

УДК 621.791

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.94.0.18

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ПОРШНЕВИХ КІЛЕЦЬ ПІСЛЯ ГАЗОТЕРМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

Глушкова Д. Б., Багров В. А.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Наведено результати дослідження структури та типу зміни твердості поверхні поршневих кілець після газотермічного напилення, в процесі шліфування, обкату й пробігу дизелів. Визначено, що формування газотермічного покриття під час одночасного напилення молібдену і сталі 11X18M на поршневі кільця з чавуну формується шарувата структура, яка складається переважно з часток сталі та молібдену. Доведено, що експлуатаційні властивості сталь-молібденового покриття підвищуються в 3–4 рази, як порівняти з традиційними методами.

**Ключові слова:** сталь-молібденове покриття, структура, мікротвердість, поршневі кільця, газотермічне напилення.

### Вступ

Нині однією з важливих проблем машинобудування є підвищення надійності й довговічності машин, зокрема збільшення зносостійкості деталей. Актуальним також є питання підвищення довговічності пар тертя поршневої групи пари кільце-гільза.

Недостатня зносостійкість матеріалів лімітує збільшення продуктивності машин і термінів їхньої експлуатації, збільшує витрати на ремонт і запасні частини.

Не завжди необхідний є комплекс властивостей поршневих кілець може бути сформований традиційними методами термічного й хіміко-термічного оброблення. Все частіше для підвищення експлуатаційних властивостей використовують нові методи поверхневого зміцнення.

### Аналіз публікацій

До прогресивних способів зміцнення та відновлення деталей машин, зокрема до циліндро-поршневої групи належать високотемпературні методи нанесення покриттів – плазмові, газоплазмові, електродуги напилення [1–4]. У галузі вітчизняного й закордонного машинобудування покриття з електролітичного хрому в деяких випадках задовольняють вимогам, що висуваються до поршневих кілець. Маючи достатню твердість, хромовані покриття забезпечують стійкість до абразивного зношення. Однак пористий шар хрому, товщиною 40–50 мкм, за декілька годин спрацьовується. Електролітичний хром незадовільно працює на тертя та зношування

за високих температурах, що призводить до знеміцнення.

Нині в галузі машинобудування використовують процес напилення поршневих кілець молібденом [5]. Він містить комплекс різноманітних фізико-механічних властивостей.

Перспективним є процес напилення на поршневі кільця різноманітних сплавів або псевдосплавів, які містять молібден. Останні напилюються з двох або більше різнорідних матеріалів, що дає змогу отримати гетерогенну структуру.

Здійснення цих процесів призвело до ідеї використання газотермічних комбінованих покриттів, що складаються з механічної суміші компонентів і продуктів їхньої взаємодії у високотемпературному струмені.

### Мета та постановка задачі

Метою цієї роботи було вивчення структури та типу зміни твердості поверхневого шару, отриманого газотермічним комбінованим напиленням після шліфування, обкату та пробігу дизеля, тобто на всіх стадіях виробничого циклу.

Завдання дослідження: 1) визначити особливості формування газотермічного покриття під час одночасного електродугового напилення молібдену й сталі 11X18M на поршневі кільця з чавуну; 2) порівняти мікротвердості дрітків молібдену й сталі зі сталемолібденовим покриттям під час напилення; 3) визначити стійкість сталемолібденового покриття до температурного впливу.

### Матеріал і методика дослідження

Об'єктом дослідження є газотермічне покриття з молібденової сталі, нанесене на високоміцний чавун. Покриття на кільця наносили методом дводрової металізації з незалежною подачею дровів зі сталі 11X18M і молібдену. У табл. 1 наведено режим напилення.

Таблиця 1 – Режим напилювання

Напруга на дузі, В	Сила струму, А	Тиск стисненого повітря, МПа	Діаметр повітряного сопла, мм
40	400	0,5–0,55	8

Для вивчення структури отриманого покриття використовували металографічний мікроскоп НЕОРНОТ 2. Стан поверхневого шару після нанесення покриття, шліфування, обкатки й пробігу дизеля вивчали за допомогою вимірювання мікротвердості на приборі ПМТ-3.

### Результати досліджень та їх обговорення

Металографічні дослідження напиленого шару визначили шарувату структуру покриття, зокрема частки сталі та молібдену розподілені в кожному поперечному перетині нерівномірно, а послідовно шарами, що чергуються. Такий розподіл часток зумовлений особливостями руху в газовому струмені частинок різної маси.

Оскільки неможливо було вибрати тип травителя, який одночасно визначає структуру молібдену і неіржавкої сталі, то застосовували послідовне травлення шарів на одну (рис. 1, б), а потім на іншу складову. На рис. 1 наведено мікроструктуру напиленого шару.

Найважливішою характеристикою напиленого шару, що визначає тип роботи покриття, є його зв'язок з поверхнею підкладки. Металографічний аналіз межі поділу сталемолібденового покриття – чавун для багатьох кілець і різних ділянок одного кільця демонструє, що покриття щільно взаємодіє з підкладкою вздовж усього профілю нанесення (рис. 2).

Визначена металографічна структура частинок молібдену демонструє їхню дрібнозернистість. Це зумовлено тим, що швидкісна кристалізація під тиском сприяє створенню дрібнозернистої структури.

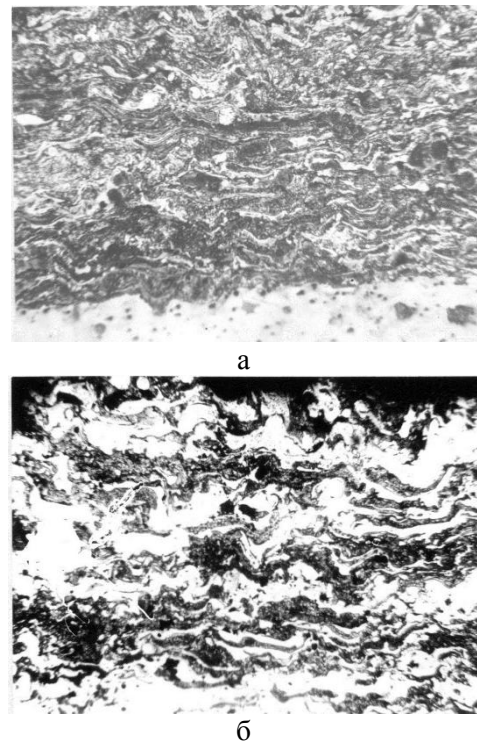


Рис. 1. Мікроструктура напиленого шару: а – повне травлення,  $\times 115$ ; б – травлення на молібден,  $\times 115$

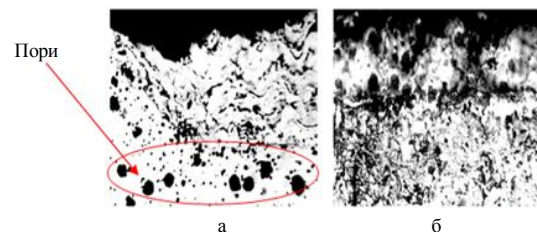


Рис. 2. Межа поділу сталемолібденового покриття – чавун: а – полірований зразок; б – травлення;  $\times 300$

На рис. 3 наведена мікротвердість молібденової складової після напилення (а), шліфування (б), обкату 100 г (в), а на рис. 4 – мікротвердість складової сталі 11X18M після напилення (а), шліфування (б), обкату 100 г (в), де  $P_i$  – середнє значення мікротвердості на зразках під час вимірювання у відсотках.

Для визначення впливу умов експлуатації на структуру та твердість сталемолібденових покриттів були встановлені поршневі кільця з нанесеними на них покриттями на парних блоках 10-циліндрового двигуна тепловоза. Після 100000 км пробігу, що дорівнює 4000 годинам роботи, були зняті й досліджені комплекти з чотирьох кілець.

У табл. 2 наведені значення мікротвердості досліджуваних матеріалів.

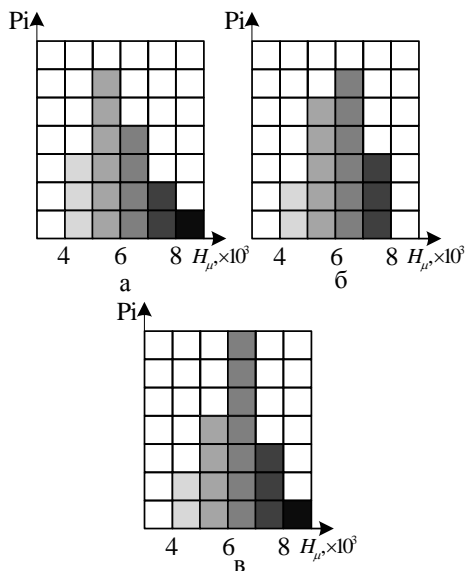


Рис. 3. Мікротвердість частинок молібдену: а – після напилення; б – після шліфування; в – після обкату 100 год

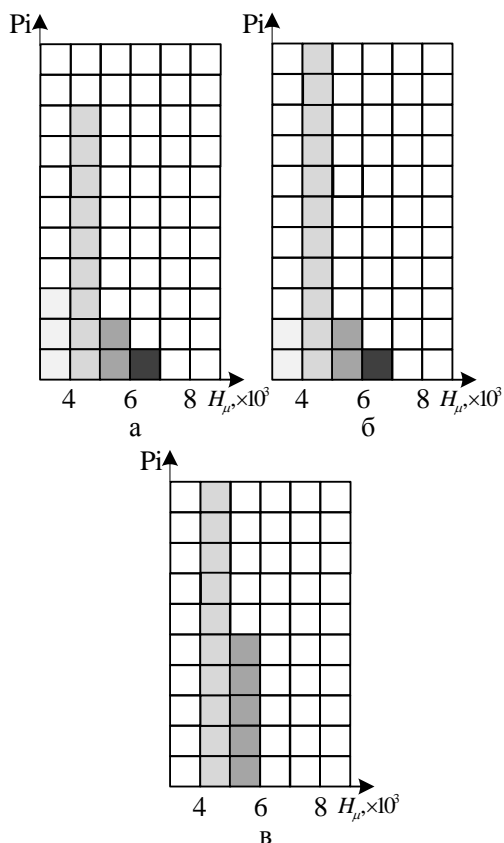


Рис. 4. Мікротвердість частинок сталі: а – після напилення; б – після шліфування; в – після обкату

Порівняльний аналіз даних, наведених в табл. 2 і на рис. 3, свідчить про значне зміцнення молібдену в процесі напилення. Найбільша кількість частинок молібдену містить мікротвердість  $H_{\mu}$  в діапазоні 5000–7000, а

мікротвердість вихідного дроту становить лише 2000. Це пов'язано з найбільшим насиченням молібдену домішками, яке здійснюється в процесі напилення. Металографічні дослідження демонструють, що основна маса частинок має структуру перенасиченого твердого розчину з початковими стадіями старіння. Основною структурою частинок сталі є частинки зі структурою більш-менш рівномірно розподілених в матриці зернистих карбідів.

Таблиця 2 – Твердість досліджуваних матеріалів

Матеріал	Мікротвердість, $H_{\mu}$
Дріт молібденовий	1800–2000
Дріт сталевий	2900–3200
Стале-молібденове покриття після напилення:	
Молібденова складова	4000–8000
Складова сталі 11X18M	3000–6000
Стале-молібденове покриття після шліфування	
Молібденова складова	5000–8000
Складова сталі 11X18M	3000–6000

Частинки сталі також помітно зміцнюються. Найбільшу кількість часток має твердість  $H_{\mu}$  4000–5000.

Поршневі кільця зі стале-молібденовим покриттям за технічними умовами експлуатуються після шліфування. Після цього найбільша кількість частинок молібдену відповідає діапазону мікротвердості, що дорівнює 5000–6000, але спостерігається помітне зрушення твердості в інтервалі 6000–7000, як порівняти з напиленням.

Для сталі (рис. 4, а, б) після шліфування збільшується кількість часток з твердістю в інтервалі 4000–5000. Таким чином, відбувається деяке підвищення мікротвердості сталі (рис. 4).

Теоретичний і практичний інтерес має тип зміни мікротвердості досліджуваних покриттів після подальшого оброблення, зокрема після обкату.

Як демонструють графіки, мікротвердість частинок молібдену та сталі після обкату збільшується. Структура складової після обкату дорівнює вихідному стану.

Експериментальні дані свідчать про стабільність твердості як частинок молібдену, так і часток сталі, що є важливою умовою для роботи покриття в умовах експлуатації.

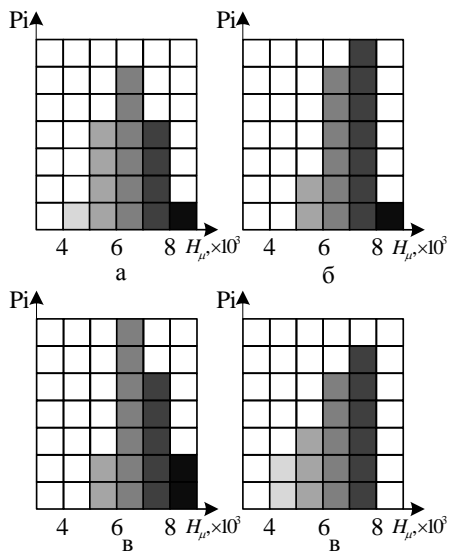


Рис. 5. Мікротвердість молибденової складової після пробігу 1000000 км: а, в – верхнє кільце; б, г – нижнє кільце

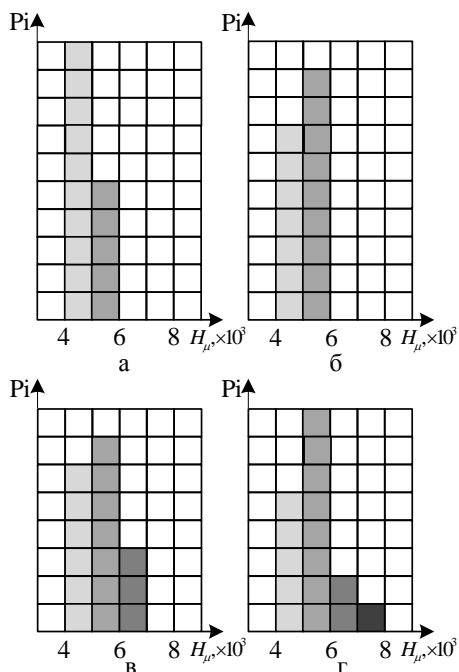


Рис. 6. Мікротвердість частинок сталі після пробігу 100000 км: а, в – верхнє кільце; б, г – нижнє кільце

Необхідно зазначити наявність стабільності структури. Дослідження поверхні зношення свідчить, що здебільшого реалізується абразивне зношення.

Таким чином, запропонована технологія нанесення газотермічного напилення істотно підвищує термін використання поршневих кілець, які працюють в умовах зношення.

## Висновки

1) визначені особливості формування газотермічного покриття в процесі одночасного електродугового напилення молибдену та сталі 11Х18М на поршневі кільця з чавуну. Формується шарувата структура, яка складається переважно з часток сталі та молибдену. Визначено причини широкого діапазону властивостей часток сталі та молибдену. Доведено, що експлуатаційні властивості сталемолібденового покриття зумовлені його антифрикційними властивостями, пористістю, яка забезпечує самозмащування поверхні тертя, адгезією з підкладкою, яка підвищується в 3–4 рази на відміну від традиційних методів;

2) порівняльний аналіз мікротвердості дрітків молибдену та сталі зі сталемолібденовим покриттям свідчить про значне зміцнення частинок молибдену та сталі в процесі напилення, що пояснюється процесами структуроутворення.

Під час подальшого шліфування покриття відбувається деяке підвищення мікротвердості;

3) визначена стійкість сталемолібденового покриття до температурного впливу. Під час нагрівання до 300 °С твердість покриття не зменшується, а збільшується внаслідок зношення молибденової складової та зменшення кількості залишкового аустеніту в сталі. Проаналізовані зміни структури та властивостей сталемолібденових покриттів у процесі експлуатації. Визначено, що під час експлуатації, як і під час стендових випробувань, спостерігається додаткове зміцнення покриттів.

## Література

1. Калита В. И., Комлев Д. И. Плазменные покрытия с нанокристаллической и аморфной структурой: монография Москва: «Лидер М», 2008. 388 с
2. Ельцов В. В. Восстановление и упрочнение деталей машин : электронное учебное пособие. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2015. Режим доступа: <https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/49/1/Eltsov%201-81-13%20-%20eui%20-%20Z.pdf>.
3. Increase of wear resistance of the critical parts of hydraulic hammer by means of ion-plasma treatment / Hlushkova D. B., Ryzhkov Yu. V., Kostina L. L. Problems of Atomic Science and Technology. 2018. 113 (1). P. 208–211.
4. Development and Investigation of a Steel-Molibdenum Coating Deposited by the Gas-Thermal Method / Bolshakov V. I., Hlushkova D. B., Kalinin O. V. Металлофизика

и новейшие технологии. 2019. Т. 41. Вып. 1. С. 39–46

5. Increasing Tribo Unit Wear Resistance with the Ion-Plasma Coating / Hlushkova D. B., Ventsel Ye., Orel O. Tribology in Industry. 2019. Vol. 41. P. 43–49.

### References

1. Kalita V. I., Komlev D. I. Plasma coatings with nanocrystalline and amorphous structure: monograph. Moskva: "Leader M", 2008. 388 p.
2. Eltsov V. V. Restoration and hardening of machine parts: electronic textbook, handbook. Togliatti: Publishing house of TSU, 2015. Access mode: <https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/49/1/Eltsov%201-81-13%20-%20eui%20-%20Z.pdf>.
3. Increase of wear resistance of the critical parts of hydraulic hammer by means of ion-plasma treatment / Hlushkova D. B., Ryzhkov Yu. V., Kostina L. L. Problems of Atomic Science and Technology. 2018. 113 (1). P. 208–211.
4. Development and Investigation of a Steel-Molibdenum Coating Deposited by the Gas-Thermal Method / Bolshakov V. I., Hlushkova D. B., Kalinin O. V. Metal Physics and New Technologies. 2019. T. 41. Issue. 1. S. 39–46
5. Increasing Tribo Unit Wear Resistance with the Ion-Plasma Coating / Hlushkova D. B., Ventsel Ye., Orel O. Tribology in Industry. 2019. Vol.41. P. 43–49.

**Глушкова Діана Борисівна**, д.т.н., проф., завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 057-707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua),

**Багров Валерій Анатолійович**, к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 057-707-37-29, E-mail: [havetabanca@ukr.net](mailto:havetabanca@ukr.net), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

### Research of surface layer properties of piston rings after gas thermal spraying

**Abstract. Problem.** Today, one of the important problems of mechanical engineering is to increase the reliability and durability of machines. A special place in this matter is occupied by increasing the wear resistance of parts. As for diesel construction, the problem of increasing the hardness and wear resistance of piston rings is very important. **Goal.** The goal is study of the structure and nature of changes in the hardness of the surface layer obtained by gas-thermal combined spraying, after grinding,

running-in and mileage of the diesel engine, i. e., at all stages of the production cycle. **Methodology.** The coating on the rings was applied by the method of two-wire metallization with independent supply of wires made of 11X18M steel and molybdenum. Metallographic analysis was used to study the structure of the obtained coating. The condition of the surface layer after coating, grinding, running-in and diesel run was studied by measuring the microhardness. **Results.** Metallographic analysis of the interface between steel and molybdenum coating – cast iron for many rings and different parts of one ring shows that the coating interacts closely with the substrate along the entire application profile. The structure of molybdenum particles demonstrates their fineness. This is due to the fact that the rapid crystallization under pressure contributes to the creation of a fine-grained structure. Comparison of the microhardness of molybdenum and steel wires with steel-molybdenum coating indicates a significant strengthening of molybdenum and steel particles during spraying, due to the processes of structure formation. Experimental data indicate the stability of the hardness of both molybdenum particles and steel particles, which is important for the coating in operation. **Originality.** Features of formation of a gas-thermal covering at a simultaneous electric arc spraying of molybdenum and 11X18M steel on piston rings from pig-iron are established. It is shown that a layered structure is formed, which consists mainly of steel and molybdenum particles. The reasons for the wide range of properties of steel and molybdenum particles have been clarified. It is proved that the operational properties of steel-molybdenum coating are due to its antifriction properties, porosity, which provides self-lubrication of the friction surface, good adhesion to the substrate, which increases by 3–4 times compared to traditional methods. **Practical value.** The proposed technology of gas-thermal spraying significantly increases the service life of piston rings operating in wear conditions.

**Key words:** steel-molybdenum coating, structure, microhardness, piston rings, gas-thermal spraying

**Hlushkova Diana**, Doct. Sc. (Tech.), Head of the Department of Technology of Metals and Materials Science, Phone: 057-707-37-29, e-mail: [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua),

**Bagrov Valeriy**, Cand. Sc. (Tech.), Associate Professor of the Department of Technology of Metals and Materials Science, Phone: 057-707-37-29, e-mail: [havetabanca@ukr.net](mailto:havetabanca@ukr.net),

Kharkov National Automobile and Highway University, Str. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkov, 61002, Ukraine.