

Таким чином, перспективні матеріали забезпечують не лише підвищення експлуатаційних характеристик двигунів, а й сприяють реалізації екологічно безпечного, економічного та інноваційного авіадвигунобудування.

АНАЛІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОКРИТТІВ TiN, TiAlN I CrAlN ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

А. І. Сібільов, Ю. О. Сисоєв

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Нітридні покриття перехідних металів активно використовуються для збільшення ресурсу роботи інструментів і деталей, зокрема в авіаційній галузі. Серед них особливе місце займають покриття на основі нітриду титану (TiN), які вирізняються високою твердістю, хімічною стійкістю та опором до зносу. Відомо, що вакуумно-дугові TiN-покриття вже тривалий час ефективно застосовуються для захисту поверхонь від зношування і корозійного руйнування. [1]. Водночас покриття з TiN має обмеження, пов'язані з недостатньою жаростійкістю. При нагріванні до температур близько до 550–600 °C, TiN активно окислюється на повітрі, перетворюючись на діоксид титану (TiO₂), що призводить до зниження його захисних властивостей [1]. Це різко обмежує його застосування в умовах високих температур (наприклад, в авіаційних двигунах), де нагрів деталей перевищує 500 °C, що може призвести до передчасного зношування покриття і оголення базового матеріалу деталі, що є небажаним.

Для покращення термічної стабільності покриттів були розроблені багатокомпонентні нітридні системи, типу (TiAlN) та (CrAlN). Додавання алюмінію до складу TiN значно підвищує його стійкість до окиснення: такі покриття практично не окислюються до температур близько 900 °C. Це пояснюється тим, що при нагріванні на їхній поверхні утворюється щільна оксидна плівка Al₂O₃, яка виконує роль дифузійного бар'єра та перешкоджає проникненню кисню у глиб покриття. Крім того, введення алюмінію у структуру покриття підвищує його мікротвердість та зносостійкість. Зокрема, твердість покриттів TiAlN може досягати близько 30 ГПа, тоді як твердість традиційного TiN становить 20 ГПа. Таким чином, TiAlN характеризується відмінною термічною стабільністю, високою твердістю та зносостійкістю, що робить його придатним для використання в умовах високих температур без охолодження (наприклад, для деталей турбін або ріжучого інструменту, що обробляє жароміцні сплави).

Іншим перспективним напрямом удосконалення захисних покриттів стало використання покриттів складу CrAlN. Таке покриття поєднує переваги обох елементів – алюмінію та хрому. Подібно до TiAlN, покриття CrAlN характеризується підвищеною жаростійкістю: під час нагрівання на його поверхні утворюються захисні оксидні шари Al₂O₃ і Cr₂O₃, які ефективно перешкоджають дифузії кисню в глибину покриття. Завдяки цьому CrAlN демонструє ще вищу стійкість до окиснення і зберігає структурну цілісність навіть при температурах, що перевищують 900 °C [2]. В випробуваннях на окиснення встановлено, що CrAlN не утворює видимих оксидних фаз до ~ 900 °C, а при 1000 °C окислюється з формуванням суміші оксидів хрому і алюмінію [3]. Твердість покриттів CrAlN також знаходиться на високому рівні – як правило ~ 25 ГПа. Важливо відзначити, що



CrAlN зберігає твердість порядку 20–25 ГПа навіть після тривалої термічної дії при 700 °C [2], тобто проявляє відмінну термічну стабільність механічних властивостей. За кімнатної температури твердість свіжоотриманого CrAlN може досягати ~ 25–30 ГПа, що порівняно з TiAlN. В окремих випадках твердість CrAlN може бути дещо нижчою, ніж у TiAlN (при високому вмісту Al) [4,5]. Більше того, наявність хрому надає покриттю підвищену корозійну стійкість: показано, що CrAlN краще протистоїть дії агресивних середовищ (наприклад, соляного туману), ніж базовий TiN [2]. Покриття CrAlN вважаються перспективними для захисту авіаційних деталей, що працюють при високих температурах та в окиснювальних середовищах. Покриття CrAlN більше схильне до адгезійного зношування, тоді як TiAlN частіше зазнає крихкого руйнування при надвисоких навантаженнях. В обох випадках ці покриття демонструють значно вищу зносостійкість порівняно з TiN [4]. Втім, за нормальних експлуатаційних навантажень обидва покриття значно перевершують TiN за опором зношуванню.

Результати порівняльного аналізу розглянутих покриттів наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Властивості покриттів TiN, TiAlN і CrAlN

Властивість покриття	Тип покриття		
	TiN	TiAlN	CrAlN
Мікротвердість, ГПа	~20 (базова)	~30 (підвищена)	~25 (висока)
Окиснювальна стійкість, °C	~550–600	~900	~900–1000 (дещо вища, ніж TiAlN)
Зносостійкість (відносна)	Висока	Дуже висока (краща за TiN)	Дуже висока (краща за TiN)
Корозійна стійкість (відносна)	Висока	Висока	Дуже висока

Висновки.

Наведені дані показують, що перехід від мононітридного покриття TiN до багатокомпонентних систем TiAlN і CrAlN суттєво підвищує експлуатаційні властивості авіаційних деталей, а саме:

- збільшується жаростійкість та довговічність деталей авіаційної техніки;
- багатокомпонентні покриття мають вищу твердість, що збільшує їх ресурс;
- покриття з багатокомпонентних систем TiAlN і CrAlN мають порівняно з TiN мають вищу корозійну та окислювальну стійкість.

Перелік посилань

1. Вареник, С. В. Покращення властивостей сталі 12X18H9TЛ методом нанесення захисних нітридних покриттів [Текст] / С. В. Вареник, Т. П. Говорун // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали VII Всеукр. наук.-техн. конф. – Суми : СумДУ, 2020. – С. 108–109.



2. Barshilia, H. C. Growth and characterization of TiAlN/CrAlN superlattices prepared by reactive DC magnetron sputtering [Text] / H. C. Barshilia, K. S. Rajam // Journal of Vacuum Science & Technology A. – 2009. – Vol. 27, No 1. – P. 29–34.
3. Witit-Anun, N. High-temperature oxidation resistance of CrAlN thin films prepared by DC reactive magnetron sputtering [Text] / N. Witit-Anun, A. Buranawong // Journal of Metals, Materials and Minerals. – 2023. – Vol. 33, No 3. – P. 1–8.
4. Tribomechanical Behaviour of TiAlN and CrAlN Coatings Deposited onto AISI H11 with Different Pre-Treatments [Text] / W. Tillmann, D. Grisales, D. Stangier, T. Butzke // Coatings. – 2019. – Vol. 9, No 8. – P. 21.
5. Comparative Characterization of the TiN and TiAlN Coatings Deposited on a New WC-Co Tool Using a CAE-PVD Technique [Text] / A.A. Matei, R. N. Turcu, I. Pencea, E. Herghelegiu, M. I. Petrescu, F. Niculescu // Crystals. – 2023. – Vol. 13, No 1. – P. 13.
6. Воробйов, Ю. А. Правила оформлення навчальних і науково-дослідних документів [Текст] : навч. посіб. / Ю. А. Воробйов, Ю. О. Сисоєв. – 4-те вид., випр. і доп. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2019. – 88 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ УМОВ ОТРИМАННЯ СУБМІКРО- ТА НАНОСТРУКТУР ПРИ ДІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА АЛЮМІНІЄВОМУ СПЛАВІ АК4

Є. І. Фесенко, Ю. В. Широкий

*Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»*

Застосування лазерного випромінювання для формування наноструктурованих і субмікроструктурованих шарів на алюмінієвих сплавах потребує ретельного визначення відповідних технологічних параметрів. З цією метою проведено теоретичне дослідження впливу лазерного випромінювання на алюмінієвий сплав АК4 із використанням моделі, запропонованої раніше в [1]. Запропонована модель дає змогу вирішити як задачу теплопровідності, так і задачу термопружності в зоні впливу лазерного випромінювання. Це дозволяє сформулювати температурні поля та температурно-напружений стан у зоні дії лазерної плями. На основі розрахованих параметрів можна ідентифікувати ділянки за глибиною матеріалу, в яких можливе створення умов для реалізації наноструктурованого або субмікроструктурованого стану. Згідно з критеріями, наведеними в [2], умови для утворення наноструктур визначаються такими параметрами: температурний діапазон від 500 до 1500 К, швидкість наростання температури понад 10^6 К/с, а температурні напруження – у межах 10^6 – 10^8 Па, що сприяє інтенсивному процесу структуроутворення.

Аналіз температурних полів, отриманих при дії теплового потоку q_1 , показав, що зі збільшенням глибини матеріалу температура знижується від 2500 К до 650 К. При цьому максимальні температури на поверхні перевищують порогові значення, необхідні для формування наноструктур. У глибших шарах матеріалу температури знижуються до рівнів, при яких утворення наноструктур є можливим. Під впливом теплового потоку q_2 максимальна температура на поверхні становила вже 1850 К, а на певній глибині – 600 К. Оцінка швидкості температурного наростання показала значення понад 10^7 К/с для q_1 та близько 10^6 К/с для q_2 .