

УДК 669.295:621.785

С.М. Лаврись, І.М. Погрелюк

Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ АЗОТУВАННЯ ДВОФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВУ VT22 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЗНОСОСТІЙКОСТІ

Досліджено вплив деформаційно-дифузійної обробки, яка включає комбінацію попереднього холодного поверхневого пластичного деформування (вигладжування) та наступної хіміко-термічної обробки (азотування) на фізико-механічні та трибологічні властивості двофазного титанового сплаву VT22. Встановлено, що попереднє вигладжування титанового сплаву VT22 інтенсифікує процеси фазоутворення та газонасичення під час азотування, суміщеного з його термічною обробкою, та забезпечує вищі значення поверхневої твердості. За результатами трибологічних випробувань та металографічних аналізів поверхні зношування встановлено механізми зношування трибопар зміцнений сплав VT22 – бронза БрАЖН 10-4-4 в умовах граничного мащення. Показано, що деформаційно-дифузійна обробка титанового сплаву забезпечує вищі триботехнічні показники досліджуваних трибопар порівняно з традиційними обробками (вигладжуванням чи азотуванням, суміщеним з термічною обробкою).

Ключові слова: титановий сплав, вигладжування, азотування, деформаційно-дифузійна обробка, зносостійкість

С.М. Лаврись, І.Н. Погрелюк

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ АЗОТИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22 ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

Исследовано влияние деформационно-диффузионной обработки, включающей комбинацию предварительного холодного поверхностного пластического деформирования (выглаживания) и последующей химико-термической обработки (газовое азотирование) на физико-механические и трибологические свойства двухфазного титанового сплава VT22. Установлено, что предварительное выглаживание титанового сплава VT22 интенсифицирует процессы фазообразования и газонасыщения при совмещенном с термической обработкой азотировании и обеспечивает высокие значения поверхностной твердости. По результатам трибологических испытаний та анализов поверхности износа установлены механизмы изнашивания трибопар упроченный сплав VT22 – бронза БрАЖН 10-4-4 в условиях граничной смазки. Показано, что деформационно-диффузионная обработка титанового сплава обеспечивает более высокие триботехнические показатели исследуемых трибопар по сравнению с традиционными обработками (выглаживанием или совмещенным с термической обработкой азотированием).

Ключевые слова: титановый сплав, выглаживание, азотирование, деформационно-диффузионная обработка, износостойкость

S.M. Lavryś, I.M. Pohrelyuk

INTENSIFICATION OF THE NITRIDING OF VT22 TWO-PHASE TITANIUM ALLOY FOR INCREASE ITS WEAR RESISTANCE

The influence of deformation-diffusion treatment including a combination of the previous cold surface plastic deformation (ball burnishing) and subsequent thermochemical treatment (nitriding), on the on physico-mechanical and tribological properties of the VT22 (Ti-6Al-5Mo-5V-1.5Cu-1Fe) two-phase titanium alloy was studied. It was established that the preliminary burnishing of the VT22 titanium alloy intensifies the processes of the phase formation and gas saturation during nitriding, combined with its heat treatment and provides higher values of surface hardness. According to the results of the tribological test, SEM and EDX analyses of the wear surfaces, wear mechanisms (or processes) of tribo-pairs hardened titanium alloy – bronze alloy (Cu-10Al-4Ni-4Fe) in the conditions of boundary lubrication were established. It is shown that deformation-diffusion treatment of titanium alloy provided higher tribotechnical parameters of investigated tribo-pairs compared to traditional treatments (ball burnishing or gas nitriding, combined with its heat treatment).

Key words: titanium alloy, burnishing, nitriding, deformation-diffusion treatment, wear resistance

Окреслення проблеми. Перспективним в авіабудуванні є використання високоміцних двофазних титанових сплавів різних систем (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-2Mo-2Cr, Ti-6Al-5Mo-5V-1.5Cu-1Fe, Ti-5Al-2.5Sn, Ti-3Al-8V-6Cr-4Zn-4Mo та інші). Однак такі сплави мають суттєвий недолік: низьку зносостійкість, що спричинена холодним мікрозварюванням та схоплюванням зі спряженим матеріалом під час тертя. Для усунення цього недоліку робочі поверхні виробів з титанових сплавів захищають від зносу. Існує безліч методів, які застосовують для підвищення зносостійкості двофазних титанових сплавів. Нижче наведено та проаналізовано деякі із цих методів: хромування, детонаційне напилення, електроіскрове поверхневе легування (ЕПЛ), холодне поверхневе пластичне деформування (ХППД), газове азотування та інші [1–4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Хромування хоча і підвищує зносостійкість титанових сплавів, проте даний метод має ряд недоліків. Оксидна плівка, що утворюється на

титанових сплавах на повітрі та в електролітах, істотно знижує адгезію покриттів з основою, що призводить до відшарування хромового покриття під час експлуатації та підвищує відсоток браку зміцнених виробів. Тому якість отримання покриттів, в основному, визначається попередньою підготовкою поверхні. Недоліком хромування є також зниження втомної міцності внаслідок дефектів структури хромових покриттів, а саме мікротріщин і залишкових внутрішніх напружень. Поруватість та нещільність хромових покриттів знижують гідравлічну щільність зміцненої поверхні, що призводить до підтікання (просочування) мастильних матеріалів у трибоспряженнях без явних слідів зносу. Гостро стоїть проблема шкідливого впливу Cr (VI) під час нанесення гальванічних покриттів та утилізації відходів такого виробництва.

Детонаційні покриття, сформовані вибуховою хвилею газової суміші, мають хорошу адгезію завдяки багатшаровості покриттів, коли першим (внутрішнім) шаром є м'який споріднений до титану метал (молібден, тантал, ніобій, нікель чи їх сплави), а наступним (зовнішній шар) – зносостійкий, який складаються з карбідів, нітридів, оксидів, боридів титану чи їх комбінації із зв'язуючими додатками порошоків нікелю, нікель – мідь та інше. Отримані детонаційні покриття мають хороше зчеплення з основним металом (титан) та низьку поруватість порівняно з іншими методами (плазмовим, електродуговим напиленнями). Однак такі покриття мають і ряд недоліків: вузькі межі грануляції порошоків для забезпечення якості покриття, низьку гідравлічну щільність та втомну міцність через різницю твердості між матрицею та пористим покриттям. Також до недоліків слід віднести порівняно низьку продуктивність обробки, необхідність фінішних технологічних операцій (шліфування, полірування, хонінгування, вигладжування тощо) та окремого приміщення (рівень гучності 140 Дб) та спеціального обладнання.

Серед електрофізичних методів зміцнення поверхні титану та його сплавів найефективнішим є електроіскрове поверхнєве легування (ЕПЛ), за якого в результаті розряду між електродом (анод) і виробом з титанового сплаву (катод) матеріал електрода переноситься на поверхню виробу. В результаті такої обробки на поверхні титанового сплаву одержують покриття хрому, нікелю, заліза, кобальту та карбідів, боридів, оксидів, нітридів різних металів. Перевагою цього методу є висока адгезія покриттів з основним металом без попередньої обробки поверхні та значне підвищення триботехнічних характеристик порівняно з вище згаданими методами. Проте неможливість одержання 100 % щільності покриття, невелика глибина та нерівномірність товщини зміцненого шару, значне погіршення шорсткості поверхні, наявність значних залишкових напружень, зниження втомної міцності та низька продуктивність процесу обмежує застосування цієї обробки в серійному виробництві.

Холодне поверхнєве пластичне деформування титанових сплавів підвищує рівень поверхнєвого зміцнення, покращує шорсткість поверхні в декілька разів, особливо несучі властивості поверхні, що підвищує гідравлічну щільність виробів. Через покращення шорсткості поверхні та утворення залишкових напружень стиску втомна міцність матеріалу підвищується. З розвитком такого методу обробки титанових сплавів (застосування нових покращених мастильних матеріалів, розробка нових матеріалів для виготовлення інденсторів) ефективно підвищується продуктивність процесу. Однак трибологічні випробування показали, що така обробка не усуває головної причини низької зносостійкості титанових сплавів, а саме високої хімічної активності титану під час тертя, що призводить до холодного мікрозварювання та схоплення зі спряженим матеріалом.

Після газового ізотермічного азотування титанових сплавів формується поверхневий нітридний шар (TiN , Ti_2N) та градієнтна перехідна зона $Ti(N)$, що підвищує трибо- та корозійну стійкість зміцненого матеріалу. Змінюючи технологічні параметри (температура, час, парціальний тиск азоту) цієї обробки можна отримувати регламентовані властивості зміцнених шарів. Газове ізотермічне азотування є чутливим до залишкових напружень, які виникають під час виготовлення виробів. Тому деталі перед азотуванням піддають попередній штатній термічній обробці (ШТО) у нейтральній атмосфері (гелій чи аргон) або у вакуумі. Основним недоліком газового азотування є високі температури ($\geq 850^\circ C$) та тривалі ізотермічні витримки (≥ 10 год) для отримання глибокого зміцненого шару, що призводить до росту зерен і, як наслідок, зниження механічних характеристик матеріалу.

Постановка завдань. Виходячи з вище сказаного, можна стверджувати, що та чи інша обробка титанових сплавів має як переваги, так і недоліки. Не виключено, що комбінування цих методів обробок дозволить отримати покращені експлуатаційні характеристики в порівнянні з експлуатаційними властивостями після окремої обробки. Прикладом таких комбінацій є наступні. Комбінація легування поверхні титану та наступної електровибухової обробки, що дозволяє

істотно збільшити поверхневу твердість та глибину зони зміцнення [5]. Комбінування плазмового напилення покриттів на титановий сплав з наступною мікродуговою окислювальною обробкою дозволяє підвищити твердість та зносостійкість [6]. Комбінація УФ-випромінювання і хімічної обробки титану значно покращує біологічну реакцію титанових поверхонь і являє собою цікаве рішення для поліпшення кісткової інтеграції зубних імплантатів [7].

В даній роботі ми вивчили ефективність деформаційно-дифузійної обробки, яка включає попереднє ХППД (вигладжування) та наступну ХТО (азотування, суміщене з термічною обробкою) для підвищення зносостійкості двофазного титанового сплаву VT22. Така комбінація способів поверхневого зміцнення виправдана тим, що попереднє здрібнення структури поверхневого шару методом ХППД забезпечує збільшення площі границь зерен, нагромадження лінійних, точкових дефектів та залишкових напружень у поверхневому шарі, що в сукупності інтенсифікує процеси фазоутворення і газонасичення під час ХТО. Це дає можливість зменшити час і температуру газового азотування та сумістити процес ХТО з ШТО. В результаті такої деформаційно-дифузійної обробки можна отримати регламентовані механічні характеристики матеріалу, які задає ШТО, і сформувати поверхневий зміцнений азотований шар з підвищеною зносостійкістю.

Мета роботи – провести порівняльну оцінку фізико-механічних та триботехнічних характеристик двофазного титанового сплаву VT22 після деформаційно-дифузійної обробки (комбінування ХППД та ХТО) з триботехнічними характеристиками цього сплаву після деформаційної (ХППД) та після термодифузійної (ХТО) обробок.

Методологія досліджень. Для дослідження вибрали високоміцний двофазний титановий сплав VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1.5Cu-Fe), який широко використовують в авіаційній промисловості під час виробництва літаків АН, ИЛ, ЯК, ТУ. Мікроструктура сплаву – це витягнуті первинні α -пластинки з різною орієнтацією, які розташовані в β -зерні (матриці) з випадковою присутністю α -фази на межах β -зерна. (рис. 1). Вміст β -фази є пропорційним до вмісту α -фази (β -фази ≈ 45 –52%). Коефіцієнт стабілізації β -фази Ti5Al5Mo5V1.5CuFe сплаву становить 1.2.

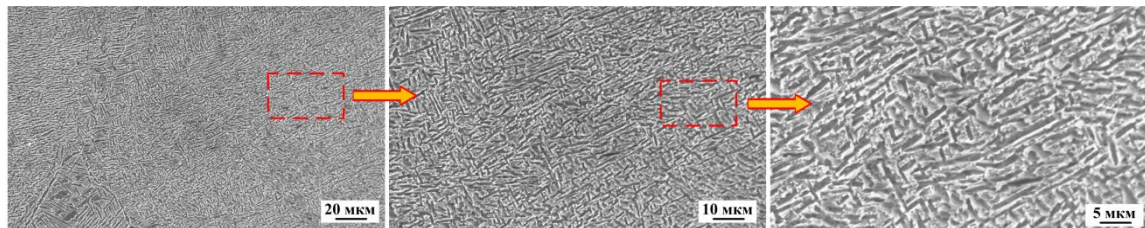


Рис. 1. Мікроструктура титанового сплаву VT22

Для порівняння ефективності деформаційно-дифузійної обробки порівняно з традиційними (вигладжуванням чи азотування) титановий сплав обробляли за наступними режимами:

Режим R1 – Деформаційне зміцнення методом ХППД. З усієї номенклатури методів ХППД для обробки титанових сплавів можуть бути застосовані ті, в основі яких лежить тертя кочення. Це пояснюється тим, що титанові сплави під час ХППД схильні до контактного схоплювання і налипання на інструмент. Тому для реалізації ХППД був вибраний метод вигладжування алмазною кулькою, в якому найнижчий ступінь тертя ковзання і, як наслідок, менша ймовірність утворення дефектів на оброблюваній поверхні. Крім цього, вигладжування кулькою дозволяє обробляти матеріал з меншими зусиллями, що знижує ймовірність деформування деталей і лущення поверхні. Навантаження під час вигладжування – 200 Н; кількість проходів – 7; швидкість – 200 об/хв; діаметр кульки 5 мм; матеріал кульки синтетичний алмаз АПКМ (алмазний полікристалічний композиційний матеріал). Даний метод оброблення титанового сплаву був реалізований в ІНМ НАН України [8].

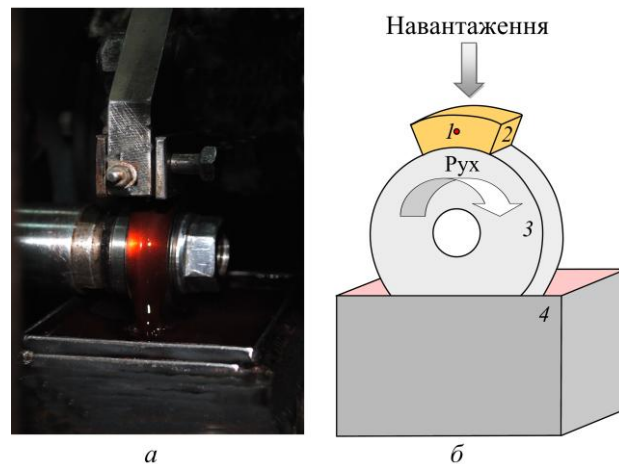
Режим R2 – Термодифузійне зміцнення, а саме азотування, суміщене з ШТО. ШТО сплаву VT22 передбачає нагрівання за ступеневим режимом: I ступінь – нагрівання до температури 820...850 °С, витримка 1...3 год; II ступінь – охолодження з піччю до – 740...760 °С, 1...4 год; охолодження зі швидкістю 5 °С/хв. до 450 °С; III ступінь – нагрівання до температури 500...650 °С, витримка 2...4 год, охолодження зі швидкістю 5 °С/хв. Азот подавали у реакційну камеру на I ступені ШТО і випускали по закінченні ШТО Азотування здійснювали на установці, яка дозволяє відтворювати технологічний регламент термічної обробки сплавів (циклічні зміни

температури, швидкості нагрівання та охолодження), а також забезпечувати температурно-часовий та газодинамічний режими азотування в одному технологічному циклі. Використовували газоподібний азот технічної чистоти, який перед подачею в реакційний простір печі висушували та звільняли від кисню, пропускаючи через капсулу з силікагелем та нагріту на 50 °С вище температури насичення титанову стружку[9].

Режим R3 – деформаційно-дифузійне зміцнення. Деформаційно-дифузійна обробка включає попереднє вигладжування (R1) та наступне азотування (R2).

Фазовий склад поверхневих шарів визначали рентгенівським фазовим аналізом на дифрактометрі ДРОН–3.0 у монохроматичному Cu K_α -випромінюванні з фокусуванням за схемою Бреґґа-Брентано. Шорсткість поверхні до та після кожної обробки вимірювали на профілометрі моделі 170621 з автоматичним визначенням середнього арифметичного відхилення профілю R_a . ДюрOMETричний аналіз вихідної та зміцненої поверхонь зразків проводили з використанням мікротвердоміра ПМТ-3М за навантаження на індентор 0,98 Н. Мікроструктурний аналіз поверхні проводили на сканувальному електронному мікроскопі (СЕМ) ZEISS EVO 40XVP, який обладнаний системою рентгеноспектрального мікроаналізу (РСА) INCA Energy 350.

Трибологічні випробування проводили на машині тертя СМЦ-2 з автоматичним визначенням зміни коефіцієнту тертя та температури в околі зони тертя. Схема трибоспрямлення «диск–колодка» (рис. 2). Шлях тертя становив 1000 м за питомого навантаження 0,6 МПа і швидкості ковзання 0,6 м/с (300 об/хв.). В якості мастильного матеріалу використовували гідрорідину АМГ-10, яка використовується у гідросистемах шасі літаків марки АН. Мащення граничне (часткове занурення досліджуваного диска у контейнер з мастилом). Диски виготовляли з титану ВТ22, поверхню яких зміцнювали за режимом R1–R3. Колодки (контртіла) виготовляли з нікель-алюмінієвої бронзи БрАЖН 10-4-4 (Cu–10Al–4Ni–4Fe). Зносостійкість оцінювали за зміною (втратою) маси тіла, контртіла та пари тертя. Зважування досліджуваних зразків після тертя проводили на аналітичних вагах ОНАУS з точністю ± 1 мг.



1 – отвір для термомпари; 2 – колодка (контртіла); 3 – диск (зразок); 4 – контейнер з мастилом

Рис. 2. Зовнішній вигляд (а) та схема (б) трибоспрямлення «диск – колодка»

Результати та їх обговорення. Топографія поверхні зразків у вихідному стані представлена паралельно розташованими борознами, які виникли внаслідок механічної обробки (точіння) під час виготовлення (рис. 3, а). Після вигладжування (R1) борозни розгладжуються та практично зникають (рис. 3, б). На вигладженій поверхні присутні окремі ділянки окиснення металу. Це пояснюється низькою теплопровідністю титану ($\lambda=20\text{...}25$ Вт/(м·К)), де температура в зоні контакту з алмазною кулькою може сягати до 400 °С, що активує взаємодію поверхневих шарів сплаву з киснем технологічного середовища з утворенням поверхневих оксидних плівок. Шорсткість поверхні титану після вигладжування поліпшується на 4 класи проти вихідної (без ХППД) (табл. 1).

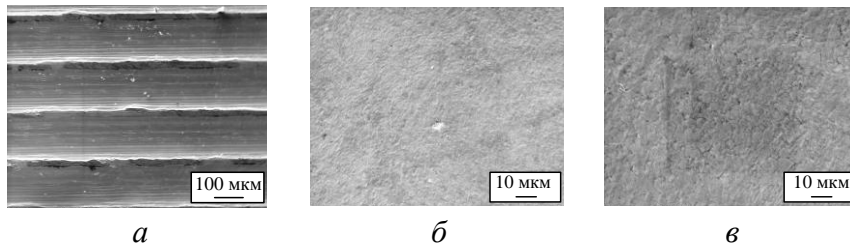


Рис. 3. Топографія поверхні титанового сплаву VT22 у вихідному стані (а), після вигладжування (б) та наступного азотування (в)

Після вигладжування відбувається поверхневе зміцнення сплаву, про що свідчить підвищення поверхневої твердості та формування ущільненого зміцненого шару. Встановлено, що під час ХППД твердість поверхні сплаву зростає на 0.7 ГПа і становить 3.9 ГПа, а глибина зміцненого шару сягає близько 50 мкм (табл. 3). Таке поверхневе зміцнення під час вигладжування відбувається внаслідок зменшення розмірів зерен α -фази (4...15 мкм) та збільшення площі їх меж. Тобто, внаслідок формування тонкого поверхневого шару матеріалу з субзеренною структурою.

Таблиця 1

Результати профілометричних та дюрOMETричних аналізів титанового сплаву VT22

Режим	Ra, мкм		H _{0,98} , ГПа		Глибина зміцненого шару, мкм
	до	після	до	після	
R1	4.00	0.24	3.2	3.9	50
R2*	0.29	0.58	3.0	5.5	80
R3	4.00	0.43	3.9	6.0	110

*Примітка: Азотування проводили на полірованих зразках

Азотування, суміщене з ШТО титанового сплаву VT22 (R2), проводили на зразках після полірування. Внаслідок термодифузійного насичення в атмосфері азоту на поверхні сплаву VT22 формується світло-золотиста плівка нижчого нітриду титану Ti₂N, про що свідчать результати рентгенівського фазового аналізу, фіксуючи присутність рефлексів цієї фази у дифракційному спектрі (рис. 4).

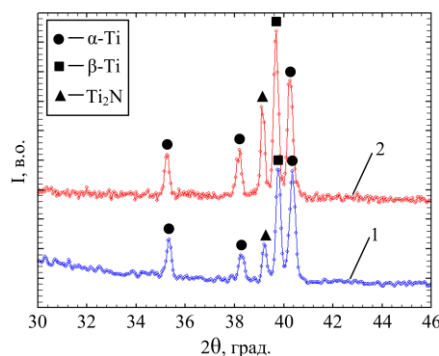


Рис. 4. Дифрактограми, зняті з поверхні титанового сплаву VT22 після традиційного азотування (1) та попереднього вигладжування та наступного азотування (2)

Шорсткість поверхні зразків після азотування погіршується на 1 клас порівняно з вихідною. Також відбувається підвищення поверхневої твердості зразків та формування азотованого шару, глибину якого визначали методом мікротвердості. Встановлено, що після термодифузійного насичення поверхнева твердість сплаву збільшується від 3.0 до 5.5 ГПа; глибина зміцненого шару сягає ~80 мкм (табл. 1).

Після деформаційно-дифузійної обробки на поверхні сплаву формується плівка нижчого нітриду титану Ti₂N. Слід відзначити, що у дифракційному спектрі інтенсивність ліній нітридної фази Ti₂N деформаційно-дифузійно зміцнених зразків є вищою порівняно з інтенсивністю ліній цієї фази у зразків після азотування, що якісно свідчить про інтенсифікацію нітридоутворення на поверхні (рис. 4).

Якість поверхні зразків після деформаційно-дифузійної обробки покращується на 3 класи порівняно зі зразками у вихідному стані (точіння). Топографія поверхні практично не відрізняється від топографії вигладженої поверхні (рис. 3, в). Також відбувається зміцнення сплаву: поверхнева мікротвердість зростає до 6.0 ГПа, а глибина дифузійного шару до ≈ 110 мкм (табл. 1).

Вищий рівень поверхневого зміцнення сплаву ВТ22 після деформаційно-дифузійної обробки порівняно з азотуванням (табл. 3) можна пояснити наступним чином. В процесі механічної дії під час поверхневої пластичної деформації формується тонкий дрібнозернистий сильно деформований шар із анізотропією фізико-механічних властивостей та дефектами кристалічної ґратки. Деформація приповерхневого шару під час вигладжування сприяє зменшенню розмірів зерен, призводячи до збільшення площі їх меж, що, в свою чергу, забезпечує гальмування, блокування та утворення нових дислокацій, дисклінацій та складних дислокаційних систем. Окрім цього, у поверхневих шарах присутні дефекти структури, які мають атомний характер. Атоми кристалічної ґратки титану безперервно коливаються поблизу положення рівноваги з тим більшою амплітудою, що вища температура під час механічної обробки; амплітуда деяких атомів стає такою значною, що вони покидають свої місця в ґратці, утворюючи, тим самим, точкові дефекти типу вакансії. Збільшення навантаження під час попереднього вигладжування збільшує кількість всіх вище перерахованих дефектів (площа границь зерен, дислокації, дисклінації, хмари Котрелла, вакансії), які є вагомими структурними факторами, що впливають на процес дифузійного насичення елементами втілення, зокрема, азоту, оскільки є сприятливими шляхами для їх полегшеної дифузії [10].

Аналіз результатів трибологічних випробувань деформаційно зміцнених (R1) титанових зразків засвідчив, що інтенсивність зношування контртіла (бронзових колодок) у два рази перевищує інтенсивність зношування титанових дисків (рис. 5, а). Окрім цього, за фрикційної взаємодії досліджуваних трибопар фіксували зміну коефіцієнта тертя та температуру в околі зони тертя. На ділянці стабільного зношування коефіцієнт тертя та температура в околі зони тертя встановлювались на рівні 0,24 та 44 °С, відповідно (рис. 6, 7).

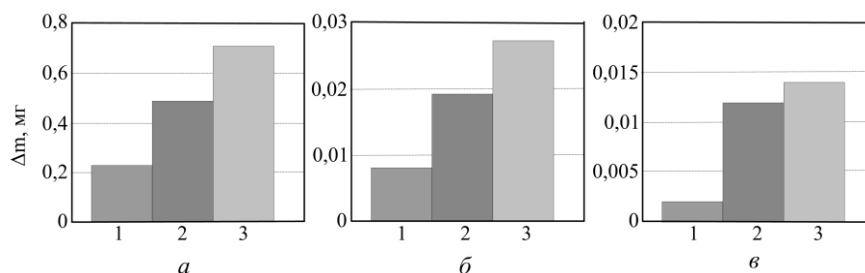


Рис. 5. Зміна (втрата) маси тіла з титанового сплаву ВТ22 (1), бронзового контртіла (2) і трибо-пари (3), де титановий сплав зміцнюється за режимами: R1 – а; R2 – б; R3 – в

Мікроструктура поверхні тертя досліджуваних трибопар характерна адгезійному механізму зношування (рис. а, з). Такий механізм описує взаємодію поверхонь тертя, що супроводжується інтенсивною пластичною деформацією тонких поверхневих шарів, за навантажень, які перевищують межу текучості матеріалів [11]. В процесі контактної взаємодії руйнується оксидна плівка і оголюються хімічно чисті металеві поверхні. Пластична деформація у зоні контакту сприяє максимальному зближенню цих поверхонь і утворенню в приповерхневих шарах текстури з гранично деформованих зерен, розташованих у напрямку відносного переміщення зразка. Під час тертя на відстані міжатомного порядку відбувається схоплювання та мікрозварювання контактних поверхонь з виділенням енергії. Коли молекулярна взаємодія між схопленими поверхнями є більшою, ніж межа міцності матеріалів, і при цьому тіла продовжують взаємно переміщатися, то відбувається виривання м'якшого матеріалу з поверхні. В результаті на контактній поверхні зразків з меншою твердістю матеріалу (бронза) утворюються хаотично розташовані вириви, а на зразках з більшою твердістю (титановий сплав) – налипання (рис. 1 а, з). Це підтверджує мікрорентгеноспектральний аналіз поверхонь після тертя: на поверхні титанових зразків фіксували матеріал контртіла (мідь). Такі ділянки намащування розташовані хаотично, також є місця нашарування. Вони напрямлені гострими краями у бік фрикційного течіння матеріалу.

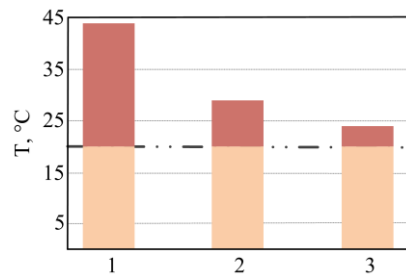


Рис. 6. Температура в околі зони тертя в трибопарі, де титановий сплав зміцнювали за режимами: 1 – R1; 2 – R2; 3 – R3 (штрихпунктирна лінія – кімнатна температура 20 °С)

Таким чином, з одного боку, вигладжування збільшує мікротвердість (за рахунок збільшення лінійних та точкових дефектів), покращує значення шорсткості та несучу здатність поверхні титанового сплаву, що повинно збільшувати зносостійкість матеріалу, однак з другого боку, в даних умовах тертя це призводить до збільшення площі та швидкості активації схоплення титану з бронзовою колодкою, інтенсифікуючи адгезійне зношування трибопар.

Азотування титанового сплаву VT22 (R2) підвищує зносостійкість трибопарі на 1 порядок порівняно з вигладжуванням (рис. 5, б). Термодифузійне насичення сплаву VT22 азотом забезпечує на етапі стабільного зношування нижчі коефіцієнти тертя 0,14 та температуру в зоні тертя 29 °С (рис. 6, 7).

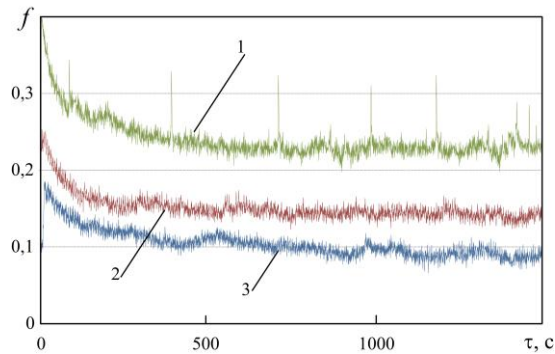


Рис. 7. Кінетика зміни коефіцієнта тертя для трибопар: 1 – титановий сплав, зміцнений за режимом R1; 2 – за R2; 3 – за R3

Мікроструктура поверхні зношування азотованого титанового сплаву VT22 свідчить про невеликий знос матеріалу. При цьому поверхня зношування контртіла має характерний борознистий мікрорельєф, що притаманний абразивному механізму зношування (рис. 5, д). Це обумовлено тим, що під час азотування на поверхні титанових сплавів формується рельєф, де плямами фактичного контактування під час тертя виступають найвищі та найтвердіші мікровиступи профілю поверхні (нітридні фази). Під час тертя ці мікровиступи подібно до абразиву проорюють м'якшу поверхню контртіла, залишаючи борозни.

Триботехнічні випробування показали, що зміцнений деформаційно-дифузійною обробкою титановий сплав VT22 у всьому діапазоні досліджень практично не зношується, що є свідченням хороших антифрикційних властивостей його поверхні (рис. 5, в). Коефіцієнт тертя такої трибопарі становив 0,09, а температура в околі зони тертя зберігалась на рівні 24 °С (рис. 6, 7).

Поверхня сплаву VT22 після тертя практично не змінюється. Проте поверхня контртіла (бронзи) під час фрикційної взаємодії зношується за абразивним механізмом. При цьому поверхня контртіла в парі з титановим диском, зміцненим за режимом R3, має меншу кількість борозен, ніж та, котра працювала з диском, зміцненим за режимом R2, де борозен більше і самі вони глибші (рис. 5, е).

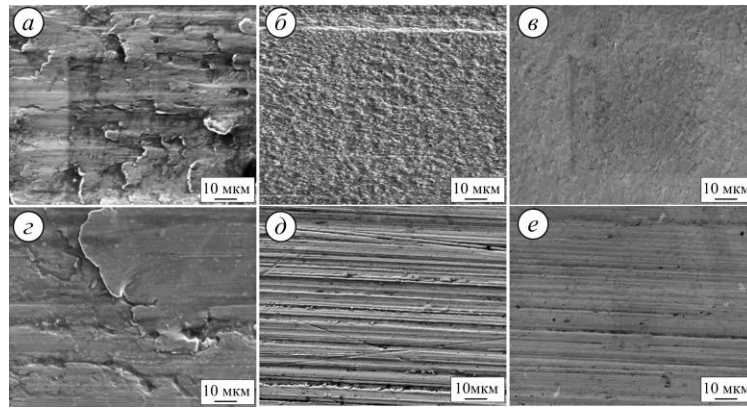


Рис. 7. Топографія поверхонь зносу пари тертя титанового сплаву VT22 (а, б, в) – бронза (г, д, е), де титановий сплав зміцнювали за режимами: R1 - а, г ; R2 - б, д; R3 - в, е

Висновок. Деформаційно-дифузійна обробка сприяє підвищенню триботехнічних характеристик трибопари титановий сплав VT22 – бронза БрАЖН 10-4-4 порівняно з традиційними обробками (вигладжування чи азотування). Така обробка на етапі стабільного зношування забезпечує нижчі як коефіцієнти тертя (0,09 проти 0,24 чи 0,1 відповідно), так і температуру в зоні тертя (24 °C проти 44 чи 29 відповідно).

1. Механіка руйнування і міцності матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О. П. Ос-таш, В. М. Федірко, В. М. Учанін, С. А. Бичков, О. Г. Моляр, О. І. Семенець, В. С. Кра-вець, В. Я. Дереча. – Львів: Сполум, 2007. – 1068 с.
2. Конструкционные материалы в самолетостроении / А.Г. Моляр, А.А. Коцюба, А.С. Бычков, О.Ю. Нечипоренко – К.: КВИЦ, 2015. – 400с.
3. Духота О.І. Проблемні питання використання титанових сплавів у вузлах тертя авіаційної техніки / О.І. Духота, М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець // Проблеми тертя та зношування – 2008.– 49. – С. 14–26.
4. Федірко В.М. Підвищення зносостійкості титанових сплавів хіміко-термічною обробкою в азотовмісних середовищах / В.М. Федірко, І.М. Погрелюк // Фіз.-хім. механіка матеріалів – 1994. №1. – С. 69–74.
5. Ivanov Y.F. Surface layer of commercially pure VT1-0 titanium after electric-explosion alloying and subsequent treatment by a high-intensity pulsed electron beam / Y.F. Ivanov, A.D. Teresov, E.A. Petrikova et al. // Steel Transl. – 2013. – 43. – P. 798–802.
6. Koshuro V.A. Composition and structure of coatings formed on a VT16 titanium alloy by electro-plasma spraying combined with microarc oxidation / V.A. Koshuro, G.G. Nechaev, A.V. Lyasnikova // Tech. Phys. – 2014. – 59. – P.1570–1572.
7. Spriano S. The combined action of UV irradiation and chemical treatment on the titanium surface of dental implants / S. Spriano, S. Ferrarisa, D.Bollatib // Appl. Surf. Sci. – 2015. – 349. – P. 599–608.
8. Шейкін С.Є. Зміна стану поверхневого шару під час накатування сплавів VT1-0 і VT22 інструментом з алмазного композиційного термостійкого матеріалу / С.Є. Шейкін, Д.В. Єфросинін, І.Ю. Ростоцький // Фізика и техника высоких давлений. – 2011. – 21(1). – С. 134-139.
9. Pohrelyuk I.M. Wear resistance of VT22 titanium alloy after nitriding combined with heat treatment / I. M. Pohrelyuk, M. V. Kindrachuk, S. M. Lavrys // Materials Science. – 2016. – 52. №1. – P. 56-61.
10. Liling Ge. Influence of the surface nanocrystallization on the gas nitriding of Ti–6Al–4V alloy / Liling Ge, Na Tian, Zhengxin Lu and Caiyin You. // Applied Surface Science. – 2013. – № 286. – P. 412-416.
11. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов –М.: Машиностроение, 1989. – 328с.

Стаття надійшла до редакції 25.04.2019