

PACS numbers: 46.55.+d, 62.20.Qp, 68.35.Ct, 68.35.Gy, 68.55.J-, 81.40.Lm, 81.40.Pq

Вплив навантаження під час обкочування на структуру та зносотривкість титанового стопу VT22

І. М. Погрелюк, С. М. Лаврись

*Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
вул. Наукова, 5,
79601, МСП, Львів, Україна*

Досліджено вплив обкочування на структуру та зносостійкість титанового стопу VT22. Показано, що збільшення навантаження під час деформаційного оброблення збільшує рівень приповерхневого зміцнення та підвищує якість поверхні. Експериментально встановлено, що обкочування стопу VT22 призводить до подрібнення зерен α -фази та збільшення густини нерухомих дислокацій у приповерхневих шарах матеріалу. Показано, що найкращим комплексом триботехнічних характеристик володіє пара тертя VT22–BrAZhN 10-4-4, диск титанового стопу якої обкочували при навантаженні у 200 Н.

Ключові слова: структура приповерхневих шарів, адгезійне зношування, пластична деформація, обкочування, титановий стоп VT22.

Effect of the rolling on the VT22 titanium alloy structure and wear resistance is investigated. As shown, a load increase during the deformation treatment increases the level of near-surface strengthening and improves surface quality. As experimentally determined, the rolling of VT22 alloy leads to both the α -phase grain refinement and the increase of the density of fixed dislocations in the near-surface layers of material. As shown, the VT22–BrAZhN 10-4-4 friction pair with titanium alloy disc rolled under loading of 200 N has the best suite of tribological characteristics.

Corresponding author: Iryna Mykolayivna Pohrelyuk
E-mail: irynapohrelyuk@gmail.com

*Karpenko Physicomechanical Institute, N.A.S. of Ukraine,
5 Naukova Str., 79061 Lviv, Ukraine*

Please cite this article as: I. M. Pohrelyuk and S. M. Lavryts, Load Influence at Rolling on Structure and Wear Resistance of a Titanium Alloy VT22, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 38, No. 6: 783–793 (2016) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.38.06.0783.

Key words: structure of near-surface layers, adhesion wear, plastic deformation, rolling, VT22 titanium alloy.

Исследовано влияние обкатывания на структуру и износостойкость титанового сплава VT22. Показано, что увеличение нагрузки во время деформационной обработки увеличивает уровень приповерхностного упрочнения и повышает качество поверхности. Экспериментально установлено, что обкатывание сплава VT22 приводит к измельчению зёрен α -фазы и увеличению плотности неподвижных дислокаций в приповерхностных слоях материала. Показано, что лучшим комплексом триботехнических характеристик обладает пара трения VT22–БрАЖН 10-4-4, диск титанового сплава которой обкатывали при нагрузке 200 Н.

Ключевые слова: структура приповерхностных слоёв, адгезионное изнашивание, пластическая деформация, обкатывание, титановый сплав VT22.

(Отримано 28 квітня 2016 р.)

1. ВСТУП

Розвиток сучасних технологій в авіаційній промисловості відбувається в умовах підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності продукції, що випускається [1]. У даний час найважливішим науково-технічним завданням є надійне забезпечення експлуатаційних характеристик деталей авіаційних двигунів і агрегатів, які виготовляються з титанових стопів [2]. Одним з важливих напрямів підвищення їх експлуатаційних характеристик є розробка нових і вдосконалення вже існуючих прогресивних технологічних процесів їх виготовлення. Великий інтерес представляють способи фінішного оброблення деталей тиском (поверхневим деформуванням) [3]. Найбільш розповсюдженим і простим у виконанні є метод холодного поверхневого пластичного деформування (ХППД). Він забезпечує збільшення значень відносної опорної довжини профілю мікронерівностей та наявність деформаційного зміцненого поверхневого шару, що, в свою чергу, підвищує опір втомним навантаженням, збільшує зносостійкість і довговічність деталей [4].

Мета роботи — оцінити вплив ХППД на структуру поверхневих зміцнених шарів та зносостійкість титанового стопу VT22.

2. МАТЕРІЯЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Досліджували зразки двофазного титанового стопу VT22 (Ti–5Al–5Mo–5V–1,5Cr–1Fe), який використовують для виготовлення елементів двигунів і шасі літаків типу АН [5].

З усієї номенклатури методів ХППД для оброблення титанових

стопів можуть бути застосовані ті, в основі яких лежить тертя кочення. Це пояснюється тим, що титанові стопи під час ХППД мають схильність до контактного схоплювання і налипання на інструмент. Тому для здійснення ХППД був вибраний метод обкочування алмазною кулькою, в якому більш низький ступінь тертя ковзання і, як наслідок, менша ймовірність утворення дефектів на обробленій поверхні. Крім того, накочування кулями дозволяє проводити оброблення з меншими зусиллями, що зменшує ймовірність деформування малоцупких деталей і луцнення поверхні [6]. Під час поверхневого оброблення використовували протаровану державку пружної дії, яка уможливує проводити оброблення з постійною силою. Для виміру сили використовували тензOMETричний динамометр УДМ-300. Режими деформаційного зміцнення наступні: навантаження у 200 Н (режим 1) та 600 Н (режим 2) у 3 проходи зі швидкістю у 200 об./мин, діаметер кулі — 5 мм.

Якість поверхні, а саме, шерсткість, до та після кожної технологічної операції вимірювали на профілометрі моделю 170621 з автоматичним визначенням середнього арифметичного відхилення профілю R_a [мкм] (ГОСТ 2789-73). ДюрOMETричні дослідження вихідної та деформаційно зміцненої поверхонь зразків проводили на мікротвердомірі ПМТ-3М при навантаженні на індентор 0,49 Н. Мікроструктурну аналізу поверхні та приповерхневих шарів проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа ZEISS EVO 40XVP, який обладнаний системою мікроаналізи INCA Energy 350, що уможливує проводити якісну та кількісну аналізу вмісту елементів з точністю до 0,01%. Зносостійкість деформаційно зміцненого стопу VT22 оцінювали за зміною маси відповідно до ГОСТ 23.224-86. Випробовували на машині для зношування металів СМЦ-2 за схемою спряження «диск–колодка» на базі 1000 м за питомого навантаження у 0,6 МПа у гідрорідині АМГ-10 (ТУ У 23.2-20574128-066:2007). Як контртіло використовували колодки з деформівної бронзи БрАЖН 10-4-4.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

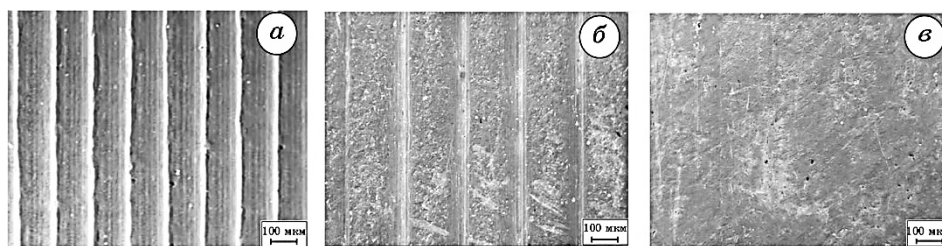
За результатами профілометричних досліджень встановлено, що після обкочування за різних навантажень зменшуються висотні параметри нерівностей поверхні і покращується якість поверхні обробленого титану (табл. 1). Обкочування при навантаженні у 600 Н забезпечує вищі показники чистоти поверхні порівняно з обкочуванням при навантаженні у 200 Н. Очевидно, за більшого навантаження під час ХППД збільшується ступінь пластичної деформації мікроступів профілю поверхні, що приводить до їх згладжування. При цьому якість поверхні в порівнянні з вихідною (без ХППД) поліпшується на 7 класів.

ТАБЛИЦЯ 1. Параметр шерсткості та мікротвердість поверхні стопу VT22 після ХППД.**TABLE 1.** Roughness and microhardness of VT22 alloy surface after cold plastic deformation (CPD).

Режим ХППД	R_a , мкм		$H_{0,49}$, ГПа	
	Вихідна	ХППД	Вихідна	ХППД
1	4,00	1,8	3,2	4,4
2		0,2		4,8

Мікроструктура поверхні титану VT22 у вихідному стані є борознистою, сформованою внаслідок механічного оброблення (точіння) під час виготовлення досліджуваних зразків. Після обкочування при навантаженні у 200 Н борозни розгладжуються, що сприяє зменшенню висотних параметрів профілю поверхні. Зі збільшенням навантаження до 600 Н на поверхні зразка борозниста структура відсутня, що обумовлює вищі показники чистоти поверхні матеріалу. Слід зазначити, що на оброблювальній поверхні присутні окремі ділянки окиснення металу (рис. 1). Можна припустити, що через низьку теплопровідність титану ($\lambda = 20\text{--}25$ Вт/(м·К)) температура в зоні контакту з алмазною кулькою може сягати до 400°C [7], що активізує взаємодію поверхневих шарів стопу з киснем технологічного середовища з утворенням поверхневих оксидних плівок.

Про поверхнєве зміцнення стопу після обкочування свідчить підвищення поверхневої твердості зразків та формування ущільненого зміцненого шару, глибину якого визначали методом мікротвердості як зону, що перевищує твердість осердя зразка на $\delta H = 0,2$ ГПа. Встановлено, що зі збільшенням навантаження під час поверхневого оброблення твердість накоченої поверхні стопу зростає від

**Рис. 1.** Мікроструктура поверхні титанового стопу VT22 у вихідному стані (а) та після обкочування за режимом 1 (б) та режимом 2 (в).**Fig. 1.** Microstructure of surface of VT22 titanium alloy in the initial state (a) and after rolling by mode 1 (b) and mode 2 (c).

4,4 до 4,8 ГПа (табл. 1). Глибина зміцненого шару після насичення за режимами 1 і 2 сягає близько 200 та 360 мкм відповідно (рис. 2). Формування рівня поверхневого зміцнення відбувається внаслідок підвищення густини дислокацій у приповерхневому шарі, а також подрібнення його структури в процесі поверхневого пластичного деформування.

Структура титанового стопу представлена малими пластинками α -фази розмірами 4–15 мкм на фоні β -матриці. За мікроструктурою приповерхневого шару титанового стопу після ХППД можна стверджувати, що із збільшенням навантаження під час обкочування розміри частинок α -фази та відстань між ними зменшуються. Подрібнення пластин α -фази на окремі витягнуті фрагменти, очевидно, слід пов'язувати з їх поділом в місцях сильної локалізації зсувної деформації [8]. У міру наближення до поверхні зерна дрібніші, а морфологія їх інша (пластини α -фази набувають глобулярної форми). Слід зазначити, що на віддалі ≈ 10 та 20 мкм (відповідно до навантаження 200 та 600 Н) глобули зерен α -фази розподіляються в напрямку колишніх пластин (текстура деформації) (рис. 3). Таким чином, під час обкочування формується тонкий поверхневий шар матеріалу з більш дрібнозернистою структурою. При збільшенні навантаження під час ХППД глибина такого шару збільшується (рис. 3). Зменшення розмірів зерен призводить до збільшення площі їх меж, що, в свою чергу, забезпечує гальмування та блокування дислокацій. Отже, в процесі обкочування реалізується зерномежовий (полікристалічний) механізм зміцнення.

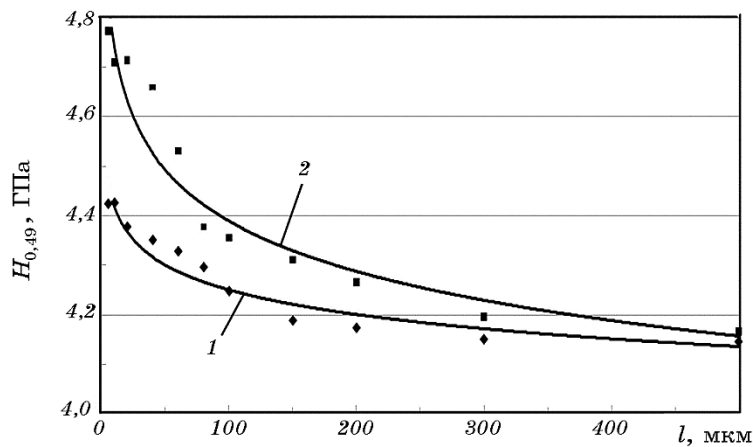


Рис. 2. Розподіл мікротвердості по перетину приповерхневих шарів стопу VT22 після ХППД (1 — режим 1; 2 — режим 2).

Fig. 2. Distribution of microhardness along section of the near-surface layers of VT22 alloy after CPD (1—mode 1, 2—mode 2).

Як засвідчує мікроструктурна аналіза, місця виходу дислокацій проявляються маленькими чорними ямками (крапками). Максимальна густина дислокацій фіксується поблизу поверхні, що свідчить про інтенсивну пластичну деформацію у приповерхневому шарі. Зазначимо, що за вищих навантажень під час обкочування перенасичений дислокаціями та вакансіями шар є більшим (рис. 3).

Глибше від поверхні характер розподілу густини дислокацій в обох досліджуваних мікроструктурах є нерівномірним та практично однаковим. Дислокаційні ямки травлення поблизу поверхні зливаються, утворюючи полоси ковзання, що призводить до зростання на кілька порядків густини точкових та лінійних дефектів кристалічної ґратниці, формування коміркової дислокаційної субструктури та стискальних напружень [9]. Утворення такого нерегулярного розподілу дислокацій під час деформування в роботі [10] пов'язують з локальним скупченням та нерівномірним розподілом дефектів кристалічної ґратниці матеріялу. Це, у свою чергу, призводить до зменшення числа рухомих дислокацій, тим самим збільшуючи їх гуστину до 10^{10} см^{-2} . За таких умов вільне переміщення дислокацій ускладнюється, що є характерним для дислокаційного (субструктурного) механізму зміцнення.

Таким чином, згідно з аналізою результатів металографічного та дюрOMETричного досліджень, в процесі обкочування титанового стопу VT22 реалізується комбінований механізм зміцнення, а саме, зерномежовий (полікристалічний) та дислокаційний (субструктурний).

Аналіза результатів трибологічних випробувань засвідчила, що збільшення навантаження під час обкочування збільшує інтенсив-

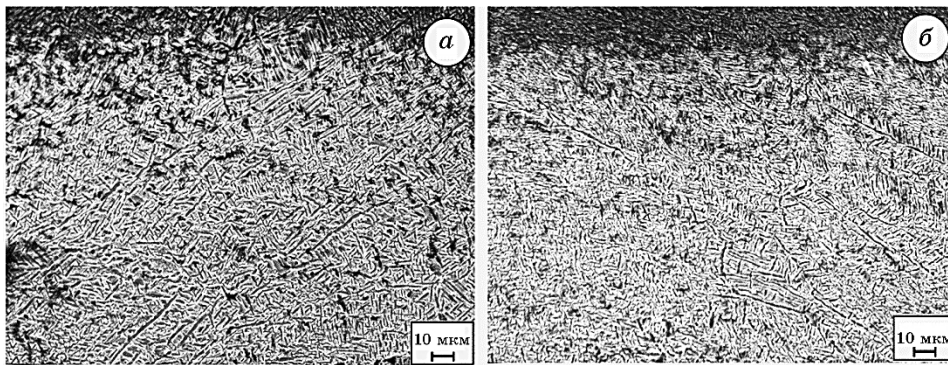


Рис. 3. Мікроструктура приповерхневого зміцненого шару стопу VT22 після обкочування за режимом 1 (а) та режимом 2 (б).

Fig. 3. Microstructure of the near-surface layer of hardened VT22 alloy after rolling by mode 1 (a) and mode 2 (b).

ність зношування титанового диску (табл. 2). При цьому інтенсивність зношування контртіл (бронзових колодок) на два порядки перевищує інтенсивність зношування титанових дисків (табл. 2). Контртіло, котре працювало у парі з титановим диском, зміцненим при навантаженні у 200 Н, має меншу величину зносу порівняно з контртілом, яке працювало з диском, зміцненим при навантаженні у 600 Н (табл. 2).

Окрім цього, за фрикційної взаємодії досліджуваних трибопар фіксували зміну коефіцієнта тертя та температуру в околі зони тертя. Нижчий коефіцієнт тертя має трибопара, диск якої обкочували при навантаженні у 200 Н (рис. 4). За вищого навантаження під час ХППД коефіцієнт тертя зростає в 2 рази (табл. 2). На ділянці стабільного зношування температура в околі зони тертя за вищого навантаження теж має тенденцію до зростання (табл. 2). Очевидно, для забезпечення високої зносостійкості пари тертя VT22–BrAZhN 10-4-4 доцільно проводити обкочування за нижчого ступеня пластичної деформації.

Мікроструктури поверхонь тертя деформаційно зміцнених титанових зразків характерні адгезійному механізму зношування. Такий механізм описує взаємодію поверхонь тертя, яка супроводжується інтенсивною пластичною деформацією тонких поверхневих шарів, за навантажень, що перевищують межу плинності 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 віддалі міжатомового порядку відбувається схоплювання та мікрозварювання контактних поверхонь з виділенням енергії, що ілюструє кінетика зміни коефіцієнту тертя (рис. 4). Коли молекулярна взаємодія між схопленими поверх-

ТАБЛИЦЯ 2. Триботехнічні характеристики пари тертя деформаційно зміцнений стоп VT22–бронза BrAZhN 10-4-4.

TABLE 2. Tribological characteristics of friction pair of strain hardening VT22 alloy–bronze BrAZhN 10-4-4.

Трибоспряження	Втрата маси Δm , г		Коефіцієнт тертя f	Температура T , °C
	VT22	BrAZhN 10-4-4		
VT22 зміцнений за режимом 1 — BrAZhN 10-4-4	0,186	0,391	0,12	42,7
VT22 зміцнений за режимом 2 — BrAZhN 10-4-4	0,222	0,484	0,24	43,6

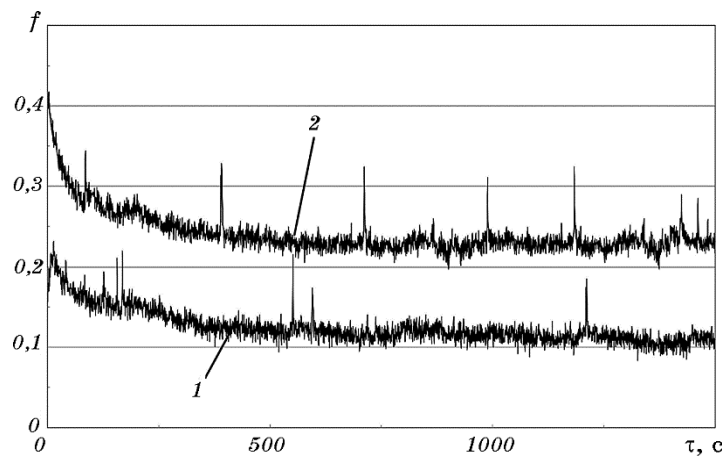


Рис. 4. Кінетика зміни коефіцієнта тертя трибопари стоп VT22–бронза БраЖН 10-4-4 (1 — обкочування за режимом 1; 2 — за режимом 2).

Fig. 4. Kinetics of change in the friction coefficient of the friction pair VT22 alloy–BrAZhN 10-4-4 bronze (1—rolling by mode 1, 2—by mode 2).

нями є більшою, ніж межа міцності матеріалів, і при цьому тіла продовжують взаємно переміщатися, то відбувається виривання м'якшого матеріялу з поверхні. В результаті на контактній поверхні зразків з меншою міцністю матеріялу (бронза) утворюються хаотично розташовані вириви, а на зразках з більшою міцністю (титановий стоп VT22) — налипання. Це підтверджує мікрорентгеноспектральна аналіза тертьових поверхонь, фіксуючи на поверхні титанових зразків матеріял контртіла (мідь) (рис. 5). Такі ділянки намащування розташовані хаотично одна від одної, також є місця нашарування. Вони напрямлені гострими кінцями у бік фрикційної течії матеріялу. В процесі тертя такі ділянки з високою твердістю сприяють розвитку вторинних процесів місцевої деформації і мікрорізання поверхонь тертя. Слід відзначити, що чим більша відстань між ділянками намащування (рис. 5, а), тим стійкіше фрикційна течія та менше зношування пари тертя (табл. 2).

Для більш детального пояснення адгезійного зношування в роботі [12] запропоновано дислокаційно-вакансійну гіпотезу створення металевих зв'язків, згідно з якою головним чинником у процесі схоплення є активізація при терті поверхневих шарів матеріялу в результаті інтенсивної пластичної деформації. Під час фрикційної взаємодії робота сили тертя витрачається на виділення тепла в зоні контакту та поглинання енергії поверхневим шаром. Ці два параметри процесу зовнішнього тертя є головними факторами, які зумовлюють трибоактивацію поверхневих шарів матеріялу. Таке поглинання енергії при пластичному деформуванні металу визначає

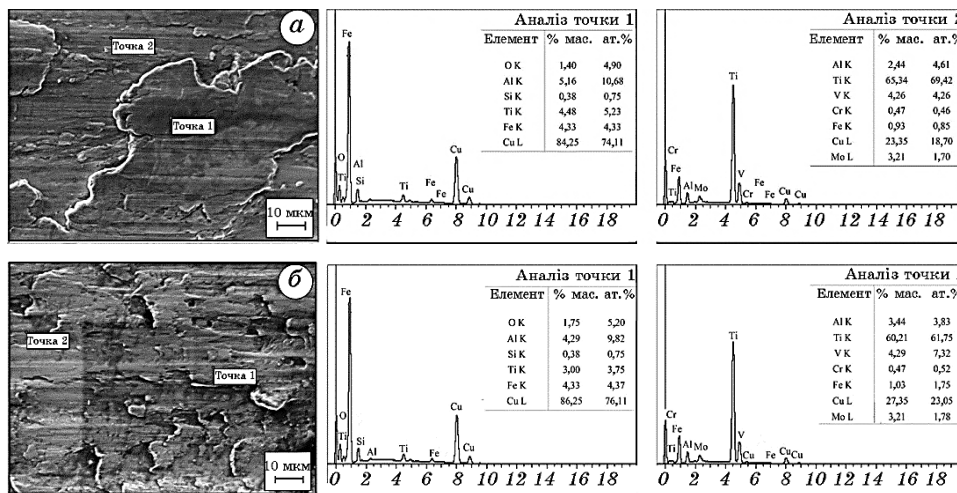


Рис. 5. Мікроструктура поверхонь тертя стопу VT22, зміцненого обкочуванням за режимами 1 (а) та 2 (б).

Fig. 5. Microstructure of the friction surfaces of VT22 alloy hardened by rolling according to modes 1 (a) and 2 (b).

кінетику накопичення дефектів структури. Активована поверхня поступово насичується вакансіями, а в процесі адгезійного зношування відбувається взаємна дифузія атомів контактуючих матеріалів по вакансіях. В результаті у точках фактичного контактування, в яких виникають дифузійні процеси, формуються структури з міцним металевим зв'язком.

У той же час, чим більше матеріалу буде схильним до утворення вакансій, тим більше буде поглинатися енергії при пластичному деформуванні і, відповідно, зношення від схоплення. Це пояснює той факт, що за більшого навантаження під час обкочування формується характерний поверхневий мікрорельєф (рис. 1, в), в якому за рахунок заокруглення радіусів мікрорівнів після ХППД збільшується площа фактичного контактування, а отже, і збільшується ступінь насичення такої поверхні вакансіями. З другого боку, за рахунок низької теплопровідності, температура в зоні контакту таких мікрорівнів збільшується, що також пришвидшує дифузійні процеси мікрозварювання поверхонь. Ці два фактори сприяють інтенсивному схоплюванню та мікрозварюванню робочих поверхонь під час тертя.

Таким чином, з одного боку, збільшення навантаження під час обкочування збільшує несучу здатність поверхні титанового стопу, а з другого, в даних умовах тертя призводить до більшої площі схоплення титану з бронзовою колідкою, інтенсифікуючи адгезійне

зношування останньої.

4. ВИСНОВКИ

Встановлено, що збільшення навантаження під час обкочування стопу BT22 забезпечує високий рівень приповерхневого зміцнення і підвищує якість поверхні. На основі металографічної та дюрOMETричної аналіз показано, що в процесі обкочування реалізується комбінований механізм зміцнення, а саме, зерномежовий (полікристалічний) та дислокаційний (субструктурний).

Під час тертя за питомого навантаження 0,6 МПа деформаційно зміцненого стопу BT22 у парі з БрАЖН 10-4-4 реалізується адгезійний механізм зношування. Обкочування титанового стопу BT22 за меншого навантаження забезпечує вищу зносотривкість в умовах граничного мащення даної трибопари. Триботехнічні характеристики титанового стопу BT22 після обкочування при навантаженні у 200 Н у 3 проходи вищі і забезпечують на етапі стабільного зношування нижчі коефіцієнт тертя (0,12 проти 0,24) і температуру в околі зони тертя, ніж при навантаженні у 600 Н у 3 проходи.

Автори статті висловлюють подяку д-ру техн. наук С. Є. Шейкіну, зав. відділу № 20 ІНМ НАН України, за надану можливість здійснення ХППД титанового стопу BT22 методом обкочування діамантовою кулькою.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. А. В. Богуслаев, Ал. А. Олейник, Ан. А. Олейник, Д. В. Павленко, С. А. Субботин, *Прогрессивные технологии моделирования, оптимизации и интеллектуальной автоматизации этапов жизненного цикла авиационных двигателей* (Запорожье: Мотор Сич: 2009).
2. О. І. Духота, М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, *Проблеми тертя та зношування*, № 49: 14 (2008).
3. Ю. Г. Шнейдер, *Технология финишной обработки давлением* (Санкт-Петербург: Политехника: 1998).
4. В. М. Смелянский, *Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием* (Москва: Машиностроение: 2002).
5. В. А. Богуслаев, А. И. Долматов, В. С. Кривцов, П. Д. Жеманюк, А. Ф. Горбачёв, Л. А. Пирогов, *Изготовление деталей газотурбинных двигателей из титановых сплавов* (Запорожье: Мотор Сич: 1997).
6. С. Є. Шейкін, Д. В. Єфросинін, І. Ю. Ростоцький, *Фізика і техніка високих давлень*, 21, № 1: 134 (2011).
7. М. Г. Вейцман, В. Г. Вайнштейн, *Вестник машиностроения*, № 2: 73 (1975).
8. С. А. Фирстов, А. Ю. Бородянская, А. В. Котко, И. В. Моисеева, В. Ф. Моисеев, *Металлофиз. новейшие технол.*, 20, № 3: 70 (1998).

9. С. А. Фирстов, В. Ф. Моисеев, А. В. Котко *Электронная микроскопия и прочность материалов*, № 4: 73 (1995).
10. А. В. Котко, В. Ф. Моисеев, Э. П. Печковский, И. В. Моисеева, В. К. Пищак, *Металлофиз. новейшие технол.*, **23**, № 8: 1013 (2001).
11. И. Г. Носовский, *Трение и износ*, **14**, № 1: 19 (1993).
12. Б. И. Костецкий, *Трение, смазка и износ в машинах* (Киев: Техника: 1970).

REFERENCES

1. A. V. Boguslaev, Al. A. Oleinik, An. A. Oleinik, D. V. Pavlenko, and S. A. Subbotin, *Progressivnye Tekhnologii Modelirovaniya, Optimizatsii i Intellektual'noy Avtomatizatsii Etapov Zhiznennogo Tsikla Aviatsionnykh Dvigatelye* (Zaporozhye: Motor Sich: 2009) (in Russian).
2. O. I. Duhota, M. V. Kindrachuk, and V. F. Labunets', *Problemy Tertya ta Znoshuvannya*, No. 49: 14 (2008) (in Ukrainian).
3. Yu. G. Shneyder, *Tekhnologiya Finishnoy Obrabotki Davleniem* (St. Petersburg: Politekhnik: 1998) (in Russian).
4. V. M. Smelyanskiy, *Mekhanika Uprochneniya Detaley Poverkhnostnym Plasticheskim Deformirovaniem* (Moscow: Mashinostroenie: 2002) (in Russian).
5. V. A. Boguslaev, A. I. Dolmatov, V. S. Krivtsov, P. D. Zhemanyuk, A. F. Gorbachev, and L. A. Pirogov, *Izgotovlenie Detaley Gazoturbinnnykh Dvigatelye iz Titanovykh Splavov* (Zaporozhye: Motor Sich: 1997) (in Russian).
6. S. Ye. Sheykin, D. V. Yefrosynin, and I. Yu. Rostotskiy, *Fizika i Tekhnika Vysokikh Davleniy*, **21**, No. 1: 134 (2011) (in Ukrainian).
7. M. G. Weitsman and V. G. Vainshtein, *Vestnik Mashinostroeniya*, No. 2: 73 (1975) (in Russian).
8. S. A. Firstov, A. Yu. Borodyanskaya, A. V. Kotko, I. V. Moiseeva, and V. F. Moiseev, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **20**, No. 3: 70 (1998) (in Russian).
9. S. A. Firstov, V. F. Moiseev, and A. V. Kotko, *Elektronnaya Mikroskopiya i Prochnost' Materialov*, No. 4: 73 (1995) (in Russian).
10. A. V. Kotko, V. F. Moiseyev, Eh. P. Pechkovs'ky, I. V. Moiseyeva, and V. K. Pishchak, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **23**, No. 8: 1013 (2001) (in Russian).
11. I. G. Nosovskiy, *Trenie i Iznos*, **14**, No. 1: 19 (1993) (in Russian).
12. B. I. Kostetskiy, *Trenie, Smazka i Iznos v Mashinakh* (Kiev: Tekhnika: 1970) (in Russian).