

УДК 669.295:621.793:620.178.162.4

**Михайло Студент, проф., д.т.н.; Олександр Лук'яненко, ст. досл., к.т.н.;
Олександра Студент, проф., д.т.н; Володимир Гвоздецький, ст. досл., д.т.н.; Василь
Труш, ст. досл., д.т.н; Христина Задорожна стар. к.т.н.,
Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна**

**ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СПЛАВУ VT6 ПІСЛЯ
ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ДИФУЗІЙНИМ НАСИЧЕННЯМ АЗОТОМ ТА
КИСНЕМ У ДИНАМІЧНОМУ ВАКУУМІ**

Продemonстровано покращення трибологічних властивостей титанового сплаву VT6 в умовах сухого тертя після його поверхневого зміцнення шляхом дифузійного насичення азотом або киснем у динамічному вакуумі.

Ключові слова: титановий сплав VT6, поверхнєве зміцнення, дифузійне насичення, трибологічні характеристики, сухе тертя

Mykhaylo Student, Prof., D.Eng.Sc., Alexander Luk'yanenko, senior researcher, Cand. Sc. in Tech., Oleksandra Student, Prof., D.Eng.Sc., Volodymyr Hvozdet'skyi, senior researcher, D.Eng.Sc., Vasyl Trush, senior researcher, D.Eng.Sc., Khrystyna Zadorozhna, Cand. Sc. in Tech.

**PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE VT6 ALLOY AFTER
SURFACE HARDENING BY DIFFUSION SATURATION WITH NITROGEN AND
OXYGEN IN A DYNAMIC VACUUM**

Improvement in the tribological properties of VT6 titanium alloy under dry friction conditions was demonstrated after surface-layer diffusion saturation with nitrogen or oxygen under dynamic vacuum.

Keywords: VT6 titanium alloy, tribological properties, dry friction, surface hardening, diffusion saturation with nitrogen or oxygen.

Подальший розвиток авіакосмічної техніки та енергомашинобудування неможливий без підвищення надійності вузлів тертя, що працюють у складних силових умовах без примусового змащування. Високі питома міцність та корозійна стійкість титанового сплаву VT6 (Ti-6Al-4V) робить його одним із перспективних конструкційних матеріалів для потреб цих галузей. Проте незадовільні трибологічні властивості за сухого тертя (високий коефіцієнт тертя та схильність до адгезійного схоплювання з утворенням задирів) стримують його ширше застосування в рухомих з'єднаннях (особливо в парі із титановими сплавами або нержавними сталями).

Традиційні методи нанесення покриттів не завжди забезпечують достатню адгезійну міцність по лінії інтерфейсу покриттів з основою, що призводить до їх відшарування під дією прикладених ззовні навантажень. Альтернативним і перспективним підходом є хіміко-термічна обробка (ХТО) титанових сплавів у вакуумі, яка створює передумови для формування градієнтних за складом і характеристиками дифузійних шарів, сформованих як тверді розчини проникнення. Втілення такого підходу обмежує утворення крихких фазових плівок на поверхні сплавів і забезпечує плавний перехід їх властивостей від найвищих на зміцненій поверхні до притаманних пластичній основі.

Мета роботи полягає у порівняльній оцінці впливу високотемпературного дифузійного насичення поверхневих шарів титанового сплаву VT6 елементами втілення (кисень і азот) на кінетику тертя та механізми зношування зміцнених шарів під час їх контакту з нержавною сталлю за умов сухого ковзання.

Для дифузійного насичення використали плоскі зразки, робоча поверхня яких становила 30x30 мм а товщина – 2 мм. Зразки азотували у вакуумній камері за температури 850°C і тиску азоту 10^5 Па. Під час оксидування зразків у вакуумній камері підтримували розрідження 10^{-2} Па і температуру 750 °C. Тривалість азотування і оксидування становили 10 та 6 годин відповідно. Обидва варіанти ХТО здійснювали в умовах динамічного вакууму за постійного контролю параметрів тиску чи розрідження і безперервного напускання азоту і відкачування кисню з насичувального середовища. Використання такого технологічного підходу дало змогу прецизійно (з точністю до 1 мкм) прогнозувати глибину формування поверхнево-зміцненого шару, що необхідно для побудови кореляційних залежностей між товщиною дифузійних шарів та парціальним тиском насичувального середовища. Адже це основа для забезпечення високої відтворюваності результатів випробувань для визначення трибологічних властивостей і дає змогу оптимізувати режими дифузійного насичення конкретних деталей авіаційного призначення з жорсткими вимогами до незмінності властивостей їх основи і допусками щодо збереження їх геометрії. Адже дотримання цих вимог є критичним для деталей авіаційної техніки.

Завдяки меншим енерговитратам та зношуванню вакуумної печі з одночасно коротшим циклом самого процесу дифузійного оксидування його застосування для поверхневого зміцнення титанового сплаву ВТ6 є дешевшим рішенням для покращення його роботоздатності під час експлуатації в легких (за невисокого питомого навантаження) умовах тертя. Азотування пов'язане з вищими витратами на нагрівання, довшим витриманням для насичення титанового сплаву на потрібну глибину. Адже азот дифундує повільніше за кисень (його коефіцієнт дифузії за температури процесу насичення 850°C становить орієнтовно $8 \cdot 10^{-16}$ м²/с, тоді як кисню за температури 750°C – $\sim 1,8 \cdot 10^{-15}$ м²/с) Проте для дифузійного насичення азотом не потрібно витратних хімічних реагентів, а лише мінімальну кількість азоту високої чистоти. Якщо вартість методу оксидування прийняти за 1.0 (умовна вартість), то азотування буде коштувати в ~ 1.3 – 1.4 дорожче, але його абразивна зносостійкість після цього зросте на 200–300%.

Попри вищу вартість реалізації, азотування виграє завдяки впливу наступних чинників: 1) термін експлуатації азотованих деталей за умов абразивного зношування у 2–3 рази перевищує, властивий оксидованим деталям; 2) як правило, витрати на виготовлення однієї довговічнішої деталі (після азотування) нижчі, ніж на дворазове виготовлення та заміну дешевших оксидованих деталей; 3) в авіації чи енергетиці вартість заміни вузла (витрати на ремонтні роботи + пов'язані з простоем виробничого процесу) у десятки разів перевищує вартість зміцнювального оброблення його елементів; 4) вакуумна технологія забезпечує видалення залишкового водню та мінімізує ризик окиснення серцевини або появи в ній тріщин, що характерно для дешевих методів поверхневого зміцнення на повітрі.

Незважаючи на вищу енергоємність процесу азотування (850 °C) порівняно з оксидуванням (750 °C), його застосування є економічно обґрунтованим і виграним для високонавантажених вузлів. Підвищення ресурсу деталі у 2,5–3 рази дозволяє суттєво знизити експлуатаційні витрати та витрати на сервісне обслуговування, що повністю нівелює різницю у вартості електроенергії під час дифузійного насичення.

Під час азотування титанового сплаву за температури 850 °C на його поверхні формується дуже твердий, але водночас надкрихкий шар нітриду титану. Авіаційники допускають, що через вібрації цей надтвердий шар матиме високу схильність розтріскування. А за високих вібрацій утворені мікротріщини миттєво проростатимуть крізь увесь переріз деталі (ефект концентрації напружень). Оксидування забезпечує у поверхнево-зміцненому шарі менш виражений градієнт за твердістю. Та й сам окиснений шар є менш крихким, що безпечніше з огляду на його меншу схильність до

тріщиноутворення як необхідної передумови для забезпечення потрібної живучості елементів з титанового сплаву. Крім того за температури 850 °С коефіцієнт дифузії водню (невелика кількість якого завжди є в камері або у самому металі) набагато вищий, ніж за 750 °С. Отже, азотування обумовлює вищий ризик для проявів водневої крихкості, ніж оксидування, що формується за нижчої температури. Слід також враховувати, що деталі літака часто мають складну геометрію та тонкі перерізи. Тому, ризик зміни форми і розмірів деталей через термічні впливи (зокрема деформація деталей під власною вагою або через внутрішні напруження) за температури 850 °С значно вищий, ніж за температури 750 °С.

Загалом оксидування за температури 750 °С вважається прийнятним для елементів авіаційного устаткування, оскільки дає змогу зберегти втомну міцність базового металу на необхідному рівні. Проте його реалізація не завжди забезпечує необхідну зносостійкість таких елементів. Це дослідження спрямоване на пошук режиму дифузійного азотування титанового сплаву ВТ6 при 850 °С, який забезпечив би його поверхневому шару екстремальну зносостійкість, не спричинивши при цьому критичного зниження пластичності. Ці результати слугуватимуть підґрунтям для розширення меж застосування ХТО для елементів високонавантажених вузлів.

Дифузійне насичення титанових сплавів елементами втілення спричиняє обернену залежність між їх поверхневою твердістю і в'язкістю руйнування зміцненого сплаву (чим вища твердість поверхні, тим нижча в'язкість руйнування). У вихідному стані титанові сплави відзначаються високою ударною в'язкістю (~0.4–0.6 МДж/м²). Після їх поверхневого оксидування за температури 750 °С зафіксовано лише незначне (на 10–15%) зниження ударної в'язкості. Пояснюється це помірним термічним впливом під час оксидування і, як наслідок, недостатніми умовами, по-перше, для інтенсивного росту зерен, а, по-друге, для швидкої дифузії кисню крізь твердий розчин, що необхідно для формування суцільного крихкого бар'єру [1, 2]. Водночас підвищення температури процесу до 850 °С та подовження часу азотування титанових сплавів призводить до відчутнішої втрати їх ударної в'язкості (на 25–35%). Таке її зниження зумовлене глибшим проникненням дифундуючого азоту та вищою концентрацією елемента проникнення в ньому, що корелює з результатами досліджень впливу ХТО на пластичність титанових сплавів [3, 4]. Це може бути також зумовлено сильнішим блокуванням ковзання дислокацій у поверхневому шарі титанових сплавів під дією азоту. Водночас оксидування практично не змінює об'ємну пластичність. Навіть за критичних навантажень деталей зберігає здатність до безпечної деформації. Тоді як за азотування виникає ефект окрихчування поверхневого шару і за ударного навантаження у ньому можуть виникати тріщини. Хоча серцевина поверхнево зміцнених деталей залишається після цього в'язкою, але поверхневий шар втрачає здатність адаптуватись до зовнішніх умов навантаження шляхом релаксації напружень внаслідок пластичного деформування. Це призводить до зниження (найчастіше на 20–30%) ударної в'язкості сплавів, поверхнево-зміцнених дифузійним азотуванням порівняно з необробленими.

Звідси виглядає обґрунтованим вибір дифузійного оксидування за температури 750 °С для поверхневого зміцнення титанових сплавів в авіаційній промисловості, яке забезпечуватиме краще поєднання трибологічних властивостей та в'язкості руйнування сплавів після оброблення. Разом з тим вакуумне азотування за температури 850 °С, хоча і призводить до зниження на ~30% ударної в'язкості, проте забезпечує критично необхідний рівень зносостійкості елементів вузлів, які експлуатуються в умовах сухого тертя. При цьому слід пам'ятати, що вибір для зміцнення титанових сплавів азотування потребує індивідуального підходу. Адже використання таких деталей у відповідальних вузлах тертя потребує урахуванням запасу їх втомної міцності після такого оброблення.

Нівелювання негативного впливу високої температури (850 °С) під час дифузійного азотування поверхні сплавів типу VT6 та VT9 на їх в'язкість руйнування можна досягти зменшенням тривалості циклів насичення поверхні азотом з наступним стабілізаційним відпалом. Завдяки цьому на їх поверхні формується високо функціональний триботехнічний шар за збереження показників відносного видовження на рівні не менше 80% від властивого базовому сплаву. Це задовольняє вимоги щодо забезпечення роботоздатності авіаційних деталей, які працюють за дії циклічних навантажень.

Дані щодо технологічних (температура, тиск насичувального середовища) і функціонально важливих показників (твердість, трибологічні властивості та ударна в'язкість) для титанового сплаву VT6 зведені у таблиці і дозволяють оцінити переваги кожного з використаних у дослідженні методів ХТО.

Таблиця. Умови ХТО та функціональні характеристики зміцненого сплаву VT6

Технологічні і функціональні властивості	Вихідний стан	Окисидування	Азотування
Температура під час ХТО, °С	—	750	850
Тиск середовища у камері, Па	—	10 ⁻²	10 ⁵
Мікротвердість поверхні HV _{0,49}	320–350	600–650	800–850
Товщина дифузійного шару, мкм	—	80–120	40–60
Коефіцієнт сухого тертя зі сталлю	0,65	0,22	0,31
Відносна ударна в'язкість, %	100	85–90	65–75
Механізм зносу за сухого тертя	Адгезійний, задири	Окисненням	Мікроабразивний

Висновки

Узагальнені в таблиці дані засвідчують, що попри те, що під час вакуумного азотування за температури 850 °С формується дифузійно-зміцнений шар з найвищими показниками за зносостійкістю, але його ударна в'язкість знижується відносно необробленого сплаву на 25–35%. Окисидування за температури 750 °С прийнятніший режим, оскільки навіть за нижчої твердості дифузійного шару виявив високу ефективність в умовах сухого тертя за збереження до 90% в'язкості руйнування, властивій базовому сплаву.

Робота виконана за фінансової підтримки Національного фонду досліджень України в межах проекту 2025.06/0028 «Розроблення технології поверхневого зміцнення деталей з титанових сплавів двигунів авіаційної техніки регламентованим дифузійним насиченням елементами втілення»

Перелік посилань

1. Pichuhin A.T., Yas'kiv O.I., Luk'yanenko O.H., Pohrelyuk I.M. Influence of the Phase-Structural State of the Surface Layers on the Mechanical Properties of VT1-0 Titanium Alloy. Materials Science 47, 670–676 (2012). <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9442-9>
2. Хіміко-термічна обробка титанових сплавів : поверхневе твердодорозчинне модифікування / В. М. Федірко, І. М. Погрелюк, О. Г. Лук'яненко, В.С. Труш. – Київ : Наукова думка, 2020. – 184 с.
3. Федірко В.М., Погрелюк І.М. Азотування титану та його сплавів. К.: Наук. думка, 1995. – 222 с.
4. Pohrelyuk I.M., Lavrys S.M., Trush V.S., Lukyanenko A.G., Kravchyshyn T.M. Effectiveness of Gas Nitriding of Two-Phase Titanium Alloys. Materials Science 59, 1–9 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00736-9>.