальником подвійного шару порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижній шар) і ПГ-СР4 (верхній шар)

Чітко прослідковується однакова тенденція зміни коефіцієнта тертя без мастильного матеріалу

при питомих навантаженнях 500 і 1000 МПа. При навантаженні 500 МПа найменший коефіцієнт тертя визначений у покриттів, легованих ТаВ – 0,37. Далі по зростаючій: 0,39 – МоВ, 0,4 – покриття після лазерного легування В₄С. Лазерне оплавлення без легування порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф (Fe (л) на рис. 1) і оплавлення пальником напиленого подвійного шару порошків ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижній шар) + ПГ-СР4 (верхній шар) (Fe + Ni (п) на рис. 1) дають схожі результати коефіцієнта тертя ковзання порядку 0,4.

З підвищенням питомого навантаження до 1000 МПа найменший коефіцієнт тертя 0,39 у покриттів після легування ТаВ, 0,41 – легування МоВ, 0,42 – покриття після лазерного легування В₄С. Коефіцієнт тертя 0,44 відповідає зношуванню покриттів після оплавлення лазером (Fe (л) на рис. 1), а після оплавлення пальником напиленого подвійного шару порошків ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижній шар) + ПГ-СР4 (верхній шар) даний коефіцієнт становить 0,47 (Fe + Ni (п) на рис. 1).

Як відомо, в умовах тертя без мастильного матеріалу основними факторами, що визначають зносостійкість деталі, є твердість легованого шару та його хімічний склад. Сприятливий вплив на коефіцієнт тертя, а отже, на експлуатаційні характеристики поверхні здійснює вміст у поверхневому шарі боридів молібдену, танталу й карбиду бору, що забезпечують утворення вторинних структур, які розділяють поверхні тертя.

Параметри лазерної обробки та легування впливають також на вагове зношування (рис. 2) [11].

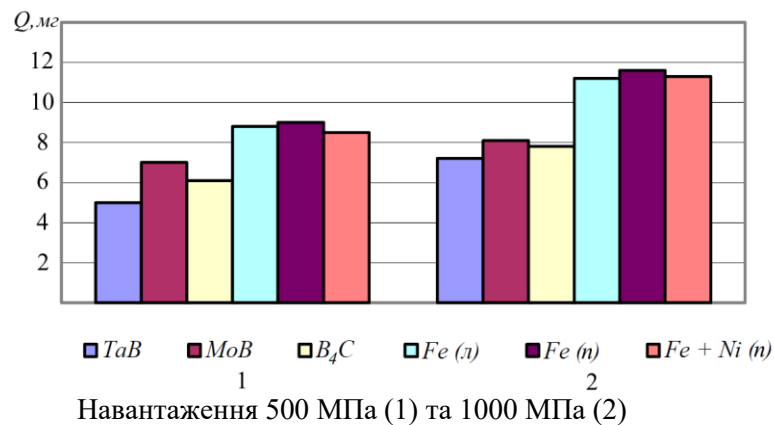


Рис. 2. Вагове зношування при терті без мастильного матеріалу для зразків:

ТаВ – після лазерного легування ТаВ; МоВ – після лазерного легування МоВ; В₄С – після лазерного легування В₄С; Fe (л) – після лазерного оплавлення порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф; Fe (п) – після оплавлення пальником порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф; Fe + Ni (п) – після оплавлення пальником подвійного шару порошків ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижній шар) та ПГ-СР4 (верхній шар)

Найменше вагове зношування в покриттів після лазерного легування ТаВ – 5 мг при питомому навантаженні на зразок 500 МПа та 7 мг при навантаженні 1000 МПа. Після лазерного легування Fe (п) найбільше вагове зношування становить 9 мг при питомому навантаженні на зразок 500 МПа та майже 12 мг при навантаженні 1000 МПа.

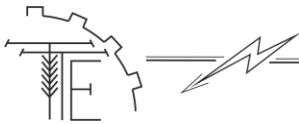
Виявлена наступна тенденція: покриття, що мають менший коефіцієнт тертя, мають також і найменше вагове зношування та є найбільш зносостійкими.

Із наведеного вище випливає, що легування боридом танталу збільшує теплостійкість покриттів, призводить до дрібнювання в них зерна й підвищення мікротвердості. Тому дане покриття можна рекомендувати для роботи в умовах тертя без мастильного матеріалу й підвищених тисків.

Дослідження показали, що на зносостійкість покриттів впливають режими лазерної обробки, контактне навантаження, спосіб оплавлення газотермічного покриття, а також його хімічний склад.

Вибір режимів лазерної обробки забезпечує управління структурою й властивостями покриттів, а також впливає на їх зношування (рис. 3) [11].

Так, при опроміненні оброблюваної поверхні великою кількістю енергії, що реалізується шляхом використання високих значень щільності потужності й низькими значеннями швидкості руху лазерного променя, формується груба дендритна структура зі зниженими значеннями фізико-механічних властивостей, і відповідно зношування таких покриттів в умовах тертя високе. Залежно від швидкості переміщення лазерного променя зносостійкість захисних покриттів змінюється відповідно до їхньої твердості. До формування квазіевтектичних структур, твердість яких найвища, при збільшенні швидкості руху лазерного променя V зношування поверхонь зменшується, що особливо чітко прослідковується при більших значеннях потужності лазерного випромінювання, а при



подальшому збільшенні швидкості практично не змінюється, поки зміцнююча боридна фаза мілкодисперсна. При швидкостях $V > 5,25$ мм/с відбувається укрупнення зміцнюючої фази, та, незважаючи на підвищення мікротвердості, твердість покриттів та їх зносостійкість зменшуються, тому що в цьому випадку армованість сплаву недостатня.

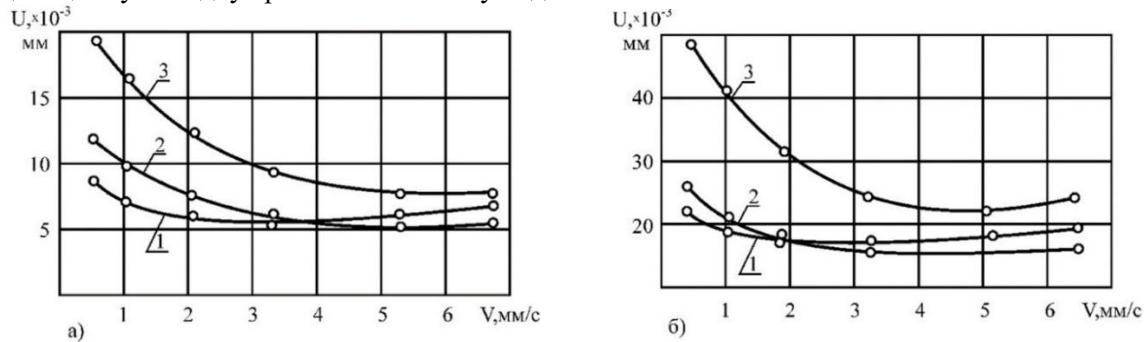


Рис. 3. Залежність зношування покриттів від швидкості переміщення променя при значеннях щільності потужності q : 1 – $1,1 \times 10^8$ Вт/м²; 2 – $1,6 \times 10^8$ Вт/м²; 3 – $2,1 \times 10^8$ Вт/м²; при режимах випробувань: а): $P = 2,3$ МПа; б): $P = 6,9$ МПа

Однак, при врахуванні зміни щільності потужності лазерного випромінювання при оптимальних режимах оплавлення, що забезпечують високі властивості покриттів, така відповідність твердості й зносостійкості не дотримується. Так, покриття, сформовані при $q = 1,1 \times 10^8$ Вт/м² і $V = 2,08$ мм/с, із твердістю HRC 67 зношуються трохи більше, ніж покриття з HRC 62 ($q = 1,6 \times 10^8$ Вт/м², $V = 3,33$ мм/с). А при збільшенні контактної навантаженні поряд із загальним збільшенням зношування покриттів ця невідповідність ще більш відчутна, що пов'язано зі збільшенням крихкості твердих сплавів і відсутністю в них міцного структурного зв'язку.

Однією із функцій мастила є поділ тертьових поверхонь. Мастило утворює між тертьовими поверхнями проміжний шар, при цьому процес тертя без мастильного матеріалу двох твердих тіл замінюється процесом внутрішнього тертя в самій мастильній речовині.

У якості середовища для проведення експериментів щодо визначення коефіцієнтів тертя ковзання використовувалося базове мастило SN150.

Мастило різко в 3,6–4 рази знижує коефіцієнт тертя (рис. 4) [11] у порівнянні з тертям без мастильного матеріалу. При питомому навантаженні 1000 МПа найменший коефіцієнт тертя в покриттів після легування MoB – 0,1. Далі по зростаючій – 0,11 після легування TaB, 0,115 – легування B_4C . У покриттів, оплавлених лазером без легування (див. рис. 4, Fe (л)) і пальником одношарового (див. рис. 4, Fe (п)) і двошарового (див. рис. 4, Fe + Ni (п)) порошків спостерігається однаковий коефіцієнт тертя – 0,125.

Найменше вагове зношування має покриття після лазерного легування MoB – 0,8 мг, найбільше – у покриттів оплавлених лазером без легування (рис. 5, Fe (л)) [11] і пальником одношарового (див. рис. 5, Fe (п)) і двошарового (див. рис. 5, Fe + Ni (п)) порошків, у них спостерігається однакове вагове зношування – 1,3 мг.

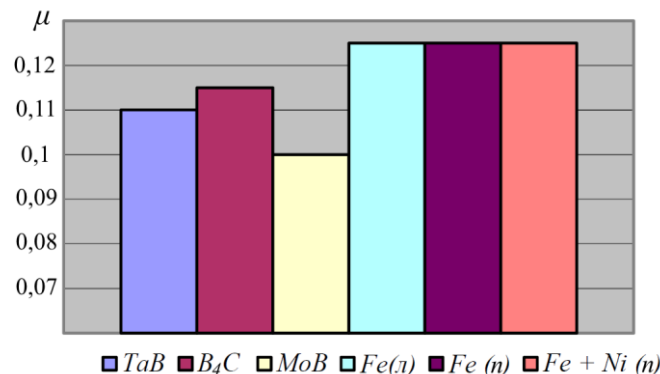


Рис. 4. Коефіцієнт тертя зразків з мастильним матеріалом при питомому навантаженні 1000 МПа: TaB – після лазерного легування TaB; MoB – після лазерного легування MoB; B_4C – після лазерного легування B_4C ; Fe (л) – після лазерного оплавлення порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф; Fe (п) – після оплавлення пальником порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф; Fe + Ni (п) – після оплавлення пальником подвійного шару порошку ПР-Х4Г2Р4С2Ф (нижній шар) і ПГ-СР4 (верхній шар)

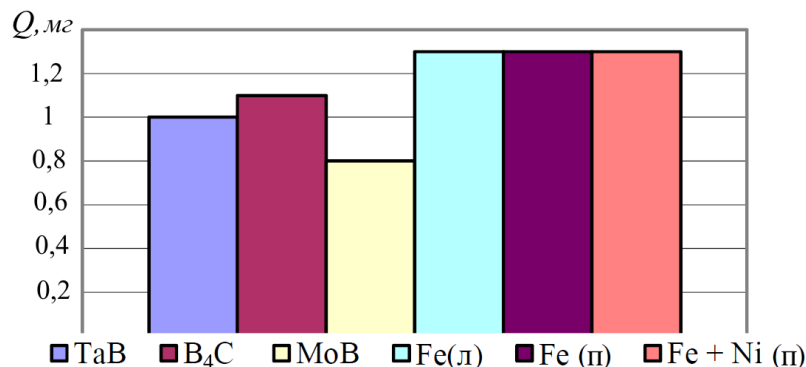
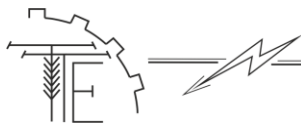


Рис. 5. Вагове зношування зразків при терті з мастильним матеріалом при питомому навантаженні 1000 МПа:

TaB – після лазерного легування *TaB*; *MoB* – після лазерного легування *MoB*; *B₄C* – після лазерного легування *B₄C*; *Fe (л)* – після лазерного оплавлення порошку *ПР-Х4Г2Р4С2Ф*; *Fe (п)* – після оплавлення пальником порошку *ПР-Х4Г2Р4С2Ф*; *Fe + Ni (п)* – після оплавлення пальником подвійного шару порошку *ПР-Х4Г2Р4С2Ф* (нижній шар) і *ПГ-СР4* (верхній шар)

Найменший коефіцієнт тертя має покриття після лазерного легування боридом молібдену, воно й саме зносостійке в умовах тертя з мастильним матеріалом.

Поясненням цьому може послужити те, що лазерне легування покриттів на залізній основі боридом молібдену збільшує їхню теплостійкість. Це має значення при підвищених навантаженнях на зразок. Крім того, молібден, взаємодіючи з киснем повітря та мастилом, утворює оксид молібдену, що додатково знижує коефіцієнт тертя.

Отже, покриття після лазерного легування боридом молібдену можна рекомендувати для роботи в умовах тертя з мастильним матеріалом при підвищених тисках.

5. Висновок

Із усього перерахованого вище випливає, що правильний вибір режимів лазерної обробки й додаткове легування забезпечує можливість отримання потрібних структури та властивостей покриттів, впливає на їхнє зношування. Залежно від швидкості променя лазера зносостійкість захисних покриттів змінюється відповідно до їх твердості.

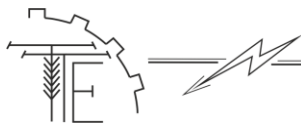
Зі збільшенням швидкості променя лазера відбувається здрібнювання структури, зростання мікротвердості покриттів, що призводить до зменшення коефіцієнта тертя, а, отже, і до збільшення зносостійкості покриттів в умовах тертя як без мастильного матеріалу, так і з ним.

Додаткове легування боридом танталу підвищує зносостійкість покриттів в умовах тертя без мастильного матеріалу при підвищених тисках. Лазерне легування боридом молібдену збільшує зносостійкість покриттів в умовах тертя з мастильним матеріалом і підвищених тисках на зразок. Що стосується легування карбідом бору, то при підвищеному питомому навантаженні (1000 МПа) відбувається руйнування твердих карбідних часток, що призводить до зниження зносостійкості покриттів.

В умовах тертя зі змащенням при невеликому контактному навантаженні зносостійкість покриттів з досліджуваних самофлюсованих сплавів на основі заліза, оплавлених лазерним випромінюванням, відповідає зносостійкості покриттів із традиційних дефінітних нікельхромборкремнієвих сплавів, наприклад, *ПР-Н70Х17С4Р4*, а у випадку абразивного зношування перевищує значення останніх. Це надає право для використання більш дешевих боридних евтектичних сплавів на основі заліза *ПР-Х4Г2Р4С2* у якості матеріалів, застосовуваних для зміцнення деталей машин, що працюють без ударних навантажень, шляхом створення захисних покриттів за допомогою лазерного оплавлення.

Список використаних джерел

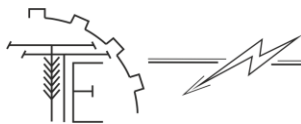
1. Заболотный В.И., Ковальчук Ю.А. Модель отражающей поверхности лазерного канала разведки информации. *Прикладная радиоэлектроника*. 2007. Т. 6, № 3. С. 432–434.
2. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки: навч. посібник. Київ, 2008. 166 с.
3. Schaaf P. Laser nitriding of metals. *Progress in Materials Science*. 2002. Vol. 47. P. 1–161.



4. Laser-plasma treatment of structural steel / A. Tokarev et al. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 788. P. 58–62.
5. Завойко О.С. Дослідження лазерного зміцнення колінчатих валів та механіко-термічної обробки при руйнуванні на втому та знос. *Фізика і хімія твердого тіла*. 2014. Т. 15. № 4. С. 846–855.
6. Rutkowski, D., Ambroziak, A. Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*. 2014. № 5, 49–57.
7. Ковальчук Ю.О., Кравченко В.В., Оляднічук Р.В. Лазерна обробка деталей сільськогосподарської техніки з чавуну. *Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти*. 2017. Вип. 5. С. 92–99.
8. Пашкова Г.І. Підвищення працездатності чавунних колінчастих валів потужних транспортних дизелів комбінованими методами зміцнення: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 Харків, 2008. 24 с.
9. Мажейка О.Й. Модифікування технології лазерної обробки деталей сільськогосподарської техніки. *Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. 2008. Вип. 21. С. 164–167.
10. Ковальчук Ю.О., Лісовий І.О. Дослідження структури та мікротвердості обробленої лазером поверхні чавунів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодерж. міжвідомч. наук.-техн. зб.* 2018. Вип. 48. С. 54–61.
11. Microstructure of TiN coatings synthesized by direct pulsed Nd:YAG laser nitriding of titanium: Development of grain size, microstrain, and grain orientation / D. Hoche et al. *Applied Physics A*. 2008. Vol. 91. P. 305–314.

References

- [1] Zabolotnyi, V.I., Kovalchuk, Yu.A. (2007). Model otrazhayushchey poverkhnosti lazernogo kanala razvedki informatsii. *Prikladnaya radioelektronika*. Vol. 6, 3, 432–434.
- [2] Chernenko, V.S., Kindrachuk, M.V., Dudka, O.I. (2008). Promenevi metody obrobky. Kyiv: Kondor [in Ukrainian].
- [3] Schaaf, P. (2002). Laser nitriding of metals. *Progress in Materials Science*, Vol. 47, 1–161 [in English].
- [4] Tokarev, A., Bataeva, Z., Grachev, G., Smirnov, A., Khomyakov, M. & Gerber, A. (2015). Laser-plasma treatment of structural steel. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 788, 58–62 [in English].
- [5] Zavoiko, O.S. (2014). Doslidzhennia lazernoho zmitsnennia kolinchatykh valiv ta mekhaniko-termichnoi obrobky pry ruinuванні na vtomu ta znos. *Fizyka i khimiia tverdoho*. Vol. 15, 4, 846–855 [in Ukrainian].
- [6] Rutkowski, D., Ambroziak, A. (2014). Effect of laser strengthening on the mechanical properties of car body steels presently used in automotive industry. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa*, 5, 49–57 [in English].
- [7] Kovalchuk, Yu.O., Kravchenko, V.V., Olyadnichuk, R.V. (2017). Lazerna obrobka detaley silskohospodarskoyi tekhniki z chavunu. *Visnyk Ukrayinskoho viddilennya Mizhnarodnoyi akademiyi ahrarnoyi osvity*. Issue 5, 92–99 [in Ukrainian].
- [8] Pashkova, H.I. (2008). Pidvyshchennia pratsezdatsnosti chavunnykh kolinchastykh valiv potuzhnykh transportnykh dyzeliv kombinovanyimi metodami zmitsnennia. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kharkiv [in Ukrainian].
- [9] Mazheyka O.Y. (2008). Modyfikuvannya tekhnolohiyi lazernoyi obrobky detaley silskohospodarskoyi tekhniki. *Zbirnyk naukovykh prats Kirovohradskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiya*. Issue 21, 164–167 [in Ukrainian].
- [10] Kovalchuk, Yu.O., Lisovyi I.O. (2018). Doslidzhennia struktury ta mikrotverdosti obroblenoyi lazerom poverkhni chavuniv. *Konstruyuvannya, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiya silskohospodarskykh mashyn: Zahalnodержavnyi mizhvidomchyi nauko-tekhnichnyi zbirnyk*. Issue 48, 54–61 [in Ukrainian].
- [11] Hoche, D., Schikora, H., Zutz, H., Queitsch, R., Emmel, A., Schaaf, P. (2008). Microstructure of TiN coatings synthesized by direct pulsed Nd:YAG laser nitriding of titanium: Development of grain size, microstrain, and grain orientation. *Applied Physics A*, Vol. 91, 305–314 [in English].



INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF ROAD TRANSPORT PARTS IN THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX BY APPLICATION OF LASER DEPOSITION

In this work, we studied the effect of laser melting and alloying elements (TaB , MoB , B_4C) on the friction coefficient and wear rate of plasma coatings of automotive parts in the agro-industrial complex under friction conditions both without lubricant and with lubricant.

Under friction without lubrication, the main factors that determine the wear resistance of the part are the hardness of the alloyed layer and its chemical composition. The content of molybdenum, tantalum and boron carbide borides in the surface layer, which provide the formation of secondary structures separating the friction surfaces, has a favorable effect on the coefficient of friction, and, consequently, on the operational characteristics of the surface.

As a result of the research, the following trend was revealed: coatings with a lower coefficient of friction also have the least weight wear and are the most wear-resistant. Alloying with tantalum boride increases the heat resistance of coatings, leads to grain refinement in them, and an increase in microhardness. Therefore, this coating can be recommended for operation in conditions of friction without lubricant and high pressures.

Studies have shown that the wear resistance of coatings is affected by laser processing modes, contact load, the method of reflow of a gas-thermal coating, as well as its chemical composition. The choice of laser processing modes provides control over the structure and properties of coatings, and also affects their wear.

Also, as a result of studies under friction conditions with a lubricant, it was determined that the coating after laser alloying with molybdenum boride has the lowest coefficient of friction and wear resistance. This can be explained by the fact that laser doping of iron-based coatings with molybdenum boride increases their heat resistance. This is important at increased loads on the test sample. In addition, molybdenum, interacting with atmospheric oxygen and lubricant, forms molybdenum oxide, which further reduces the coefficient of friction. Therefore, the coating after laser alloying with molybdenum boride can be recommended for operation under conditions of friction with a lubricant at elevated pressures.

Key words: laser hardening, hardfacing, coefficient of friction, wear resistance, agricultural machinery parts.

Fig. 5. Ref. 11.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Ковальчук Юрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва (вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська обл., 20301, Україна, e-mail: temp14053@gmail.com).

Пушка Олександр Сергійович – кандидат технічних наук, декан інженерно-технологічного факультету, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва (вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська обл., 20301, Україна, e-mail: pushka79@ukr.net).

Войтік Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, завідувач кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва (вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська обл., 20301, Україна, e-mail: av.afex81@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8196-3102>).

Ковальчук Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики та радіоелектроніки Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба (вул. Сумська, 77/79, м. Харків, 61023, Україна, e-mail: Inna700nf@gmail.com).

Yuriy Kovalchuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Agroengineering, Uman National University of Horticulture (Str. Instytutaska, 1, Uman, Cherkasy region, 20301, Ukraine, e-mail: temp14053@gmail.com).

Olexandr Pushka – Candidate of Technical Sciences, Dean of Engineering and Technology Faculty, Associate Professor of the Department of Agroengineering, Uman National University of Horticulture (Str. Instytutaska, 1, Uman, Cherkasy region, 20301, Ukraine, e-mail: pushka79@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-6481-8536>).

Andriy Voitik – Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Agroengineering, Uman National University of Horticulture (Str. Instytutaska, 1, Uman, Cherkasy region, 20301, Ukraine, e-mail: av.afex81@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8196-3102>).

Andriy Kovalchuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Radioelectronics, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University (Str. Sumska, 77/79, Kharkiv, 61023, Ukraine, e-mail: Inna700nf@gmail.com).