

С.В. Устінов, І.О. Буліч, Г.О. Шумілін

Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПЛАЗМОВОГО НАПИЛЕННЯ ПРИ ВІДНОВЛЕННІ ПОВЕРХОНЬ ШТОКІВ ЦИЛІНДРІВ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

У статті розглянуто метод відновлення хромованих поверхонь штоків стояків шасі, рульових машин та інших складових деталей агрегатів авіаційної техніки, які пошкоджені глибокою корозією. Відновлення хромованих поверхонь відбувається для деталей авіаційної техніки з застосуванням технології газотермічного напилення. Дана технологія не завдає шкоди для здоров'я та зовнішнього довкілля. Газотермічне напилення є екологічно чистим процесом. Важливим аспектом у згаданій технології є переваги у збільшенні строку служби деталей та суттєве зменшення собівартості виробництва.

Ключові слова: корозія, штоки стояків шасі, газотермічне напилення, корозійна стійкість.

Вступ

Постановка проблеми. На повітряних судах державної авіації України дедалі частіше зустрічаються випадки дефектів, пов'язаних з глибокою корозією поверхні штоків стояків шасі, рульових машин та інших складових деталей агрегатів, що мають гальванічне хромування, і, які неможливо відновити гальванічним методом.

Метод твердого хромування широко застосовується з метою забезпечення корозійної стійкості та зносостійкості поверхонь деталей, але через канцерогенну активність шестивалентного іону хрому (Cr^{6+}) в процесі виробництва інтенсивно ведуться дослідження можливості з метою реалізації заміни хромування методами газотермічного напилення (ГТН).

З метою відновлення поверхні хромованих штоків, пошкоджених глибокою корозією, пропонується розглянути при ремонті деталей авіаційної техніки застосування технології газотермічного напилення та замінити операції гальванічного хромування, що застосовуються у їх вузлах, а також реалізувати розроблені SAE рекомендації, які викладені у стандартах ARP5935, AMS2449. У вищезазначених стандартах наводиться перелік обладнання та матеріалів, які використовуються для запровадження методу газотермічного напилення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питаннями відновлення покриттів займаються багато компаній у різних країнах. Найбільш відомими є група оборонних відомств США та Канади і аерокосмічних та військових ремонтних

компаній Hard Chrome Alternatives Team (HCAT). За публікаціями у міжнародних виданнях вони досягли значних результатів у даному напрямку, але ретельні описи технологічних процесів, що застосовуються, не публікуються. У наукових виданнях України на сьогоднішній день публікацій щодо проведених у цьому напрямку досліджень теж не було.

Мета статті – дати об'єктивну експертну оцінку для прийняття обґрунтованого рішення щодо відновлення поверхонь хромованих штоків, які пошкоджені глибокою корозією, методом газотермічного напилення.

Виклад основного матеріалу

Газотермічне напилення, це методика нанесення покриття шляхом нагріву, диспергування та переносу активних часток розпилюемого газовим потоком матеріалу з формуванням на підложці контактного слою. На відміну від технології гальванічного хромування, яка потребує великої кількості шкідливих для здоров'я та зовнішнього довкілля речовин, ГТН є екологічно чистим процесом. Крім позитивних екологічних аспектів процеси ГТН мають переваги у збільшенні строку служби деталей при одночасному зменшенні вартості виробництва.

Однією з основних методик є виконання покриття на основі карбіду вольфраму, яке широко використовується у промисловості для підвищення стійкості деталей до зносу та корозії. Висока зносостійкість газотермічних WC-Co-покриттів забезпечується сполученням WC як твердої складової та Co як пластичної зв'язувальної. У випадку напилення WC-Co-покриттів

застосовуються високошвидкісні методи. Вони мають переваги відносно інших методів ГТН, тому що вони реалізують великі швидкості та менші температури часток порошку, знижують, при цьому, ступінь розкладання WC у процесі напилення та попереджують зниження твердості та зносостійкості [1, с. 750...756]. Газотермічні методи нанесення покриттів засновані на використанні технологій детонаційного, понадзвукового повітряно-газового плазмового (ППГП) та високошвидкісного газоплазменного (HVOF) напилення. Швидкість часток при напиленні складає до 1000 м/с при детонаційному напиленні, 500...1000 м/с – при ППГП та до 800 м/с – при HVOF напиленні. Характерними особливостями покриттів, отриманих високошвидкісним напиленням, є їх низька пористість (<1,5 %) при збереженні хімічного складу початкового порошку, а також висока міцність зчеплення (більше 50...70 МПа).

Для проведення напилення використовують WC-Co – порошки зі складом Co 6...17 %, які отримані різними методами [2, с. 2; 3, с. 1]. Для підвищення стійкості WC-Co – покриттів до корозії порошок WC-Co легують хромом, оскільки Co-Cr матриця забезпечує більш високу стійкість до корозії у порівнянні з WC-Co – матеріалами. У порошках вміст Cr складає 4...8 % (WC-10 Co-4Cr; WC-6 Co-8Cr). В залежності від складу порошку, типу обладнання та режимів напилення мікротвердість отриманих WC-Co-покриттів складає 6...12 ГПа при детонаційному напиленні [4, с. 125...131; 5, с. 225...234], 10...15 ГПа при ППГП [6, с. 3709...3714; 7, с. 794...797] та HVOF напиленні [8, с. 473...476; 9, с. 957...962]. Пористість покриттів, які отримані високошвидкісними методами напилення, переважно не перевищує 1,5 %.

За своїми властивостями WC-Co-Cr - покриття мають високу твердість, низький коефіцієнт тертя, а їх зносостійкість, в порівнянні з твердим хромом, вище у 3...5 разів [10, с. 2642...2652].

За корозійною стійкістю WC-Co-Cr – покриття, завдяки наявності Cr, не поступається твердому хрому [11, с. 389...394; 12, с. 3375...3397]. Газотермічне покриття з карбіду вольфраму, у якості альтернативи гальванічному хромуванню, отримало широке застосування у авіаційній промисловості провідних світових авіабудівельних компаній на деталях гідравлічних приводів та стояках шасі [13, с. 39]. Найбільше поширення для заміни гальванічного хромування в авіаційній промисловості знайшов метод HVOF.

За публікаціями у міжнародних виданнях значні досягнення у застосуванні HVOF отримано Hard Chrome Alternatives Team (HCAT) – сумісною групою оборонних відомств США та Канади і

аерокосмічних та військових ремонтних компаній, які займаються питаннями заміни гальванічного хромування газотермічним HVOF-покриттями на деталях авіаційної техніки. Початковою метою роботи цієї групи була розробка технології, яка буде еквівалентною гальванічному хромуванню зі складності виконання та собівартості. Внаслідок цього було встановлено, що газотермічне напилення доцільніше гальванічного хромування за стійкістю та має менші загальні виробничі витрати.

HCAT – є основною установою міністерства оборони США щодо заміни твердого хромування, яке використовується виробниками аерокосмічного обладнання на заводських деталях, а також на військових ремонтних заводах для відновлення зношених компонентів. До складу групи входять усі відповідальні установи, які приймають рішення та є зацікавленими сторонами. До них входять різні виробники аерокосмічної техніки, військові ремонтні заводи та агентства з сертифікації, а також лабораторії США та Канади. Установи працюють разом над створенням та обміном даних, необхідних для перевірки покриттів, отриманих методом HVOF-напилення та іншими методами ГТН, й використовують їх у якості замінювачів твердого хрому у аерокосмічній промисловості. Американські виробники концентруються на використанні HVOF-покриттів WC-17Co у військових цілях, а канадська частина команди концентрується на виробництві шасі літаків цивільної авіації з HVOF-покриттями WC-10Co-4Cr. У цій області Канада є ведучим світовим виробником.

Група HCAT концентрується на використанні HVOF-покриттів WC-Co у якості альтернативи гальванічному хромуванню для класів компонентів, пов'язаних з конкретними авіаційними системами, а саме:

шасі – внутрішні циліндри, вісі, штифти, приводи (сумісно з Boeing та виробниками шасі, BF Goodrich/Menasco, Heroux та MessierDowty) [14, с. 1];

турбіни двигунів (сумісно з робочою групою по захисту зовнішнього середовища, PEWG, членами якого є Pratt&Whitney, GE Aircraft Engines та Rolls Royce-Allison);

ступіці пропелерів (сумісно з Hamilton Sundstrand);

гідравлічні системи;

компоненти вертолітних систем.

У даний час HVOF-покриття WC-Co та WC-Co-Cr використовуються для заміни гальванічних хромових покриттів на більшості комерційних літаках Boeing та Airbus. Зокрема, HVOF-покриття застосовуються на стояках шасі Boeing 767 (787), Airbus 380, а також на стояках шасі та приводах військових літаків (таких як F-35, F-22 і X-45 UCAV).

Чисельні виробничі випробування і підвищена чисельність комерційних пропозицій підтверджують експлуатаційну перевагу HVOF-покриття з карбіду вольфраму для різних компонентів авіаційних двигунів та планерів. Покриття спроможне забезпечити підвищену зносостійкість, удароміцність та втомну міцність, а також рівну чи кращу корозійну стійкість відносно до хромового гальванічного покриття. У таблиці 1 приведено порівняльні характеристики HVOF-покриттів з карбіду вольфраму та гальванічного хромового покриття [13, с. 40].

Таблиця 1

Властивості HVOF-покриттів з карбіду вольфраму та гальванічного хромового покриття

Властивості	Покриття	
	HVOF WC-Co	Гальванічне хромове
Мікротвердість, HRC	>70	60-70
Мікротвердість, HV ₃₀₀	>1050	750-850
Міцність зчеплення, МПа	>80	~41
Пористість, %	<1	<1,5
Товщина покриття, мкм	>80	<0,13
Шорсткість покриття, Ra	<4	<4
Корозійна стійкість (FSTM B117), ч	720	55
Максимальна робоча температура, °C	550	400

Джерело: [13, с. 40]

Також для заміни гальванічного хрому можуть застосовуватися покриття Ni(Fe)CrBCSi, отримані методом HVOF, які мають високу твердість, зносостійкість, корозійну стійкість та мають високу міцність зчеплення зі сталлюю основою [15, с. 1005...1014].

HVOF-покриття зі сплаву на основі Co Tribaloy-800 при високій температурі (500°C) показало добрі зносостійкі властивості [16, с. 6348...6355], завдяки добрій міцності покриття. Воно може бути застосовано для захисту деталей машин, які підлягають тепловому тертю та зносу.

Для заміни твердого хрому на деталях, на яких виникають корозійно-ерозійні ураження, проведені дослідження HVOF-покриттів WC-Ni та Cr₃C₂-NiCr [17, с. 1405...1417]. HVOF-покриття Cr₃C₂-NiCr, отримане з мілкодисперсних та нано-порошків, яке має дуже добрі механічні, зносостійкісні та корозійні властивості, й тому може застосовуватись у якості заміни хромових покриттів на циліндрах землерийних машин, поршневих кільцях та штоках клапанів у автомобільній промисловості [18, с. 2803...2814].

Процес HVOF забезпечує отримання твердого зносостійкого покриття WC-CrC-Ni, яке має кращу

втомлену стійкість, ніж хромове покриття [19, с. 477...484; 20, с. 1617...1623].

Випробування HVOF-покриття Co-Cr-Mo показує, що воно відповідає мінімальним вимогам по корозійній стійкості та складає 750 годин [14, с. 1].

Методом гіперзвукової металізації шляхом напилання порошкових дрітків DURMAT AS-897 (склад: Si 1,25/ Ni 4,5/ Cr 14/ Mn 5,5/ B 1,85/ W 26/ Ti 2/ C 36/ Fe) твердість за шкалою С Роквелла – 66 HRC, DURMAT AS-816 (склад: C 5,1/ Cr 22/ Si 1,7/ Nb 7,0/ Fe) твердість за шкалою С Роквелла – 57...67 HRC [21, с. 1]. Порівняльні триботехнічні випробування показали, що зносостійкість гальванічних хромових покриттів на 30...40 % менше композитних газотермічних покриттів. Відмічається, що технологія гіперзвукової металізації, при правильному підборі матеріалів, що напильються, режимів нанесення та наступної фінішної обробки, може позитивно вирішити завдання з відновлення деталей зі зношеним хромовим покриттям.

Метод виміру міцності зчеплення покриття з основою при відриві дозволяє визначити міцність зчеплення покриття з основою при розтягуванні у напрямку перпендикулярному поверхні. Спосіб полягає у вимірі міцності зчеплення відривом покриття від основи через контрольний зразок, приклеєний до зовнішньої поверхні.

Міцність зчеплення при відриві $S_{мз}$ визначається з виразу [14, с. 2]:

$$S_{мз} = \frac{4P}{\pi d^2} K_e$$

де P – максимальне значення руйнуючого зусилля, кг; d – діаметр зразка, мм; K_e – поправочний коефіцієнт товщини покриття.

Таблиця 2

Значення поправочного коефіцієнту товщини покриття в залежності від його міцності

K_e	0,88	1	1,21	1,41	1,6	1,75	1,96	2,22
d_n	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1,0

d_n – товщина покриття, мм.

Джерело: [14, с. 2]

У таблиці 3 приведені результати випробування WC-Co-Cr-покриття на міцність зчеплення.

Таблиця 3

Результати випробування WC-Co-Cr-покриття на міцність зчеплення

№ зразка	Товщина покриття, мкм	Зусилля при відриві, кг	Міцність зчеплення, МПа	Характер відриву
1	300	1081	>22	По клею
2	300	1180	>24	
3	300	1430	>29	
Середня міцність зчеплення, МПа			>25	

Джерело: [14, с. 3].

Результати випробувань показали, що міцність зчеплення газоплазмених WC-Co-Cr-покриттів зі сталлюю основою складає >25 МПа, яка є прийнятною для деталей з покриттями, які працюють в умовах вузлів тертя.

Випробування ремонтного NiCr-покриття за допомогою WC-Co-Cr методом на газощільність показало, що воно має показник, який достатній для роботи гідравлічної системи. Також покриття показало добру обробку в умовах шліфування.

Висновки

Запропонований метод газотермічного напилення HVOF-покриття на заміну гальванічному хромуванню, з метою відновлення поверхні штоків

літакових агрегатів, які пошкоджені глибокою корозією, має значні переваги при застосуванні для отримання твердого зносостійкого покриття. Крім того, даний метод має меншу собівартість та екологічно чистий при використанні, у порівнянні з класичним гальванічним методом. Тому, метод газотермічного напилення HVOF-покриття доцільно впровадити при виконанні ремонту авіаційної техніки в умовах авіаційних підприємств.

Напрями подальших досліджень. При практичній реалізації запропонованого методу необхідно, по мірі накопичення статистичного матеріалу, проведення досліджень з оцінки надійності виробів АТ.

Список літератури

1. P. Chivavibul, M. Watanabe, S. Kuroda/ Development of WC-Co Coatings Deposited by Warm Spray Process// J. of Thermal Spray Technology. – V.17, Issue 5–6. 2008. – P. 750–756.
2. AMPERIT Thermal Spray Powders <http://www.tecnospray.net/download/HCS/AMPERIT-Brochure.pdf>.
3. Technology, Powder Technology Catalog [http://www.fisherproductsllc.com/pdf/Powder – Brochure.pdf](http://www.fisherproductsllc.com/pdf/Powder%20Brochure.pdf) Praxair Surface.
4. A. A. Shterter, I. Yu. Smurov, V. Yu. Ulianitsky, S. B. Zlobin/ Comparative analysis of tribological properties of cermet detonation sprayed coating // Proc of ITSC (Netherlands, Maastricht. June 2-4) – 2008. – P. 125–131.
5. J. K. Knapp, H. Nitta/ Fine-particle slurry wear resistance of selected tungsten carbide thermal spray coatings // Tribology International – 1997. – V. 30(3), – P. 225–234.
6. L. Du, B. Xub, S. Dong/ Sliding wear behavior of supersonic plasma sprayed WC-Co coating in oil containing sand // Surf. Coat. Technol. 2008. V. 202(15) – P. 3709–3714.
7. S. Ma, C. Li and, X. Ye/ Microstructure and properties of nanostructured WC-Co coating deposited by supersonic plasma spraying // Proc. of ITSC (Basel, Switzerland, 2- 4 May). – 2005. – P. 794–797.
8. G. Matthaeus, W. Brandl, I.-F. Secosan/ Standard HVOF Process Compared to the HVOF Process for Internal Coating with Fine Powders // Proc. Of ITSC (Netherland, Maastricht. June 2 – 4). – 2008. – P. 473–476.
9. A. Kirsten, M. Oechsle and R. F. Moll/ Carbide containing materials for hard chromium replacement by HVOF – spraying // Proc. of ITSC (Basel, Switzerland, 2 – 4 May). – 2005. – P. 957–962.
10. J. K. N. Murthy, B. Venkataraman/ Abrasive wear behavior of WC-Co-Cr and Cr₃C₂-20(NiCr) deposited by HVOF and detonation spray processes // Surface and Coatings Technology. – 2006. – V. 200. – Issue 8. – P. 2642–2652.
11. K. Bobzin, N. Kopp, T. Warda/ Investigation and Characterization of HVOF WC-Co-Cr Coatings and Comparison to Galvanic Hard Chrome Coating // Proc. of ITSC (Busan, South Korea, 13 – 15 May). – 2013. – P. 389–394.
12. G. Bolleli, R. Giovanardi/ Corrosion Resistance of HVOF – Sprayed Coating for Hard Chrome Replacement // Corrosion Science. – 2006. V. 48(11). – P. 3375–3397.
13. F. Peter/ Ruggiero Tungsten carbide coating replace chromium // Advanced Materials and processes (July 2005). – P. 39–40.
14. K. O. Legg, B. Sartwell/ Hard Chromium Alternatives Team Update – Improving Performance While Reducing Cost <https://p2infohouse.org/ref/26/25351.pdf>.
15. S. Abdi, S. Lebaili/ (2009). Alternative to chromium, a hard alloy powder NiCrBCSi (Fe) coatings thermally sprayed on 60CrMn4 steel. Phase and comportements. Physics Procedia, 2(3), – P. 1005–1014.
16. J.Y. Cho, S.H. Zhang, T.Y. Cho, J.H. Yoon, Y.K. Joo, S.K. Hur/ The processing optimization and property evaluation of HVOF Co-base alloy T800 coating. J. Mater. Sci. 2009, 44, – P. 6348–6355.
17. N. Espallargas, J. Berget, J.M. Guilemany/ Cr₃C₂-NiCr and WC-Ni thermal spray coatings as alternatives to hard chromium for erosion-corrosion resistance. Surf. Coat. Technol. 2008, 202, – P. 1405–1417.
18. L. Fedrizzi, S. Rossi, R. Cristel, P.L. Borona/ Corrosion and behavior of HVOF cermet coating used to replace hard chromium. Electrochim. Acta 2004, 49, – P. 2803–2814.
19. J.A. Picas, A. Fomand, G. Matthäus/ HVOF coating as an alternative to hard chrome for pistons and valves. Wear 2006, 261, – P. 477–484.
20. R.G. Borona, H.J.C. Voorwald, M. O. H. Cioffi/ Fatigue in AISI 4340 steel thermal spray coating by HVOF for aeronautic application. Procedia Engin. 2010, 2, – P. 1617–1623.
21. BTMPE Hardfacing, Порошковая проволока DURMATAS, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://btmpe.com>.

Надійшла до редколегії 20.10.2022

Схвалена до друку 12.12.2022

Відомості про авторів:

Устінів Сергій Володимирович

начальник науково-дослідної лабораторії
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5532-1125>

Буліч Ігор Олексійович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-1201-6475>

Шумілін Геннадій Олександрович

старший науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-6974-3692>

Information about the authors:

Serhiy Ustinov

Head of Research Laboratory
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5532-1125>

Ihor Bulich

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1201-6475>

Hennadii Shumilin

Senior Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6974-3692>

PROSPECTS FOR THE USE OF PLASMA SPRAYING IN THE RESTORATION OF THE SURFACES OF THE CYLINDER RODS OF AVIATION EQUIPMENT UNITS

S. Ustinov, I. Bulich, H. Shumilin

Raising of problems. On the air ships of state aviation of Ukraine all more often there are cases of defects, rods of chimneys of undercarriage, steering machines and other component details of aggregates that have the galvanic chrome-plating and that it is impossible to renew a galvanic method related to deep corrosion of surface. A method of the hard chrome-plating is a method is widely used for providing corrosive resistance and wearproofness of sur-faces of details, but through carcinogenic activity to the hexavalent ion of chrome(Cr^{6+}) in the process of produc-tion, works are intensively conducted in area of research of possibilities of replacement of chrome-plating the meth-ods of gas-thermal spraying (GTS) With the aim of proceeding in the surface of rods damaged it is suggested to consider application of technology of gas-thermal spraying deep corrosion for the details of aerotechics and re-placement of applied in their knots of operation of the galvanic chrome-plating, and also worked out SAE of rec-ommendation, what the stated in the standards of ARP5935, AMS2449. In the above-mentioned.

Gas-thermal spraying, it is a methodology of applying coverage by heating, dispersing and transfer of active parts of sprayed material by a gas stream with forming a pin layer on the substrate. Unlike the galvanic chrome-plating technology, which needs large careening bones of unsalubrious and external environmental substances, GTS is an ecologically clean process. Except ecological aspects the processes of GTS have an advantage in the increase of tenure of employment of details simultaneously diminishing value of production. One from basic methodologies there is coverage on to the basic carbide of tungsten, that is widely used in industry for the increase of firmness of details to the wear and corrosion. High wearproofness of gas-thermal WC - Co - coverages provided by connection of WC as a hard constituent and Co as plastic binder.

Keywords: corrosion, stem of chimneys of undercarriage, gas-thermal spraying, corrosive firmness.