

является цементация, поэтому рост плотности тока коррозии при этой температуре насыщения связан с увеличением концентрации углерода в поверхностном слое.

Таким образом, проведено исследование коррозионных и трибологических свойств стали 20, модифицированной плазменно-электролитическим методом в растворе, содержащем нитрат аммония, азотную кислоту и глицерин, в зависимости от температуры обработки. Показано, что коэффициент трения практически не зависит от температуры обработки, и принимает примерно те же значения, что и до обработки. Массовый износ при этом снижается примерно в 4 раза для всех температур обработки. Выявлено, что ток коррозии модифицированной поверхности зависит от температуры, если не удалять оксидный слой, и мало изменяется после механического удаления оксидного слоя. Минимальное значение плотности тока коррозии  $2,2 \text{ мкА/см}^2$  наблюдается при температуре насыщения  $800^\circ\text{C}$  при наличии оксидного слоя на поверхности образца.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (контракт № 15–13–10018) Костромскому государственному университету.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кусманов С.А., Наумов А.Р., Паркаева Ю.В., Белкин П.Н. Анодное электролитно-плазменное насыщение малоуглеродистых сталей азотом и углеродом // Физика и химия обработки материалов. 2013. №6. С. 47-53.

УДК 621.791

Силкин С.А., Смирнов А.А., Плюснина Е.Н.  
(Костромской Государственный Университет, Россия)

#### **ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT22 ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОГО АЗОТИРОВАНИЯ**

Электролитно-плазменное насыщение металлов и сплавов легкими элементами вызывает значительный интерес благодаря своим преимуществам [1]. Обрабатываемые детали не требуют предварительной подготовки. Непрерывное движение среды в парогазовой оболочке обеспечивает быстрый подвод насыщающих компонентов к обрабатываемой детали и удаление продуктов реакций. Благодаря особенностям метода достигаются высокие скорости нагрева, что предотвращает рост зерна и связанное с этим ухудшение свойств. Кроме того, малая толщина оболочки способствует быстрой стабили-

зации условий, при которых равновесная концентрация адсорбированного углерода достигается за несколько секунд [2]. В результате продолжительность обработки составляет несколько минут.

Целью данного исследования является изучение возможности повышения износостойкости двухфазного титанового сплава ВТ22 после анодного электролитно-плазменного азотирования.

#### **Методика эксперимента**

Цилиндрические образцы диаметром 10 и длиной 15 мм титанового сплава ВТ22 (4–5.5% Mo, 4–5.5% V, 4.4–5.9% Al, 0.5–1.5% Fe, 0.5–2% Cr) обрабатывались в цилиндрическом электролизере с внутренним диаметром 100 мм и высотой 210 мм в условиях симметричного продольного обтекания образца электролитом, подаваемого через патрубок, расположенный в дне электролизера. Перед обработкой каждый образец зачищался наждачной бумагой, содержащей карбид кремния, до шероховатости  $R_a \sim 1.0$  мкм и очищался в ацетоне ультразвуком. В верхней части электролизера электролит переливался через край в поддон и оттуда подавался насосом в теплообменник со скоростью 2,6 л/мин. Расход электролита измерялся ротаметром LZT-M15. Температура электролита измерялась термопарой, помещенной на дне камеры, и поддерживалась равной  $30 \pm 2$  °С. После подачи напряжения образцы погружались в электролит на глубину, равную их высоте. Напряжение и ток измерялось встраиваемыми вольтметром DP6-DV и амперметром DP6-DA. Температура образцов измерялась мультиметром APPA109N с термопарой К-типа. Термопара помещалась в отверстие образца на расстоянии 2 мм от его нагреваемой поверхности. Время обработки составляло 5 мин. Электролит для электроплазменного азотирования: водный раствор аммиака (5%) и хлорида аммония (10%), предложенный для азотирования сталей. Время обработки составляло 5 мин, температура – 850 °С. Морфология поверхности и поперечное сечение слоя исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta 3D 200i и оптического металлографического микроскопа ЕСМЕТАМРВ–21 после полирования и травления образцов в течение 1 мин, используя 5%-ный раствор фтористоводородной кислоты в глицерине. Микротвердость образцов после обработки измерялась на твердомере ПМТ-3 с нагрузкой 50 г. Коэффициент трения и массовый износ контрольных и обработанных образцов определялись при испытаниях по схеме «шарик-по-диску», контролем служил шарик из оксида алюминия диаметром 6.25 мм. Нагрузка при трении 5Н, путь трения составил 240м, скорость скольжения изменяли в диапазоне 0,05–0,4м/с. Массовый износ измерялся электронными весами Vibra AF 225 DRCE с ценой деления  $\pm 0.00001$  г.

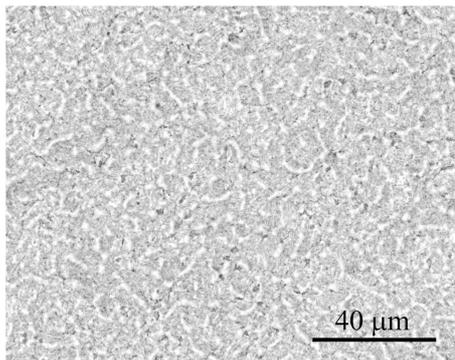
Профиль дорожек трения измерялся с помощью профилометра TR200.

### **Результаты и обсуждение**

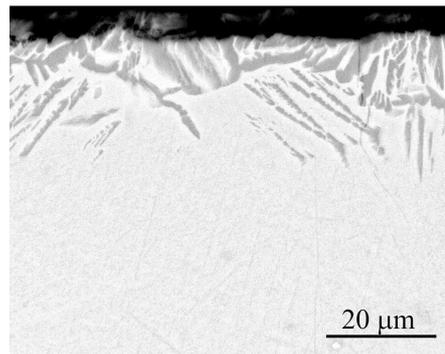
Трибологическое поведение обработанных образцов определяется структурой модифицированного слоя, который содержит оксиды титана и упрочненный подслои. На рисунке 1 показана морфология оксидного слоя, имеющего поры, через которые осуществляется диффузия азота и выход ионов титана в процессе анодного растворения. На рисунке 2 представлено поперечное сечение образца, содержащего оксиды титана и оксидно-нитридный подслои. Нитриды титана с помощью рентгеновского анализа не обнаружены. Вероятно, что модифицированный слой содержит твердый раствор азота в титане.

Согласно полученным результатам анодное насыщение двухфазного титанового сплава приводит к существенному снижению интенсивности его изнашивания в изученных условиях.

Для улучшения воспроизводимости экспериментальных данных рыхлая часть оксидного слоя удалялась механически абразивной бумагой с размером зерен порядка 3 мкм.

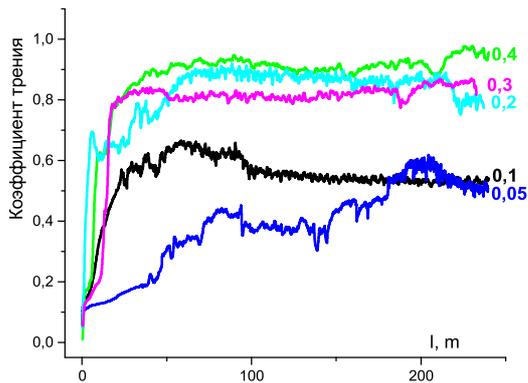


**Рисунок 1- Морфология поверхности после обработки**

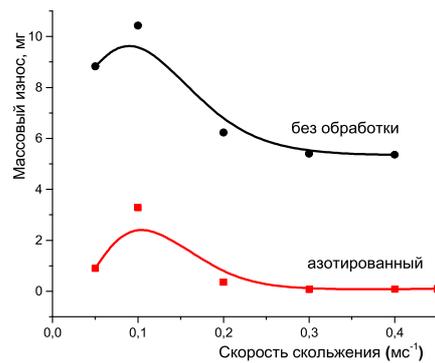


**Рисунок 2 - Поперечное сечение образца после обработки и травления**

Измерения потери массы азотированного образца (850 °С, 5 мин) показали, что воспроизводимость составила  $\pm 0.01$  mg (или 10%) для сухого трения по шарик  $Al_2O_3$  (нагрузка 5 Н, скорость скольжения 0.4 м/с). Установлено, что коэффициент трения контрольного образца равнялся 0,6–0,8 с некоторой тенденцией к уменьшению при росте скорости скольжения (рисунок 3). Коэффициент трения азотированных образцов без оксидного слоя, как правило, оказался выше, чем у необработанных образцов. Увеличение скорости скольжения способствовало уменьшению длины начального участка, на котором происходит прирабатывание и стабилизация коэффициента трения. Измерения профиля дорожек трения показали, что азотирование титановых образцов с удаленным частично оксидным слоем повышает сопротивление износу при всех вариантах обработки.

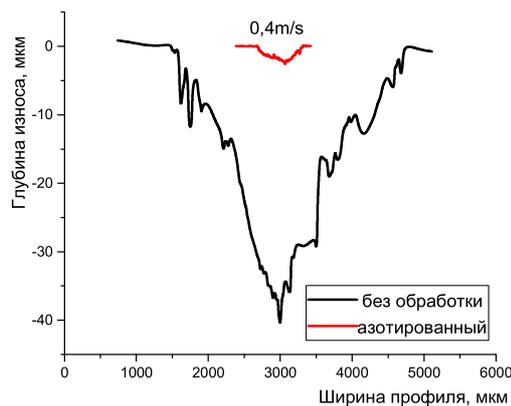


**Рисунок 3 - Коэффициент трения азотированных образцов в зависимости от скорости скольжения**



**Рисунок 4 - Поперечное сечение образца после обработки и травления**

Глубина дорожек трения азотированных образцов изменяется от 3 до 30 мкм при различных скоростях скольжения, что меньше, чем у контрольных образцов (от 40 до 80 мкм) (рисунок 4).



**Рисунок 5 - Профиль поверхности до и после износа при скорости скольжения 0,4м/с.**

Вероятно, повышение скорости скольжения до 0,1 м/с способствует усилению вклада адгезионной составляющей, но при увеличении скорости до 0,4 м/с ее вклад уменьшается. Можно предположить, что при повышении скорости скольжения более 0,1 м/с усиливается образование защитных оксидных пленок вследствие повышения температуры поверхности в месте контакта с контртелом, которые препятствуют адгезионному схватыванию и участвуют в полировке поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S.J. Dowey, Plasma electrolysis for surface engineering, Surf. Coat. Technol. 122 (1999) 73–93.

2. P.N. Belkin, E.A. Pasinkovskij, Heat treatment and case hardening of steels subjected to heat in electrolytic solutions, Met. Sci. Heat Treat. 31(5-6) (1989) 331–337.

УДК 621.357.7

О.Л. Смирнова, доц., канд. техн. наук;  
Е.С. Рутковская; В.И. Юсов; В.С. Шитов  
(НТУ “ХПИ”, г. Харьков)

### **АНОДНОЕ ПОВЕДЕНИЕ МЕДИ, СЕРЕБРА И ЗОЛОТА В ТИОКАРБАМИДНО-ЦИТРАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТАХ В УСЛОВИЯХ ОСАЖДЕНИЯ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЙ**

**Введение.** Анодные процессы на меди, серебре и золоте имеют большое значение для разработки и эксплуатации электролитов для осаждения гальванических покрытий. Наиболее полно они изучены в растворах цианидов, а также в серноокислых тиокарбамидных растворах (при металлургической переработке руд). Растворение металлов в этих средах связано с использованием токсичных и агрессивных веществ, с выделением на аноде опасных продуктов.

Тиокарбамидно-цитратные растворы представляют собой органические электролиты, компоненты которых (тиокарбамид и лимонная кислота) являются эффективными лигандами для металлов подгруппы меди. Применение умеренных ( $0,1 - 0,25$  моль/дм<sup>3</sup>) концентраций этих веществ делает их практически безвредными и весьма перспективными для использования в гальванотехнике.

**Целью работы** является изучение кинетики анодных реакций, протекающих на меди, серебре и золоте в кислых тиокарбамидно-цитратных электролитах для осаждения покрытий и разработка оптимальных условий для стационарного режима растворения.

**Методика эксперимента.** При выполнении исследований использовались рабочие электроды из чистого золота (марки Зл 999,9), серебра (марки Ср 999,9) и меди (марки ММ). Вспомогательным электродом служил платиновый электрод (марки Пл 99,9). Исследования проводились в стандартной электрохимической ячейке с помощью импульсного потенциостата ПИ 50-1.1 с программатором ПР-8. Все значения потенциалов пересчитывались относительно нормального водородного электрода.

**Результаты работы.** Установлено, что введение в тиокарбамидные электролиты лимонной кислоты способствует стабилизации растворов, а слабокислое значение рН (3-5) непосредственно влияет на активность металлов в анодном процессе. С увеличением концентрации тиокарбамида и лимонной кислоты скорость растворения ме-