

УДК 669.295'71'292:621.785.062:620.178.162.42

АНТИФРИКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА ВТ6 ПОСЛЕ ТЕРМОВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО АЗОТИРОВАНИЯ

И. Н. ПОГРЕЛЮК¹, С. В. СКВОРЦОВА², В. Н. ФЕДИРКО¹,
В. С. СПЕКТОР², А. Г. ЛУКЬЯНЕНКО¹, О. В. ТКАЧУК¹

¹ Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенко НАН України, Львів;

² Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "МАТИ – Российский государственный технологический университет им. К. Э. Циолковского", Москва, Россия

Испытаны азотированные образцы титанового сплава ВТ6 в состоянии поставки и после термоводородной обработки. Выявлено, что такая обработка повышает их износостойкость в паре с нержавеющей сталью 12Х18Н10Т и со сверхвысокомолекулярным полиэтиленом марки "ХИРУЛЕН" при трении без смазки на 27...31%, а в 0,9% NaCl – на 23...30%. В режиме трения со смазкой (в этом растворе) эффект улучшения антифрикционных характеристик выражен менее.

Ключевые слова: титановый сплав, термоводородная обработка, азотирование, трение, коэффициент трения.

В настоящее время титановые сплавы практически не применяются для изготовления изделий, функционирующих в условиях высоких фрикционных нагрузок, а в некоторых случаях – в сочетании с усталостными нагрузками и агрессивными средами. Это обусловлено, в основном, двумя причинами: параметрами объемной структуры исходных полуфабрикатов, которые не обеспечивают достаточной прочности и твердости, и наличием тонкой оксидной пленки на поверхности, которая легко разрушается при интенсивном трении, а ее отделившиеся фрагменты приводят к катастрофическому износу компонентов пары трения [1–4]. Поэтому их применение в областях техники (авиация, двигателестроение, медицина, химическая промышленность и др.) неоправданно ограничено.

Экономно легированные ($\alpha+\beta$)-титановые сплавы, в частности сплав ВТ6, термически упрочняются слабо, а после традиционных методов пластической деформации в них сформируется структура с размерами зерен не менее 2...3 μm , что не обеспечивает достаточной твердости [5–7]. Изменением объемной структуры материала при обратимом легировании водородом можно образовать структуру с размером зерен меньше одного микрона [8, 9] и повысить прочностные характеристики этих материалов.

Сплав ВТ6 широко применяют для изготовления имплантатов, в частности, шарового сочленения тазобедренного сустава, где он работает в паре с нержавеющей сталью, а и в современных имплантатах – со сверхвысокомолекулярным полиэтиленом марки "ХИРУЛЕН". Однако он, как и все титановые сплавы, имеет относительно низкую износостойкость [4, 10]. Для ее повышения используют поверхностную обработку, в частности, азотирование [11, 12].

Цель работы – изучить влияние термоводородной обработки (ТВО) и последующего азотирования на антифрикционные характеристики титанового сплава ВТ6 при трении без смазки и в 0,9% NaCl.

Контактная особа: И. Н. ПОГРЕЛЮК, e-mail: pohrelyuk@ipm.lviv.ua

Методика исследований. Изучали образцы размером 20×20×2 mm из ($\alpha+\beta$)-титанового сплава ВТ6 (Ti-4Al-6V). Для формирования исходного структурно-фазового состояния (снятия напряжений, удаления водорода, гомогенизации и стабилизации структуры) предварительно полированные образцы ($R_a = 0,08 \mu\text{m}$) отжигали в вакууме по режиму: $T = 800^\circ\text{C}$, $\tau = 2 \text{ h}$, $P = 0,05 \text{ mPa}$, скорость собственного натекания в вакуумную систему $I = 0,1 \text{ mPa}\cdot\text{dm}^3\cdot\text{s}^{-1}$.

При термоводородной обработке образцы насыщали водородом до концентрации 0,7 vol.% в установке Сивертса при 850°C . Для вакуумного отжига при 625°C использовали печь модели “ВЕГА-3М”. Время выдержки выбирали таким образом, чтобы содержание водорода в процессе дегазации уменьшалось до безопасной концентрации ($\sim 0,006\%$). Его концентрацию после вакуумного отжига определяли на спектрографе ИСП-51 с приставкой МОРС-1/2048/РС1.

Азотировали при температуре 750°C в молекулярном азоте атмосферного давления и в разреженном до 1 Pa динамическом потоке. Продолжительность изотермической выдержки при насыщении 1; 5 и 10 h. В отличие от традиционного азотирования, до температуры изотермической выдержки образцы нагревали в вакууме 10 mPa [13], чтобы устранить природные оксидные пленки и исключить их образование на стадии нагрева. Скорость нагрева $\sim 150^\circ\text{C}/\text{h}$. После выдержки образцы охлаждали в азоте с печью (средняя скорость охлаждения $\sim 100^\circ\text{C}/\text{h}$), а при достижении температуры 500°C систему вакуумировали.

Использовали газообразный азот технической чистоты, содержащий не более 0,4 vol.% кислорода и не более $0,07 \text{ g}/\text{m}^3$ паров воды. Перед подачей в реакционную камеру его очищали от влаги и кислорода, пропуская через капсулу с силикагелем при комнатной температуре, а затем – через титановую стружку, нагретую на 50°C выше температуры насыщения. Через каждые 3–4 обработки для восстановления эффективности очистки силикагель “сушили” при 180°C в течение 3...4 h, а титановую стружку заменяли новой.

Структуру поверхности и матрицы сплава исследовали с помощью металлографического микроскопа “Eriquant”, оснащенного камерой и компьютерной приставкой с фиксацией изображения в цифровом виде. Состав поверхностных пленок определяли на дифрактографе ДРОН-3.0 в монохроматическом CuK_α -излучении с фокусировкой по схеме Брэгга-Брентано. Полученные дифрактограммы анализировали по методу Ритвельда, используя программные пакеты Powder Cell 2.4 и FullProf, с помощью которых устанавливали положение дифракционных максимумов отражения и идентифицировали их по данным картотеки JCPDS-ASTM. Поверхностное упрочнение определяли на микротвердомере ПМТ-3М при нагрузке на индентор 0,49 N, а шероховатость поверхности – на профилометре модели 170621.

Трибологические характеристики поверхности изучали на линейном трибометре, предназначенном для лабораторной оценки антифрикционных и противозносных свойств смазочных и конструкционных материалов, а также покрытий в условиях возвратно-поступательного перемещения трущихся тел. Реализовали трение при линейном контакте образцов по схеме “торец неподвижного цилиндра (контртело) – осциллирующая пластина (тело)”. В качестве контртела испытывали сталь 12X18H10T и полиэтилен марки “ХИРУЛЕН” (ultrahigh molecular weight polyethylene (UHMWPE)) при нагрузке $0,354 \text{ kg}/\text{mm}^2$, частоте осцилляций 30 min^{-1} и температуре 24°C . Смазывали, погружая трибосочленение в 0,9% изотонический раствор хлорида натрия. Результаты испытаний обрабатывали методами математической статистики.

Результаты исследований. Исходная шероховатость поверхности образцов, в том числе и после ТВО, соответствует 11 классу ($R_a = 0,08 \mu\text{m}$) согласно

ГОСТ 2789-59. В приповерхностных слоях сплава до азотирования зафиксирован незначительный градиент свойств, о чем свидетельствуют неодинаковые значения микротвердости при разных нагрузках на индентор ($H^s_{0,198} = 3,0$ ГПа; $H^s_{0,49} = 3,1$ ГПа). После ТВО изменение нагрузки не влияет на микротвердость образцов, что косвенно свидетельствует о постоянстве характеристик по глубине приповерхностного слоя ($H^s_{0,198}$ и $H^s_{0,49}$ составили 3,5 ГПа) (рис. 1).

Согласно результатам рентгеноструктурных исследований в структуре сплава после ТВО присутствуют более мелкие (практически в два раза) кристаллиты и наблюдаются более низкие напряжения. Параметры его решетки уменьшаются ($a = 0,2922$ nm против 0,2924 nm; $c = 0,4660$ nm против 0,4667 nm).

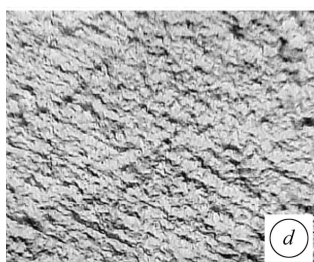
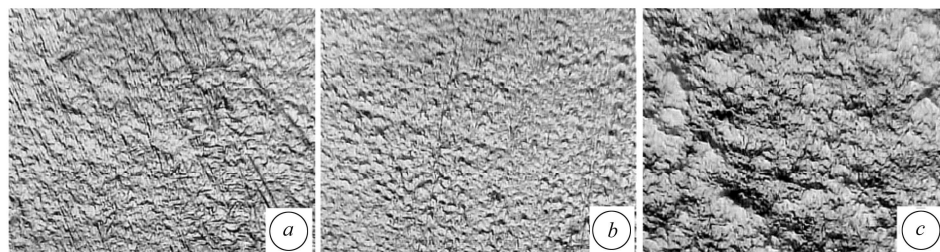


Рис. 1. Поверхность титанового сплава BT6 после азотирования при 750°C на протяжении 1 (a, b) и 5 h (c, d) в азоте атмосферного давления: a, c – без ТВО; b, d – с предшествующей ТВО. $\times 400$.

Fig. 1. The surface of the BT6 titanium alloy after nitriding at 750°C for 1 (a, b) and 5 h (c, d) in nitrogen of atmospheric pressure: a, c – without previous thermo hydrogen treatment (THT); b, d – with the previous THT. $\times 400$.

После азотирования качество его поверхности ухудшается, причем тем сильнее, чем продолжительнее изотермическая выдержка (табл. 1). Шероховатость R_a увеличивается и после 10 h экспозиции в азоте атмосферного давления соответствует девятому классу. При насыщении в разреженном динамическом потоке она растет с продолжительностью экспозиции в азоте, повышаясь на класс.

Таблица 1. Шероховатость поверхности R_a сплава BT6 в исходном состоянии и после азотирования при 750°C в азоте атмосферного давления и в разреженном его потоке без и после ТВО

Продолжительность азотирования, h	$(R_a, \mu\text{m})$, после азотирования			
	при $P_{N_2} = 10^5$ Pa		в потоке при $P_{N_2} = 1$ Pa	
	без ТВО	после ТВО	без ТВО	после ТВО
0	0,076	0,085	0,076	0,085
1	0,095	0,107	0,067	0,069
5	0,215	0,155	0,089	0,089
10	0,323	0,204	0,11	0,104

Предварительная ТВО не влияет на указанные закономерности. Особенно это касается азотирования в разреженном динамическом потоке азота. Если азотируют при атмосферном давлении газа, то прирост шероховатости R_a с продолжительностью насыщения уменьшается и ее значения после 5 и 10 h выдержки ниже, чем для азотированных образцов без ТВО.

Ухудшение качества поверхности после азотирования связано с развитием характерного рельефа вследствие формирования пленки, состоящей из нитридов TiN_x и Ti_2N (рис. 1 и табл. 2). С увеличением длительности насыщения образование нитридов на поверхности сплава активизируется: в поверхностном дифракционном спектре интенсивность рефлексов TiN_x фазы возрастает (так, относительная интенсивность рефлекса (200) растет в ряду $56 \rightarrow 87 \rightarrow 90$ а.е. с увеличением выдержки при азотировании $1 \rightarrow 5 \rightarrow 10$ h). Одновременно усиливается текстура Ti_2N по плоскости [002] (табл. 2).

Таблица 2. Интенсивность рефлексов (а.е.) нитридных фаз на поверхности сплава ВТ6 после азотирования при 750°C в азоте атмосферного давления и в разреженном его потоке без и после термоводородной обработки

Режим азотирования		TiN_x			Ti_2N									
		111	200	220	101	111	200	210	211	002	311	320	321	
Без ТВО	1 atm N_2	1 h	–	56	–	–	–	428	679	–	321	–	–	–
		5 h	96	87	42	52	103	–	–	–	794	–	28	–
		10 h	79	90	53	–	97	65	156	–	1132	–	–	–
	1 Pa N_2	1 h	–	–	–	–	111	56	–	–	–	–	–	–
		10 h	–	–	–	56	245	–	–	36	290	34	31	–
	с ТВО	1 atm N_2	5 h	67	80	42	46	57	–	–	–	1259	81	–
1 h			–	–	–	–	117	–	–	31	–	–	–	–
1 Pa N_2		1 h	–	–	–	–	117	–	–	31	–	–	–	–
		10 h	–	–	–	56	280	–	–	–	300	142	30	32

С понижением давления азота до 1 Pa количество рефлексов TiN_x фазы уменьшается до одного (111), а их относительная интенсивность снижается в 1,4 раза (табл. 2). При этом в поверхностном дифракционном спектре увеличивается количество рефлексов низшего нитрида титана Ti_2N ((101), (211), (311), (320)) и сохраняется текстура по плоскости [002]. Эволюция поверхностного дифракционного спектра свидетельствует о торможении нитридообразования на поверхности азотированных образцов при падении давления азота и увеличении доли нитрида низшей валентности в нитридной пленке.

Предварительная ТВО влияет на структуру сплава [9], а при последующем азотировании – на кинетику физико-химических процессов и формирование структурно-фазового состояния поверхностных упрочненных слоев, что, в конечном итоге, отображается на поверхностном дифракционном спектре образцов. В частности, после азотирования обработанных образцов при атмосферном давлении газа усиливается текстура фазы Ti_2N (относительная интенсивность рефлекса (002) увеличивается в 1,6 раза) (табл. 2). При азотировании в разреженном потоке азота качественные и количественные характеристики спектра нитрида низшей валентности Ti_2N практически сохраняются. Что касается моонитрида TiN_x , то соответствующего ему рефлекса (111), присутствующего в дифракционном спектре поверхности азотированного сплава без ТВО, здесь не фиксировали (табл. 2).

Сформированный после азотирования нитридный слой и диффузионная зона в виде твердого раствора азота в α -титане (смещение рефлексов α -титана в сторону меньших углов отражения) обеспечивают поверхностное упрочнение сплава.

ва. С длительностью изотермической выдержки микротвердость сплава возрастает (табл. 3), причем с ее увеличением от 5 до 10 h – практически вдвое независимо от предшествующей азотированию обработки и после 10 h составляет ~14,4 GPa. С уменьшением давления азота при азотировании вследствие торможения нитридообразования [12] она с длительностью экспозиции возрастает более равномерно, хотя абсолютные ее значения ниже, особенно после продолжительных экспозиций (табл. 3).

Предварительная ТВО усиливает эффект поверхностного упрочнения. Это обусловлено, очевидно, интенсификацией диффузионных процессов в измельченной ТВО структуре. Причем вследствие азотирования при атмосферном давлении азота разница в значениях микротвердости образцов после ТВО и без нее незначительная (табл. 3), тогда как при азотировании в разреженном до 1 Pa динамическом потоке азота после выдержек 1 и 5 h ее прирост для обработанных образцов составляет 1,7 и 2,5 GPa соответственно.

Физико-химические характеристики упрочненных поверхностных слоев определяют поведение сплава при фрикционном взаимодействии. Его фрикционные свойства после азотирования с ТВО и без нее в паре с нержавеющей сталью 12Х18Н10Т и “ХИРУЛЕНОМ” изучали в режиме трения без смазки и при смазывании в 0,9% NaCl.

Таблица 3. Микротвердость поверхности $H_{0,49}^s$ сплава ВТ6 в исходном состоянии и после азотирования при 750°C в азоте атмосферного давления и в разреженном его потоке без и после термоводородной обработки

Продолжительность азотирования, h	$(H_{0,49}^s, \text{GPa})$ после азотирования и предварительной обработки			
	$P_{N_2} = 1 \times 10^5 \text{ Pa}$		в потоке при $P_{N_2} = 1 \text{ Pa}$	
	без ТВО	после ТВО	без ТВО	после ТВО
0	3,05	3,51	3,05	3,51
1	8,00	6,82	5,74	7,43
5	7,70	7,73	8,76	11,30
10	14,43	15,15	10,4	10,72

При трении без смазки азотированных образцов в паре со сталью Х18Н10Т коэффициент трения f в течение 300 с монотонно возрастает от 0,33 до 0,51 (рис. 2а, кривая 1). С увеличением времени контакта наблюдаем осцилляции его значений, причем с наработкой амплитуда и период колебаний возрастают. Это, как и многочисленные повреждения поверхности, свидетельствует об локальном схватывании в трибопаре.

Предварительная ТВО улучшает антифрикционные характеристики трибопары. На протяжении первых 300 с испытаний коэффициент трения увеличивается от 0,30 до 0,43 (рис. 2а, кривая 2). После 380 с его значения сохраняются на уровне 0,54...0,56 при незначительных осцилляциях, обусловленных локальным схватыванием и образованием задиrow.

С длительностью насыщения азотом нитридная пленка утолщается и развивается поверхностный рельеф, вследствие чего улучшается поверхностное упрочнение и увеличивается шероховатость (табл. 1 и 3). При трении без смазки в паре со сталью выступающие хрупкие участки нитридной пленки разрушаются и образованные в результате этого частицы служат в дальнейшем абразивом, стимулирующим намазывание материала контртела на азотированную поверхность и формирование задиrow. Кинетике коэффициента трения в такой трибопаре ха-

рактены нерегулярные осцилляции: его значения в течение 300 s испытаний изменяются от 0,41 до 0,89 (рис. 2с, кривая 1). После азотирования с предшествующей ТВО осцилляции в указанном диапазоне наблюдаются только после 140 s испытаний (рис. 3с, кривая 2). До этого они стабильны и составляют 0,47...0,53. Улучшению антифрикционных характеристик здесь, очевидно, способствует более высокое качество азотированной поверхности образцов (см. табл. 1) при соизмеримом поверхностном упрочнении (табл. 3).

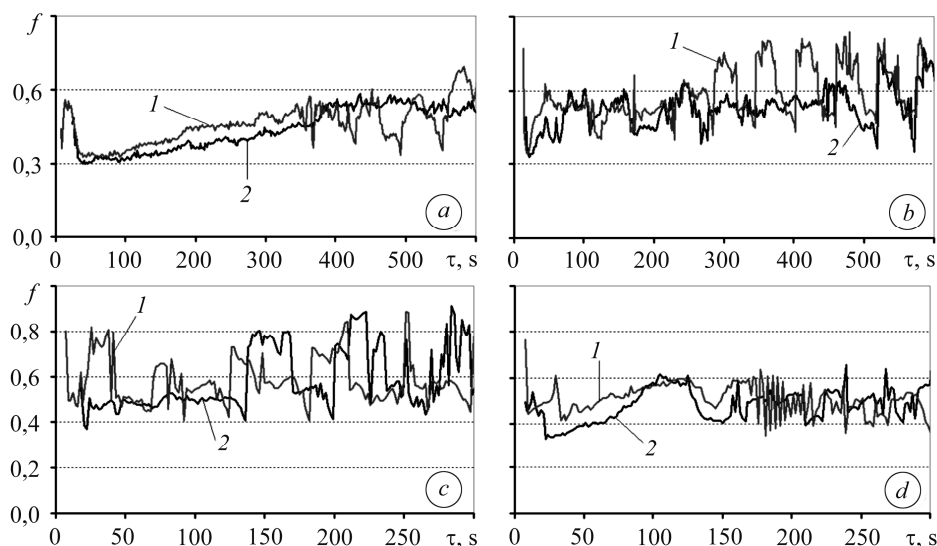


Рис. 2. Кинетика коэффициента трения азотированного сплава ВТ6 в паре со сталью 12Х18Н10Т без смазки (азотирование без предварительной ТВО (1) и с ТВО (2)):
a – 750°С, 1 h, 10⁵ Pa N₂; *b* – 750°С, 1 h, 1 Pa N₂; *c* – 750°С, 10 h, 10⁵ Pa N₂;
d – 750°С, 10 h, 1 Pa N₂.

Fig. 2. Kinetics of the friction coefficient of nitrided VT6 alloy in a pair with 12X18H10T steel without lubrication (nitriding without previous THT (1) and with the previous THT (2)):
a – 750°С, 1 h, 10⁵ Pa N₂; *b* – 750°С, 1 h, 1 Pa N₂; *c* – 750°С, 10 h, 10⁵ Pa N₂;
d – 750°С, 10 h, 1 Pa N₂.

С уменьшением давления азота при азотировании антифрикционные свойства сплава ВТ6 ухудшаются. Уже на начальном этапе испытаний трибопары для коэффициента трения характерны незначительные осцилляции, которые со временем (после 290 s) усиливаются и становятся регулярными (рис. 2b, кривая 1). Средние его значения на исследуемой базе для азотированных в разреженном динамическом потоке азота образцов, по сравнению с азотированными в азоте атмосферного давления, выше: 0,58 против 0,46.

Предварительная ТВО повышает антифрикционные характеристики: значение коэффициента трения уменьшается до 0,53, его осцилляции существенно слабее и усиливаются только после 520 s испытаний (рис. 2b, кривая 2). Это обусловлено, очевидно, формированием в указанных условиях более прочной азотированной поверхности с незначительной шероховатостью (табл. 1 и 3).

При увеличении длительности насыщения до 10 h в разреженном динамическом потоке азота различия в физико-химических характеристиках приповерхностных упрочненных слоев образцов с предварительной ТВО и без нее несущественны. Поэтому и особых несоответствий в их триботехническом поведении в паре со сталью при трении без смазки не выявили (рис. 2d).

Кинетике коэффициента трения азотированных образцов в паре со сталью в изотоническом 0,9% NaCl свойственны периодические регулярные осцилляции на начальных стадиях исследований (рис. 3а). Причем его значения для стали при трении по азотированной поверхности, полученной в разреженном динамическом потоке азота, ниже, чем по поверхности, сформированной азотированием в азоте атмосферного давления. Таким образом, лучшие триботехнические характеристики соответствуют поверхности с более низким упрочнением при лучшем ее качестве (табл. 1 и 3).

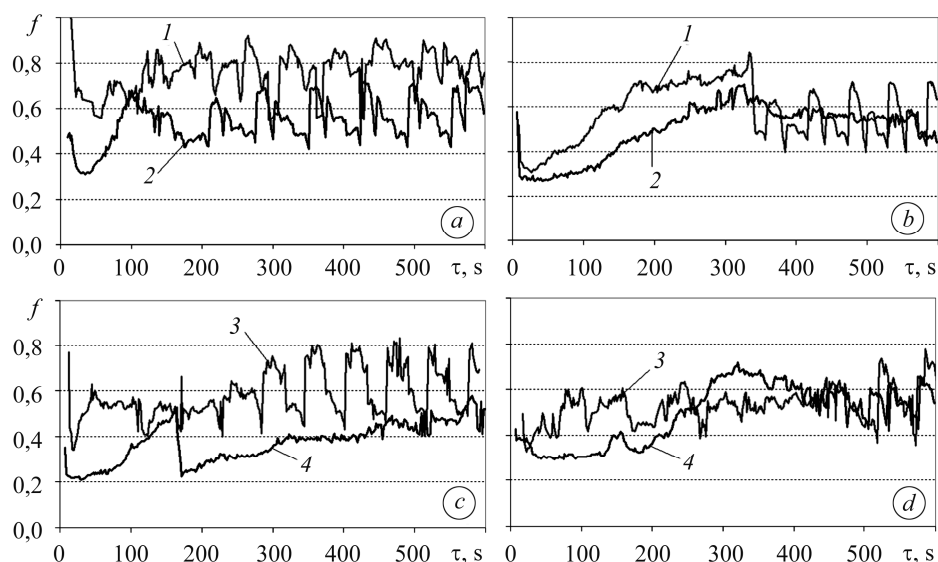


Рис. 3. Кинетика коэффициента трения азотированного сплава ВТ6 в паре со сталью 12Х18Н10Т без (а, с) и с ТВО (b, d): а, b – 750°С, 10 h; с, d – 750°С, 1 h; 1 – 10⁵ Pa N₂; 2 – 1 Pa N₂; 3 – трение без смазки; 4 – в 0,9% NaCl.

Fig. 3. Kinetics of the friction coefficient of nitrated BT6 alloy in a pair with the 12X18H10T steel nitriding without previous THT (a, c) and with previous THT (b, d): a, b – 750°C, 10 h; c, d – 750°C, 1 h; 1 – 10⁵ Pa N₂; 2 – 1 Pa N₂; 3 – dry friction; 4 – friction in 0.9% NaCl solution.

Предварительная ТВО в общем не изменяет вышеуказанной зависимости: значения коэффициента трения для трибопары “азотированный сплав ВТ6–сталь” в 0,9% NaCl меньше, чем при азотировании в разреженном азоте (уровень поверхностного упрочнения ниже, но качество поверхности выше) (рис. 3b). При этом в течение 330 s он увеличивается от 0,29 до 0,63 с единичными несильными всплесками в диапазоне 290...330 s. В дальнейшем его значения несколько снижаются и стабилизируются на уровне 0,54...0,57.

Кинетика коэффициента трения стали по азотированной поверхности, полученной термодиффузионным насыщением в азоте атмосферного давления, в основном, соответствует сформированной в разреженном азоте: в диапазоне до 330 s он увеличивается от 0,29 до 0,84. При продолжении испытаний наблюдаем его осцилляции при среднем значении 0,56, причем амплитуда осцилляций с продолжительностью наработки увеличивается.

Испытания в изотоническом 0,9% NaCl в паре со сталью демонстрируют улучшение триботехнических характеристик азотированной поверхности, сформированной термодиффузионным насыщением в разреженном азоте, по сравнению с трением без смазки (рис. 3c). Предварительная ТВО не влияет на эти закономерности, однако различия в характере изменения коэффициента трения при трении без и со смазкой не столь существенны (рис. 3d). Они сохраняются и для

поверхности, полученной термодиффузионным насыщением в азоте атмосферного давления: различия в ширине дорожек трения при испытаниях без смазки и в 0,9% NaCl при азотировании без ТВО более существенны, чем при азотировании с предварительной ТВО.

Трению азотированного сплава в паре с “ХИРУЛЕНОМ” как в режиме трения без смазки, так и в 0,9% NaCl свойственны меньшие значения коэффициента трения, незначительное их увеличение на исследуемой временной базе и отсутствие осцилляций (рис. 4).

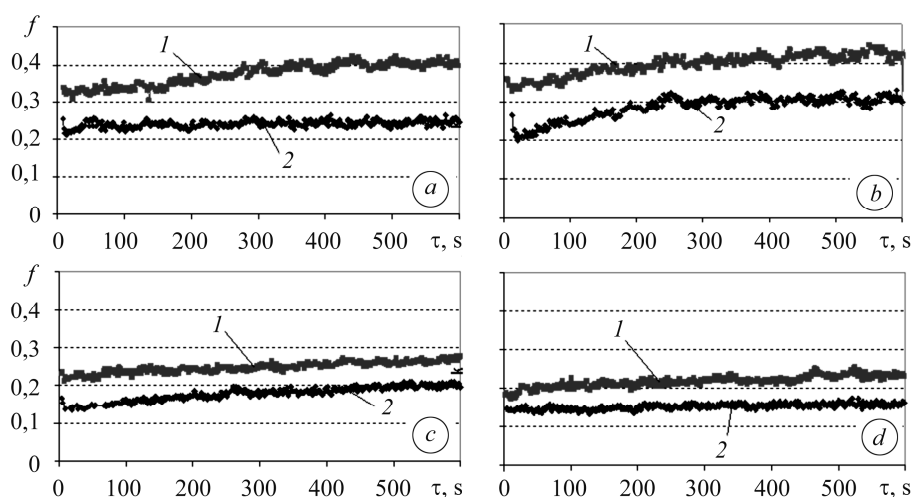


Рис. 4. Кинетика коэффициента трения азотированного сплава ВТ6 в паре с “ХИРУЛЕНОМ” (азотирование при 750°C в разреженном до 1 Па динамическом потоке N₂ без предварительной ТВО (1) и с ТВО (2)): а, с – 5 h; b, d – 10 h; а, b – трение без смазки; с, d – трение в 0,9% NaCl .

Fig. 4. Kinetics of the friction coefficient of nitrated BT6 alloy in a pair with the “HIRULEN” (UHMWPE) (nitriding at 750°C in rarefied to 1 Pa dynamic N₂ stream without previous THT (1) and after previous THT (2)): a, b – 5 h; b, d – 10 h; a, b – friction without lubrication, c, d – friction in 0.9% NaCl solution.

Скорость роста коэффициента трения со временем ниже при трении со смазкой (при трении без смазки на базе 600 s он увеличивается с 0,33 до 0,4, а в растворе 0,9% NaCl – с 0,22 до 0,28). ТВО обеспечивает его стабильность на исследуемой базе при трении без смазки (~0,25) и их увеличение (от 0,14 до 0,21) при трении в 0,9% NaCl.

С увеличением выдержки при насыщении в разреженном азоте от 5 до 10 h, что соответствует росту нитридной пленки на поверхности, кинетика коэффициента трения несколько изменяется, что, вероятно, связано с различием в физико-химических характеристиках упрочненных слоев (табл. 1 и 3). При испытаниях без смазки он увеличивается от 0,34 до 0,43, при предварительном ТВО – от 0,23 до 0,31. В условиях трения в 0,9% NaCl антифрикционные свойства сплава улучшаются независимо от технологии азотирования (с ТВО или без нее). Причем в растворе NaCl с продолжением испытаний коэффициент трения растет с 0,19 до 0,23, а предварительная ТВО обеспечивает его стабильное значение на уровне ~0,16. Таким образом, после предварительной ТВО он при трении без смазки снижается на 27...31%, а при трении в 0,9% NaCl – на 23...30%. Причем сохраняется наблюдаемая при трении в паре со сталью зависимость: с ТВО антифрикционные характеристики при трении в 0,9% NaCl повышаются меньше (рис. 5).

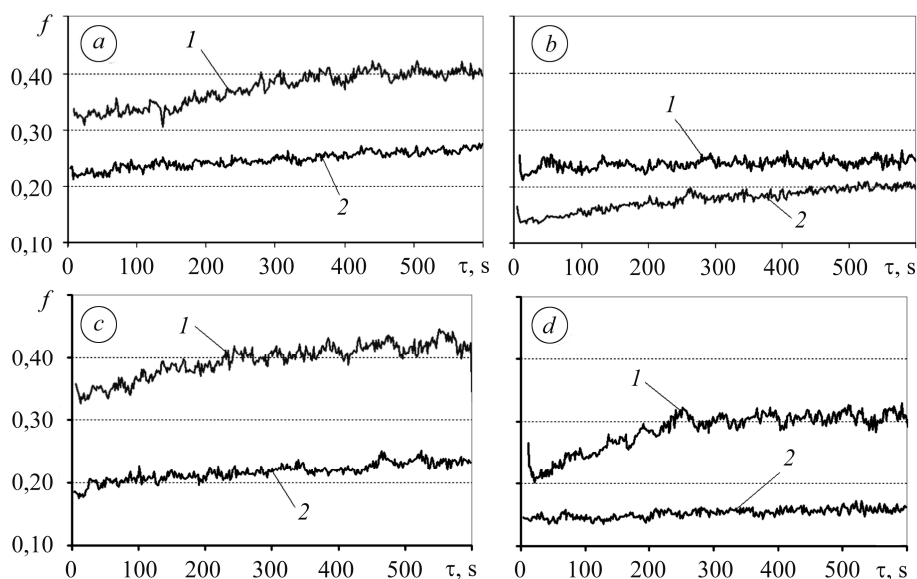


Рис. 5. Кинетика коэффициента трения азотированного сплава ВТ6 в паре с “ХИРУЛЕНОМ” (азотирование при 750°C, 5 h (a, b) и 10 h (c, d) в разреженном до 1 Па динамическом потоке N₂ без предварительной ТВД (a, c) и с ТВД (b, d)): 1 – трение без смазки; 2 – в 0,9% NaCl.

Fig. 5. Kinetics of the friction coefficient of nitrated BT6 alloy together with the “HIRULEN” (nitriding at 750°C, 5 h (a, b) and 10 h (c, d) in the rarefied to 1 Pa dynamical N₂ stream without previous THT (a, c) with the previous THT (b, d)): 1 – friction without lubrication; 2 – in 0.9% NaCl solution.

ВЫВОДЫ

Предшествующая диффузионному азотированию термоводородная обработка усиливает эффект поверхностного упрочнения и улучшает качество азотированной поверхности, а следовательно, антифрикционные свойства сплава ВТ6 при трении без смазки и в 0,9% NaCl в паре со сталью 12Х18Н10Т. Антифрикционные характеристики азотированного сплава в паре с “ХИРУЛЕНОМ” выше, чем в паре со сталью. При трении в паре с “ХИРУЛЕНОМ” без смазки и в 0,9% NaCl значения коэффициента трения меньше и наблюдается незначительный их прирост на исследуемой временной базе, а также и отсутствие осцилляций. Предварительная термоводородная обработка обеспечивает его снижение при трении без смазки на 27...31%, а в 0,9% NaCl – на 23...30%. Такая обработка уменьшает эффект повышения антифрикционных характеристик сплава при трении в растворе 0,9% NaCl как в паре со сталью, так и с “ХИРУЛЕНОМ”.

РЕЗЮМЕ. Виконані порівняльні випробування антифрикційних властивостей азотованих зразків титанового сплаву ВТ6 в стані постачання та після термоводневої обробки. Азотували при 750°C в молекулярному азоті атмосферного тиску упродовж 1; 5 і 10 h. Термоводнева обробка перед азотуванням поліпшує антифрикційні властивості азотованих зразків у парі з нержавною сталлю 12Х18Н10Т та з надвисокомолекулярним поліетиленом марки “ХИРУЛЕН” під час тертя без мащення на 27...31% і в 0,9% NaCl – на 23...30%. За тертя в 0,9% NaCl антифрикційні характеристики покращуються слабше.

SUMMARY. Comparative testing of anti-friction properties of samples of nitrated titanium alloy BT6 in the state of delivery and after thermal hydrogen treatment is done. Nitriding was done at a temperature of 750°C in molecular nitrogen at atmospheric pressure for 1; 5 and 10 h. Thermal hydrogen treatment prior to nitriding increased the friction properties of samples of nitrated BT6 alloy in a pair with 12Х18Н10Т stainless steel and high-molecular polyethylene

“HIRULEN” (UHMWPE) during friction without lubrication by 27...31% and in 0.9% NaCl solution by 23..30%. Under friction in 0.9% NaCl solution the effect of increasing anti-friction properties is less pronounced.

Работа выполнена при финансовой поддержке ГФФИ Украины (проект Ф53.07/019) и РФФИ (грант Укр_ф_а 13-08-90410).

1. Колачев Б. А., Ильин А. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства: Справ. – М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. – 520 с.
2. Титановые сплавы в машиностроении / Под ред. Г. И. Капырина. – Л.: Машиностроение, 1977. – 248 с.
3. Технология производства титановых самолетных конструкций / А. Г. Братухин, Б. А. Колачев, В. В. Садков и др. – М.: Машиностроение, 1995. – 448 с.
4. Горынин И. В., Чечулин Б. Б. Титан в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
5. Металлография титановых сплавов / Н. Ф. Аношкин, Г. А. Бочвар, В. Н. Моисеев и др. / Под ред. С. Г. Глазунова и Б. А. Колачева. – М.: Металлургия, 1980. – 464 с.
6. Основные закономерности фазовых превращений и оптимизация структуры и свойств высокопрочных титановых сплавов / И. С. Полькин, Т. В. Ишунькина, В. Л. Родионов и др. // Титан. – 1993. – № 2. – С. 13–19.
7. Глазунов С. Г., Моисеев В. Н. Титановые сплавы. Конструкционные титановые сплавы. – М.: Металлургия, 1974. – 368 с.
8. Ильин А. А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. – М.: Наука, 1994. – 304 с.
9. Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов, А. М. Мамонов. – М.: МИСИС, 2002. – 392 с.
10. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довідн. пос. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 9: Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій / Під ред. О. П. Осташа, В. М. Федірка. – Львів: Сполом, 2007. – 1068 с.
11. Погрелюк І. М., Федірко В. М., Кравчишин Т. М. Вплив параметрів азотування на приповерхнєве зміцнення титанового сплаву VT6 // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2007. – 43, № 6. – С. 49–54.
(Pohrelyuk I. M., Fedirko V. M., and Kravchishyn T. M. Influence of the parameters of nitriding on the subsurface hardening of VT6 titanium alloy // Materials Science. – 2007. – 43, № 6. – P. 807–813.)
12. Chemico-thermal Treatment of Titanium Alloys – Nitriding. Chapter 7 / I. Pohrelyuk, V. Fedirko // Titanium Alloys – Towards Achieving Enhanced Properties for Diversified Applications; Book edited by Prof. Dr. Akm Nurul Amin. – InTech, 2012. – P. 141–174.

Получено 30.04.2015