

УДК 669.295:621.785

І. М. ПОГРЕЛЮК¹, С. Є. ШЕЙКІН², С. М. ЛАВРИСЬ¹

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, Україна

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, Україна

ВПЛИВ РЕЖИМУ ОБКОЧУВАННЯ ПІД ЧАС ДЕФОРМАЦІЙНО-ДИFUЗІЙНОЇ ОБРОБКИ НА ЗНОСОТРИВКІСТЬ СПЛАВУ VT22

Оцінено рівень поверхневого зміцнення і якість поверхні титанового сплаву VT22 після деформаційно-дифузійної обробки, яка включає попередню холодну поверхневу пластичну деформацію (ХППД) і наступне термодифузійне насичення поверхні азотом (ТДА). Досліджено вплив режиму ХППД під час деформаційно-дифузійної обробки на триботехнічні характеристики зміцненого сплаву VT22.

Ключові слова: титановий сплав VT22, деформаційно-дифузійна обробка, зміцнення, шорсткість, мікротвердість, зносотривкість.

Вступ. Титанові сплави широко використовуються у літакобудуванні завдяки високій питомій міцності, корозійній тривкості, жаротривкості та унікальним теплофізичним властивостям. В конструкціях літаків марки АН маса деталей із титанових сплавів складає 8...9 % маси деталей планера. Це, в першу чергу, підкоси та силові гідроциліндри шасі, вилки, кронштейни системи управління, силові деталі крила, трубопроводи, компенсатори, теплообмінники і інше [1–3].

Ефективність і надійність експлуатації виробів з титанових сплавів залежить від технології їх поверхневого зміцнення [4; 5]. Так, для підвищення зносотривкості робочі поверхні титанових гідроциліндрів шасі покривають електролітичним хромом. Однак технологія електролітичного хромування на практиці виявилась досить складною у відтворюваності, оскільки нанесенні покриття через малу адгезію з основою матеріалу відшаровуються під час експлуатації. Також через нещільність та пористість хромованого покриття під час експлуатації можливе підтікання гідrorідини крізь бронзове ущільнення штоку без явних слідів зносу на робочих поверхнях. Слід також відзначити, що внаслідок високих токсичних і канцерогенних властивостей сполук хрому та проблем їх утилізації, використання «шестивалентного» хрому провідними країнами світу обмежується [6–8]. Тому на даний час існує завдання розробки нових або вдосконалення вже існуючих методів інженерії поверхні титанових сплавів, які б забезпечували характеристики зміцненої поверхні не гірші, ніж електролітичне хромування [9–11]. В даній роботі розглядається перспектива деформаційно-дифузійного зміцнення поверхні сплаву VT22, яке поєднує попереднє холодне поверхневе пластичне деформування (ХППД) з наступним термодифузійним насиченням поверхні азотом (ТДА).

Мета роботи. Оцінити вплив режиму ХППД під час деформаційно-дифузійної обробки на триботехнічні характеристики поверхнево зміцненого титанового сплаву VT22.

Методика дослідження. Дослідження проводили на зразках двофазного титанового сплаву VT22 (Ti-5Al-5Mo-5V-1,5Cu-Fe), структура якого представлена нерівноосними β-зернами, орієнтованими в напрямку переважного течіння ме-

талу в процесі гарячої деформації, всередині яких присутні пластинки дисперсної α -фази. (рис. 1). Мікротвердість сплаву – 3,2...3,4 ГПа.

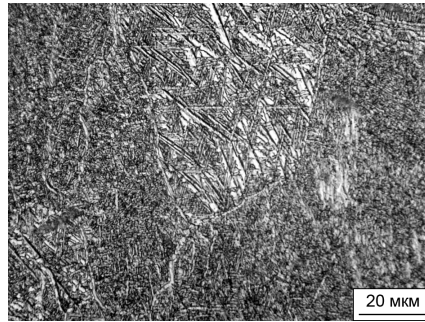


Рис. 1. Структура титанового сплаву BT22

Серед великої номенклатури методів ХППД був вибраний метод обкочування алмазною кулькою (діаметр 5 мм). Даний метод є економічно доцільний, простий у використанні, у нього низький коефіцієнт тертя ковзання і, як наслідок, менша ймовірність утворення дефектів на обробленій поверхні [12]. Навантаження під час обкочування – 200, 300, 600 та 700 Н у 7 проходів.

Для збереження об'ємного зміцнення, яке задається термічною обробкою сплаву, і забезпечення поверхневого зміцнення термодифузійним насиченням поверхневого шару азотом, сплав BT22 азотували, суміщаючи термічну та хіміко-термічну обробку в одному технологічному циклі. Режим такої обробки наступний: нагрівання до 820 °С, витримка 1 год, охолодження з піччю до температури 750 °С, витримка 3 год; охолодження до 450 °С із швидкістю 7 °хв.; 600 °С, витримка 4 год, охолодження з піччю. Насичення азотом здійснювали на другому ступені (750 °С, 3 год) режиму термічної обробки сплаву. Використовували газоподібний азот технічної чистоти (ГОСТ 9293-74), який перед подачею в реакційну камеру печі висушували та вивільняли від кисню, пропускаючи його через капсулу з силікагелем та нагріту на ~ 50 °С вище температури насичення титанову стружку [13].

Якість поверхні, а саме шорсткість, до та після кожної технологічної операції вимірювали на профілометрі моделі 170621 з автоматичним визначенням середнього арифметичного відхилення профілю R_a , мкм (ГОСТ 2789-73). Діурометричний аналіз вихідної та зміцненої поверхонь зразків проводили з використанням мікротвердоміра ПМТ-3М за навантаження на індентор 0,49 Н.

Трибологічні випробування здійснювали на машині для тертя металів СМЦ-2 за схемою спряження «диск – колодка» на базі 1000 м за питомого навантаження 0,6 МПа із швидкістю 0,6 м/с. Випробовували диски із сплаву BT22, поверхню яких зміцнювали деформаційно-дифузійною обробкою. Як контртіло використовували колодки з деформівної бронзи БрАЖН 10-4-4. Змашування проводили у гідрорідині АМГ-10 (ТУ У 23.2-20574128-066:2007). Зносостійкість пар тертя оцінювали за зміною маси трибопар після фрикційної взаємодії, зважуючи на вазі Voyager фірми «ОНАУС» з точністю до 0,1 мг, відповідно до ГОСТ 23.224-86.

Результати та їх обговорення. Мікроструктура поверхні титану BT22 у вихідному стані є борознистою, сформованою внаслідок механічної обробки (точіння) під час виготовлення досліджуваних зразків. Після обкочування за різних навантажень борозни розгладжуються, що сприяє зменшенню висотних параметрів профілю та покращенню якості поверхні обробленого титану (див. табл.).

Таблиця

Параметр шорсткості та мікротвердість поверхні сплаву ВТ22 після де-формаційно-дифузійної обробки

Режим	Навантаження під час ХППД	Ra, мкм			H _{0,49} , ГПа		
		Вихідна	ХППД	ТДА	Вихідна	ХППД	ТДА
1	200 Н	4,00	0,189	0,25	3,25	4,81	6,06
2	300 Н		0,155	0,27		4,95	6,44
3	600 Н		0,114	0,28		5,15	7,06
4	700 Н		0,102	0,31		6,02	8,04

Зі збільшенням навантаження під час поверхневої обробки борозниста структура поступово зникає, що обумовлює вищі показники чистоти поверхні матеріалу. Так, за навантаження 700 Н структура поверхні з борознистим рельєфом переходить в гладку дзеркальну, а якість її в порівнянні з вихідною (без ХППД) поліпшується на 7 класів. Очевидно, що за більшого навантаження під час обкочування збільшується ступінь пластичної деформації мікровиступів поверхні, що призводить до їх згладження. Слід зазначити, що на оброблювальній поверхні присутні окремі ділянки окиснення металу (рис. 2). Можна припустити, що через низьку теплопровідність титану ($\lambda=20\ldots 25$ Вт/м·К) температура в зоні контакту з алмазною кулькою може сягати до 400 °С [14], що активізує взаємодію поверхневих шарів сплаву з киснем технологічного середовища з утворенням поверхневих оксидних плівок.

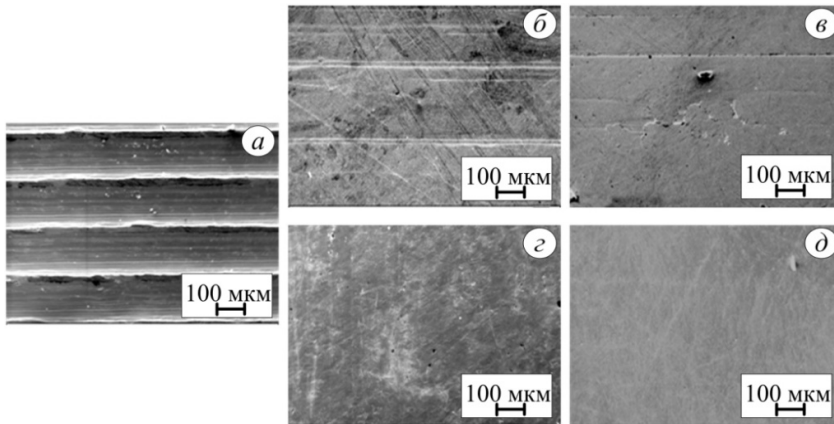


Рис. 2. Вихідна мікроструктура поверхні титанового сплаву ВТ22 у вихідному стані (а) та після обкочування за режимом 200 (б), 300 (в), 600 (г), 700 (д) Н

Дюрометричний аналіз після обкочування свідчить про поверхнєве зміцнення сплаву. Встановлено, що зі збільшенням навантаження під час поверхневої обробки мікротвердість поверхні зростає, і найвищою її фіксували на зразку, обкоченому за навантаження 700 Н (див. табл.). Формування такого рівня поверхневого зміцнення відбувається внаслідок підвищення щільності дислокацій у приповерхневому шарі, а також подрібнення його структури в процесі поверхневого пластичного деформування [15]. Таким чином, збільшення навантаження під час ХППД забезпечує покращення якості поверхні та збільшення її мікротвердості.

Після наступної ХТО, яка поєднує штатну термічну обробку і азотування, поверхня зразків сплаву ВТ22 гладка, блискуча, світло-золотиста. Попереднє обкочування не впливає на фазовий склад поверхневих шарів сплаву. Незалежно

від режиму ХППД, на поверхні VT22 формується плівка нижчого нітриду титану Ti_2N , що підтверджують результати рентгенівського фазового аналізу, фіксуючи присутність рефлексів цієї фази у дифракційному спектрі. Слід відзначити, що збільшення навантаження під час попередньої обробки корелює зі збільшенням інтенсивності ліній нітридної фази у дифракційному спектрі, що свідчить про інтенсифікацію нітридоутворення на поверхні.

Профілометричні дослідження показали, що якість поверхні зразків після азотування погіршується на клас у порівнянні з якістю поверхні після обкочування. Причому, чим більший ступінь попередньої пластичної деформації, тим вищий параметр шорсткості R_a . Окрім цього, внаслідок термодифузійного насичення азотом відбувається подальше поверхневе зміцнення сплаву, що підтверджують результати дюрOMETричних досліджень зразків (див. табл.). Найвищу поверхневу мікротвердість фіксували після азотування зразка, який попередньо обкочували за навантаження 700 Н (див. табл.).

Таке збільшення поверхневої мікротвердості та погіршення якості поверхні після азотування та їх взаємозв'язок з попереднім обкочування можна пояснити наступним чином. В процесі механічної дії під час поверхневої пластичної деформації формується тонкий дрібнозернистий деформований шар із анізотропією фізико-механічних властивостей та дефектами кристалічної ґратки. Деформація приповерхневого шару під час обкочування 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, чим 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 обкочування 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 [15]. Таким чином, попереднє ХППД інтенсифікує процеси нітридоутворення, підвищуючи поверхневу мікротвердість сплаву VT22. Однак, збільшення кількості нітридних фаз, які виступають новими мікровиступами на поверхні, негативно впливає на якість обробленої поверхні.

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 (втрата маси диска $\pm 0,2$ мг). Тому інтенсивність зношування пари тертя визначали за втратою маси контртіла.

Інтенсивність зношування бронзи, яка працювала в парі з диском, обкоченим за навантаження 700 Н, в 3 рази більша, ніж тієї, яка працювала в парі з диском, обкоченим за навантаження 200 Н (рис. 3, а). Це пов'язано з тим, що після азотування формується характерний поверхневий рельєф, де плямами фактичного контактування під час тертя виступають нітридні фази. Зі збільшенням ступеня пластичної деформації під час обкочування інтенсифікуються дифузійні процеси, тим самим збільшується кількість нітридних фаз, ступінь поверхневого

зміцнення та посилюється поверхневий рельєф. В процесі зношування сформовані нітридні мікроступи подібно абразиву проорюють м'якшу поверхню контртіла, залишаючи борозни, що підтверджує мікроструктура поверхні тертя бронзових колодок. (рис. 4).

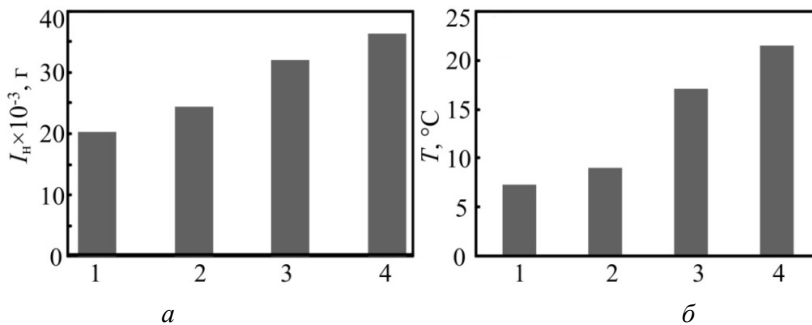


Рис. 3. Зміна маси (а) та температури в околі зони тертя (б) контртіла, яке працювало в парі з азотованим титановим диском, попередньо обкоченим за режимом 1–4 (див. табл.)

У всіх досліджуваних трибопар за фрикційної взаємодії переважає абразивний механізм зношування з формуванням характерного для нього борознистого рельєфу поверхні тертя (рис. 4). При цьому, поверхня контртіла, яка працювала з диском, попередньо обкоченим за навантаження 200 Н, має меншу кількість борозен та на клас більший квалітет чистоти поверхні, ніж та, яка працювала з диском, попередньо обкоченим за навантаження 700, де борозен більше і самі борозни глибші (рис. 4, з).

Слід зазначити, що на поверхнях тертя присутні такі дефекти як мікрОВириви, розмір яких не перевищує характерні розміри структурних складових поверхні. Такі мікрОВириви, ймовірно, утворюються, коли тверді частинки, переміщаючись по поверхні, зненацька зустрічають на своєму шляху якусь перешкоду, наприклад, пластично zdeформований матеріал або, навпаки, прикріплюються до поверхні за рахунок сил адгезії.

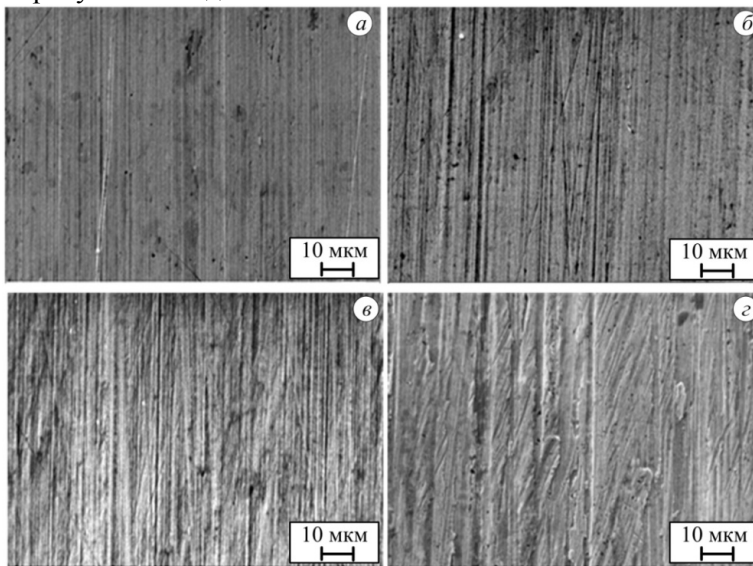


Рис. 4. Мікроструктура поверхні зношування контртіла після тертя в парі з азотованим диском сплаву ВТ22, попередньо обкоченим за режимом 1–4 (а–з), відповідно(див. табл.)

В процесі фрикційної взаємодії поверхня тертя намагається усунути неоднорідність товщини шару, тим самим зриваючи частинки і утворюючи за ними мікрОВириви.

Значення втрати маси контртіл добре корелюють зі значеннями температури в приконтатній зоні тертя (див. рис. 3, б). За низьких значень інтенсивності зношування бронзи, яка працювала з диском обкоченим за навантаженні 200 Н, ця температура встановлюється на рівні 20 °С. Для трибопар, диск якої обкочували при навантаженні 700 Н, температура в околі зони тертя встановлюється на рівні 36 °С, що свідчить про гірші трибологічні властивості пари.

Слід зазначити, що якість поверхні зміцнених титанових дисків після фрикційної взаємодії покращується порівняно з вихідною. Параметр шорсткості поверхні R_a зміцнених дисків після тертя зменшується залежно від режиму ХППД: чим більше навантаження під час обкочування, тим менше змінюється R_a (рис. 5). Це пояснюється тим, що за вищих навантажень (700 Н) та наступного азотування формується твердий поверхневий шар, який під час притирання (переходу від технічної до експлуатаційної шорсткості) менше піддається пластичній деформації (згладжування мікрОВиступів). Шорсткість поверхонь контртіл після тертя зменшується і встановлюється на рівні шорсткості зміцнених титанових дисків, що є свідченням усталеного процесу зношування.

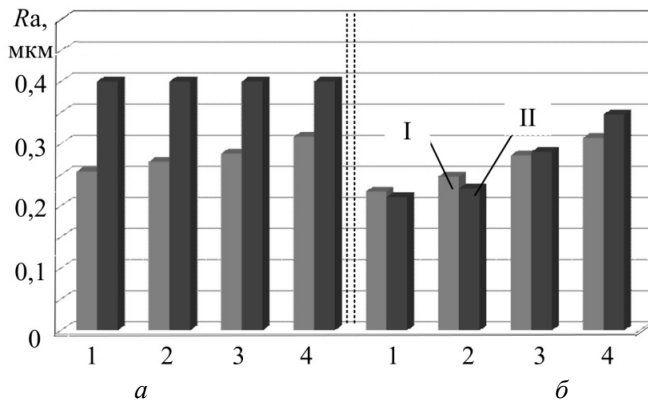


Рис. 5. Зміна параметру шорсткості поверхні дисків (I) і контртіл (II) до (а) та після тертя (б) в залежності від режиму ХППД (1–4) (див. табл.)

Також під час трибологічних досліджень визначали кінетику зміни коефіцієнту тертя трибопар. Під час роботи трибоспряження, диск якого перед азотуванням обкочували за навантаження 200 Н, фіксуємо низькі значення коефіцієнта тертя – 0,02...0,03 (рис. 6). Зі збільшенням навантаження під час ХППД коефіцієнт тертя трибопар зростає і для трибопар, диск котрої обкочували за 700 Н, коефіцієнт тертя на порядок вищий, порівняно з парою тертя, диск якої обкочували за навантаження 200 Н. Також слід зазначити, що період і характер зони припрацювання досліджуваних трибоспряжень різний (рис. 6). Пара тертя, яка працювала з диском, попередньо обкоченим за навантаження 200 Н, характеризується практично вдвічі меншим періодом притирання в порівнянні з парою тертя, диск якої обкочували за навантаження 600 Н. Очевидно, що для забезпечення високих триботехнічних характеристик даних пар тертя слід проводити попереднє ХППД за малих навантажень.

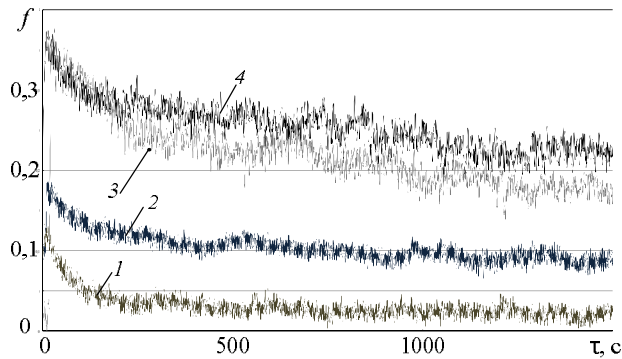


Рис. 5. Кінетика зміни коефіцієнта тертя трибопар, диски яких зміцнювали за режимами 1–4 (див. табл.)

Висновки. Збільшення навантаження під час ХППД сплаву ВТ22 забезпечує високий рівень приповерхневого зміцнення та покращує квалітет чистоти поверхні. Наступне термодифузійне насичення азотом підвищує поверхневу мікротвердість, але погіршує якість обробленої поверхні.

Встановлено, що для забезпечення високої зносостійкості пари тертя ВТ22 – БраЖН 10-4-4 доцільно проводити ХППД за малих навантажень. Показано, що кращими триботехнічними характеристиками володіє пара тертя, диск якої попередньо обкочували за навантаження 200 Н. Коефіцієнт тертя такої трибопари становив 0,03, а температура в околі зони тертя зберігалась на рівні 20 °С.

Список літератури

1. Антонюк С.Л. Титановые сплавы для авиационной промышленности Украины / С.Л. Антонюк, А.Г. Моляр, А.Н. Калинюк, В.Н. Замков // Электронно-лучевые процессы. – 2003. – №1. – С. 10–14.
2. Бычков А.С. Эксплуатационная несущая способность деталей конструкций отечественных воздушных судов транспортной категории из титановых сплавов / А.С. Бычков, А. Г. Моляр // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2016. – № 71. – С. 18-29.
3. Конструкционные материалы в самолетостроении / А. Г. Моляр, А. А. Коцюба, А. С. Бычков, О. Ю. Нечипоренко. – К.: КВИЦ, 2015. – 400 с.
4. Особенности использование титановых сплавов, нержавеющей сталей, металлокомпозиционных и антифрикционных материалов в шасси современных самолетов / В.И. Рябков, Л.В. Капитанова, Ю.В. Бабенко и др. // Авиационные-космическая техника и технология. – 2003. – 36, № 1. – С. 6–15.
5. Бойцов. Б.В. Комплексное исследование шасси самолетов.. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.;
6. Аксенов А.Ф. Состояние и перспективы использования антифрикционных покрытий на титановых сплавах / А.Ф. Аксенов, И.Е. Полищук, Э.А. Кульгавый.// Трение и износ. – 1982. – №3.;
7. Духота О.І. Проблеми 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.
8. Трофимов В.А. Методы улучшение подвижных узлов шасси, выполненных из титановых сплавов / В.А. Трофимов // Авиационные-космическая техника и технология. – 2001. – 24. – С. 143–150.
9. Триботехнические характеристики детонационных покрытий на титановом сплаве ВТ-22/ М. В. Кіндрачук, Э. А. Кульгавый, А. Л. Шевченко, А. П. Данилов // Проблеми тертя та зношування. – 2009. – 51. – С. 112–123.

10. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. Посібник / Під заг. ред. В.В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / О.П. Остап, В.М. Федірко, В.М. Учанін, С.А. Бичков, О.Г. Моляр, О.І. Семенець, В.С. Кравець, В.Я. Дереча. Під. ред. О.П. Остапа, В.М. Федірка. – Львів: Вид-во “Сполом”, 2007. – 1068 с.
11. Посвятенко Е.К. Холодне пластичне деформування як метод прискорення азотування / Е. К. Посвятенко, В. В. Алексеев // Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. – 2012. –9. – С. 157–161.
12. 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 // Физика и техника высоких давлений. — Київ: ІНМ НАН України. – 2011. – 21, № 1. – С. 134–139.
13. 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.
14. Вейцман М.Г. Упрочнение титановых сплавов поверхностным пластическим деформированием/ М.Г. Вейцман, В.Г. Вайнштейн. // "Вестник машиностроения". – 1975. – № 2. – С. 73–75.;
15. Гаркунов Д.Н. Триботехника: Учебник для студентов вузов– 2-е изд., перераб. и доп. / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.

Стаття надійшла до редакції 08.09.2016.

Погрелюк Ірина Миколаївна – д-р. техн. наук, професор, завідувач відділу №15 Високотемпературної міцності конструкційний матеріалів у газових і рідкометалевих середовищах, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, вул. Наукова, 5, тел. +38096 073 00 23 E-mail – pohrelyuk@ipm.lviv.ua, irynapohrelyuk@gmail.com.

Шейкін Сергій Євгенович – д-р. техн. наук, завідувач відділу № 20 Перспективних ресурсозберігаючих технологій механічної обробки, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України, м. Київ, вул. Автозаводська, 2. тел.: +38 044 468 86 40, E-mail – ism20@ism.kiev.ua, shcykin2003@ukr.net.

Лаврись Сергій Мирославович – аспірант відділу №15 Високотемпературної міцності конструкційний матеріалів у газових і рідкометалевих середовищах, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів, вул. Наукова, 5, тел. +38032-263-33-43, +38099-268-31-25, E-mail – serhiy-92@yandex.ua.

I. M. POHRELYUK, S. YE. SHEYKIN, S. M. LAVRYS

THE INFLUENCE OF ROLLING MODES DURING DEFORMATION-DIFFUSION TREATMENT ON WEAR RESISTANCE OF BT22 TITANIUM

The influence of rolling modes during deformation-diffusion treatment on wear resistance of BT22 titanium was investigated. Deformation-diffusion treatment includes previous cold surface plastic deformation (CSPD) and followed thermodiffusion nitrogen saturation of surface (TDN). Established that previous surface deformation increased microhardness and improved surface quality of machined surfaces that intensify the process TDN. It was shown that increased load during the previous rolling negatively affects tribotechnical characteristics (friction factor, wear intensity, temperature in area of friction, lapping period) friction pair hardened by combined treatment of BT22 alloy – БрАЖН 10-4-4 bronze. The best complex tribological properties had friction pair, disc which previously rolled for load 600 N.

Keywords: BT22 titanium alloy, deformation-diffusion treatment, hardening, roughness, microhardness, wear resistance

References

1. Antonjuk S.L. Titanovye splavy dlja aviacionnoj promyshlennosti Ukrainy / S.L. Antonjuk, A.G. Moljar, A.N. Kalinjuk, V.N. Zamkov // *Jelektronno-luchevye processy*. – 2003. – №1. – S. 10–14.
2. Bychkov A.S. Jekspluatacionnaja nesushhaja sposobnost' detalej konstrukcij otechestvennyh vozdušnyh sudov transportnoj kategorii iz titanovyh splavov / A.S. Bychkov, A. G. Moljar // *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii*. – 2016. – № 71. – S. 18–29.
3. Konstrukcionnye materialy v samoletostroenii / A. G. Moljar, A. A. Kocjuba, A. S. Bychkov, O. Ju. Nechiporenko. – K.: KVIC, 2015. – 400 s.
4. Osobennosti ispol'zovanie titanovyh splavov, nerzhavejushhih stalej, metallokompozicionnyh i antifrikcionnyh materialov v shassi sovremennyh samoletov / V.I. Rjabkov, L.V. Kapitanova, Ju.V. Babenko i dr. // *Aviacionnye-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. – 2003. – 36, № 1. – S. 6–15.
5. Bojcov. B.V. Kompleksnoe issledovanie shassi samoletov.. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 232 s.;
6. Aksenov A.F. Sostojanie i perspektivy ispol'zovanija antifrikcionnyh pokrytij na titanovyh splavah / A.F. Aksenov, I.E. Polishhuk, Je.A. Kul'gavyj. // *Trenie i iznos*. – 1982. – №3.
7. Dukhota O.I. Problemni pytannja vykorystannja tytanovykh splaviv u vuzlakh tertja aviaatsynoyi tekhniki / O.I. Dukhota, M.V. Kindrachuk, V.F. Labunets' // *Problemy tertja ta znoshuvannya*, 2008. – 49. – s. 14–26.
8. Trofimov V.A. Metody uluchshenie podvizhnyh uzlov shassi, vypolnennyh iz titanovyh splavov / V.A. Trofimov // *Aviacionnye-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*. – 2001. – 24. – S. 143–150.
9. Tribotekhnicheskie harakteristiki detonacionnyh pokrytij na titanovom splave VT-22 / M. V. Kindrachuk, Je. A. Kul'gavyj, A. L. Shevchenko, A. P. Danilov // *Problemi tertja ta znoshuvannja*. – 2009. – 51. – S. 112–123.
10. Mekhanika ruynuvannya i mitsnist' materialiv: Dovidn. Posibnyk / Pid zah. red. V.V. Panasyuka. T. 9: Mitsnist' i dovhovichnist' aviaatsynykh materialiv ta elementiv konstruksiy / O.P. Ostash, V.M. Fedirko, V.M. Uchanin, S.A. Bychkov, O.H. Molyar, O.I. Semenets', V.S. Kravets', V.Ya. Derecha. Pid. red. O.P. Ostasha, V.M. Fedirka. – L'viv: Vyd-vo “Spolom”, 2007. – 1068 s.
11. Posvyatenko E.K. Kholodne plastychne deformuvannya yak metod pryskorennja azotuvannya / E. K. Posvyatenko, V. V. Alyeksyeyev // *Upravlinnya proektamy, systemnyy analiz i lohistyka. Tekhnichna seriya*. – 2012. – 9. – S. 157–161.

-
12. Sheykin S.Ye. Zmina stanu poverkhnevoho sharu pid chas nakatuvannya splaviv VT1-0 i VT22 instrumentom z almaznoho kompozytsiynoho termostiukoho materialu. / S.Ye. Sheykin, D.V. Yefrosynin, I.Yu. Rostots'kyy // Fyzyka y tekhnika vysokykh davlenyy. — Kyyiv: INM NAN Ukrayiny. — 2011. — 21, # 1. — S. 134–139.
 13. 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.
 14. Vejman M.G. Uprochnenie titanovyh splavov poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem/ M.G. Vejman, V.G. Vajnshtejn. // "Vestnik mashinostroeniya". — 1975. — № 2. — S. 73–75.;
 15. Garkunov D.N. Tribotekhnika: Uchebnik dlja studentov vuzov— 2-e izd., pererab. i dop. / D.N. Garkunov. — M.: Mashinostroenie, 1989. — 328 s.