УДК 621.785.532, 620.178.16

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДИФИЦИРОВАННЫХ ИОНАМИ АЗОТА СЛОЕВ НА ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ ВТ16

М.Ю. Смолякова, Д.С. Вершинин

Научно-образовательный и инновационный центр «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» (НОиИЦ НСМН), ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород; Vershinin@bsu.edu.ru

Представлена членом редколлегии профессором Н.Ц. Гатаповой

Ключевые слова и фразы: износостойкость; коэффициент трения; низкотемпературное азотирование; титановый сплав ВТ16.

Аннотация: Исследовано влияние состава газовой смеси при низкотемпературном азотировании на структуру и трибологические свойства титанового сплава ВТ16. Установлено, что независимо от режима азотирования на поверхности формируется модифицированный слой, который позволяет увеличить ее микротвердость и износостойкость.

Современное производство требует надежных и долговечных механизмов для создания, которых необходим тщательный подход. Причем выбор используемых материалов является одним из самых важных этапов конструирования. В настоящее время очень сложно найти устройство, где бы ни использовались узлы трения, поэтому при подборе сырья для производства необходимо учитывать и его трибологические свойства.

Титановые сплавы нашли широкое применение, например, в медицине для производства различного рода имплантатов, в том числе и имплантатов, работающих в условиях трения. Кроме того, титановые сплавы используются в различных отраслях промышленности, где необходима высокая коррозионная стойкость в сочетании с малым удельным весом. Однако неудовлетворительные трибологические свойства титана и его сплавов не позволяют широко их использовать в узлах трения. Известно, что улучшить трибологические свойства материалов можно различными методами упрочнения поверхности: нанесением функциональных покрытий [1], ионной имплантацией, азотированием [2, 3]. Каждый из представленных методов имеет свои достоинства и недостатки. Одним из самых перспективных способов является низкотемпературное ионно-плазменное азотирование [4, 5]. Предлагаемая нами технология низкотемпературного азотирования позволит сократить время обработки в разы и при этом существенно понизить температуру процесса.

В рамках представляемой работы были проведены исследования по изучению влияния основных параметров процесса низкотемпературного азотирования

в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления на структуру и трибологические свойства титанового сплава ВТ16.

В качестве материала исследования был выбран титановый сплав ВТ16 в двух структурных состояниях: крупнозернистом (**КЗ**) и субмикрокристаллическом (**СМК**). Для проведения исследований из объемной заготовки вырезались модельные образцы размерами 25×10×2 мм. Модельные образцы сначала подвергались шлифовке с последующей полировкой на алмазных пастах до зеркального блеска. Перед загрузкой в камеру для азотирования все образцы были промыты в бензине, затем в ацетоне и высушены на воздухе. Непосредственно само ионно-плазменное азотирование осуществлялось на типовой установке ННВ6.6-1, оснащенной плазменными источниками с накаленным катодом (**ПИНК**) на основе несамостоятельного дугового разряда низкого давления [4]. Азотирование в плазме несамостоятельного дугового разряда проводилось при температуре 420 ºС в течение 40 мин в смеси газов азот–аргон, причем процентное содержание аргона варьировалось от 5 до 25 %: режим 1 – 5 % Ar – 95 % N_2; режим 2 – 13 % Ar – 87 % N_2; режим 3 – 25 % Ar – 75 % N_2.

Исследование изменения морфологии поверхности после низкотемпературного азотирования проводились с использованием растрового электронного микроскопа (**РЭМ**) Quanta 600 FEG, позволяющего работать в режиме вторичных и обратнорассеянных электронов. Микротвердость на поверхности азотированных образцов измерялась при помощью автоматического микротвердомера DM-8B (Affri) при нагрузке на индентор 0,01 Н по ГОСТ 9450–76. Трибологические испытания были проведены на автоматизированной машине трения – высокотемпературном трибометре (High-Temperature Tribometer, CSM Instruments, Швейцария) по схеме испытания «шарик–диск» [5]. В качестве контртела был выбран шарик диаметром 6 мм из стали 100Cr6 (аналог стали ШХ15). Все исследования проводились в режиме сухого трения на воздухе при температуре 30 ºС и нагрузке на держатель контртела 2Н, при этом путь трения составлял 200 м. Оценка площади поперечного сечения дорожки износа после трибологических испытаний проводилась с помощью прецизионного контактного профилометра Surtronic в пяти областях по трем точкам. Анализ пятна износа на статическом партнере – шарике – проводился с помощью оптического микроскопа Olympus GX71.

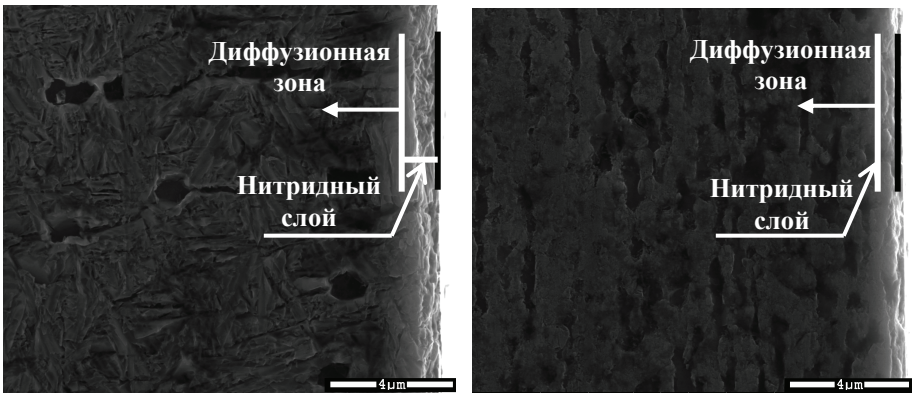
В результате проведенных исследований было установлено, что процентное содержание аргона в газовой смеси Ar – N_2 оказывает существенное влияние на структуру и трибологические свойства титанового сплава ВТ16 как в КЗ, так и СМК состоянии.

Первоначально были проведены исследования изменения микротвердости на поверхности модельных образцов после азотирования. Из представленных в таблице данных можно видеть, что независимо от режима азотирования микротвердость увеличивается, причем прирост микротвердости для сплава в СМК состоянии больше, чем для КЗ состояния. Данное явление возможно связано с формированием более протяженного модифицированного слоя в случае СМК материала, благодаря наличию большего числа границ зерен, которые способствуют увеличению коэффициента диффузии азота в объеме материала [6].

Исследования структуры модифицированного слоя показали, что в результате азотирования на модельных образцах с КЗ структурой формируется более протяженный нитридный слой, чем на образцах с СМК структурой (рис. 1), причем

Значение микротвердости поверхности до и после азотирования, ГПа

Сплавы	Исходная	Режим 1	Режим 2	Режим 3
ВТ16 КЗ	5,5	6,6 (20 %)	7,2 (31 %)	7,7 (40 %)
ВТ16 СМК	5,1	8,6 (68 %)	8,8 (72 %)	8,3 (61 %)



а) *б*)

Рис. 1. Структура поперечного шлифа на титановом сплаве ВТ16 после азотирования:
а – КЗ состояние, азотированное по режиму 2;
б – СМК состояние, азотированное по режиму 2

данная тенденция сохраняется при изменении концентрации аргона. Увеличение концентрации аргона в газовой смеси от 5 до 25 % проводит к увеличению глубины нитридного слоя, но при этом на сплавах с КЗ структурой он всегда больше, чем на СМК образцах.

На следующем этапе работы были проведены трибологические испытания модельных образцов до и после азотирования. В результате проведенных испытаний было установлено, что независимо от содержания аргона в газовой смеси износостойкость азотированных образцов выше, чем износостойкость немодифицированного сплава. Формирование СМК структуры приводит к увеличению фактора износа на порядок с $6{,}97 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}10 \cdot 10^{-3}$ мм^2/(Н·м). Оптимальный режим азотирования для титанового сплава с КЗ структурой – режим с минимальным содержанием аргона. В результате обработки по режиму 1 на поверхности формируется нитридный слой минимальной толщины, в то время как увеличение содержание аргона в плазмообразующей смеси приводит к увеличению толщины нитридного слоя. При высокой концентрации азота на первых этапах азотирования сразу образуется нитридный слой, который в дальнейшем препятствует диффузии азота в объем материала. Поэтому уменьшение количества азота приводит к увеличению нитридного слоя. Но необходимо отметить, что уже при концентрации азота 75 % толщина нитридного слоя начинает уменьшаться по сравнению с режимом 2. Улучшение трибологических свойств после азотирования связано с дополнительным упрочнением поверхности и изменением механизма износа. Известно, что титановые сплавы отличаются неудовлетворительными трибологическими свойствами, а именно вы-

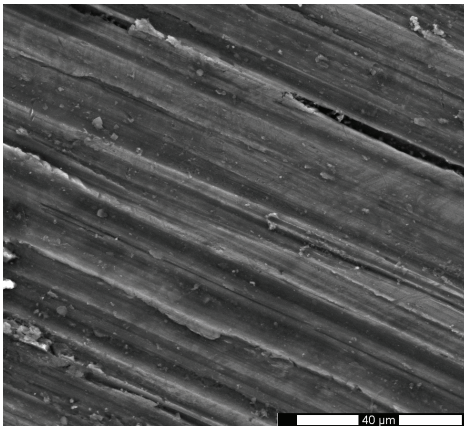


Рис. 2. Морфология поверхности дорожки трения образца ВТ16 с КЗ структурой после азотирования по режиму 3

сокой склонностью к схватыванию при трении. При трибологических испытаниях в условиях сухого трения у титановых сплавов преобладает адгезионное изнашивание [7]. Наличие на поверхности азотированного слоя позволяет уменьшить влияние адгезионной составляющей. На первых этапах изнашивания контакт происходит между контртелом и нитридным слоем, затем под воздействием нагрузки и накоплением в поверхностном слое напряжений происходит разрушение нитридного слоя. В результате в пятне контакта формируются дополнительные твердые частицы, которые выступают в роли абразива. Подтверждением данного явления является наличие характерных канавок на поверхности дорожки трения (рис. 2). Наличие мелких абразивных частиц позволяет также предотвратить контактное схватывание. Таким образом, после азотирования механизм изнашивания меняется с адгезионного на абразивный. Испытания модельных образцов с СМК структурой также показали изменение механизма изнашивания на абразивный. Однако стоит отметить, что благодаря меньшей толщине нитридного слоя и, предположительно, более протяженной диффузионной зоне износостойкость азотированных образцов с СМК структурой выше, чем износостойкость азотированных с КЗ структурой, так после азотирования по режиму 3 фактор износа для КЗ сплава $6{,}01\cdot10^{-4}$ мм^2/(Н·м), а для СМК образцов он уменьшается до $4{,}25\cdot10^{-4}$ мм^2/(Н·м).

В результате проведенных исследований было установлено, что азотирование в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления позволит повысить микротвердость поверхности и износостойкость. Процентное содержание аргона в газовой смеси влияет на толщину нитридного слоя и, как следствие, на механические свойства поверхности титанового сплава ВТ16. Формирование СМК структуры приводит к снижению износостойкости титанового сплава по сравнению с КЗ структурой.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы, грант № 14.B37.21.0133.

Список литературы

1. Современная трибология: Итоги и перспективы / И.А. Буяновский [и др.] ; ред. К.В. Фролов. – М. : ЛКИ, 2008. – 480 с.

2. Пастух, И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И.М. Пастух. – Харьков : Изд-во Нац. науч. центра Харьк. физ.-техн. ин-та, 2006. – 364 с.

3. Ионная химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – М. : Изд-во Моск. гос. техн. ун-та им. Н.Э. Баумана, 1999. – 400 с.

4. Вершинин, Д.С. Низкотемпературное азотирование титана в плазме несамостоятельного дугового разряда низкого давления / Д.С. Вершинин, М.Ю. Смолякова // Физика и химия обработки материалов. – 2011. – № 5. – С. 15–20.

5. Исследование трибологических свойств азотированного титанового сплава ВТ16 / Д.С. Вершинин [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2010. – Т. 76, № 12. – С. 45–49.

6. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов / Ю.Р. Колобов [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2001. – 232 с.

7. Мышкин, Н.К. Трение, смазки, износ. Физические основы и технические приложения трибологии / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М. : ФИЗМАЛИТ, 2007. – 368 с.

Study of Tribological Characteristics of Layers Modified with Nitrogen Ions on VT16 Titanium Alloy

M.Yu. Smolyakova, D.S. Vershinin

Center of Nanostructured Materials and Nanotechnology,
National Research University Belgorod State University, Belgorod;
Vershinin@bsu.edu.ru

Key words and phrases: coefficient of friction; low-temperature nitriding; VT16 titanium alloy; wear resistance.

Abstract: The paper studies the effect of gas mixture at low temperature nitriding on the structure and tribological properties of VT16 titanium alloy. It has been revealed that, irrespective of the nitriding mode the modified layer is formed on the surface, which can increase the microhardness and wear resistance of the surface.

Forschung der tribologischen Charakteristiken der von den Ionen des Stickstoffes modifizierten Schichten auf der Titanlegierung VT16

Zusammenfassung: Es ist den Einfluss des Bestandes der Gasmischung bei der Tieftemperaturnitrierung auf die Struktur und die tribologischen Eigenschaften der Titanlegierung VT16 untersucht. Es ist bestimmt, dass sich unabhängig vom Regime der Nitrierung auf der Oberfläche die abgeänderte Schicht entwickelt, die die Mikrofestigkeit und die Verschleißfestigkeit der Oberfläche zu vergrössern zulässt.

Etude des caractéristiques tribologiques des couches sur un alliage de titane BT16 modifiées par les ions de l'azote

Résumé: Est étudiée l'influence de la composition du mélange gazeux lors de l'azotation à basse température sur la structure et les propriétés tribologiques de l'alliage de titane VT16. Est établi qu'indépendemment du régime de l'azotation sur la surface est formée une couche modifiée qui permet d'augmenter la microsolidité et la résistance à l'usure de la surface.

Авторы: ***Смолякова Марина Юрьевна*** – младший научный сотрудник; ***Вершинин Данил Сергеевич*** – научный сотрудник Научно-образовательного и инновационного центра «Наноструктурные материалы и нанотехнологии», ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород.

Рецензент: ***Иванов Олег Николаевич*** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Материаловедение и нанотехнологии», директор Центра коллективного пользования научным оборудованием «Диагностика структуры и свойств наноматериалов», ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет» (НИУ «БелГУ»), г. Белгород.