

УДК 620.178.162.42:669.295: 669.296

В.А. КУКАРЕКО, д-р физ.-мат. наук  
Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

В.М. КОНСТАНТИНОВ, д-р техн. наук  
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

А.Ю. ШЕВЦОВ  
ОАО «558 Авиационный ремонтный завод», г. Барановичи, Республика Беларусь

## СТРУКТУРНОЕ СОСТОЯНИЕ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ВТ6С, ПОДВЕРГНУТОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОМУ АЗОТИРОВАНИЮ

*Изучено влияние низкотемпературного ионно-плазменного азотирования титанового сплава ВТ6С на его структуру, дюротметрические и триботехнические свойства. Установлено, что ионно-плазменное азотирование сплава при 810 К приводит к увеличению микротвердости его поверхностного слоя в 2,5 раза, а также к увеличению износостойкости в условиях трения без смазочного материала в 2 раза и в условиях граничного трения в 3,5 раза.*

**Ключевые слова:** сплав ВТ6С, ионное азотирование, структура, микротвердость, износостойкость

**Введение.** Титановые сплавы вследствие своей высокой удельной прочности, коррозионной стойкости и пластичности нашли широкое применение в авиационном и ракетостроении [1, 2]. Кроме этого, благодаря лучшей среди металлических материалов биосовместимости с тканями живых организмов, титан и некоторые сплавы на его основе (в частности ВТ6 и различные его модификации) рассматриваются в качестве перспективных материалов для медицинских приложений [3]. Вместе с тем прочностные и триботехнические характеристики титановых сплавов в значительной степени уступают металлическим материалам на основе железа. В связи с этим проблема повышения прочностных и триботехнических характеристик поверхностных слоев титановых сплавов остается актуальной. Перспективным методом повышения механических и триботехнических характеристик титановых сплавов является модифицирование их поверхностных слоев атомами азота и, в частности, атомами азота [4]. В задачу работы входило исследование структуры и триботехнических свойств сплава ВТ6С, подвергнутого низкотемпературному ионно-плазменному азотированию.

**Методика эксперимента.** Исследование проводилось на образцах размерами 6×6×8 мм, вырезанных из цилиндрического проката сплава ВТ6С. Химический состав сплава приведен в таблице. Ионно-плазменное азотирование сплава проводилось при температуре 810 К в среде N, Ar, H, CH<sub>4</sub> на установке ионно-плазменного азотирования производства Физико-технического института НАН Беларуси. Время азотирования — 16 ч.

Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном CoK<sub>α</sub> излучении. Съемка образцов проводилась при ускоряющем напряжении на рентгеновской трубке 30 кВ и анодном токе 10 мА. Запись интенсивно-

сти рассеянного рентгеновского излучения осуществлялась в режиме сканирования (по точкам) с фиксированным временем счета 40 с на точку. Шаг сканирования составлял 0,1°. Измерение твердости и микротвердости по Виккерсу выполнялось на приборе Durascan 20 при нагрузках 10 кг, 25 и 10 г.

Триботехнические испытания образцов покрытий проводились на автоматизированном трибометре АТВП, оснащенный специально разработанным устройством для регистрации коэффициента трения [5]. Схема трибометра приведена на рисунке 1. Испытуемый образец 11, закрепленный в обойме 12, прижимается с силой  $P$  к контртелу 10. Контртело в виде закрепленной на ползуне 8 пластины совершает возвратно-поступательное движение амплитудой 30 мм. Средняя скорость перемещения контртела в процессе испытаний может регулироваться в пределах от 0,01 до 0,30 м/с. Сила  $P$ , действующая в перпендикулярном к поверхности трения направлении, задается рычажным узлом нагружения 18, 19 и через коромысло 14 передается на обойму 12 с образцом 11. Величина силы  $P$  может регулироваться в пределах от 5 до 750 Н. Коромысло 14 обеспечивает самоустановку образца 11 на поверхности контртела. Сила трения  $F$ , возникающая при взаимном перемещении контактирующих поверхностей, регистрируется с помощью тензометрического динамометра. Динамометр представляет собой упругий элемент (балку) 17 с наклеенными по мостовой схеме тензодатчика-

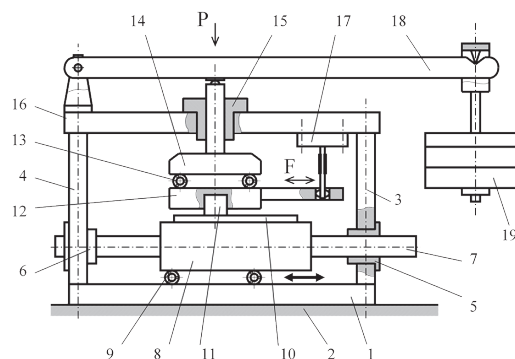


Рисунок 1 – Схема трибометра АТВП

Таблица – Химический состав сплава ВТ6С

Содержание элементов, масс. %								
Ti	Al	V	Fe	Cu	Mn	Si	P	S
основа	4,11	3,95	0,51	—	0,01	1,17	0,01	0,02

ми, а также систему регистрации и обработки электрического сигнала.

Измерение коэффициента трения осуществлялось на различных стадиях цикла взаимного перемещения контактирующих тел и в течение всего периода испытаний. Значения силы трения пересчитывались в величины коэффициента трения по формуле Кулона–Амонтона:

$$f = \frac{F}{P},$$

где  $F$  — сила трения;  $P$  — сила, сжимающая контактирующие тела в направлении, перпендикулярном к поверхности трения. Измеренные величины коэффициентов трения подвергались статистической обработке, и определялись максимальное и среднее значение  $f$  на каждом цикле испытания. Полученные величины  $f$  аккумулировались в файле оперативных данных вычислительного устройства и использовались для построения графической зависимости  $f$  от числа циклов испытаний. Погрешность измерения коэффициента трения не превышает 5 % от измеряемой величины.

При испытаниях использовалось контртело, изготовленное из закаленной стали У8 ( $HV = 7800\text{--}8000$  МПа), с размерами  $2 \times 40 \times 90$  мм. Средняя скорость взаимного перемещения составляла  $\approx 0,1$  м/с. Удельная нагрузка испытаний при трении без смазки составляла 1,5 МПа. Рабочая поверхность образца перед испытаниями дополнительной обработке не подвергалась. Поверхность стального контртела шлифовалась с последующей полировкой на тонкой абразивной бумаге с зернистостью М40. Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел обезжиривались спиртом, ацетоном и высушивались.

Измерение величины износа призматических образцов при трении без смазочного материала осуществлялось весовым методом с использованием аналитических весов АДВ-200М. Погрешность измерения массы образца составляла 0,05 мг. С поверхности образцов перед взвешиванием тщательно удалялись продукты изнашивания, затем образцы промывались, протирались спиртом и просушивались в сушильном шкафу при температуре  $\sim 100$  °С. После высушивания образцы взвешивались на аналитических весах АДВ-200М. Взвешивание каждого образца производилось не менее 2–3 раз. Испытания проводились до достижения 8000–20000 циклов с промежуточными взвешиваниями после каждой 1000–2000 циклов. Путь трения за один цикл испытаний составлял 0,06 м. Общий путь трения при испытаниях составлял 480–1200 м.

Испытания в условиях граничного трения выполнялись в среде смазочного материала И-20А. Номинальное контактное давление испытаний составляло 5 МПа. В качестве триботехнических характеристик, подлежащих оценке в процессе испытаний, были выбраны массовый износ и коэффициент трения. Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел обезжиривались спиртом и ацетоном и высушивались.

**Результаты исследования и их обсуждение. Структура сплава ВТ6С.** Титановый сплав ВТ6С в исходном состоянии содержит твердый раствор алюминия и ванадия в низкотемпературной модификации  $\alpha$ -Тi с ГПУ кристаллической решеткой (пространственная группа  $R\bar{6}3/mmc$ ) и высокотемпературной модификации  $\beta$ -Тi с ОЦК кристаллической решеткой (пространственная

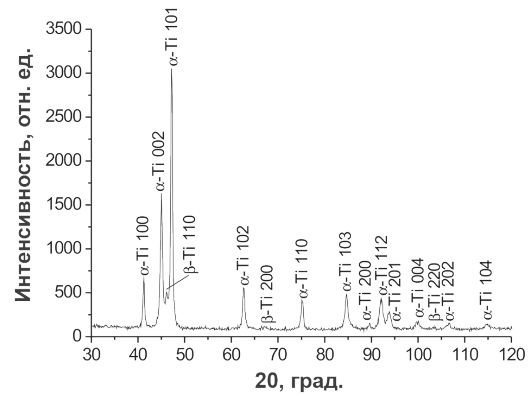


Рисунок 2 — Фрагмент рентгеновской дифрактограммы ( $CoK_{\alpha}$ ) от поверхностных слоев сплава ВТ6С в исходном состоянии

группа  $Im\bar{3}m$ ) (рисунок 2). Параметры решетки  $\alpha$ -фазы составляют соответственно  $a=0,2934$  нм и  $c=0,4671$  нм, а параметр решетки  $\beta$ -фазы составляет  $a=0,3239$  нм.

Значения параметра решетки матричных фаз сплава ВТ6С существенно ниже соответствующих значений параметров решетки чистых  $\alpha$ -Тi и  $\beta$ -Тi, вследствие присутствия в твердых растворах атомов Al и V, которые имеют меньший радиус, по сравнению с атомами Тi ( $R_{Ti} = 0,1475$  нм,  $R_{Al} = 0,143$  нм,  $R_V = 0,1314$  нм). Микроструктура титанового сплава ВТ6С в исходном состоянии приведена на рисунке 3. Твердость титанового сплава ВТ6С в данном состоянии составляет 308 HV 10.

Низкотемпературное ионно-плазменное азотирование приводит к существенному возрастанию диэлектрических свойств поверхностного слоя сплава ВТ6С. Микротвердость обработанного ионами азота сплава возрастает в  $\approx 2,5$  раза и составляет 760 HV 0,01 (590 HV 0,025). Столь значительное увеличение твердости обусловлено образованием на поверхности титанового сплава азотированного слоя, показанного на рисунке 4.

На рисунке 5 приведены фрагменты рентгеновских дифрактограмм от поверхностных слоев. Можно видеть, что ионное азотирование титанового сплава приводит к формированию модифицированных поверхностных слоев, содержащих нитриды титана  $TiN$  (ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа  $Fm\bar{3}m$ ,  $a = 0,4242$  нм) и  $Ti_2N$  (тетрагональная решетка, пространственная группа  $R42/mnm$ ,  $a = 0,4945$  нм,  $c = 0,3034$  нм,  $c/a = 0,61$ ).

**Триботехнические свойства сплава ВТ6С.** Основной причиной катастрофического износа материалов является адгезионное схватывание контактирующих поверхностей, сопровождающееся задирами и заеданием узлов

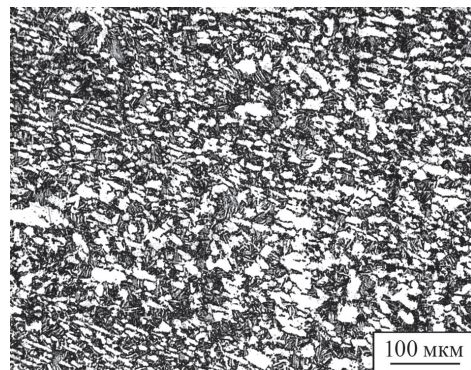


Рисунок 3 — Структура титанового сплава ВТ6С в исходном состоянии

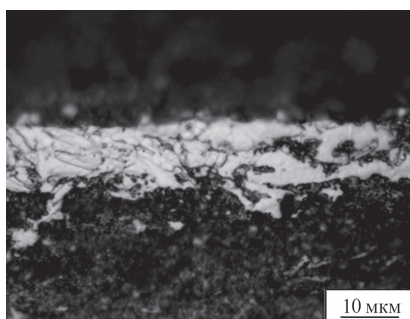


Рисунок 4 — Азотированный слой на поверхности образца из титанового сплава ВТ6С

трения. Такие процессы обычно реализуются при функционировании трибосопряжений в условиях высоких контактных давлений, трении без смазки или с недостаточным количеством смазки, а также при работе в области повышенных температур. В связи с этим для оценки сопротивления контактному разрушению сплава ВТ6С представляло интерес провести измерение его триботехнических характеристик в условиях трения без смазочного материала (сухое трение). Кроме этого, исследовалось поведение сплава ВТ6С при испытаниях в условиях граничного трения со смазочным материалом И-20А.

На рисунке 6 для случая сухого трения приведены зависимости величины накопленного весового износа от пути трения для сплава ВТ6С в исходном состоянии, а также после ионно-плазменного азотирования (ИПА). Из приведенных данных следует, что ионное азотирование приводит к существенному снижению величины накопленного весового износа для титанового сплава по сравнению с исходным состоянием. В частности, интенсивность массового изнашивания сплава в исходном состоянии составляет  $I_q = 0,084$  мг/м, а после ионно-плазменного азотирования величина  $I_q$  снижается в  $\approx 2$  раза

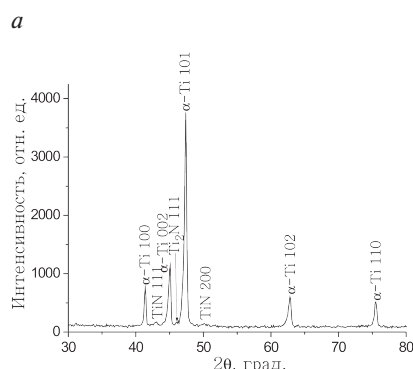
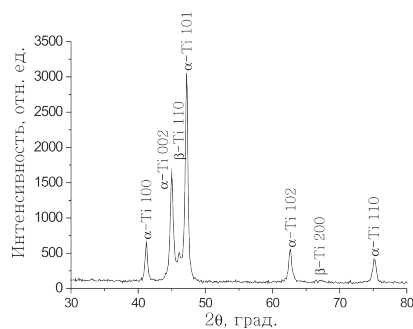


Рисунок 5 — Фрагменты рентгеновских дифрактограмм ( $\text{CoK}_\alpha$ ) от поверхностных слоев сплава ВТ6С в исходном состоянии (а) и после ионно-плазменного азотирования при 810 К (б)

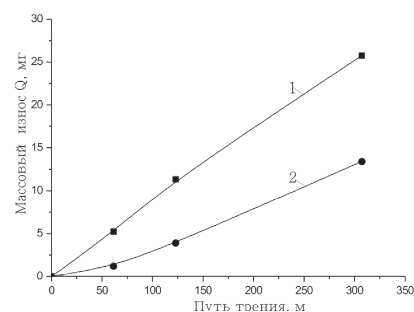


Рисунок 6 — Зависимости накопленного массового износа титанового сплава ВТ6С от пути трения в процессе триботехнических испытаний при трении без смазочного материала: 1 — исходное состояние; 2 — ионно-плазменное азотирование при 810 К

и составляет  $I_q = 0,043$  мг/м. Необходимо отметить, что с увеличением продолжительности испытаний величина интенсивности изнашивания азотированного сплава ВТ6С увеличивается, что связано с износом модифицированного азотом слоя (см. рисунок 6).

На рисунке 7 представлены зависимости коэффициента трения  $f$  исследуемых образцов титанового сплава от продолжительности триботехнических испытаний в условиях адгезионного взаимодействия при трении без смазочного материала. Можно видеть, что в случае испытаний образца сплава ВТ6С значения коэффициента трения находятся на уровне  $f = 0,35-0,45$ . Необходимо отметить, что регистрируемый коэффициент сухого трения сплава ВТ6С по стали У8 находится на сравнительно низком уровне, что существенно ниже уровня коэффициента сухого трения для большинства ГЦК металлов [6]. Указанный факт объясняется, по-видимому, присущим для кристаллов с ГПУ кристалличе-

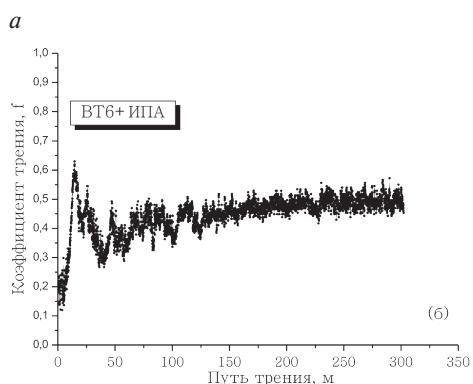
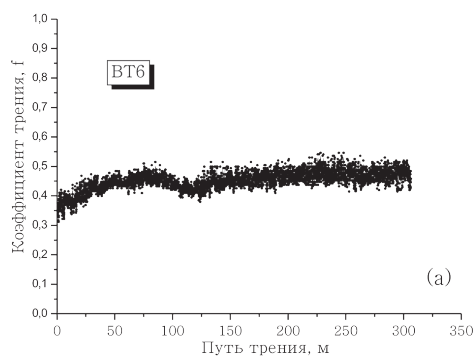
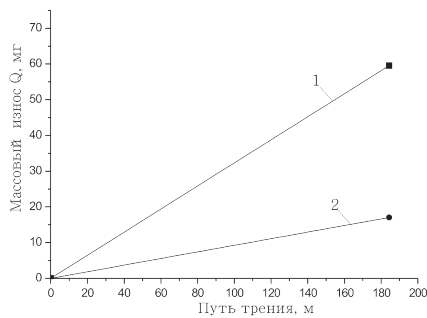
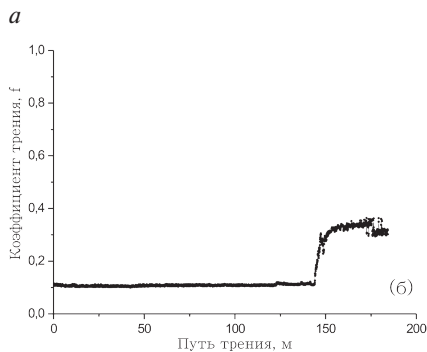
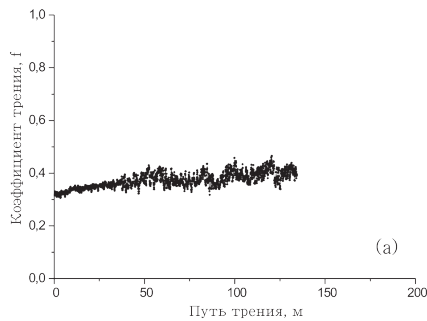


Рисунок 7 — Зависимости коэффициента трения сплава ВТ6С от пути трения после различных режимов обработки: а — исходное состояние; б — ионно-плазменное азотирование при 810 К (трение без смазочного материала,  $p = 1,5$  МПа)



**Рисунок 8** – Зависимости массового износа титанового сплава VT6S от пути трения в процессе триботехнических испытаний при граничном трении в среде жидкого смазочного материала И-20А: 1 – исходное состояние; 2 – ионно-плазменное азотирование при 810 К



**Рисунок 9** – Зависимости коэффициента трения сплава VT6S от пути трения после различных режимов обработки: а – исходное состояние; б – ионно-плазменное азотирование при 810 К (трение в среде смазочного материала И-20А,  $p = 5$  МПа)

ской решеткой облегченным сдвигом в базисных плотноупакованных плоскостях (0001). В случае испытаний обработанного ионами азота титанового сплава VT6S на начальных стадиях испытаний значения коэффициента трения находятся на низком уровне  $f = 0,15–0,20$  (рисунок 7 б), однако затем значения  $f$  возрастают до уровня  $0,50–0,60$  и снижаются до значений  $0,40–0,45$  на стадиях износа модифицированного азотом слоя.

В случае испытания сплава VT6S в условиях граничного трения в среде жидкого смазочного материала И-20А при номинальном давлении испытаний 5 МПа регистрируется высокий износ сплава (см. рисунок 7). Интенсивность весового изнашивания сплава составляет  $I_q = 0,323$  мг/м.

Сравнительно высокая интенсивность изнашивания титанового сплава в среде смазочного материала И-20А может быть обусловлена либо относительно низкой твердостью сплава, либо процессами трибохимического взаимодействия материала сплава с компонентами жидкой смазки. В пользу последнего может свидетельствовать сравнительно высокий коэффициент трения ( $f = 0,30–0,40$ ), регистрируемый в процессе фрикционного взаимодействия в среде смазки И-20А (рисунок 9 а).

Ионно-плазменное азотирование сплава VT6S приводит к снижению в  $\approx 3,5$  раза интенсивности изнашивания сплава до уровня  $I_q = 0,092$  мг/м (рисунок 8).

При этом регистрируется существенное уменьшение (в  $\approx 3,2$  раза) коэффициента трения трибосопряжения до значений  $f \approx 0,11$  (см. рисунок 9 б). После изнашивания тонкого упрочненного слоя коэффициент трения сплава резко увеличивается и вновь выходит на уровень, характерный для исходного неупрочненного состояния сплава  $f \approx 0,30–0,35$  (см. рисунок 9 б).

**Заключение.** Исследовано влияние ионно-плазменного азотирования титанового сплава VT6S на его структуру, дуromетрические и триботехнические свойства. Установлено, что ионно-плазменное азотирование сплава при 810 К приводит к увеличению микротвердости его поверхностного слоя в 2,5 раза, а также к увеличению износостойкости в условиях трения без смазочного материала в 2 раза и в условиях граничного трения в 3,5 раза. Обнаружено снижение коэффициента трения азотированного сплава в условиях граничного трения в 3,2 раза.

**Список литературы**

1. Гуляев, А.П. *Металловедение* / А.П. Гуляев. — 5-е изд. — М.: Металлургия, 1977. — 647 с.
2. Колачев, Б.А. *Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов* / Б.А. Колачев, В.И. Елагин, В.А. Ливанов. — 5-е изд. — М.: МИСИС, 1999. — 416 с.
3. *Биосовместимость* / под ред. В. И. Севастьянова. — М., 1999. — 368 с.
4. Белый, А.В. *Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота* / А.В. Белый, В.А. Кукареко, А. Патеюк. — Минск: Беларус. наука, 2007. — 244 с.
5. *Ионно-модифицированные субмикроструктурные титановые и циркониевые сплавы для медицины и техники* / А.Г. Кононов [и др.] // *Механика машин, механизмов и материалов*. — 2013. — № 1(22). — С. 47–53.
6. *Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)* / А.В. Чичинадзе [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. — М.: Машиностроение, 2003. — 576 с.

Kukareko V.A., Konstantinov V.M., Shevtsov A.Yu.

**Structural state and tribological properties of the alloy VT6S exposed to ion-plasma nitriding**

The effect of low-temperature ion-plasma nitriding of VT6S titanium alloy on its structure, durometric and tribological properties is studied. It is found that ion-plasma nitriding of the alloy 810 K results in the increase in the microhardness of the surface layer 2,5 times, and also in increase in wear resisting properties under the conditions of friction without a lubricant 2 times, and under the conditions of boundary friction 3,5 times.

Поступил в редакцию 22.07.2016.