

PACS numbers: 46.50.+a, 46.55.+d, 62.20.Qp, 68.35.bd, 68.35.Ct, 81.15.Pq, 81.40.Pq

## **Продовження ресурсу деталей силових установок авіаційної наземної техніки в умовах експлуатації**

М. Ф. Дмитриченко, В. В. Варюхно, А. В. Кулініч, А. Г. Довгаль,  
В. П. Коба\*

*Національний транспортний університет,  
вул. М. Омеляновича-Павленка, 1,  
01010 Київ, Україна*

*\*Національний авіаційний університет,  
просп. Космонавта Комарова, 1,  
03058 Україна, Київ*

Розглянуто питання продовження ресурсу та відновлення деталей циліндропоршневої групи двигунів внутрішнього згоряння. Розроблено методику моделювання умов роботи пари «канавка–кільце» двигунів і проведено дослідження зносостійкості алюмінієвого стопу Ал-25 з електроіскровими покриттями різного складу в парі з легованою хромом сталлю в умовах високотемпературного фретинг-процесу. Визначено оптимальні режими зміцнювального оброблення канавок для поршневих кілець поршнів двигунів внутрішнього згоряння.

**Ключові слова:** авіаційна наземна техніка, двигун внутрішнього згоряння, циліндропоршнева група, зносостійкість, електроіскрове легування, фретинг-корозія.

The problems of resource extension and recovery of the piston–cylinder parts of internal combustion engines are considered. A method for modelling working conditions of pair ‘groove–ring’ of motors is developed, and durability of

---

Corresponding author: Mykola Fedorovych Dmitrichenko  
E-mail: tolik\_savchuk@bigmir.net

*National Transport University,  
1 M. Omelyanovych-Pavlenko Str., 01010 Kyiv, Ukraine  
\*National Aviation University, 1 Kosmonavt Komarov Ave., 03058 Kyiv, Ukraine*

Please cite this article as: M. F. Dmitrichenko, V. V. Varyuhno, A. V. Kulinich, A. G. Dovgal, and V. P. Koba, Extension of Resource of Power-Plants' Parts of Aviation Ground Equipment under Operating Conditions, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 39, No. 1: 69–81 (2017) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.39.01.0069.

aluminium Al-25 alloy with electrospark coatings of different composition paired with a chromium alloyed steel under high-temperature fretting process is carried out. Optimum modes of hardening treatment for piston ring grooves of pistons of internal combustion engines are determined.

**Key words:** aviation ground equipment, internal combustion engine, piston-cylinder group, wear resistance, electrospark doping, fretting corrosion.

Рассмотрены вопросы продления ресурса и восстановления деталей цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания. Разработана методика моделирования условий работы пары «канавка-кольцо» двигателей и проведено исследование износостойкости алюминиевого сплава Ал-25 с электроискровыми покрытиями различного состава в паре с легированной хромом сталью в условиях высокотемпературного фреттинг-процесса. Определены оптимальные режимы упрочняющей обработки канавок для поршневых колец поршней двигателей внутреннего сгорания.

**Ключевые слова:** авиационная наземная техника, двигатель внутреннего сгорания, цилиндропоршневая группа, износостойкость, электроискровое легирование, фреттинг-коррозия.

*(Отримано 29 жовтня 2015 р.; після доопрацювання — 18 липня 2016 р.)*

## 1. ВСТУП

Основним агрегатом силової установки сучасної авіаційної наземної техніки (АНТ) є двигун внутрішнього згорання (ДВЗ), що значно ефективніший та економічніший за авіаційні реактивні двигуни, але потужніший за електричні аналоги. Найбільш навантаженим вузлом двигунів внутрішнього згорання є цилиндропоршнева група (ЦПГ). Поршні двигунів виготовляються з високоміцних алюмінієвих ливарних стопів, що втричі легше сталі, а отже значно полегшується проблема балансування цих двигунів. Але водночас з цим постає питання локального підвищення зносостійкості цих стопів, 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 від 25% до 40% свого робочого часу на холостому ході в режимі прогрівання, 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.

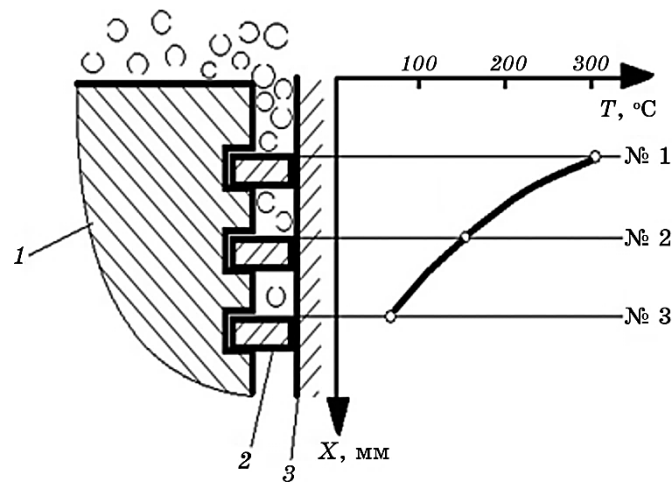
Поршні ДВЗ працюють в дуже важких умовах. Температура вихлопних газів в бензинових двигунах може досягати  $950\text{--}980^\circ\text{C}$ . Тиск в циліндрі в момент робочого ходу досягає  $100\text{ кг/см}^2$  (рис. 1).

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 електроіскрових покриттів та досліджена можливість застосування дискретних електроіскрових покриттів та їх вплив на зносостійкість.

Продовжуються дослідження в області 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 пластинчастого 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  $0,4\text{ мм}$ , порів-



**Рис. 1.** Температурний режим роботи компресійних кілець дизеля ЯМЗ-238: 1 — поршень, 2 — кільце, 3 — гільза.

**Fig. 1.** Operating temperature of compression rings of diesel YaMZ 238: 1 — piston, 2 — ring, 3 — sleeve.

няно з вихідним 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.

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

Отже, з посеред усіх технологічних заходів вирішення проблеми 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. Все вищевикладене дозволяє сформулювати мету дослідження.

Метою дослідження 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 неенергоємними технологічними методами, та були б цілком доступні в умовах експлуатаційних підприємств спецмашин.

## **2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ, ОБЛАДНАННЯ ТА ВИТРАТНІ МАТЕРІАЛИ**

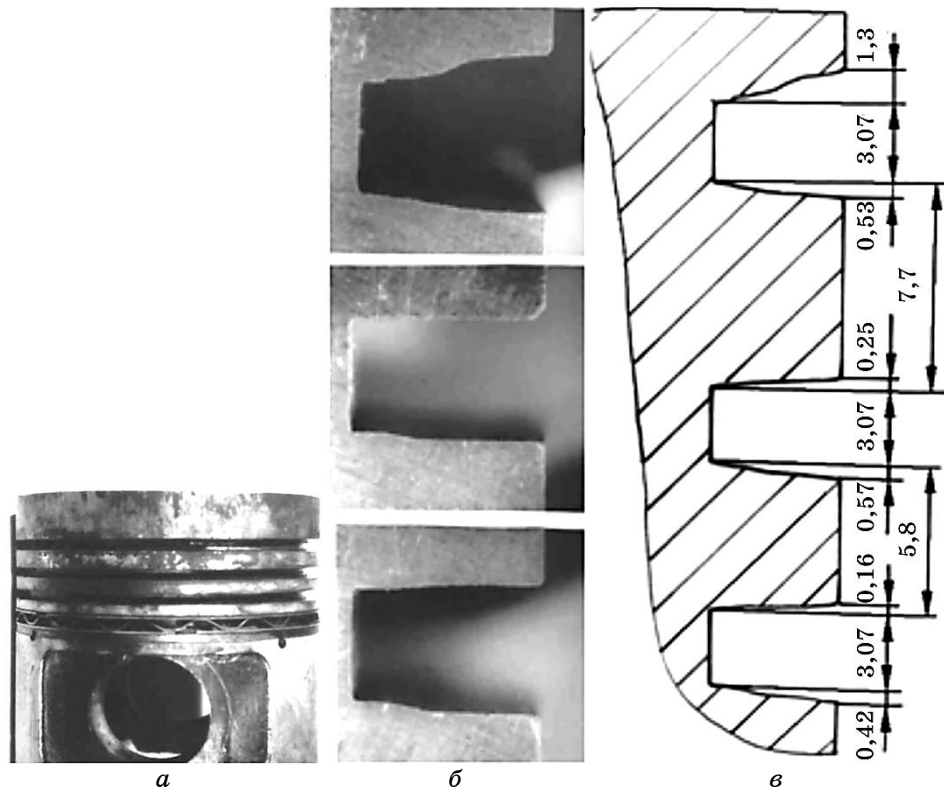
Для вивчення взаємозв'язків між властивостями покриттів з їх фазовим складом і структурою, а також впливом зовнішніх факторів велике значення має вибір методів дослідження.

Для проведення дослідження використовувалися натурні поршні серійного двигуна ЯМЗ-238 (рис. 2), що мав напрацювання 3000 тис. мотогодин. Саме з оцупок поршня цього двигуна і виготовлялися зразки для лабораторних випробувань на зносостійкість з нанесеними електроіскровими покриттями.

Для одержання зразків з алюмінієвого стопу Ал25 (ГОСТ 1583-93) циліндричної форми  $\varnothing 20 \times 20$  мм наносили електроіскрові покриття електродами з міді М1 (ГОСТ 1535-91) у вигляді прутка. Для підбору металу легувального електроду були використані матеріали, що вказані в табл. 1.

Електроіскрові покриття наносили на установці «Элитрон-22» з вібратором, встановленим в пістолеті з вимикачем. Промислове застосування установки дозволяє використовувати її в комплекті з токарно-гвинторізним верстатом. Установками такого типу можна наносити будь-який струмопровідний матеріал чи то композицію.

Режим обробки: струм короткого замикання  $I_{кз} = 80-100$  А, робо-



**Рис. 2.** Зовнішній вигляд поршня (*a*) і канавок поршня (збільшення  $\times 15$ ) (*б*) та їх профіль зносу (*в*) у двигуні ЯМЗ-238 після 3000 тисяч годин експлуатації.

**Fig. 2.** Appearances of piston (*a*) and piston grooves (increasing  $\times 15$ ) (*б*), and their wear profile (*в*) for engine YaMZ 238 after 3000 thousands hours of operation.

чий струм  $I_p = 10-20$  А, колова швидкість заготовки  $V_c = 3,5-7$  м/хв., частота імпульсів 50 Гц. Таким чином, товщина отриманих покриттів складала 0,1–0,4 мм.

Дослідження процесу зношування електроіскрових покриттів в умовах тертя коливання за високих температур в умовах фретинг-процесу проводили на лабораторній торцевій машині тертя МФК-1, конструкція якої уможлиблює визначати в процесі експерименту коефіцієнт тертя. Підігрів до робочих температур виконувався за допомогою височастотної індукційної котушки довкола вузла тертя.

В якості контртіла (рухомого зразка) використовували сталевий зразок 40Х9С2 ( $HRC 75-80$ ), виходячи з наступних міркувань: компресійні кільця ДВЗ здебільш виготовляються з сірого чавуну марок

**ТАБЛИЦЯ 1.** Характеристики компактних матеріалів для електроіскрового легування.**TABLE 1.** Characteristics of compact materials for electric spark.

Матеріал	Марка	Умови
Алюмінієвий стоп	Ал25	ГОСТ 1583-93
Мідь	М1	ГОСТ 1535-91
Нікель	НП2	ГОСТ 13083-77

СЧ, але для підвищення теплостійкості до 350–400°C в нього додавали легувальні присадки Cr, Ni, Mo, Cu, W. До того ж поверхня чавунних компресійних кілець ДВЗ вкривається електролітичним пористим хромовим покриттям 0,1–0,2 мм завтовшки. Тож такий склад легуваної хромом сталі якнайкраще моделює склад та властивості чавунного вкритого хромом компресійного кільця. Нагрівальний елемент дозволяв підвищувати температуру до 700°C, а саме, для дослідження впливу температури та моделювання окремо роботи першого, другого та третього компресійного кільця використовувалися три режими: 20, 150 та 300°C. В процесі експерименту за кожного значення температури випробовувалось 3–5 зразків, а остаточні параметри визначались як середні значення з одержаних даних.

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

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Правильний вибір структурних складових є одним із головних завдань при створенні захисних зносостійких покриттів. Для отримання захисних покриттів з використанням електрофізичних методів нанесення потрібно ретельно дослідити сумісність матеріалів, кінетику масопереносу та його напрямки. Кінетика масопереносу та сумісність матеріалів електродів з алюмінієвими стопами були детально досліджені в роботі [1], у результаті чого було встановлено, що для легування алюмінієвих стопів доцільно використовувати мідні та нікелеві електроди.

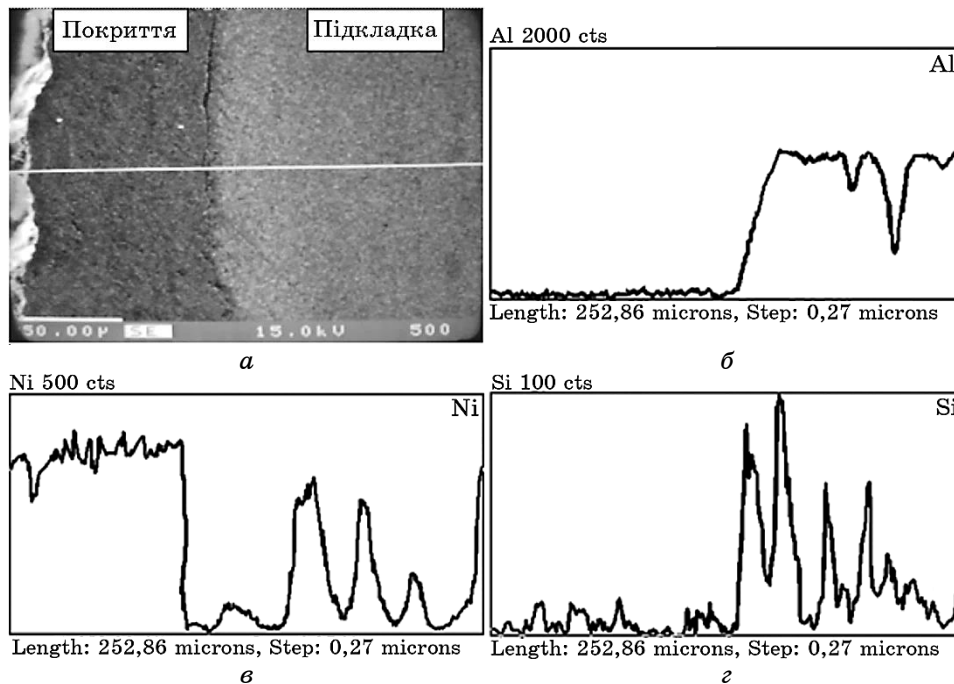
Для з'ясування адгезійних властивостей майбутнього покриття та мінімізації впливу на матеріал підкладки Ал-25, що має досить низькі фізико-механічні властивості, було нанесено два покриття з цих металів на зразки зі стопу Ал-25 та ретельно досліджено їх мікроструктуру на електронному мікроскопі «САМЕСА». Покриття

наносили на установці електроіскрового легування «Элитрон-22» з використанням наступних режимів нанесення.

Для отримання нікелевого покриття на стопі Ал-25 методом визначення найбільш інтенсивного масопереносу було обрано режими з  $I_p \leq 10-15$  А. Для отримання мідного покриття на стопі Ал-25 методом визначення найбільш інтенсивного масопереносу було використано режим з  $I_p \leq 10-30$  А. Мікроструктура отриманих покриттів показана на рис. 3 і 4 відповідно.

Таким чином нікелеве електроіскрове покриття на стопі Ал-25, структура якого представлена на рис. 3, а, відрізняється різкою межею «покриття–підкладка» та низькою дифузійною проникністю основного компоненту підкладки — алюмінію в нікелеве покриття, що, можливо, і зумовило виникнення адгезійних тріщин на межі (угорі рис. 3, а), що значно погіршують фізико-механічні властивості межі «покриття–підкладка».

На цій підставі нікель, як компонент для електрофізичного пок-



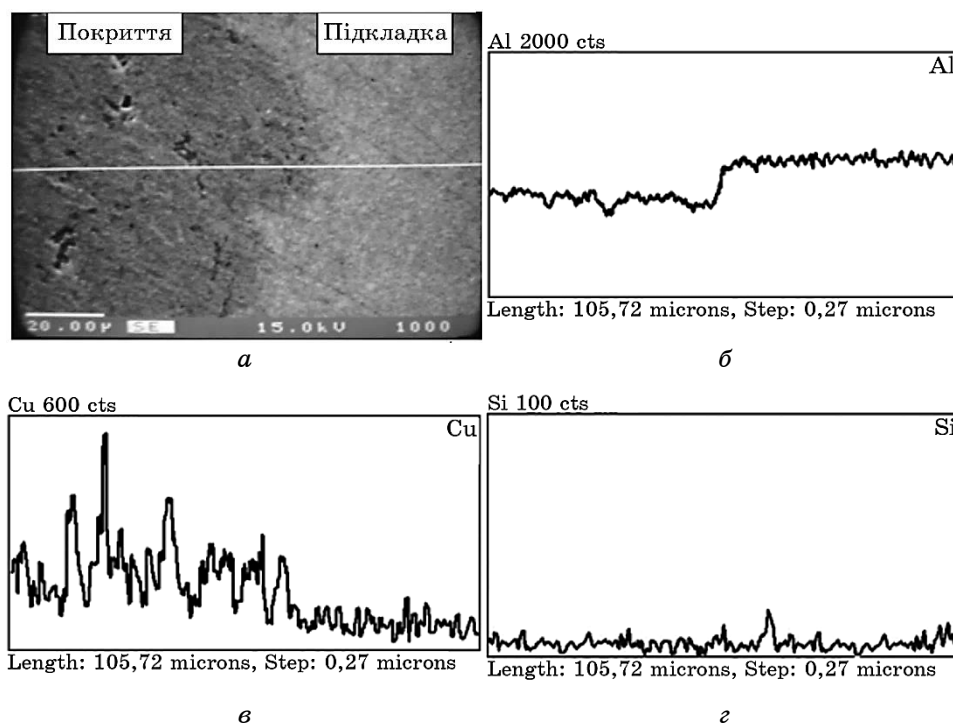
**Рис. 3.** Мікроструктура ЕІЛ-покриття на основі нікелю (а) на підкладці зі стопу Ал-25 та розподіл в ній: алюмінію (б), нікелю (в), кремнію (г).

**Fig. 3.** Microstructure of electrical-spark alloyed nickel-based coverage (a) on substrate from alloy Al-25 and distribution in it of chemical elements: aluminium (b), nickel (c), silicon (d).

риття для канавок поршнів ДВЗ АНТ, було відкинута, як матеріал покриття, що матиме низьку адгезію.

Мідне електроіскрове покриття, структура якого представлена на рис. 4, *a*, має дуже розмиту та хвилясту межу «покриття–підкладка», що свідчить про наявність перехідного дифузійного шару між мідними та алюмінієвими сполуками.

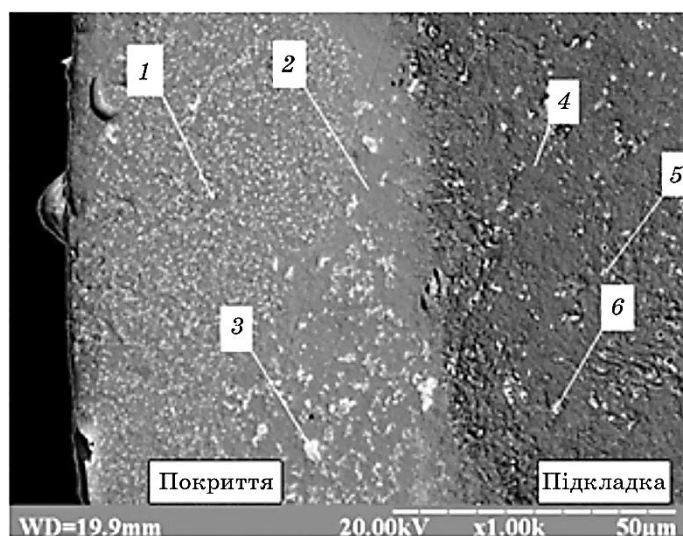
Про елементний склад цього електрофізичного покриття дають вичерпне уявлення результати мікрорентгеноспектрального аналізу. Так, як видно з рис. 4, *б, в*, основа покриття — це сполуки на основі міді та алюмінію, що містять фази різного стехіометричного складу. Мідь дуже активно проникає в підкладку та фіксується в ній на рівні 100 імпульсів. Отже загальний металографічний та компонентний аналіз електроіскрових покриттів на основі нікелю та міді дає можливість зробити остаточний вибір компоненту покриття на користь міді, що вимагає більш ретельного дослідження



**Рис. 4.** Мікроструктура ЕІЛ-покриття на основі міді (*a*) та підкладки зі ступу Ал-25 та розподіл в ній: алюмінію (*б*), міді (*в*), кремнію (*г*).

**Fig. 4.** Microstructure of electrical-spark alloyed copper-based coverage (*a*) on substrate from alloy Al-25 and distribution in it of chemical elements: aluminium (*b*), copper (*c*), silicon (*d*).





**Рис. 5.** Мікроструктура електроіскрового покриття мідним електродом на зразках зі ступу Ал-25 у вторинних електронах із зазначенням ділянок мікрорентгеноспектрального аналізу (див. табл. 2).

**Fig. 5.** The microstructure of the electrical-spark coating produced by copper electrode on the samples from alloy Al-25 obtained in secondary electron with indicating of regions of X-ray spectral microanalysis (see Table 2).

мідного покриття на основі силуміну.

Мікроструктуру мідного електроіскрового покриття на стопі Ал-25, одержану на мікроскопі РЕМ-106И, показано на рис. 5, де зазначено ділянки мікрорентгеноспектрального аналізу для визначення

**ТАБЛИЦА 2.** Результати мікрорентгеноспектрального аналізу ділянок покриття, позначених на рис. 5.

**TABLE 2.** Results of X-ray spectral micro-analysis of coating's regions indicated in Fig. 5.

Спектри	Вміст елементів, %			
	Al	Cu	Si	O
Спектр 1	58,53	34,45	–	0,89
Спектр 2	18,99	73,44	–	0,98
Спектр 3	29,90	65,14	–	0,93
Спектр 4	89,02	1,02	10,98	0,01
Спектр 5	85,02	0,15	12,98	0,07
Спектр 6	81,02	0,07	14,98	5,03

відсоткового вмісту елементів кожної з найбільш характерних ділянок фазового контрасту. Вміст основних елементів цих фаз, концентрація яких суттєво перевищує фоновий рівень домішок, наведено в табл. 2. Як можна констатувати з проведеного аналізу, матриця покриття (спектр 2) являє собою твердий розчин алюмінію в міді, бо, як відомо, алюміній розчинний в міді до 10% в твердому стані. Основні зміцнювальні фази покриття, найбільш ймовірно, являють собою інтерметалідні хімічні з'єднання алюмінію та міді різного стехіометричного складу. Структура підкладки змінилася не суттєво. Підкладка містить фази 4, 5 та 6 на основі алюмінію та кремнію з дифузійним проникненням міді та дещо підкиснені.

Вичерпне уявлення про фазовий склад електроіскрового мідного покриття на алюмінієвій матриці надає рентгенофазовий аналіз. Так, в результаті розшифрування рентгенограми було виявлено фази Cu, Al та хімічні сполуки інтерметалідів  $Cu_3Al$ ,  $Cu_3Al_4$  та ще однієї інтерметалевої фази з проміжним стехіометричним співвідношенням. Ці проміжні інтерметалеві фази, ймовірно, і являють собою зміцнювальні включення в електроіскровому покритті, що мають суттєво підвищену його зносостійкість.

Оскільки електроіскрові однокомпонентні покриття призначалися для роботи в якості захисту канавок компресійних поршневих кілець двигунів внутрішнього згоряння, то і режими триботехнічних випробувань були вибрані такими, щоб моделювати умови роботи пари «канавка–кілець» в умовах найбільш сталих режимів роботи ДВЗ. А саме, за частот коливання 30 Гц, що відповідає середнім частотам обертання колінчатого валу, який вчиняє циклічну дію на ущільнюючий вузол поршня, тобто відповідно до номінального режиму роботи ДВЗ для частот обертання колінчастого валу біля 1800 об/хв. і навантажень у 1000 Н. Такий режим відповідає навантаженню на контактну ділянку тертя у 20 МПа, так як саме такою є максимальна величина тиску на бічну контактну ділянку системи «канавка–кілець» в момент робочого ходу [3]. Амплітуда коливань складала 10 мкм — в межах робочих зазорів нової пари, а база випробувань —  $5 \cdot 10^5$  циклів. Ці показники залишалися постійними та незмінними для усієї серії випробувань мідних електроіскрових покриттів різного режиму нанесення, а решта факторів варіювалася для оптимізаційних цілей технологічних рішень.

Триботехнічні випробування проводилися за схемою «площина–площина» на модифікованій машині тертя МФК-1, що уможливило контрольований підігрів зони тертя та вимірювання середнього значення коефіцієнта тертя. В якості матеріалу контртіла було вибрано сталь 40X9C2 (HRC 75–80), яка є близькою за складом до чавунних кілець з електролітичним хромовим покриттям для дослідження можливості застосування покриття в парі тертя «канавка–кілець». При цьому, при постійному робочому струмі нанесення

ТАБЛИЦА 3. Режими нанесення покриттів (електроіскрове легування).

TABLE 3. Modes of coatings' deposition (electrical-spark alloying).

Режим нанесення	Робочий струм $I_p$ , А	Час оброблення поверхні, с
1-й режим	10	160
2-й режим	20	160
3-й режим	30	160

$I_p = \text{const}$  досліджували вплив температури в зоні трибоконтакту на інтенсивність зношування і коефіцієнти тертя відповідно, так як три компресійні кільця поршня працюють у різноманітних температурних умовах (рис. 1), отже, можуть вимагати й різних режимів зміцнення.

Для дослідження впливу режиму нанесення, а мідь є дуже чутливою до режиму нанесення [1], використовувалися три режими (табл. 3). Результати триботехнічних випробувань електрофізичних покриттів за постійного режиму нанесення показали, що зі збільшенням температури інтенсивність зношування монотонно зростала для всіх режимів нанесення крім першого, за якого спостерігається підвищення зносостійкості до 300°C.

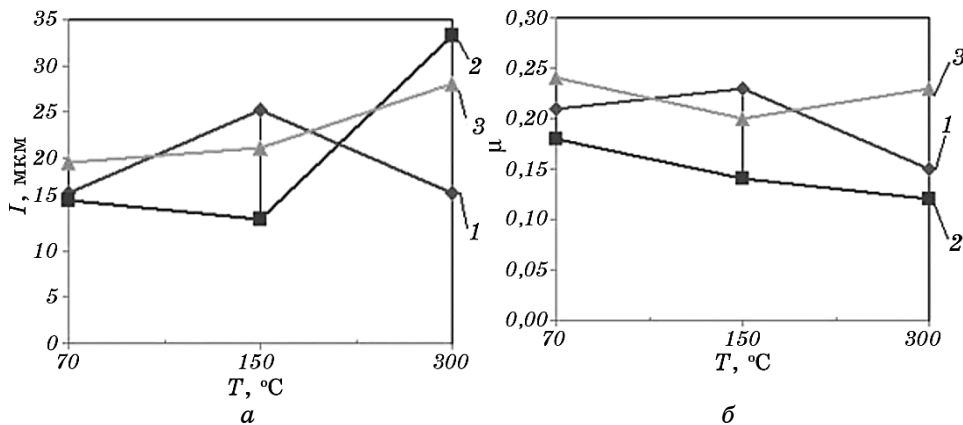
Таким чином, у діапазоні робочих температур для першої поршневої канавки (300°C) найкращі характеристики (16,2 мкм) показав 1-й режим, для другої канавки поршня (150°C) мінімальні значення зношування (13,47 мкм) показав 2-й режим нанесення покриття. Для третьої канавки з робочою температурою біля 70°C найбільш оптимальним також є 2-й режим нанесення зі значенням зношування 15,5 мкм (рис. 6, а).

Коефіцієнт тертя при випробуванні електрофізичних покриттів в залежності від температури у зоні тертя змінюється в межах від 0,12 до 0,24 (рис. 6, б). Для обраних режимів нанесення у випадку першої канавки поршня в робочих режимах випробувань коефіцієнт тертя складає 0,21, для оптимального режиму зміцнення другої канавки поршня — 0,14, а для відповідного режиму зміцнення третьої канавки коефіцієнт тертя складає 0,18. Це свідчить про те, що матеріали працюватимуть в антифрикційній зоні без суттєвих задирів схоплювання та спотворювання ущільненої поверхні, до того ж в другу та третю канавки поршня можливе проникнення суттєвої кількості оливи.

Для пояснення одержаних результатів поверхні тертя зразків з розроблених електрофізичних покриттів були досліджені на електронному мікроскопі «САМЕСА SX 50».

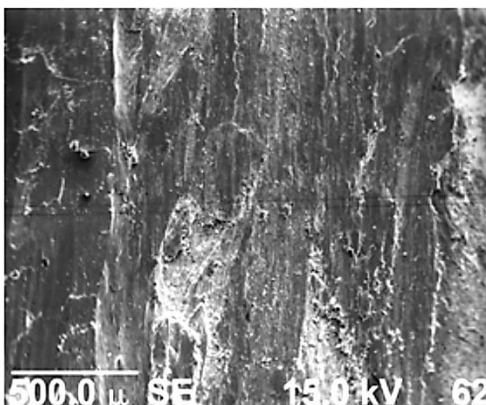
Структура зони тертя композиційних матеріалів при збільшенні  $\times 62$  представляє собою поверхню досить гладкої морфології без сут-

тевих пошкоджень (рис. 7), що має ділянки, які нагадують лускати нашарування. Це свідчить про достатні ущільнювальні властивості трибоконтракту.



**Рис. 6.** Залежності інтенсивності зношування (а) і коефіцієнту тертя (б) від температури випробування для різних режимів нанесення мідного покриття (електроіскрове легування): 1 — 10 А, 2 — 20 А, 3 — 30 А.

**Fig. 6.** Dependences of wear intensity (a) and friction coefficient (b) on the operating temperature for the different modes of copper coverage deposition (electrical-spark alloying): 1 — 10 A, 2 — 20 A, 3 — 30 A.



**Рис. 7.** Мікрофотографія поверхні тертя зразка з мідним покриттям для 1-го режиму нанесення (електроіскрове легування) після випробувань за температури 300°C; збільшення  $\times 62$ .

**Fig. 7.** Photomicrography of friction surface of sample with copper coverage (electrical-spark alloying) for first mode of deposition after tribological test at temperature of 300°C; magnification  $\times 62$ .

#### 4. ВИСНОВКИ

1. Шляхом дослідження структури та адгезійних якостей електроіскрового покриття на основі нікелю та міді було визначено, що нікелеві покриття досить компактні та мають низьку адгезією до силуміну Ал-25, а мідні покриття мають високу адгезію та задовільно наносяться з моменту встановлення прямої полярності електроіскрового процесу.

2. Досліджено триботехнічні характеристики розроблених електрофізичних покриттів в умовах, що моделюють роботу пари «поршнева канавка–кільце», встановлено, що для першої поршневої канавки компресійного кільця доцільно використовувати 1-й режим зміцнення ЕІЛ, а для другої та третьої канавок — 2-й режим зміцнення мідним електроодом.

3. Результати синтезу та досліджень отриманих покриттів дозволяють рекомендувати їх впровадження в якості захисних покриттів для канавок компресійних кілець сучасних двигунів внутрішнього згоряння авіаційної наземної техніки.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. Г. Довгаль, Л. В. Бурдюженко, І. В. Ткаченко, *Сучасні процеси механічної обробки інструментами з НТМ та якість поверхні деталей машин* (Київ: Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України: 2003), с. 313.
2. А. F. Acar, F. Ozturk, and M. Bayrak, *Mater. Technol.*, **44**, No. 6: 391 (2010).
3. О. Г. Гасангусенов, *Вестник АГТУ. Серия: Морская техника и технология*, № 1: 111 (2013).
4. Н. Ю. Дударева, *Вестник УГАТУ*, **14**, № 3: 111 (2010).

#### REFERENCES

1. A. G. Dovgal', L. V. Burdyuzhenko, and I. V. Tkachenko, *Suchasni Protsesy Mekanichnoyi Obrobky Instrumentamy z NTM ta Yakist' Poverkhni Detaley Mashyn* [Modern Processes of Mechanical Treatment by Tools with NTM and Quality of the Surface of Machines Parts] (Kyiv: V. Bakul Institute for Superhard Materials, N.A.S. of Ukraine: 2003), p. 313 (in Ukrainian).
2. A. F. Acar, F. Ozturk, and M. Bayrak, *Mater. Technol.*, **44**, No. 6: 391 (2010).
3. O. G. Gasangusenov, *Vestnik AGTU. Seriya: Morskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, No. 1: 111 (2013) (in Russian).
4. N. Yu. Dudareva, *Vestnik UGATU*, **14**, No. 3: 111 (2010) (in Russian).