

Антифрикционные свойства карбидсодержащего слоя на титановом сплаве VT1-0

И. Г. Жевтун^{а,б}, П. С. Гордиенко^а, Д. В. Машталяр^а, А. В. Пузь^а, А. А. Юдаков^{а,в}

^а Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт химии ДВО РАН,

пр-т 100-летия Владивостока, 159, г. Владивосток, 690022, Россия, e-mail: jevtun_ivan@mail.ru

^б Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Владивостокский государственный
университет экономики и сервиса,

ул. Гоголя, 41, г. Владивосток, 690014, Россия

^в Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Дальневосточный федеральный университет,
ул. Суханова, 8, г. Владивосток, 690950, Россия

Представлены результаты исследования антифрикционных свойств поверхности технически чистого титана VT1-0, подвергнутого электродуговой обработке в водном электролите. Приводятся и обсуждаются изменения коэффициента трения поверхности при скратч-тестировании алмазным индентором и при проведении трибологических испытаний.

Ключевые слова: титановые сплавы, карбид титана, композит, антифрикционные свойства.

УДК 669.017

ВВЕДЕНИЕ

Титановые сплавы, широко применяемые во многих отраслях благодаря важным эксплуатационным характеристикам (низкая плотность, высокая прочность и коррозионная стойкость), имеют при этом низкие антифрикционные свойства, обусловленные высокой активностью титана [1].

Одним из эффективных методов повышения антифрикционных свойств титановых сплавов является электродуговая обработка поверхности с использованием графитового анода в водном электролите [2]. Значительное увеличение износостойкости сплава, а также его стойкости к окислению в результате данной обработки обусловлено формированием в поверхностном слое глубиной до 2 мм гетерогенной микроструктуры, состоящей из тонкодисперсных зерен TiC, хаотично расположенных в титановой матрице [3, 4].

Цель настоящей работы – изучение влияния электродуговой обработки титановых сплавов на антифрикционные свойства их поверхности на примере титана VT1-0.

МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Дуговой разряд возбуждали между графитовыми электродами (анод) и образцами из титанового сплава VT1-0 (катод) в водном растворе 0,1–0,2% NaCl. Зазор между электродами составлял не более одного миллиметра, сила тока в цепи – до 100 А. В качестве источника тока использовали сварочную установку TiG 200AC/DC.

Затем образцы обрабатывали на шлифовальном станке (снямали не более 0,3 мм поверхности).

Скратч-тестирование проводили на установке Revetest-RST («CSM industries», Швейцария). Метод основан на царапании поверхности пирамидкой Виккерса с заданной нагрузкой и регистрацией параметров процесса – силы трения (а также коэффициента трения) и глубины проникновения индентора в поверхность образца. Испытания проводили при линейно увеличивающейся нагрузке – от 1 до 35 Н.

Трибологические испытания осуществляли на установке Tribometer TRB («CSM industries», Швейцария) по схеме «шар-диск» с вращением контртела по радиусу в плоскости образца. Контртело – шарик диаметром 6 мм из стали Ac100Cr6 (Российский аналог – ШХ15). Параметры отдельного испытания: скорость скольжения – 100 мм/с; суммарный путь трения – 100 м; вертикальная нагрузка – 10 Н. Трение сухое, на воздухе. Износ оценивали по изменению массы образца, а также измерением площади поперечного сечения канавки S_k с помощью профилометра фирмы Taylor Hobson, которым оснащена установка.

При обоих видах испытания коэффициент трения μ определялся путем автоматического пересчета значений силы трения, фиксируемой в непрерывном режиме. Для скратч-теста использовали прямоугольные образцы 20×10×3 мм, для трибологических испытаний – плоские кольца толщиной 3 мм и радиусом 17 мм.

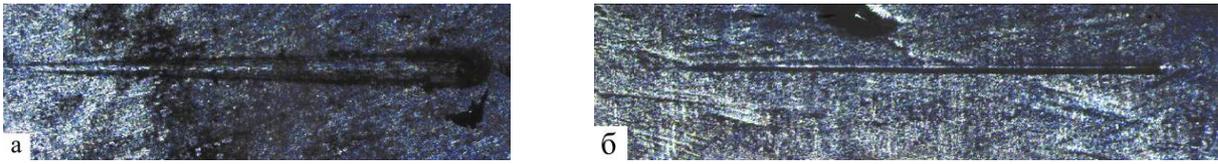


Рис. 1. Царапины после скратч-тестирования поверхности сплава ВТ1-0 (а) и карбидсодержащего слоя (б), $\times 10$.

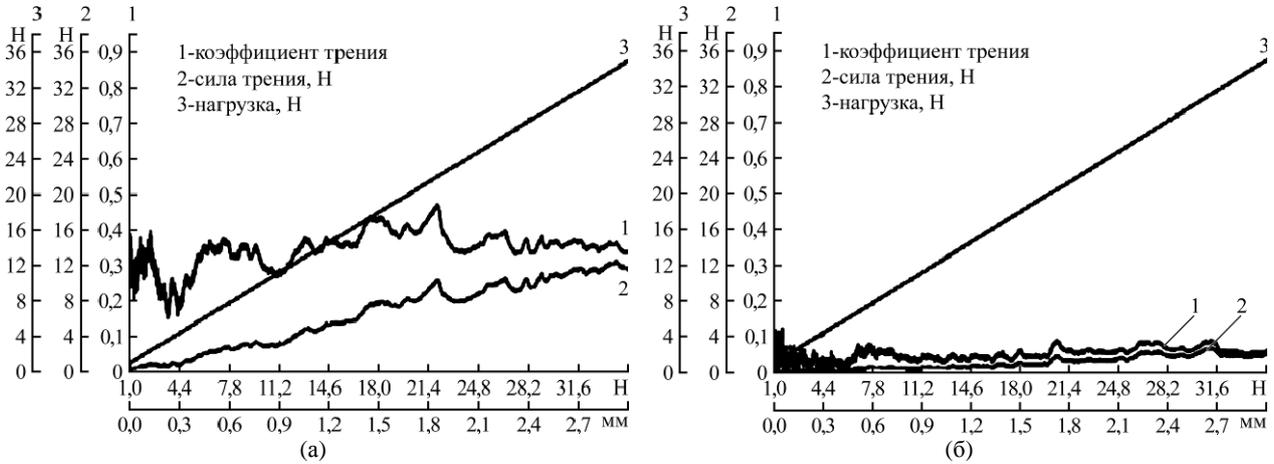


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от нагрузки при испытаниях исходной поверхности (а) и карбидсодержащего слоя (б).

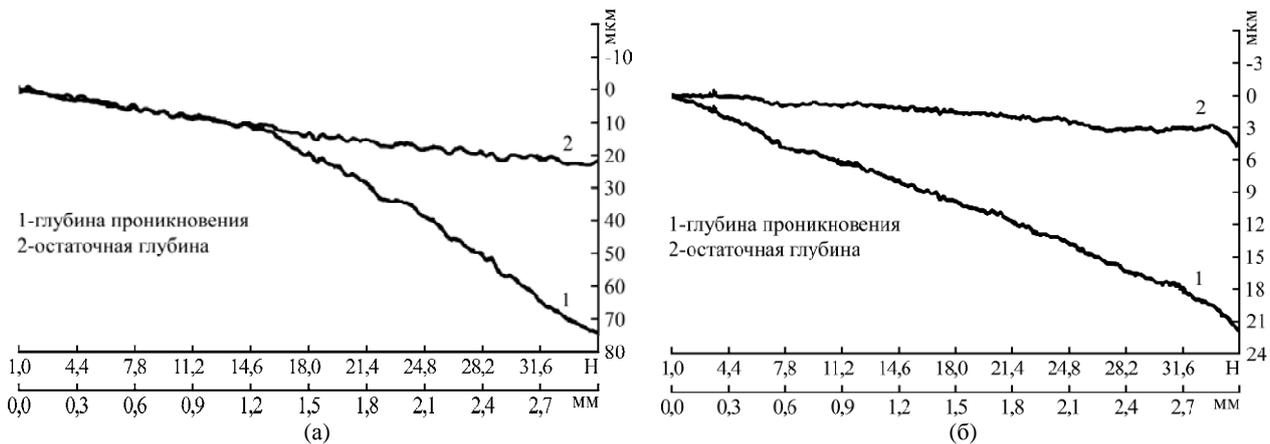


Рис. 3. Зависимость глубины проникновения индентора h от нагрузки и восстановленная глубина h_e (после снятия нагрузки) при царапании исходной поверхности (а) и карбидсодержащего слоя (б).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Скратч-тестирование обработанных и необработанных образцов проводилось после шлифовки поверхности (рис. 1).

Из внешнего вида царапин на исходной поверхности сплава ВТ1-0 (рис. 1а) и на поверхности карбидсодержащего слоя (рис. 1б) можно заключить, что исходная поверхность имеет значительно меньшую твердость и большую вязкость, о чем свидетельствуют как размеры царапин (глубина и ширина), так и наличие борозд внутри царапины на исходной поверхности (рис. 1а).

На рис. 2 приведены характерные зависимости силы трения и коэффициента трения от увеличивающейся нагрузки для исходной (необработанной) поверхности титанового сплава ВТ1-0 (а) и карбидсодержащего слоя (б). Из рисунка

видно, что после электродуговой обработки коэффициент трения уменьшается в 7–8 раз: на поверхности сплава ВТ1-0 составляет в среднем 0,35–0,4, а для карбидного слоя – около 0,05, что обусловлено присутствием TiC, коэффициент трения которого в несколько раз ниже, чем у титана и его сплавов.

На рис. 3 показаны зависимость глубины проникновения индентора h от увеличивающейся нагрузки и восстановленная глубина после снятия нагрузки h_e . При одинаковой нагрузке в исходную поверхность индентор проникает на глубину около 75 мкм, а после ее снятия за счет упругости материала глубина уменьшается до 20 мкм, в то время как глубина проникновения индентора в поверхность карбидного слоя составляет около 21 мкм, а после снятия нагрузки – около 4 мкм. Такое различие между исходной

поверхностью и карбидным слоем объясняется не только высокой твердостью последнего, но и сохранением упругости титановой матрицы.

Результаты серии подобных испытаний сведены в табл. 1. Некоторый разброс в значениях параметров при тестировании исходных образцов, видимо, следует отнести к большей их шероховатости.

Таблица 1. Результаты скратч-тестирования поверхности образцов

№	μ	h , мкм	h_0 , мкм	Δh , мкм
Исходные				
1	0,3	59	14	45
2	0,4	68	18	40
3	0,4	63	19	44
Обработанные				
1	0,1	16	4	12
2	0,1	16	3	13
3	0,1	13	3	10

При трибологических испытаниях на исходных образцах хотя и формируется дорожка трения шириной около 1 мм (рис. 4а,б), но в связи с относительно небольшим суммарным путем трения потеря массы самих образцов при этом незначительна (табл. 2): она составляет 2,5–3 мг при заданных условиях испытания. Увеличение массы контртела связано с налипанием титана в процессе трения (рис. 5а).

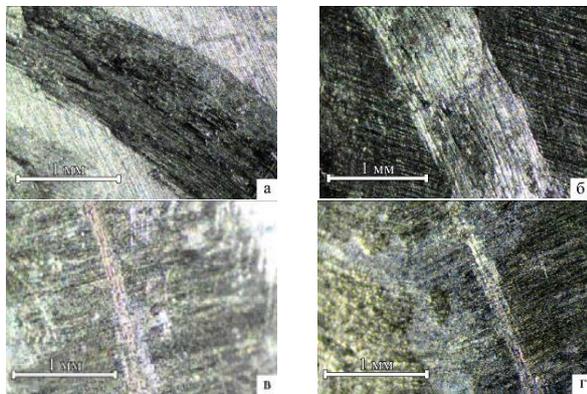


Рис. 4. Дорожки трения на исходных (а, б) и на обработанных (в, г) образцах, $\times 5$.

Таблица 2. Результаты трибологических испытаний поверхности образцов

№	S_k , мкм ²	Δm , мг	$\Delta m_{\text{контртела}}$, мг
Исходные			
1	21701	-2,7	+ 0,1
2	19871	-2,5	+ 0,1
3	29824	-3,0	+ 0,5
Обработанные			
1	–	0	-0,6
2	–	0	-0,1
3*	–	+ 0,6	+0,3

*Суммарный путь – 500 м.

Масса обработанных образцов после испытания осталась без изменений, дорожка трения при визуальном осмотре едва различима (рис. 4в,г). А значение площади поперечного сечения канавки S_k находится ниже предела обнаружения профилометра (на уровне шероховатости), но при этом наблюдается износ контртела (рис. 5б). Увеличение массы и образца, и контртела (табл. 2, п.3*) можно объяснить окислением обеих поверхностей пары трения. Следует отметить, что столь незначительные величины (десятые доли мг) соизмеримы с ошибкой измерения, хотя и согласуются с условиями эксперимента.

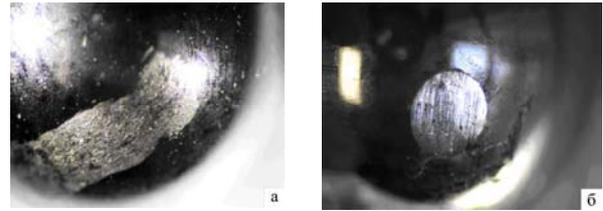


Рис. 5. Контртело после испытаний исходных (а) и обработанных (б) образцов, $\times 5$.

Изменение коэффициента трения во время испытаний приведено на рис. 6.

При трении исходных образцов в паре со стальным шариком коэффициент трения сначала возрастает (рис. 6а), затем, достигнув максимума ($\mu = 0,5$) при прохождении 30 м пути, пара прирабатывается, и μ несколько снижается, достигая в конце пути значения 0,45. Увеличение μ в начале испытаний, видимо, связано с увеличением площади контакта пары (образование канавки), а также с локальным повышением температуры, инициирующим как процессы окисления, так и фазовый переход в титане α (ГПУ) \rightarrow β (ОЦК), который должен способствовать резкому увеличению коэффициента трения [5, 6]. Необходимо также учитывать, что при трении титана в паре с любым более твердым материалом присутствует эффект налипания (холодного схватывания) на сопряженную поверхность, в результате чего происходит трение титана по титану, и коэффициент трения такой пары приближается к μ пары титан-титан, который находится в пределах 0,45–0,55 в зависимости от условий трения [1]. Дальнейшее плавное снижение μ в процессе приработки пары трения, возможно, обусловлено образованием оксидов титана, препятствующих схватыванию. Однако подобное явление наблюдалось и в вакууме и объяснено авторами снижением роли деформационного упрочнения (наклепа) [6].

Линейное возрастание μ при трении обработанных образцов (рис. 6б) следует связывать с процессом износа стального шарика: в паре с более твердым карбидсодержащим слоем локальное повышение температуры в зоне трения значительно больше, чем в случае (а), за счет меньшей площади контакта (канавка практиче-

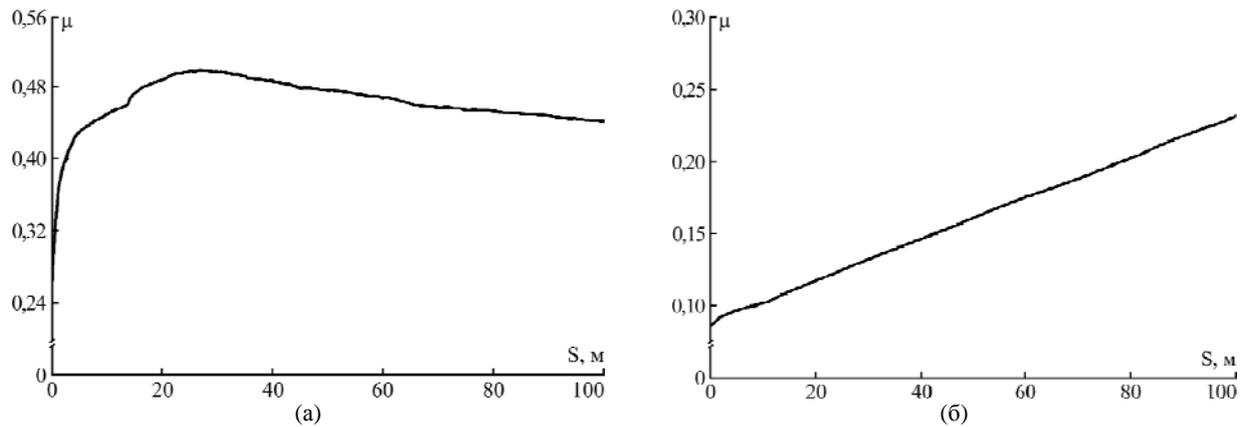


Рис. 6. Изменение коэффициента трения при трибологических испытаниях исходной поверхности (а) и карбидсодержащего слоя (б).

ски отсутствует) при одинаковой нагрузке. Это влечет за собой структурные изменения в материале контртела – образование «аустенита трения», сопровождающееся повышением силы трения и износа [5]. По мере износа стального шарика увеличивается площадь контакта пары трения.

Таким образом, электродуговая обработка поверхности титанового сплава VT1-0 графитовым анодом в водном электролите с образованием композитной микроструктуры Ti-TiC способствует значительному повышению антифрикционных свойств поверхности сплава.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, по постановлению П218, договор №02.G25.31.0035-225 от 12 февраля 2013 г. между Открытым акционерным обществом «Дальневосточный завод «Звезда» и Министерством образования и науки Российской Федерации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. *Титан в машиностроении*. М.: Машиностроение, 1990. 400 с.
2. Жевтун И.Г. Повышение функциональных свойств титана и его сплавов путем формирования на поверхности карбидсодержащих фаз при электродуговом разряде в водных электролитах. *Автореф. дис. канд. техн. наук*. Комсомольск-на-Амуре, 2012. 24 с.
3. Гордиенко П.С., Жевтун И.Г., Достовалов В.А., Куравый В.Г., Баринов Н.Н. Состав и структура углеродсодержащих локальных участков, формируемых на титановых сплавах в электролитах. *Вестник машиностроения*. 2012, (2), 52–55.
4. Жевтун И.Г., Гордиенко П.С., Достовалов В.А., Верхотуров А.Д. Использование электродуговой обработки титановых сплавов для создания режущего инструмента на основе композита Ti-TiC. *ЭОМ*. 2013, 49(4), 92–93.
5. Любарский И.М., Палатник Л.С. *Металлофизика трения*. М.: Металлургия, 1976. 176 с.
6. Семенов А.П., Поздняков В.В. Методика и некоторые результаты исследования трения и адгезионного взаимодействия при высоких температурах в вакууме и газовых средах. *Сборник трудов: Структура и свойства жаропрочных металлических материалов*. М.: Наука. 1967. С. 101–109.

Поступила 11.02.14

После доработки 30.10.14

Summary

In this work the results of investigations of antifriction properties of the VT1-0 titanium alloy, treated by the electric arc in an aqueous electrolyte are presented. The changes of the friction coefficient at scratch testing with a diamond indenter and during tribological tests with a counter body (steel Ac100Cr6) are presented and discussed.

Keywords: titanium alloys, titanium carbide, composite, antifriction properties.