

УДК 621.785.532, 620.178.16

DOI: 10.18372/0370-2197.3(96).16830

А. В. САГАЛОВИЧ<sup>1</sup>, В. В. САГАЛОВИЧ<sup>1</sup>, В. В. ПОПОВ<sup>1</sup>, С. Ф. ДУДНИК<sup>1</sup>,  
О. К. ОЛІЙНИК<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АТ «ФЕД», м. Харків Україна

<sup>2</sup>ДП завод ім. Малишева, м. Харків Україна

### ТРИБОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ АЗОТОВАНИХ У ПЛАЗМІ ТЛІЮЧОГО РОЗРЯДУ ЗРАЗКІВ ІЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ ВТ5 У ПАРАХ ІЗ РІЗНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Одним із сучасних методів поліпшення експлуатаційних характеристик титану та сплавів на його основі в умовах тертя та підвищених контактних навантажень є метод іонно-плазмового азотування. Досліджено вплив азотування сплаву ВТ5 в плазмі тліючого розряду, що збуджується в порожнистому катоді, на його трибологічні характеристики в парах з різними матеріалами в паливі Т-1 та в умовах сухого тертя. Для досліджень і трибологічних випробувань зразки зі сплаву ВТ5 були проазотовані в плазмі тліючого розряду, що збуджувався в порожнистому катоді, при температурі  $975 \pm 15^\circ\text{C}$  і тиску  $58 \pm 2$  Па в азотно-аргоновій газовій суміші з вмістом азоту 78 %. Дослідження зразків із сплаву ВТ5 після азотування показали, що шорсткість поверхні Ra знаходилася в межах 0,58-0,64, а твердість поверхні HV5 становила  $525 \pm 20$  кгс/мм<sup>2</sup> за твердості основи  $325 \pm 15$  кгс/мм<sup>2</sup>. Трибологічні випробування виконували на машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою «кубик – ролик». Випробування в умовах тертя з мастилом проводилися при навантаженні 200 Н. Швидкість ковзання при випробуваннях становила 1,3 м/с, час випробування 75 сек. Змащування здійснювалося шляхом занурення рухомого контртіла у ванну з паливом ТС-1. Випробування в умовах сухого тертя здійснювалося при навантаженні 100 Н та швидкості ковзання 0,785 м/с, час випробувань – 30 хвилин. Низьку зношуючу здатність по відношенню до азотованого сплаву титану ВТ5 ( $< 2,4 \times 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/сек), а також коефіцієнти тертя на рівні від 0,08 до 0,12 в порядку їх зростання мали бронзи БрСу3Н3Ц3С20Ф0,2, Бр.О10С2Н3, БрСу6Ф0,9, сталь ШХ-15, чавун ВЧ2169-2, цементована сталь 20Х3МВФ.

**Ключові слова:** сплави титану, азотування, трибологічні характеристики, тертя, зносостійкість.

**Вступ.** Сплави титану мають ряд певних переваг, які зумовлюють розширення їх використання у виробництві сучасної техніки. Однак схильність до схоплювання при терті ковзання та низькі інші трибологічні властивості обмежують можливості їх раціонального використання [1].

Область застосування титанових сплавів може бути суттєво розширена, якщо модифікувати їх поверхню різними методами обробки або нанесення покриттів, які підвищують їх зносостійкість, антифрикційні та інші властивості [2-4].

**Аналіз літературних джерел та стан проблеми.** Одним із сучасних методів поліпшення експлуатаційних характеристик титану та сплавів на його основі в умовах тертя є метод іонно-плазмового азотування [5-7]. Так, в роботі [5] показано, що після іонного азотування сплаву ВТ6 мікротвердість його поверхні HV збільшується в 3–4 рази порівняно з вихідним станом в залежності від умов азотування. Вимірювання зносу азотованих в різних режимах зразках, що проводився на трибометрі Nanovea по схемі «кулька по диску» при навантаженні 4N показали, що його величина суттєво залежить від умов азотування зразків. В

роботі [6] досліджувались трибологічні характеристики титанового сплаву (Ti-6Al-4V), що є аналогом вітчизняного сплаву ВТ6. Величина зносу та коефіцієнт тертя вимірювались за допомогою трибometру CSM (Switzerland) в режимі односпрямованого ковзання з кулькою із  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при навантаженні 3 N. Дослідження показали, що коефіцієнт тертя міг мати значення від  $\approx 0,6$  до 1,0 в залежності від режиму іонного азотування та наявності текстури поверхневого шару зразка, як і величина зносу, яка була в межах від  $\approx 0,025\text{мм}^3$  до  $0,3\text{мм}^3$ . В роботі [7] трибологічні дослідження азотованого в різних режимах титанового сплаву ВТ8 проводили на універсальній машині тертя UMF 2168 за схемою «диск-палець» в умовах сухого тертя при навантаженні близько 20 N. Контртілом слугувала загартована сталь 45 (HRC-45). Було встановлено, що відмінності у режимі іонного азотування зразків призводять до різних значень коефіцієнта тертя в межах від 0,2 до 0,4 та різних значень інтенсивності зносу. Таким чином, результати впливу іонно-плазмового азотування на трибологічні характеристики титану та його сплавів при роботі з тими чи іншими матеріалами, які приводяться в літературі, можуть суттєво відрізнятися навіть для ідентичних по матеріалам пар тертя з причини неспівпадіння умов їх виготовлення, методів та умов проведення досліджень їх характеристик. Тому на практиці, при впровадженні в виробництво азотованого титану та його сплавів, отриманих за певними відпрацьованими режимами, є потреба в проведенні трибологічних досліджень з різними матеріалами з урахуванням конкретних умов їх роботи. Слід зазначити, що впровадження титану та сплавів на його основі наразі є одним з актуальних завдань в авіабудуванні.

**Постановка задачі.** У матеріалах статті містяться такі питання: Обладнання, методи дослідження та матеріали Метою даної роботи було дослідження впливу азотування сплаву ВТ5 в плазмі тліючого розряду, що збуджується в порожнистому катоді, на його трибологічні характеристики в парах з різними матеріалами в умовах сухого тертя та паливі Т-1.

**Обладнання, методи дослідження та матеріали.** Для досліджень і випробувань були виготовлені зразки зі сплаву ВТ5 у вигляді кубів зі стороною 10 мм з шорсткістю поверхні Ra 0,63. Азотування зразків проводили в плазмі тліючого розряду, що збуджується в порожнистому катоді у формі куба з розмірами  $100 \times 100 \times 100\text{мм}^3$  при температурі  $975 \pm 15^\circ\text{C}$  і тиску  $P = 58 \pm 2\text{Па}$  протягом 4 годин в азотно-аргоновій газовій суміші з вмістом азоту 78 %. На рис. 1 представлено фото тліючого розряду в порожнистому катоді при азотуванні зразка.

Контроль температури зразків під час азотування здійснювали пірометром «Промінь» (Україна), склад газової суміші задавали за допомогою витратомірів FG201 компанії Bronkhorst (Нідерланди), тиск вимірювали вакуумметром KPDR900 компанії Kurt J. Lesker (США). Твердість азотованої поверхні зразків визначали за допомогою твердоміра QNESS Q60M компанії «КЕМІКА» (Австрія) при навантаженні 5 кг, шорсткість покриттів визначалася за допомогою профілометр-профілограф JENOPTIK panoscan 855 (Німеччина). Топографію поверхні до та після трибологічних випробувань досліджували з використанням оптичного мікроскопа Altami MET-1C із цифровою камерою.

Трибологічні випробування виконували на модернізованій машині тертя 2070 СМТ-1 за схемою «кубик – ролик» в умовах сухого тертя ковзання та тертя зі змащенням.



Рис. 1. Фото тліючого розряду в порожнистому катоді при азотуванні зразка, що знаходиться в центрі катоду.

Модернізація полягала у виготовленні спеціального пристосування для кріплення верхнього зразка «колодки», що забезпечує самоустановку зразка у процесі випробувань. Випробування в умовах тертя з мастилом проводилися при навантаженні 200 Н. Швидкість ковзання при випробуваннях становила 1,3 м/с, час випробування 75 сек. Мастило здійснювалося шляхом занурення рухомого контртіла у ванну з паливом ТС-1, ГОСТ 10227-86. Випробування в умовах сухого тертя здійснювалося при навантаженні 100 Н та швидкості ковзання 0,785 м/с, час випробувань – 30 хвилин. Як нерухомий зразок «колодки» використовували кубічні зразки. Як рухомий - «диска» - стандартні зразки діаметром 50 мм і висотою 12 мм, виготовлені з різних матеріалів, що можуть застосовуватися в різних галузях машинобудування та авіабудування (Сталь 12Х18Н10Т, сталь ШХ-15, азотована сталь 20Х3МВФ, цементована сталь 20Х3МВФ, високоміцний чавун ВЧ2169-2 – аналог ВЧ80-2, бронзи Бр.СуЗНЗЦЗС20Ф0,2, бронзи Бр.О10С2НЗ, Бр.СубФ0,9). Величину зносу досліджуваних зразків визначали за допомогою ваг АДВ-200.

**Результати.** Дослідження зразків із сплаву ВТ5 після азотування показали, що шорсткість поверхні Ra знаходилася в межах 0,58-0,64, а твердість поверхні HV5 становила  $525 \pm 20$  кгс/мм<sup>2</sup> за твердості основи  $325 \pm 15$  кгс/мм<sup>2</sup>. На рис. 2 наведена структура травленого у суміші плавикової та азотної кислот поперечного шліфу азотованого шару. У структурі азотованого шару виявляється тонкий, товщиною 3-4 мкм, темний зовнішній шар, далі світлий суцільний однорідний шар товщиною 25-30 мкм, за яким знаходиться проміжний шар між основою та суцільним світлим шаром. Проміжний шар має змішану структуру зі світлих за кольором фрагментів, подібних до суцільного шару, вкраплених у поле зі структурою основи. Така тришарова структура поверхневого азотованого шару

формується при азотуванні титану та  $\alpha$ -сплавів у певній області температур вище температури фазового  $\alpha \rightarrow \beta$  переходу, яка для сплаву VT5 за різними літературними даними знаходиться в інтервалі температур (940 ÷ 990) °C.

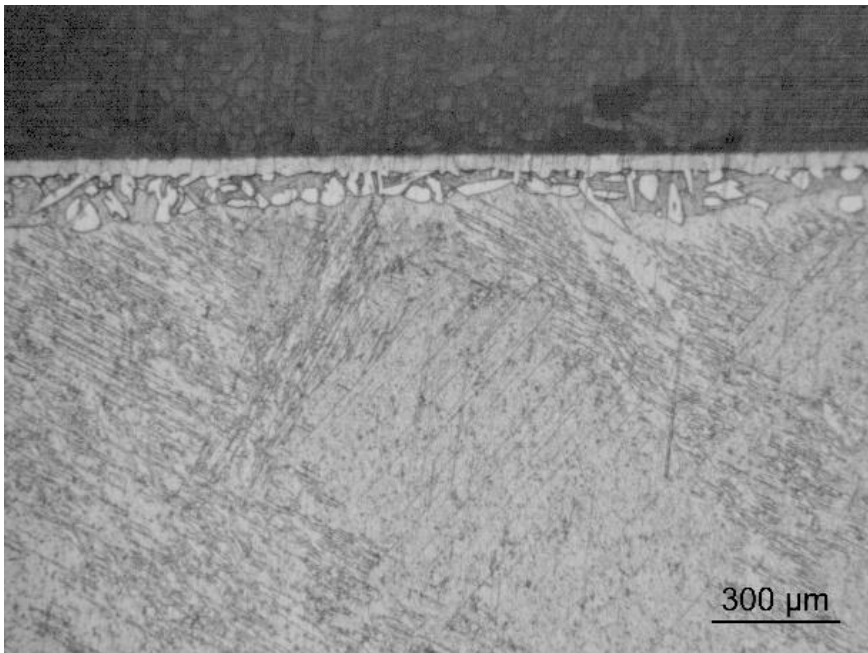


Рис. 2. Структура травленого у суміші плавикової та азотної кислот поперечного шліфу азотованого шару зразка зі сплаву VT5.

Зовнішній шар є нітридом титану  $TiN_x$ , далі шар, в якому відбувся перехід з  $\beta$  фази в  $\alpha$ -фазу за рахунок насичення її азотом до концентрації, достатньої для такого переходу при температурі азотування. У проміжному шарі тільки в деяких фрагментах його структури була досягнута концентрація азоту, достатня для утворення  $\alpha$ -фази за температури азотування в шарі  $\beta$  фази. При охолодженні ці фрагменти, що мають такий же колір, як і шар, що вище лежить, не відчували поліморфного перетворення, тоді як основа і решта проміжного шару при охолодженні відчували  $\beta \rightarrow \alpha$  перетворення.

Результати випробувань азотованих зразків у контакті з різними матеріалами в умовах тертя зі змащенням представлені у табл. 1. Їх умовно можна поділити на дві групи. Одна група матеріалів – це пари тертя, що показали задовільні результати за величиною зношування та коефіцієнтом тертя для даних умов випробувань, до якої відносяться всі типи випробуваних бронз, чавун, а також цементована сталь 20X3MBФ та сталь ШХ-15. Інша група випробуваних матеріалів у парах тертя, до якої увійшли азотована сталь 20X3MBФ і сталь 12X18H10T, мала високі значення як коефіцієнта тертя, і величину зносу контактуючих матеріалів.

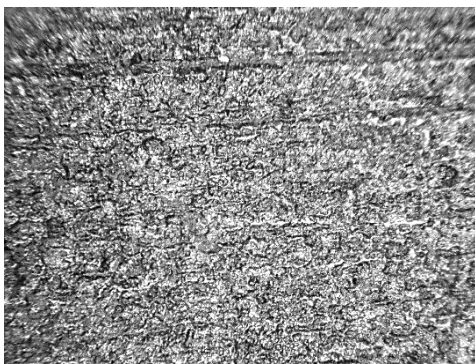
У першій групі матеріалів найменший коефіцієнт тертя зафіксований у парі тертя азотованого титану з бронзою БрCu3H3Ц3C20Ф0,2. Мінімальну зношуючу здатність по відношенню до азотованого титану, ( $2,4 \times 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/сек) мали бронзи БрCu3H3Ц3C20Ф0,2, БрCu6Ф0,9, чавун ВЧ2169-2, а також цементована сталь 20X3MBФ, у парі з якою колодка з азотованого титанового сплаву мала після випробувань навіть деякий приріст.

Таблиця 1

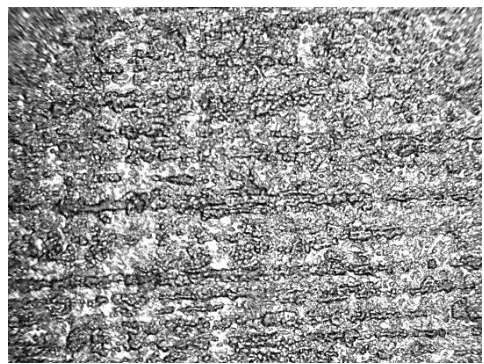
## Результати випробувань пар тертя та зношування зі змащенням паливом ТС-1

№ п/п	Матеріал контргіла	Знос «колодки», г	Знос «контргіла», г	Коефіцієнт тертя	Швидкість зносу колодки, мм <sup>3</sup> /Нм	Швидкість зносу контргіла, мм <sup>3</sup> /Нм
1	БрСу3НЗЦ3С20Ф0,2	0,0000	0,0030	0,08	$<1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,81 \cdot 10^{-5}$
2	БрО10С2Н3	0,0001	0,0010	0,10	$1,13 \cdot 10^{-6}$	$6,25 \cdot 10^{-6}$
3	БрСу6Ф0,9	0,0000	0,0002	0,10	$<1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$
4	ВЧ2169-2	0,0000	0,0016	0,11	$<1,13 \cdot 10^{-6}$	$1,14 \cdot 10^{-5}$
7	Сталь ШХ-15	0,0002	0,0011	0,10	$2,26 \cdot 10^{-6}$	$7,22 \cdot 10^{-6}$
8	Сталь 20Х3МВФ цементована.	+0,0002	0,0003	0,12	Приріст $2,26 \cdot 10^{-6}$	$1,97 \cdot 10^{-6}$
9	Сталь 20Х3МВФ азотована	0,0020	0,0090	0,54	$2,26 \cdot 10^{-5}$	$5,92 \cdot 10^{-5}$
10	Сталь 12Х18Н10Т	0,0014	0,0031	0,54	$1,58 \cdot 10^{-5}$	$2,42 \cdot 10^{-5}$

Доріжки тертя з цієї групою матеріалів при візуальному огляді ледь помітні на поверхні азотованих зразків і практично не мали зміни в структурі поверхні порівняно з вихідною (рис. 3). Інша група випробуваних у парах тертя матеріалів, до якої увійшли азотована сталь 20Х3МВФ і сталь 12Х18Н10Т, мала високі значення як коефіцієнта тертя, так і величину зносу контактуючих матеріалів. Більш високу зношуючу здатність по відношенню до азотованого титану, як і величину власного зношування, мала азотована сталь 20Х3МВФ. Коефіцієнт тертя для цієї групи матеріалів виявився однаковим і мав величину 0,54. На рис. 4 наведено вид доріжки тертя після трибологічних випробувань азотованого титанового зразка в парі з азотованою сталлю 20Х3МВФ.



а



б

×200

Рис. 3. Структура поверхні азотованого зразка до та після проведення трибологічних випробувань у парі з цементованою сталлю зі змащенням у паливі, відповідно а та б

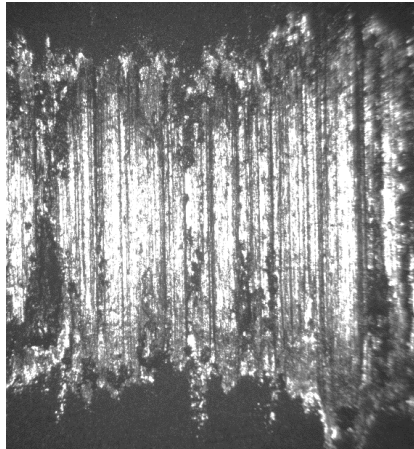


Рис. 4. Доріжки тертя азотованого титанового зразка після трибологічних випробувань у парі з азотованою сталлю 20X3МВФ зі змащенням у паливі Т-1,  $\times 15$

Доріжка має контури з рваними краями, а її поверхня представляє грубий смугастий рельєф з перепадами по глибині борозен у десятки мікронів (рис. 5) при усередненій максимальній глибині доріжки  $\approx 40$  мкм.

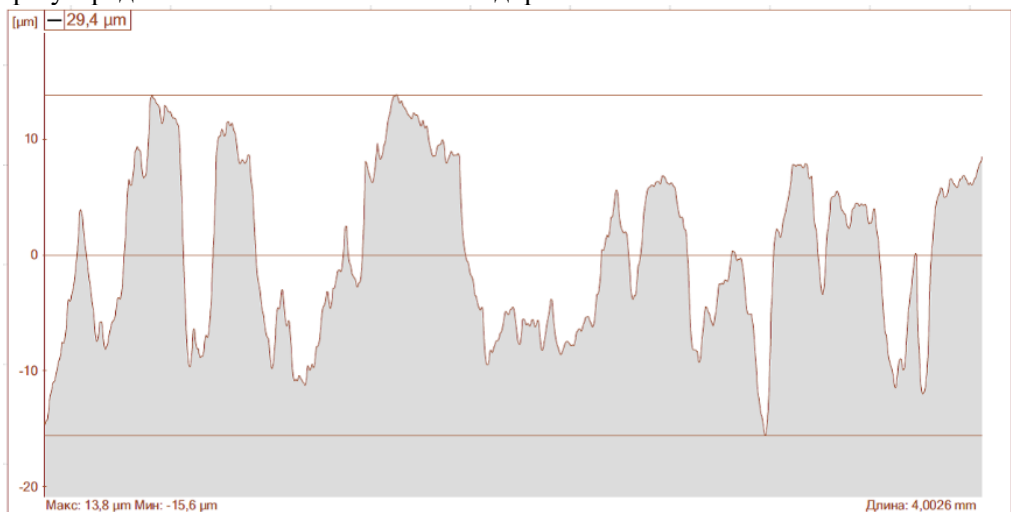


Рис. 5. Профілограма в області максимальної глибини поверхні доріжки тертя азотованого титанового зразка після трибологічних випробувань у парі з азотованою сталлю 20X3МВФ із мастилом у паливі Т-1.

Подібний вигляд має і доріжка тертя після трибологічних випробувань у парі зі сталлю 12X18Н10Т при дещо меншій глибині. З такою глибиною доріжки тертя, зношування в області контакту азотованого зразка з контртілом повинен повністю піддатися верхній шар з нітриду титану, суцільний азотований шар і частково проміжний шар між азотованим шаром і матеріалом основи титанового сплаву, представлені на рис. 1. На рис. 6 представлена структура поперечних шліфів титанових зразків з азотованим шаром в області доріжок тертя з азотованою сталлю 20X3МВФ та сталлю 12X18Н10Т.

На рис. 6 видно, що в області максимальної глибини доріжки тертя після трибологічних випробувань з азотованою сталлю 20X3МВФ і сталлю 12X18Н10Т межа зношування матеріалу титанового зразка знаходиться в області проміжного

азотованого шару, не доходячи до матеріалу основи. Добре також видно деформаційні спотворення в структурі проміжного шару, викликані впливом сили тертя між роликком, що обертається, і поверхнею випробуваного зразка.

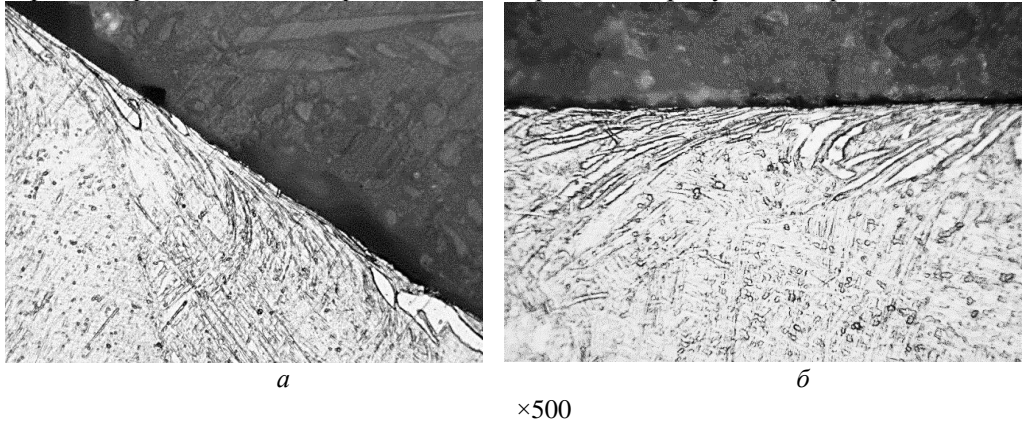


Рис. 6. Структура поперечного шліфу азотованого титанового зразка в області максимальної глибини доріжки тертя після трибологічних випробувань: *a* – у парі з азотованою сталлю 20X3MBФ; *б* – у парі зі сталлю 12X18H10Т.

Досить хороші трибологічні властивості чавунів у парах тертя з різними матеріалами перш за все пов'язують з високим вмістом у них вуглецю, який при контакті поверхонь, що труться, бере участь у формуванні поверхневих плівок, що забезпечують ковзання з низьким коефіцієнтом тертя. З цих позицій можна пояснити, чому так сильно відрізняються результати трибологічних випробувань у парах тертя з азотованою та цементованою сталлю 20X3MBФ, в якій, за даними роботи [8] поверхнева концентрація вуглецю, залежно від режимів цементації, може мати значення від 2,14 % до 5,7 %, але в відстані 0,2 мм від поверхні концентрація вуглецю може мати значення від 0,95 % до 1,45 %.

При роботі різних пар тертя з мастилом за умов граничного тертя коефіцієнт тертя має значення лише на рівні 0,08 – 0,15, займаючи проміжні значення між величинами, притаманними умовам рідинного тертя і умовам сухого тертя. Саме в цьому діапазоні є значення коефіцієнтів тертя для першої групи пар тертя. У другій групі пар тертя отримане значення для коефіцієнта тертя вказує на значний внесок адгезійної взаємодії між матеріалами, що контактують у парі тертя, незважаючи на наявність змащувальної рідини. Про це свідчить і вид доріжок тертя цих груп матеріалів.

Для прогнозування поведінки роботи вузлів та механізмів у разі недостатньої кількості мастила або перебоїв у її подачі необхідно знати характеристики вибраної трибопари також і в умовах сухого тертя. Крім цього, для багатьох вузлів тертя використання мастил за умовами їхньої експлуатації просто неприпустимо. У цьому було цікаво визначити трибологічні характеристики азотованого сплаву VT5 під час роботи за умов сухого тертя. Як матеріал контртіла була обрана цементована сталь 20X3MBФ, яка досить широко використовується при виробництві різних агрегатів. Враховуючи умови роботи в парах тертя без мастила, що використовуються у вузлах вироблених агрегатів, випробування були проведені при навантаженні 100Н. При проведенні випробувань було встановлено, що в початковий момент протягом наступних 75 секунд випробувань коефіцієнт тертя мав практично постійну, величину рівну 0,34. Після

цього періоду часу величина коефіцієнта тертя стала непостійною і нижчою з коливаннями значень спочатку від 0,32 до 0,2 і випробувань, що збільшилися до кінця, до значень від 0,26 до 0,52. У табл. 2 наведені результати вимірювання зносу досліджуваних зразків у цьому експерименті.

Таблиця 2

**Результати випробувань без мастила пари тертя «Азотований сплав VT5-цементована сталь 20X3МВФ»**

Шлях, м	Знос «колодки», г	Знос «контртіла», г	Коефіцієнт тертя	Швидкість зносу Колодки, мм <sup>3</sup> /Nm	Швидкість зносу контртіла мм <sup>3</sup> /Nm
1413	Приріст +0,0005	0,0046	0, 2 ÷ 0,52	Приріст 6,51·10 <sup>-7</sup>	4,46·10 <sup>-6</sup>

Після випробувань пари тертя «азотований сплав VT5-цементована сталь 20X3МВФ» без мастила колодка додала у вазі, також як і після випробувань такої пари з мастилом. Але якщо після випробувань такої пари з мастилом поверхня азотованого сплаву титану в області контакту з контртілом не зазнала істотних змін, то в даному випадку утворилася доріжка тертя, яка, як показали виміри, мала глибину близько 13 мкм. При такій глибині доріжки від контртіла Ø 50 мм розрахунковий спад ваги повинен був бути не менше 0,0006 г. Невідповідність між розрахунковою зміною ваги колодки і фактично вимірним свідчить про те, що в процесі ковзання цієї пари має місце перенесення матеріалу з ролика. На рис. 7 представлено фото доріжки тертя на колодці з наволакуванням матеріалу на межі виходу ролика з поверхнею колодки і численними ділянками з продуктами взаємодії матеріалів, що труться на поверхні доріжки тертя.

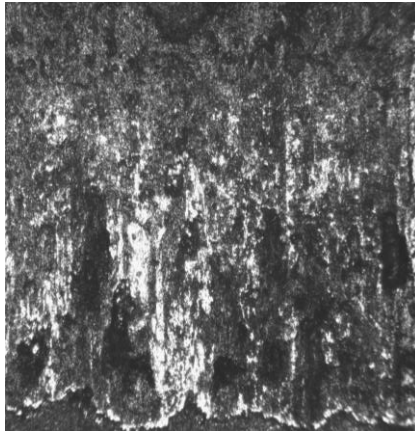


Рис. 7. Доріжка тертя азотованого титанового зразка після трибологічних випробувань у парі із зразком із цементованої сталі 20X3МВФ без мастила, ×40

Зміна величини коефіцієнта тертя в процесі випробувань можна пояснити зміною складу матеріалу, що контактує, поверхні колодки при її зносі. Початковий період, мабуть, відповідає часу, протягом якого ковзання здійснювалося по шару нітриду титану, з яким адгезійна взаємодія з матеріалом ролика була постійною і тому коефіцієнт тертя не змінювався. При подальшому збільшенні глибини вироблення області контакту з роликом адгезійна взаємодія матеріалу ролика посилюється з допомогою появи контакту вже зі сплавом титану, ковзання яким супроводжується процесом перенесення матеріалу ролика



і актами локального схоплювання контактуючих матеріалів. Це призводить до нестабільності величини коефіцієнта тертя та збільшення амплітуди його коливання внаслідок збільшення площі контакту контртіла зі сплавом титану при подальшому зносі азотованого шару. Подібний характер зміни коефіцієнта тертя спостерігався і в роботі [5] при проведенні випробувань за схемою «диск-кулька» азотованого сплаву ВТ6 у парі з керамічною кулькою без мастила.

Проведені в даній роботі дослідження показали, що в залежності від матеріалу, що контактує в парі тертя з азотованим сплавом ВТ5, можна забезпечити ковзання з досить низькими значеннями коефіцієнта тертя та зносу матеріалів трибопар при вибраних в даній роботі умовах випробувань. Наявність шару з нітриду титану на поверхні азотованих титанових сплавів забезпечує їхню високу зносостійкість порівняно з неазотованими матеріалами. Зменшення адгезійної взаємодії і схильності до схоплювання з матеріалами, що контактують, при ковзанні також пов'язують з наявністю на поверхні азотованих сплавів нітридного шару. Важливу роль при цьому можуть грати процеси перенесення матеріалу контртіла на азотовану поверхню сплавів титану. Виходячи з таких позицій запропоновано пояснення результатів у даній роботі, отриманих при випробуванні пари тертя «азотований сплав ВТ5-цементована сталь 20Х3МВФ» без мастила.

**Висновки** Проведено трибологічні випробування матеріалів зі сталі 12Х18Н10Т, сталі ШХ-15, азотованої сталі 20Х3МВФ, цементованої сталі 20Х3МВФ, високоміцного чавуну ВЧ2169-2 – аналога ВЧ80-2, бронз Бр.СуЗН30, у контакті з азотованим сплавом ВТ5 у різних умовах та встановлено:

– низьку зношуючу здатність по відношенню до азотованого титану ( $2,4 \times 10^{-4}$  мм<sup>3</sup>/сек) при випробуваннях в умовах мастила в паливі Т-1 та коефіцієнти тертя на рівні від 0,08 до 0,12 у порядку їх зростання мали бронзи БрСуЗН3Ц3С20Ф0,2, Бр.О10С2Н3, БрСу6Ф0,9, сталь ШХ-15, чавун ВЧ2169-2, цементована сталь 20Х3МВФ.

– низькі значення зносу та величини коефіцієнта тертя сталі ШХ-15, чавуну ВЧ2169-2, цементованої сталі 20Х3МВФ у парі тертя з азотованим сплавом ВТ5 можна пояснити високим вмістом у них вуглецю, що грає роль твердого змащення при ковзанні та участю процесів переносу поверхню азотованого металу ВТ5.

– результати проведених випробувань азотованого сплаву ВТ5 у конкретних умовах доповнюють наявні в літературі дані про трибологічні характеристики азотованих сплавів у контакті з різними матеріалами, отриманими та випробуваними в різних умовах.

#### Список літератури

1. Еременко В. Н. Титан и его сплавы/ Еременко В. Н. // - Київ - Изд. АН УССР - 1960 - 500 с.
2. Zhechevaa A. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods / A. Zhechevaa, W. Shaa, S. Malinobv, A. Long // Surface and Coatings Technology - Volume 200 - Issue 7 - 21 December 2005 - pp. 2192-2207.
3. Sarma B. Recent advances in surface hardening of titanium / B Sarma. K. S. Ravi Chandran // JOM - volume - 63 - 2011 - pp. 85-92.
4. Güleriyüz H. An Overview on Surface Hardening of Titanium Alloys by Diffusion of Interstitial Atoms /H. Güleriyüz, E. Atar, F. Seahjani, H. Çimenoglu // Diffusion Foundations - 4 - 2015 - pp. 103-116.

5. Budilov V. V. Ion Nitriding of Titanium Alloys with a Hollow Cathode Effect Application / V. V. Budilov., K. N. Ramazanov, I. V. Zolotov, R. F. Khucnutdinov, S. V. Starovoitov // *Journal of Engineering Science and Technology - Review* 8 (6) - 2015 - pp. 22 – 24.

6. Kang, J. Tribological Behavior of Titanium Alloy Treated by Nitriding and Surface Texturing Composite Technology / J. Kang, M. Wang, W. Yue, Z. Fu, L. Zhu, D. She, C. Wang // *Materials* - 12 – 301 – 2019 – pp. 2-12

7. Mashovets N. S. Analysis of the influence of nitriding in a glow discharge on the properties of a titanium alloy / N. S. Mashovets // *Problems of Tribology* - 24 - 3/93 - 2019 - pp. 39-44.

8. Смирнов А.Е. Износостойкость теплостойкой стали после вакуумной цементации / А. Е. Смирнов, Р. С. Фахуртдинов, М. Ю. Рыжова, С. А. Пахомова // *Упрочняющие технологии и покрытия* - 2016 - № 7 - С. 8-13.

Стаття надійшла до редакції 21.06.2022.

**Сагалович Олексій Владиславович** – керівник Управління спеціальних технологій Акціонерного Товариства «ФЕД» (м. Харків), iht@kharkov.ua, <https://orcid.org/0000-0002-8060-3201>.

**Сагалович Владислав Вікторович** – д-р техн. наук, професор, головний технічний керівник Акціонерного Товариства «ФЕД» (м. Харків), avinit@avinit.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2136-2740>.

**Попов Віктор Васильович** – д-р техн. наук, голова правління Акціонерного Товариства «ФЕД» (м. Харків), fed@fed.com.ua.

**Дуднік Станіслав Федорович** – канд. техн. наук, керівник відділу тонких технологій Акціонерного Товариства «ФЕД» (м. Харків), dudnik@avinit.ua, <https://orcid.org/0000-0003-2074-4739>.

**Олійник Олександр Купріянович** – канд. техн. наук, керівник лабораторії трибології заводу ім. Малишева (м. Харків), Olijnyk aleksandr@gmail.com.

A. SAGALOVYCH, V. SAGALOVYCH, V. POPOV, S. DUDNIK, A. OLIJNYK

## TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF NITRIDED IN PLASMA GLOW DISCHARGE SAMPLES FROM TITANIUM ALLOY VT5 IN PAIRS WITH DIFFERENT MATERIALS

One of the modern methods of improving operating characteristics of titanium and titanium-based alloys under conditions of friction and increased contact loads is the method of ion-plasma nitriding. The effect of nitriding of VT5 alloy in the plasma of a glow discharge excited in a hollow cathode on its tribological characteristics in pairs with different materials in T-1 fuel and under dry friction conditions has been studied. For research and tribological tests, samples of VT5 alloy were nitrided in the plasma of a glow discharge excited in a hollow cathode at a temperature of  $975 \pm 15$  °C and a pressure of  $58 \pm 2$  PA in a nitrogen-argon gas mixture with a nitrogen content of 78 %. Studies of samples of BT5 alloy after nitriding showed that the surface roughness Ra was in the range of 0.58-0.64, and the surface hardness HV5 was  $525 \pm 20$  kgf/mm<sup>2</sup> at a base hardness of  $325 \pm 15$  kgf/mm<sup>2</sup>. Tribological tests were performed on a friction machine 2070 SMT-1 according to the scheme "cube - roller". Tests under conditions of friction with oil were performed at a load of 200 N. The sliding speed during the tests was 1.3 m/s, the test time was 75 sec. The test under dry friction conditions was carried out at a load of 100 N and a sliding speed of 0.785 m / s, the test time was 30 minutes. Low wear ability in relation to the nitrided titanium alloy VT5 ( $<2.4 \times 10^{-4}$  mm<sup>3</sup> / sec), as well as friction coefficients at the level of 0.08 to 0.12 in the order of their growth had bronze BrSu3N3Ts3S20F0,2, Br.O10S2NZ, BrSu6F0,9, steel SHH-15, cast iron VCH2169-2, cemented steel 20H3MVF.

**Key words:** titanium alloys, nitriding, tribological characteristics, friction, wear resistance.

### References

1. Eremenko V. N. Tytan y eho сплавы/ Eremenko V. N. // – Kyєv – Yzd. AN UCCP – 1960 – 500 c.
2. Zhechevaa A. Enhancing the microstructure and properties of titanium alloys through nitriding and other surface engineering methods / A. Zhechevaa, W. Shaa, S. Malinob, A. Long // Surface and Coatings Technology – Volume 200 – Issue 7 – 21 December 2005 – rr. 2192–2207.
3. Sarma B. Recent advances in surface hardening of titanium / B Sarma. K. S. Ravi Chandran // JOM - volume – 63 – 2011 – rp. 85–92.
4. Gülerüz H. An Overview on Surface Hardening of Titanium Alloys by Diffusion of Interstitial Atoms /H. Gülerüz, E. Atar, F. Seahjani, H. Çimenoglu // Diffusion Foundations - 4 – 2015 – rr. 103–116.
5. Budilov V. V. Ion Nitriding of Titanium Alloys with a Hollow Cathode Effect Application / V. V. Budilov., K. N. Ramazanov, I. V. Zolotov, R. F. Khucnutdinov, S. V. Starovoitov // Journal of Engineering Science and Technology - Review 8 (6) – 2015 – rr. 22 – 24.
6. Kang, J. Tribological Behavior of Titanium Alloy Treated by Nitriding and Surface Texturing Composite Technology / J. Kang, M. Wang, W. Yue, Z. Fu, L. Zhu, D. She, C. Wang // Materials – 12 – 301 – 2019 – rr. 2–12.
7. Mashovets N. S. Analysis of the influence of nitriding in a glow discharge on the properties of a titanium alloy / N. S. Mashovets // Problems of Tribology – 24 – 3/93 – 2019 – rr. 39–44.
8. Smyrnov A.E. Yznosostoikost teplostoikoi staly posle vakuumnoi tsementatsyy / A. E. Smyrnov, R. S. Fakhurdynov, M. Yu. Rizhova, S. A. Pakhomova // Uprochniushchye tekhnolohyy y pokrytya – 2016 – № 7 – S. 8–13.