

**Варюхно В.В.,\***  
**Довгаль А.Г.,\***  
**Білякович О.М.,\***  
**Курбет Л. В.,\***  
**Савчук А.М.,\*\***  
**Туриця Ю.О.\***

\*Національний авіаційний університет

м. Київ, Україна,

\*\*Національний транспортний університет,

м. Київ, Україна

E-mail: [yuliya\\_tur@ukr.net](mailto:yuliya_tur@ukr.net)

## ЗАХИСНЕ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ПОРШНІВ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ АВІАЦІЙНОЇ НАЗЕМНОЇ ТЕХНІКИ

УДК 62.242; 621431.3 (045)

DOI:10.31891/2079-1372-2018-90-4-85-91

Розглянуто питання продовження ресурсу та відновлення деталей циліндрово-поршневої групи двигунів внутрішнього згоряння. Розроблена методика моделювання умов роботи пари «спідниця поршня-гільза циліндра» двигунів та проведено дослідження зносостійкості алюмінієвого сплаву Ал-25 з композиційними покриттями в парі з легованою хромом сталлю в умовах високошвидкісного тертя. Визначені оптимальні режими зміцнюючої обробки досліджуваних покриттів для спідниць поршнів двигунів внутрішнього згоряння.

**Ключові слова:** авіаційна наземна техніка, двигун внутрішнього згоряння, циліндрово-поршнева група, захисне покриття, зносостійкість.

### Вступ

Основним агрегатом силової установки сучасної авіаційної наземної техніки (АНТ) є двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ). Найбільш навантаженим вузлом двигунів внутрішнього згоряння являється циліндрово-поршнева група (ЦПГ). Поршні двигунів виготовляються з високоміцних алюмінієвих ливарних сплавів, що втричі легше сталі, а отже значно полегшується проблема балансування цих двигунів. Але водночас з цим постає питання локального підвищення зносостійкості цих сплавів, особливо в умовах високих температур. Зносостійкість поршнів прямо впливає не лише на ресурс, а і на компресію циліндра, а отже і паливну ефективність двигуна. За умовами експлуатації окремих видів авіаційної наземної техніки обладнаної високопотужними та форсованими ДВЗ нерідкі випадки, коли двигун АНТ працює в діапазоні від 25% до 40% свого робочого часу на холостому ході в режимі прогрівання та вибігу, що примушує в деяких видах АНТ застосовувати інші види силових установок та інші енерго- та ресурсозберігаючі технології. Отже підвищення паливної ефективності та продовження ресурсу енергетичних установок авіаційної наземної техніки значно покращує працездатність обладнання та економічну ефективність експлуатації окремих видів авіаційної наземної техніки. Важливим аспектом усіх технологічних заходів являється їх низька вартість, можливість застосування в умовах експлуатаційних підприємств та ефективність.

### Аналіз останніх робіт та публікацій

Поршні ДВЗ, працюють в дуже важких динамічних умовах. Температура вихлопних газів, в бензинових двигунах, може досягати 950-980оС. Тиск в циліндрі в момент робочого ходу досягає 100 кг/см<sup>2</sup>. Тому зношування поршня ДВЗ може вплинути на всі процеси в ньому.(рис. 1).

Проблема зміцнення деталей ЦПГ ДВЗ триває вже більше ста років з моменту винайдення та серійного застосування в умовах народного господарства перших ДВЗ. Не вщухає цікавість до цього питання і в наш час. Зокрема в роботі [1] було проведено фундаментальне дослідження застосування для зміцнення алюмінієвих деталей авіаційної техніки електроіскровими покриттями та досліджена можливість застосування дискретних електроіскрових покриттів ті їх вплив на зносостійкість.

Продовжуються дослідження в царині застосування термостійких вставок в першу канавку компресійного кільця. Зокрема в роботі [2] науковці вирішували відому проблему адгезії вставки до тіла поршня. А саме, було встановлено, що основною причиною адгезійного відшарування вставки є накопичення на межі пластівчастого графіту. Тому для уникнення відшарування пропонується модифікувати структуру силуміну в зоні вставки.

В публікації [3], використовуючи аналітичні та емпіричні методи, автор визначив величини максимального зносу сполучення канавка-кільце, коли воно цілком виходить з ладу в 0,4 мм, порівняно з видним 0,08 мм та запропонував формули для розрахунку довговічності сполучення від навантаження,

температури та швидкості тертя, визначивши їх як основні фактори, що впливають на зносостійкість сполучення.

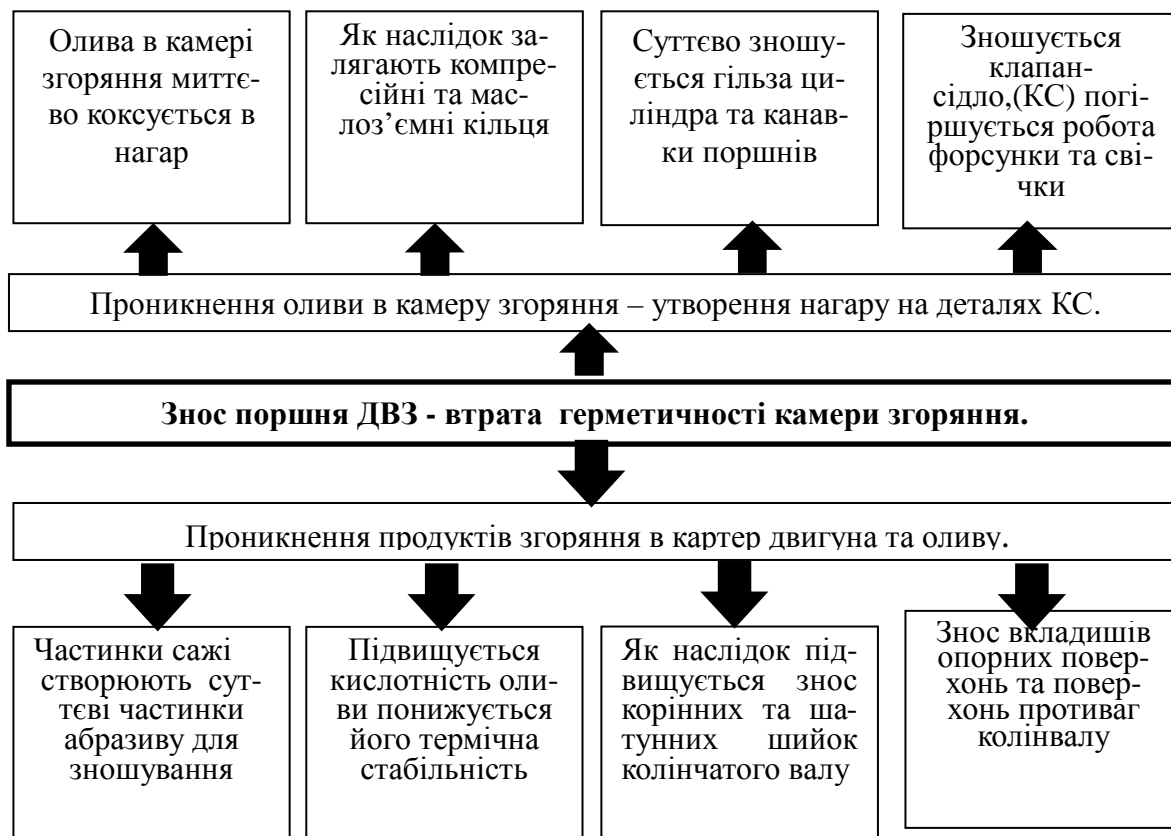


Рис. 1 – Вплив зносу поршня на робочий процес ДВЗ в цілому

В роботі [4] визначено, що основною технологією зміцнення та відновлення поршневих канавок є електроіскрове легування, що є дуже ефективним та перспективним для алюмінієвих сплавів, так як не вчиняє суттєвої термічної дії на легкоплавкий метал (температура плавлення деяких силумінів складає 510 °С, а суттєвої поверхневої пластифікації зазнає вже при 300 °С.).

Отже з посеред усіх технологічних заходів вирішення проблеми працездатності першої канавки поршня ДВЗ важливо визначити такі заходи, що були б дешеві при збереженні ефективності, не вимагали складного та витратного обладнання та були доступні в умовах експлуатаційних підприємств в межах чергових профілактичних робіт по двигуну [5]. Все вище викладене дозволяє сформулювати мету дослідження.

### Мета і постановка задачі

Метою роботи є наукова розробка нових захисних покриттів для зміцнення та відновлення поршнів двигунів авіаційної наземної техніки та аеродромних машин, що містять не коштовні складники та наносяться дешевими матеріалами та неенергоємними технологічними методами, та були б цілком доступні в умовах експлуатаційних підприємств спецмашин.

### Засоби та методи проведення дослідження

Для отримання шихти композиційного покриття з домішками оксиду алюмінію використовували вихідні порошки: карбід кремнію марки 64С (ГОСТ 26 327 – 84) середнім розміром 45-55 мкм, оксид алюмінію (ТУ 6-09-03-350-73) з частинками середнім розміром 45-50 мкм.

Для отримання зразків з алюмінієвого сплаву Ал25 (ГОСТ 1583-93) використовували деталі дискової форми зовнішній діаметр Ø 90 мм, внутрішній Ø 50 мм, завтовшки. Покриття наносили на бічну сторону. У якості контртіла використовували пальці виготовлені з сірого чавуну перлітного класу СЧ-21-40 (ГОСТ 5950-73) Ø 10 мм.

### Методика отримання композиційних порошоків для покриттів

Для формування композиційних покриттів із вихідних порошоків невід'ємною операцією являється їх взаємне перемішування і розмел.

Для отримання покриття з кераміки на основі SiC з домішками  $Al_2O_3$ , порошоків компоненти у відповідних пропорціях змішували з одночасно подрібненим протягом 1-4 годин порошком, для отримання необхідного фракційного складу в лабораторному планетарному млині «Санд-1» в середовищі спирту. При цьому частота обертання водила складала 648 об/хв., частота обертання барабану – 1620 об/хв. Для отримання шихти використовували футеровані оксидом алюмінію барабани об'ємом  $340\text{ см}^3$  та розмельні тіла розміром 10-15 мм з однойменної кераміки SiC- $Al_2O_3$ . Співвідношення маси шихти до маси розмельних тіл – 1:2. Після розмелу шихту сушили і просіювали.

Гранулометричний склад отриманих сумішей після розмелювання визначали у водяному середовищі на лазерному мікроаналізаторі «SK Laser Micron Sizer PRO 7000».

### Методика для нанесення покриттів та технологічні особливості процесу

Покриття в роботі наносили новаторським методом, а саме, на устаткуванні призначеному для попередньої підготовки поверхні для нанесення покриттів піскоструминній установці, додаючи в робоче середовище – кварцевий пісок розміром 0,5-1 мм, додавали суміші компонентів покриття SiC-  $Al_2O_3$  середнім розміром частинок 3-8 мкм. Зразки та натурні поршні обробляли соплом ежекційного типу в захисному кожусі установки.

Робоче середовище не осаджувалося на поверхні. Для подальшої фіксації покриття деталі проходили термічну обробку в звичайній муфельній печі за температур 200, 300 та 400 °С.

Мікротвердість покриттів вимірювали на приладі ПМТ-3 шляхом втискування алмазної піраміди в поліровану поверхню шліфа за навантаження 0,1Н.

### Устаткування для дослідження структури та фазового складу покриттів та їх поверхонь тертя

Для дослідження структури і фазового складу покриттів на сплаві Ал-25, а також поверхонь їх тертя проводили металографічний, рентгенофазовий (РФА) і мікрорентгеноспектральний (МРСА) аналізи. Металографічний аналіз досліджуваних матеріалів проводили на оптичних мікроскопах МИМ-8 і ЛСМ.

Рентгенофазовий аналіз зразків виконували на рентгеновських дифрактометрах ДРОН-2.0 у  $Cu_{\text{K}\alpha}$ -випромінненні. Мікрорентгеноспектральний аналіз та отримання електронних зображень поверхонь проводили на електронних мікроскопах Самеса SX 50 та РЕМ-106И.

Для дослідження структури, фазового складу, а також розподілу і складу елементів в кожній з фаз поверхонь тертя покриттів, використовували мікрорентгеноспектральний аналіз (МРСА) на мікроаналізаторі Camebax SX – 50 і електронному мікроскопі РЕМ-106И.

### Результати досліджень та отримані показники

Захисне покриття, що розробляється композиційне та мусить наноситися не коштовним фізичним методом, а саме, на серійній піскоструминній машині за рахунок інтрузії компонентів покриття в струменю кварцового піску. Таким чином визначено два основні фактори, що впливають на масоперенос (покривистість) покриття та власне його зносостійкість: це середній розмір  $d$  частинки компонентів шихти SiC- $Al_2O_3$  та температура фінальної обробки нанесеного покриття Т.

### Обґрунтування вибору фракційного складу композиційних покриттів

Оскільки майбутнє покриття мусить працювати в парі з гільзою циліндра, що виготовляють здебільш із сірих чавунів та спеціальних чавунів, що обробляють хонінгуванням до 9 - 12 класу чистоти поверхні, тому для покриття, що містить такі абразивні часточки, як карбід кремнію та оксид алюмінію вкрай важливо, щоб вони не зношували контрповерхню. Як відомо, абразивні часточки розміром менше 5 мкм, не зношують сталеві поверхні, а навпаки відіграють роль так званого припрацьовочного абразиву, що не зношує поверхню, а вигладжує її та заповнює мікронерівності підвищуючи фактичну площу контакту, а тому знижуючи контактний тиск. Тому, основною метою процесу було отримання шихти дисперсністю 3 - 8 мкм та визначення впливу середнього розміру частинок на структуроутворення покриттів. Це досягалося різною тривалістю розмелу композиції у млині. За результатами гранулометричного аналізу на мікроаналізаторі було отримано наступні результати. Було отримано три фракції порошоків

композицій протягом відповідно 1, 2 та 4 годин розмелу, що відповідало середньому розміру частинок відповідно 8,7; 4,9 та 3,8 мікрметрів. В подальшому цей технологічний фактор використовувався як технологічний фактор для оптимізації зносостійкості композиційних покриттів.

Структура і фазовий склад покриттів для відновлення та поліпшення зносостійкості поршнів силових установок АНТ. Нанесення чистої порошкової шихти керамічної системи SiC–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> представляє суттєву технологічну складність із-за низької питомої ваги цієї композиції. Тому покриття наносили інтрузійним методом на піскоструминній установці в струменю піску. При цьому досліджували три фракційні склади порошкових композицій, а саме 3, 5 та 8 мкм. Покриття наносилися на дискові зразки для трибологічних випробувань так і на плоскі пластини для дослідження мікроструктури покриття. Отримані плоскі зразки піддавали електроіскровій різці та полірували алмазними пастами для отримання шліфів, що потім досліджувалися на електронному мікроскопі РЕМ-106И.

Відразу після нанесення покриття на зразки для випробування його адгезії до поверхні силуміну виконували термічну обробку зразків, що повинна переконати в задовільній адгезії покриттів до силумінової підкладки та нормалізувати деформаційно напружений стан, зокрема залишкові напруги, що виникають практично за всіх методів нанесення покриття. Температура термічної обробки покриття складала 200, 300 та 400 °С в неконтрольованій атмосфері електропечі. Потому зразки повільно охолоджували на повітрі до кімнатної температури.

Мікроструктура покриття 5 мкм за збільшення 200 (рис. 2) представляє собою гетерофазну систему, що складається із фаз трьох характерних кольорів.

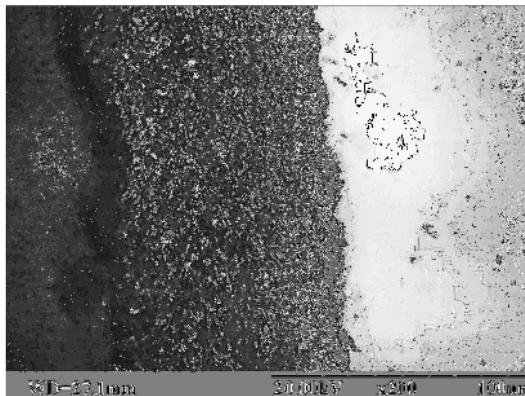


Рис. 2 – Структура інтрузійного композиційного покриття нанесеного композицією фракцією 5 мкм за збільшення 200

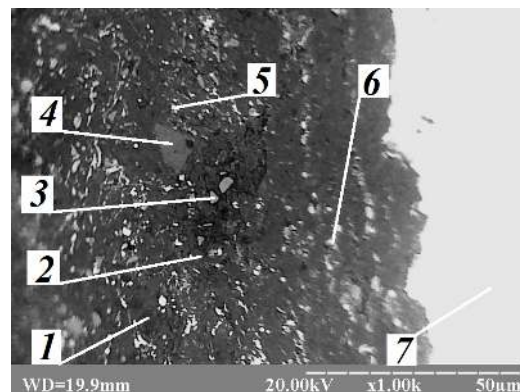


Рис. 3 – Структура інтрузійного композиційного покриття нанесеного композицією фракцією 5 мкм за збільшення 1000 із зазначеними ділянками мікрорентгеноспектрального аналізу

Основна темна фаза, що складає 65 - 70 % від площі покриття, в котрій рівномірно розподілені частинки двох типів: сірі частинки та яскраво білі. Поверхня переходу «покриття-підкладка» візуально чітка, викривлена шорсткістю без суттєвих пошкоджень на межі розділу. Товщина покриттів змінюється в межах 80 - 100 мкм. Пористість покриття не перевищувала 5 %. Розмір керамічних включень змінюється в межах від 3 до 10 мкм.

Об'ємний вміст керамічних фаз в покритті не відповідає вихідному, що пояснюється технологічними втратами при нанесенні покриттів. Кількість керамічних компонентів в композиційному покритті складає 80 - 85 %. Для більш детального аналізу структурних складових було проведено мікрорентгеноспектральний аналіз ділянки покриття за збільшення 1000 результати якого наведені на рис. 3.

Таблиця 1

#### Результати МРСА ділянки покриття рис. 3

Спектр	C	O	Al	Si	Fe
Спектр 1	47,53	-	-	52,47	-
Спектр 2	45,42	-	-	54,58	-
Спектр 3	-	54,02	45,98	-	-
Спектр 4	-	53,03	46,97	-	-
Спектр 5	-	-	84,36	15,64	-
Спектр 6	-	-	82,95	17,05	-
Спектр 7	-	-	85,47	14,53	-

Результати дослідження структури покриття і підкладки за результатами мікрорентгеноспектрального аналізу підтвердило рівномірний розподіл керамічних компонентів композиційного покриття (рис. 3), таким чином в покритті були виявлені фази карбіду кремнію (рис. 3, спектри 1 та 2), оксиду алюмінію (рис. 3., спектри 3 та 4) та частинки дуже схожі за складом на матеріал підкладки – ливарний силумін Ал-25 (рис. 3, спектри 5, 6 та 7). Ймовірно, піскоструминна обробка вибивала частинки з поверхні та утримувала в нашаруваннях покриття. Це підтвердив і рентгенофазовий аналіз покриття, котрий показав наявність в ньому фаз SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al. Розмір частинок композиційного покриття не перевищував 7 - 10 мкм.

Мікроструктура покриття фракції 8 мкм за збільшення 200 наведено на рис. 4. Вона відрізняється від попередньої наступним чином, а саме, - відразу помітна низька осаджуваність покриття отриманого з порошкової композиції з такої фракції. Товщина покриття не перевищує 50 мкм. Помітні суттєві дефекти на межі переходу між покриттям та підкладкою, що може свідчити про незадовільну адгезію покриття до підкладки.

Для більш ретельного дослідження покриття нанесеного фракцією порошку 8 мкм була досліджена його мікроструктура за збільшенням 1000 та проведено мікрорентгеноспектральний аналіз його найбільш характерних фаз (рис. 5).

Таким чином, як і в першому випадку, в покритті були виявлені фази карбіду кремнію (рис. 5, спектри 1 та 2), оксиду алюмінію (рис. 5, спектри 3 та 4) та частинки дуже схожі за складом на матеріал підкладки – ливарний силумін Ал-25 (рис. 5., спектри 5, 6 та 7).

Проте відразу помітно суттєві дефекти на поверхні розподілу покриття підкладка та суттєве розшарування карбідної та оксидної фаз покриття. Це може свідчити про його незадовільну зносостійкість.

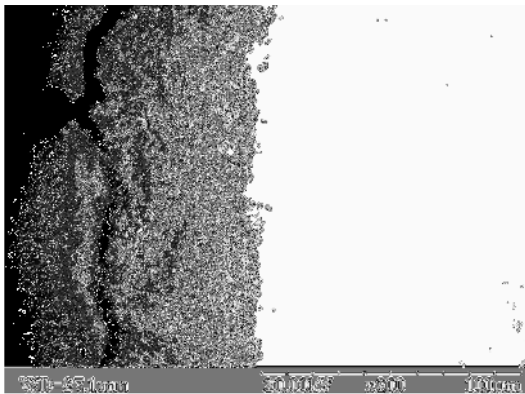


Рис. 4 – Структура інтрузійного композиційного покриття нанесеного композицією фракцією 8 мкм за збільшення 200

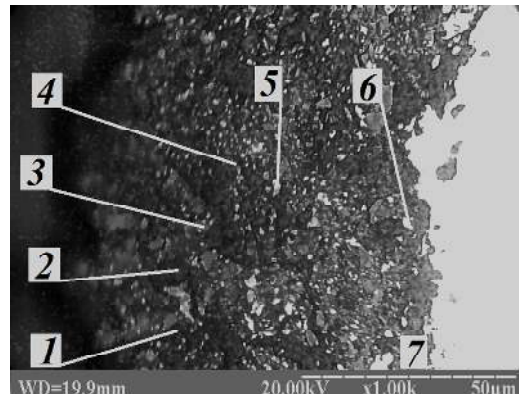


Рис. 5 – Структура інтрузійного композиційного покриття нанесеного композиційною фракцією 8 мкм за збільшення 1000 із зазначеними ділянками мікрорентгеноспектрального аналізу

Таблиця 2

#### Результати МРСА ділянки покриття рис. 5

Спектр	C	O	Al	Si	Fe
Спектр 1	48,64	-	-	51,36	-
Спектр 2	44,31	-	-	55,69	-
Спектр 3	-	55,13	44,87	-	-
Спектр 4	-	51,92	48,08	-	-
Спектр 5	-	-	83,25	16,75	-
Спектр 6	-	-	84,06	15,94	-
Спектр 7	-	-	84,36	15,64	-

Адгезія покриття що вимірювалася за методом штифта складала 5 МПа в обох випадках, тобто на силу адгезії покриття фракційний склад шихти не впливав. Суттєвий науковий інтерес представляють триботехнічні випробування вказаних покриттів в умовах, що моделюють роботу контактної зони «спідниця поршня-гільза циліндра» для формулювання практичних рекомендацій.

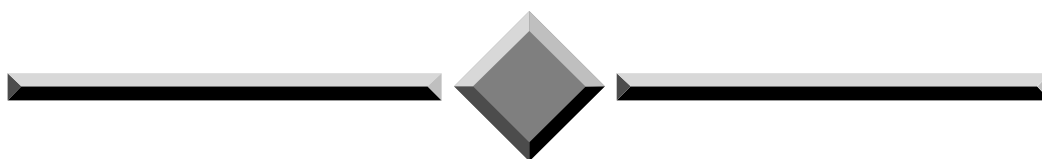
### Висновки

1. Дослідженнями структури та адгезійних якостей композиційного покриття на основі карбїду кремнію і оксиду алюмінію було визначено, що отримані покриття досить компактні, та володіють достатньою адгезією до силуміну Ал-25, проте на структуроутворення та осадження керамічної фази впливає фракційний склад шихти.
2. На адгезійні якості фракційний склад не впливає, проте перевагу варто надавати фракційному складу до 5 мкм, так як такий абразив не зношує сталевого контртіла.
3. Синтез та дослідження отриманих покриттів дозволяє рекомендувати їх впровадження в якості захисних покриттів для спідниць поршнів сучасних двигунів внутрішнього згоряння авіаційної наземної техніки.

### Література

1. Довгаль А.Г. Зносостійкі електроіскрові покриття для підвищення довговічності кінематичних сполучень авіаційної техніки / А.Г. Довгаль, Л.В. Бурдюженко, І.В. Ткаченко // Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин. Серія Г. Збірка наукових праць. – К. : 2003. С. 313-320.
2. Ahu Fahriye Acar, Fahrettin Ozturk, Mustafa Bayrak Effects of variations in alloy content and machining parameters on the strength of the intermetallic bonding between diesel piston and ring carrier. – Materials and technology. – No. 44. – 2010. – P. 391–395.
3. Гасангусенов О.Г. Расчетно-экспериментальное исследование влияния температуры, нагрузки и скорости скольжения на долговечность сопряжения канавка-поршневое кольцо малоразмерного дизеля. – Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. – 2013. – № 1. – С. 111 - 116.
4. Дударева Н.Ю.. Упрочнение верхних поршневых канавок двигателей внутреннего сгорания методом искрового упрочнения. – Вестник УГАТУ, 2010. – Т. 14, № 3 (38). – С. 111-115.
5. Дмитриченко Н.Ф. Продление ресурса деталей силовых установок авиационной наземной техники в условиях эксплуатации / Н.Ф. Дмитриченко, В.В. Варюхно, А.В. Кулинич, А.Г. Довгаль, В.П. Коба. // Металлофизика и новейшие технологии // Том. 39, № 1. січень 2017. – С. 69-82.

Надійшла в редакцію 09.01.2019



**Проблеми трибології**  
**“Problems of Tribology”**  
**E-mail: tribosensor@gmail.com**

---

**Varuhno V.V., Dovgal A.G., Bilyakovich O.N., Kurbet L.V., Savchuk A.N., Turitsya Y.A. Sheeting for pistons of an internal combustion engine of aviation ground equipment.**

The most loaded unit of internal combustion engines is a cylindrical-piston group (CPG). Pistons of engines are made of high-strength aluminum casting alloys, three times lighter than steel, and thus the problem of balancing these engines is greatly alleviated. But at the same time, the question arises of a local increase in the wear resistance of these alloys, especially at high temperatures.

So, it was revealed that among all the technological measures to solve the problem of the first groove of the internal combustion engine, it is important to identify such measures that would be cheap while maintaining efficiency, would not require complex and costly equipment and were available in operational facilities within Chery prophylactic work on the engine.

The aim of the work is the scientific development of new protective coatings to strengthen and restore the pistons of the engines of aviation ground equipment and airfield machines. To study the structure, phase composition, as well as the distribution and composition of elements in each of the phases of the friction surfaces of the coatings, X-ray microanalysis was used. The results of the study of the structure of the coating and the substrate according to the results of micro X-ray spectral analysis confirmed the uniform distribution of the ceramic components of the composite coating. Thus, silicon carbide and aluminum oxide phases were detected in the coating and the particles are very similar in composition to the substrate material, foundry silumin Al-25. It has been established that the adhesion qualities of the fractional composition do not affect, however, preference should be given to the fractional composition up to 5 microns, since such an abrasive does not wear out the steel counterbody.

**Key words:** aviation ground equipment, internal combustion engine, cylindrical-piston group, protective coating, wear resistance.

### References

1. Dovgal A.G. ZnosostlykI elektroIskrovI pokrittya dlya pIdvischennya dovgovIchnostI kInematchnih spoluchen avlatsIynoYi tehnIki. A.G. Dovgal, L.V. Burdyuzhenko, I.V. Tkachenko. Suchasni protsesi mehanIch-noYi obrobki Instrumentami z NTM ta yakIst poverhniI detaley mashin. SerIya G. ZbIrka naukovih prats.– K.: 2003. S. 313-320.
2. Ahu Fahriye Acar, Fahrettin Ozturk, Mustafa Bayrak Effects of variations in alloy content and machining parameters on the strength of the intermetallic bonding between diesel piston and ring carrier. *Materials and technology*. No. 44. 2010. P. 391–395
3. Gasangusenov O.G. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya temperatury i nagruzki i skorosti skolzheniya na dolgovechnost sopryazheniya kanavka-porshnevoe koltso malorazmernogo dizelya. *Vestnik AGTU. Ser. Morskaya tehnika i tehnologiya*. 2013. № 1. pp.. 111- 116.
4. Dudareva N.Yu.. Uprochnenie verhnih porshnevyyih kanavok dvigateley vnutrennego sgoraniya metodom iskrovogo uprochneniya. *Vestnik UGATU*, 2010. T. 14, # 3 (38). pp. 111-115.
5. Dmitrichenko N.F. Prodlenie resursa detaley silovyih ustanovok aviatsionnoy nazemnoy teh-niki v usloviyah ekspluatatsii. N.F. Dmitrichenko, V.V. Varyuhno, A.V. Kulinich, A.G. Dovgal, V.P. Koba. *Metallofizika i noveyshie tehnologii*. Tom. 39, №1. sichen 2017. pp.. 69-82.