УДК 621.793.7 DOI: 10.20998/2078-6840.2025.1.07

С.О. ЛУЗАН

ЗМІЦНЕННЯ БОЛТІВ ШТОВХАЧІВ ПЛУНЖЕРІВ ПАЛИВНИХ НАСОСІВ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

В роботі запропоновано та досліджено технологія відновлення і зміцнення болтів штовхачів плунжерів паливних насосів шляхом плазмового напилення зносостійкого покриття, що містить карбід вольфраму (WC) порошком марки ПС-12НВК-01. Було досліджено мікроструктуру та мікротвердість напилених і оплавлених покриттів. Проведені порівняльні випробування напилених покриттів показали вищу зносостійкість покриття ПС-12НВК-01, що містить карбід вольфраму, порівняно з покриттям ПГ-10Н-01. Також дослідна партія болтів штовхачів плунжерів паливного насоса пройшла випробування на вібростенді в обсязі 300 годин. Результати випробувань показали, що середній знос болтів під п'ятою плунжера в 2,2 рази менше серійних (0,095 і 0,21мм відповідно), під тарілкою плунжера – в 2,25 рази (0,195 і 0,44 мм відповідно).

Ключові слова: болт штовхача плунжера**,** плазмове покриття, мікротвердість, мікроструктура, зміцнення, зносостійкість.

S. LUZAN

STRENGTHENING OF PUSHROD BOLTS OF PLUNGERS OF DIESEL ENGINE FUEL PUMPS

The paper proposes and investigates the technology of restoring and strengthening the bolts of fuel pump plungers by plasma spraying a wear-resistant coating containing tungsten carbide (WC) with PS-12NVK-01 powder. The microstructure and microhardness of the sputtered and melted coatings were investigated. Comparative tests of the sputtered coatings showed higher wear resistance of the PS-12NVK-01 coating containing tungsten carbide compared to the PG-10N-01 coating. Also, a test batch of fuel pump plunger push rod bolts was tested on a vibration bench for 300 hours. The test results showed that the average wear of the bolts under the plunger heel is 2.2 times less than the serial ones (0.095 and 0.21 mm, respectively), and under the plunger plate - 2.25 times (0.195 and 0.44 mm, respectively).

Key words: ram pusher bolt, plasma coating, microhardness, microstructure, hardening, wear resistance.

Вступ.

Болти штовхачі плунжерів паливних насосів дизельних двигунів працюють в умовах високих контактних навантажень під п'ятою і тарілкою плунжера и подвергаются значительному износу. Абразивні частинки, що проникають через паливні фільтри, сприяють процесу зношування. Зміна геометричних параметрів деталей призводить до зменшення подачі палива, зміни кута вприскування, що в свою чергу призводить до зниження потужності двигуна.

Знос робочої поверхні болта штовхача, сконцентрований у місцях контакту з п'ятою і тарілкою плунжера, має характер заглиблень до 0,21 мм під п'ятою і 0,44 мм під тарілкою плунжера.

Відомо, що нові насоси розвивають тиск подачі палива не нижче 50 МПа, а в разі зносу болтів штовхачів плунжерів плунжерних пар плунжерних пар тиск може знижуватися в 4-5 разів. Крім того, це призводить до значного зниження їхньої продуктивності через зворотне перетікання палива і до великих його втрат, особливо на пускових обертах.

Тому виникає необхідність пошуку сучасних способів зміцнення болтів штовхачів плунжерів і плунжерних пар паливних насосів для підвищення їхнього ресурсу. Під час вибору способу необхідно виходити з того, що зміцнення має забезпечити таке підвищення ресурсу роботи деталей, яке буде економічно обґрунтованим.

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

На основі аналізу науково-технічної літератури встановлено, що відновлення плунжерних пар здебільшого проводиться такими методами [1-8]:

– азотування, борування;

– хромування;

– дифузійне хромування;
– оксидування;
– іонно-плазмове нанесення покриттів;
– електроосадження композиційних хімічних покриттів.

Отримало досить широке застосування азотування для відновлення плунжерних пар. Під час азотування в поверхневому шарі деталей утворюються нітриди, а також відбуваються структурні перетворення. Цей спосіб незначно збільшує розміри деталей. До недоліків слід віднести високу трудомісткість та енергоємність технології, процес триває 25-30 год за температури 440-460° С.

Аналогічні недоліки мають процеси борування (тривалість обробки 6 год), цементації (витримка до 10 год для отримання шару 1 мм).

Хромування, характеризуючись високою зносостійкістю, гарним зчепленням з основним металом, високою корозійною стійкістю, надійністю та довговічністю (у 2 - 3 рази вищою, ніж у серійних), має в той самий час низький вихід хрому за струмом, погану здатність електроліту до розсіювання, малу швидкість осадження хрому (0,5 - 0,7 мкм/хв) та більшу нерівномірність розподілу осаду по поверхні.

Дифузійне хромування дає змогу створити зносостійкий поверхневий шар, що виникає під час взаємодії хрому з вуглецем (азотом), який міститься в деталі. На поверхні виробу утворюється дифузійний шар такого складу: для низьковуглецевих сталей і заліза - твердий розчин хрому в залізі, для вуглецевих і легованих сталей - карбіди (нітриди) хрому. Збільшення розмірів виробів становить від 0,05 до 0,16 мм, що дає можливість відновлювати зношені деталі. Товщина дифузійного шару має високу адгезію з основним матеріалом деталі та володіє поверхневою твердістю до HV = 18000 МПа.

Оксидування процес отримання оксидних плівок на поверхні. При роботі з мастилом дещо збільшує зносостійкість деталей. Сульфідування, зазвичай проведене в сольових ваннах, дає значний протизадирний ефект і знижує коефіцієнт тертя. Проводиться при температурі 500-700° С зі значною корозією плунжерних пар. Сульфоціанування (одночасне насичення поверхонь нітридами і сульфідами) підвищує як протизадирні властивості, так і зносостійкість, але має ті самі недоліки, що і сульфідування в сольових ваннах.

Іонно-плазмове нанесення покриттів дає змогу формувати покриття з металів і сплавів, різноманітних сполук і композицій. Переваги іонно-плазмового нанесення покриттів - це висока міцність зчеплення і щільність напилених покриттів, формування покриттів без зміни стехіометричного складу, можливість отримання покриттів з тугоплавких і неплавких матеріалів. Основні недоліки - тривалість технологічного процесу нанесення покриттів, розмір виробу обмежений об'ємом камери, товщина покриттів до 5 мкм.

В останні десятиліття успішно розвивається технологія електроосадження композиційних хімічних покриттів. Суть методу полягає в тому, що разом із металом із гальванічної ванни на деталі осідають різні неметалеві частинки: карбіди, бориди, оксиди, сульфіди, порошки полімерів тощо. Включення дисперсних матеріалів сильно змінює властивості покриттів і, головне, в десятки разів збільшує їхню зносостійкість.

Однак вищевказані процеси утворення композиційних покриттів є довготривалими, їхнє здійснення потребує застосування складного та дороговартісного обладнання.

Таким чином, вибір методу для відновлення плунжерних пар, а також болтів штовхачів плунжерів паливних насосів дизельних двигунів, є актуальним науково-технічним завданням, що потребує свого вирішення.

Мета та постановка задачі.

Метою даної роботи є дослідження можливості застосування плазмового напилення зносостійкого покриття порошком ПС-12НВК-01, що містить 35% карбіду вольфраму, для відновлення і зміцнення болтів штовхачів плунжерів паливних насосів дизельних двигунів.

Результати досліджень і їх обговорення.

Покриття на зразки і болти штовхачів плунжерів наносили методом плазмового напилення на установці УПУ-3Д на таких режимах: сила струму – А 400 А, напруга – 45 В, витрата плазмоутворюючого газу (суміш аргону 85% і азоту 15%) – 4 $м^3$/год, витрата порошку – 3 кг/год, дистанція напилення 120 мм, кут напилення – 90±10 град. Як вихідний матеріал для напилення був використаний порошок марки ПС-12НВК-01 ТУ У 322-19-004-96, що виготовляється ВАТ "Торезтвердосплав". Його хімічний склад: 35% WC і 65% ПГ-10Н-01 (Основа Ni, B 2,8-4,2, C 0,6-1,0, Si 4,0-4,5, Cr 14-20, Fe 3,0-7,0). Як плазмоутворюючий газ застосовувалася суміш аргону (85%) і азоту (15%).

З метою визначення зносостійкості плазмонапилених покриттів з присутністю абразив-ного середовища були проведені порівняльні лабораторні випробування дослідних зразків на верстаті для випробування на стирання АР 40 (Німеччина).

Зусилля притиснення зразка до наждачного полотна 14А6-НМ ГОСТ 5009 складало 10Н, бічна подача утримувача зразка. 4,2 мм/об, шлях стирання 240 м, діаметр катка 150 мм, число оборотів катка 40 об/хв. Зразки виготовляли зі сталі 20 діаметром 13мм і заввишки 8мм. Покриття завтовшки 0,5 мм наносили на торцеву поверхню зразка. Зносостійкість оцінювалася по втраті ваги зразка в процесі тертя, яка визначалася на лабораторних вагах моделі ВЛР-200 г з точністю до 10^{-4}г.

Дослідження мікротвердості здійснювалося відповідно до ГОСТ 9450. Мікротвердість матриці по перетину замерялась через 100 мкм, починаючи від поверхні $H_{\mu\,100}$.

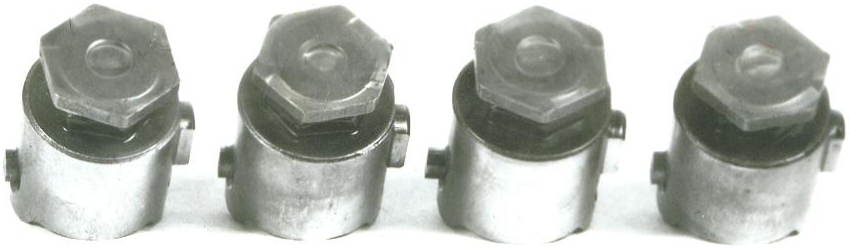
Для порівняльних випробувань на зносостійкість напилених покриттів було обрано порошкові матеріали на основі нікелю ПГ-10Н-01 і ПГ-12Н-01, які не містять карбід вольфраму WC. Також необхідно зазначити, що випробовували покриття двох типів: без оплавлення і з оплавленням після напилення.

Результати випробувань, які представлені в таблиці 1, підтверджують, що більш високу зносостійкість має покриття ПС-12НВК-01, яке містить карбід вольфраму та оплавлене після напилення.

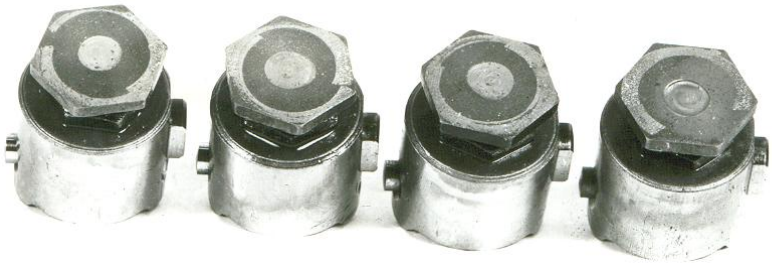
Таблиця 1 – Результати випробувань на абразивну зносостійкість

№ зр.	Марка порошку	Термообробка	Вага зразка, гр		Величина зносу, гр	Середня величина зносу, гр
			до випр.	після випр.		
1	ПГ-12Н-01	оплавлення	9,001	8,857	0,144	0,094
2			9,410	9,355	0,055	
3			9,143	9,060	0,083	
4	ПГ-12Н-01	без оплавлення	9,284	9,218	0,066	0,066
5			9,121	9,050	0,071	
6			9,436	9,374	0,062	
7	ПГ-10Н-01	оплавлення	9,518	9,460	0,058	0,050
8			9,277	9,229	0,048	
9			9,364	9,321	0,043	
10	ПГ-10Н-01	без оплавлення	9,531	9,488	0,043	0,117
11			9,606	9,497	0,109	
12			9,456	9,258	0,198	
13	ПС-12НВК-01	оплавлення	9,206	9,196	0,010	0,018
14			9,140	8,980	0,016	
15			8,933	8,905	0,028	
16	ПС-12НВК-01	без оплавлення	8,922	8,891	0,031	0,031
17			9,031	8,999	0,032	
18			8,815	8,784	0,031	

Дослідна партія болтів штовхачів плунжерів паливного насоса (рис. 1) була виготовлена на основі проведених досліджень за такою технологією:



а



б

Рис. 1 – Стан серійних болтів штовхачів:
(а) і дослідних з покриттям ПС-12НВК-01 (б) після випробувань

1. Допоміжні операції:
   – підготовка порошку марки ПС-12НВК-01 (сушка при Т = 473К, розсівання на фракції);
   – знежирення деталей;
   – струминно-абразивна обробка напилюваної поверхні.
2. Плазмового напилення болтів штовхачів паливного насоса.

Плазмове напилення деталей проводилося на оптимальних режимах для марки порошку ПС-12НВК-01 гранулометричного складу 56-80 мкм:

– ток дуги – 400 А;
– напруга 45 В;
– витрата плазмоутворюючого газу (85% Ar + 15%N_2) – 4 $м^3$/год;
– витрата транспортуючого газу (85% Ar + 15%N_2) – 0,06 $м^3$/год;
– дистанція напилювання 120-130 мм.

3. Оплавлення напиленого покриття.

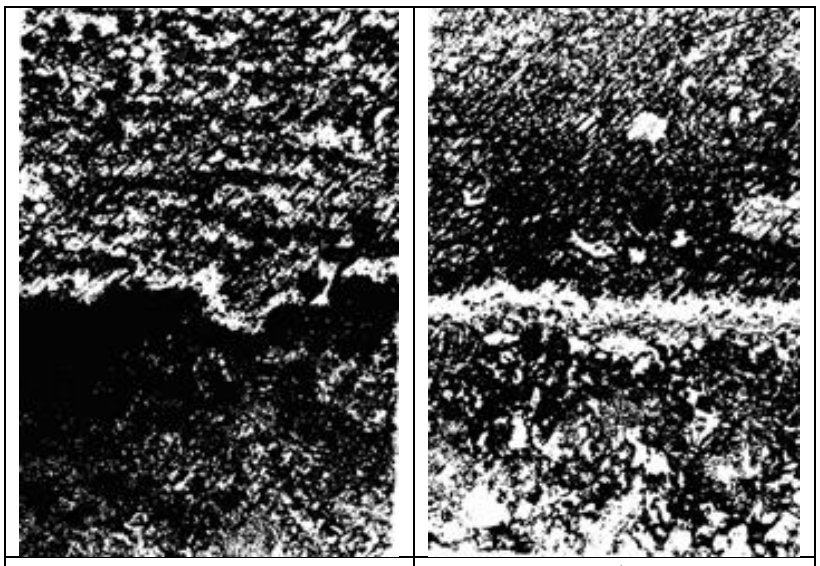
Оплавлення покриття здійснювалося в електропечі при Т = 1313-1323 К протягом 10 хв, з подальшим охолодженням на спокійному повітрі. Мікроструктури болтів штовха-чів плунжерів паливного насоса, виготовлених зі сталі 20 з плазмовими покриттями ПГ-10Н-01, ПС-12НВК-01, представлені на рис. 2, мікротвердість покриття і твердість основи дослідних болтів штовхачів у табл. 2. Товщина напиленого шару – 0,3 мм.

Мікротвердість матриці по перетину, через 20 мкм від поверхні: 667, 683, 667, 683, 683.

Партія болтів штовхачів плунжерів паливного насоса пройшла випробування на вібростенде в обсязі 300 годин. Процес зношування на вібростенді форсувався наступним чином: для змащування застосовувалося дизельне паливо марки «ДЛ» по ГОСТ 305, запилене кварцовим абразивом з питомою поверхнею S=5600 $см^2$/г по ГОСТ 2138.

Кількість змазки, що заправляється в порожнину кожного насоса, 0,5 л., концентрація абразиву – 2 г/л. В процесі випробувань зміна змазки в насосах проводилася через кожні 20 годин роботи.

Оцінка зносостійкості проводилася за результатами мікрометражу дослідних і серійних деталей до і після випробувань.



а б

Рис. 2 – Мікроструктура плазмонапилених зразків (х 180):
а – покриття ПГ-10Н-01, б – покриття ПС-12НВК-01

Таблиця 2 – Мікротвердість покриття і твердість основи дослідних болтів штовхачів

Найменування деталі	Мікротвердість напиленої поверхні, $H_{\mu\ 100}$	Мікротвердість основи, $H_{\mu\ 100}$	Твердість основи, HRC
Болт штовхача	849, 812, 812, 849	342, 342, 342	55-57

Результати випробувань показали, що середній знос болтів під п'ятою плунжера в 2,2 рази менше серійних (0,095 і 0,21мм відповідно), під тарілкою плунжера – в 2,25 рази (0,195 і 0,44мм відповідно).

Висновки.

Результати проведеного дослідження показали, що плазмове покриття порошковим матеріалом ПС-12НВК-01, що являє собою механічну суміш 35 % карбіду вольфраму (WC) і порошку марки ПГ-10Н-01, забезпечує підвищення зносостійкості болтів штовхачів плунжерів паливних насосів дизельних двигунів більш ніж у 2 рази.

Список літератури:

1. Ouyang G. Common Rail Fuel Injection Technology in Diesel Engines. Wiley, 2019. 367 p.
2. Lakshminarayanan P.A., Nayak N.S. Critical Component Wear in Heavy Duty Engine. Willey, 2011. 352 p.
3. Rahnejat H. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain: Fundamentals, Applications and Future Trends. Woodhead Publishing, 2010. XXX, 1018 p.
4. Попик П.С., Роговський Л.Л., Вечера О.М., Поліщук О. Г. Ефективність способів відновлення деталей плунжерних пар паливних насосів дизельних двигунів сільськогосподарської техніки. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, № 2. P. 115-120. DOI: 10.31548/machenergy.2019.02.115-120
5. Дацун Ю.М., Матвієнко К.І. Вибір оптимального способу відновлення зношених плунжерних пар. The 9th International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (May 29-31, 2022) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2022. С. 262-265. ISBN 978-91-87224-02-7
6. Погорєлов В.О. Дослідження технічного стану плунжерних пар паливних насосів високого тиску / Погорєлов В.О. Матеріали науковопрактичної конференції. ДДАЕУ. Дніпро. 2021 – 32 – 34 с.
7. Анісімов В. Ф. Шляхи і методи підвищення довговічності і надійності роботи паливної апаратури автотракторних двигунів / Анісімов В. Ф., Музичук В. І., П’ясецький А. А., Рябошапка В. Б. – Вінниця: ВНАУ, 2012. - 142 с.
8. Zablotsky Yu. V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines / Yu. V. Zablotsky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and

Technology, Published by Indian Society of Education and Environment, May 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

References (transliterated):

1. Ouyang G. Common Rail Fuel Injection Technology in Diesel Engines. Wiley, 2019. 367 p.
2. Lakshminarayanan P.A., Nayak N.S. Critical Component Wear in Heavy Duty Engine. Willey, 2011. 352 p.
3. Rahnejat H. Tribology and Dynamics of Engine and Powertrain: Fundamentals, Applications and Future Trends. Woodhead Publishing, 2010. XXX, 1018 p.
4. Popik P.S., Rogovskij L.L., Vechera O.M., Polishuk O. G. Efektivnist sposobiv vidnovlennya detalej plunzhernih par palivnih nasosiv dizelnih dviguniv silskogospodarskoyi tehniki. Machinery & Energetics. Journal of Rural Production Research. Kyiv. Ukraine. 2019, Vol. 10, № 2. P. 115-120. DOI: 10.31548/machenergy.2019.02.115-120
5. Dacun Yu.M., Matviyenko K.I. Vibir optimalnogo sposobu vidnovlennya znoshenih plunzhernih par. The 9th International scientific and practical conference “Modern science: innovations and prospects” (May 29-31, 2022) SSPG Publish, Stockholm, Sweden. 2022. S. 262-265. ISBN 978-91-87224-02-7
6. Pogoryelov V.O. Doslidzhennya tehnichnogo stanu plunzhernih par palivnih nasosiv visokogo tisku / Pogoryelov V.O. Materiali naukovopraktichnoyi konferenciyi. DDAEU. Dnipro. 2021 – 32 – 34 s.
7. Anisimov V. F. Shlyahi i metodi pidvishennya dovgovichnosti i nadijnosti roboti palivnoyi aparaturi avtotraktornih dviguniv / Anisimov V. F., Muzichuk V. I., P’yaseckij A. A., Ryaboshapka V. B. – Vinnicya: VNAU, 2012. - 142 s.
8. Zablotsky Yu. V. Maintaining Boundary and Hydrodynamic Lubrication Modes in Operating High-pressure Fuel Injection Pumps of Marine Diesel Engines / Yu. V. Zablotsky, S. V. Sagin // Indian Journal of Science and Technology, Published by Indian Society of Education and Environment, May 2016. – Vol. 9. – Iss. 20. – P. 208-216. DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i20/94490.

Надійшла (received): 15.04.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Лузан Сергій Олексійович (***Sergii Luzan***) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри зварювання, м. Харків, Україна; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4808-0017; e-mail: khadi.luzan@gmail.com