

## МОДИФИКАЦИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТИТАНА КОМПРЕССИОННЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

**В.В. Углов, В.И. Шиманский, Н.Н. Черенда**

*Белорусский государственный университет, Минск;*

**В.М. Асташицкий, А.М. Кузьмицкий**

*ГНУ «Институт физики НАН Беларуси», Минск*

**Введение.** Титан и его сплавы широко применяются в различных отраслях промышленности. Вместе с тем низкие трибологические свойства титана ограничивают его применение в парах трения. Как правило, эта проблема решается либо легированием титана, либо нанесением износостойких покрытий [1, 2]. Ещё одним возможным путем решения этой проблемы является азотирование поверхностного слоя титана [3 - 5]. Перспективными в этом направлении являются методы, связанные с воздействием на поверхность концентрированных потоков энергии. Цель работы – исследование трибологических свойств титана, подвергнутого воздействию компрессионных плазменных потоков (КПП).

**Методы исследований.** Объектом исследования были образцы титанового сплава ВТ1-0 размером 1x1 см и толщиной 3 мм. Поверхность образцов подвергалась воздействию КПП, генерируемых в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре компактной геометрии в атмосфере азота [6]. Длительность разряда составляла примерно 100 мкс, остаточное давление азота – 400 Па. Плотность мощности изменялась в диапазоне от  $1,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> до  $3,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>, что достигалось за счет изменения расстояния от поверхности образца до среза катода (от 12 до 6 см). Обработка проводилась 1, 3 и 5 последовательными импульсами с интервалом в 20 с.

Морфология поверхности обработанных образцов исследовалась с помощью растровой электронной микроскопии на микроскопе LEO1455VP. Фазовый состав определялся методом рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4 в  $\text{Cu K}\alpha$  излучении.

Микротвердость определялась по методике Виккерса на приборе ПМТ-3 в диапазоне нагрузок 0,5 – 2,0 Н. Трибологические испытания проводились на установке ТАУ-1М при возвратно-поступательном движении индентора, изготовленного из твердого сплава ВК8, со скоростью 4 мм/с в условиях сухого трения. Нагрузка на индентор составляла 0,5 Н.

**Результаты и обсуждение.** Ранее проведенные исследования показали, что при воздействии КПП на поверхность образца происходит плавл-

ление поверхностного слоя толщиной 10 - 20 мкм с последующим затвердеванием в условиях быстрого охлаждения ( $\sim 10^5 - 10^7$  К/с). Толщина азотированного слоя в высоколегированных сталях не превышает несколько микрон [7].

Анализ фазового состава поверхностного слоя титана выявил формирование нитрида  $Ti_2N$  (рис. 1). Следовательно, можно ожидать, что концентрация азота в поверхностном слое составляет около 30 ат. %. Уширение дифракционных линий может быть связано с формированием мелкодисперсной структуры титана после кристаллизации из расплава.

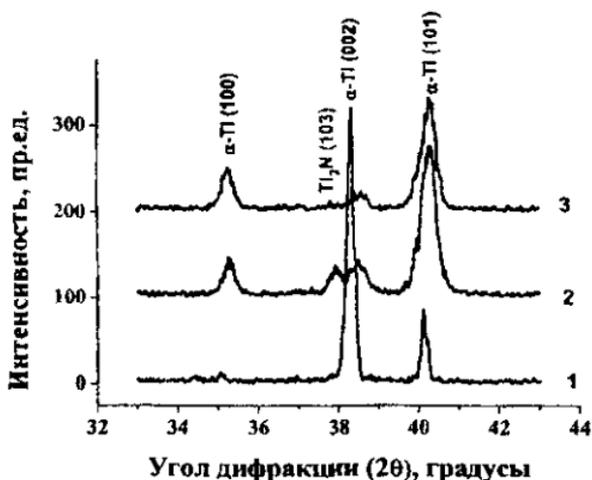


Рис. 1. Рентгенограммы исходного титана (1) и образцов после воздействия КПП(3 импульса) с поглощенной мощностью  $1,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> (2) и  $3,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> (3)

Обработка титана КПП приводит к увеличению микротвердости приповерхностных слоев. При плотности поглощенной энергии  $1,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> величина микротвердости в слое до 2 мкм достигает значения 5 ГПа (рис. 2, а), что примерно в 2 раза превышает соответствующее значение для необработанного титана (2,7 ГПа). С увеличением поглощенной энергии происходит уменьшение микротвердости в этом слое. Согласно результатам рентгеноструктурного анализа при увеличении поглощенной энергии наблюдается уменьшение относительного содержания нитрида, что, по-видимому, и приводит к снижению микротвердости. Изменение поглощенной энергии практически не влияет на микротвердость в слоях на глубине до 5 мкм, хотя ее значение выше, чем у исходного образца (1,5 ГПа), что связывается с формированием мелкодисперсной структуры.

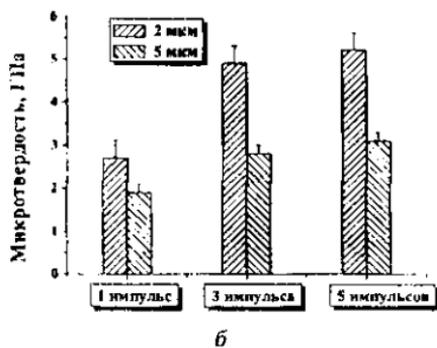
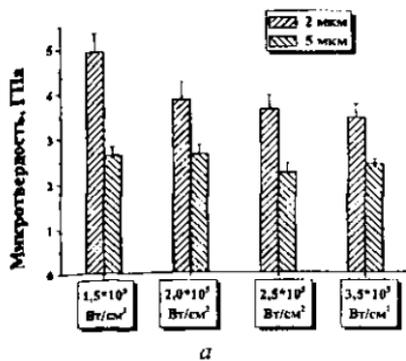


Рис. 2. Зависимость микротвердости титана после воздействия КПП при различных плотностях поглощенной мощности (3 импульса) (а) и различного числа импульсов ( $1,5 \cdot 10^5$  Вт/см²) (б)

Увеличение количества импульсов от 1 до 5 при неизменном значении поглощенной энергии за один импульс ( $1,5 \cdot 10^5$  Вт/см²) также приводит к увеличению микротвердости в поверхностном слое толщиной 5 мкм.

На рис. 3, а, б представлены зависимости коэффициента трения от пути, пройденного индентором. Полученные результаты показывают, что обработка КПП поверхности титана приводит к уменьшению коэффициента трения от значения 0,6 (исходный образец) до значения 0,1 – 0,2. Причем наименьшим значением коэффициента трения обладают образцы, обработанные КПП с максимальной поглощенной энергией ( $3,5 \cdot 10^5$  Вт/см²).

Следовательно, на модификацию трибологических свойств титана после воздействия КПП, вероятнее всего, микроструктура приповерхностных слоев влияет в большей степени, чем их фазовое состояние (образование нитридов). Увеличение числа импульсов не влияет на величину коэффициента трения (рис. 3, б).

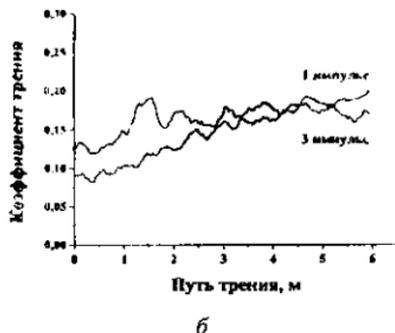
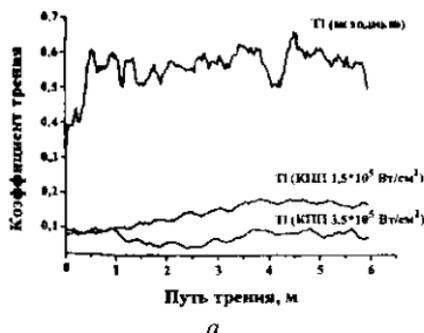


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента трения титана от пройденного индентором пути после воздействия КПП при различных плотностях поглощенной мощности (3 импульса) – а, и различного числа импульсов ( $1,5 \cdot 10^5$  Вт/см²) – б

**Выводы.** Воздействие компрессионных плазменных потоков, генерируемых в атмосфере азота, на титан приводит к формированию мелкодисперсной структуры поверхностного слоя, образованию нитрида  $Ti_2N$  и, как следствие, к модификации трибологических свойств: увеличению микротвердости до  $5\ 1\ Па$  (в слое  $2\ \mu\text{м}$ ) и снижению коэффициента трения до  $0,1$ .

#### Литература

1. X. Ding [et all]. – Surf. and Coat Technol. 203 (2008) – P. 680 – 684.
2. E. Bousser [et all] – Surf. and Coat Technol. 203 (2008) – P. 776 – 780.
3. F.M. El-Hossary [et all]. – Thin Solid Films. 497 (2006). – P. 196 – 202.
4. Matsuura K. / K. Matsuura, M. Kudoh. – Acta. Mater. 50 (2002). – P. 2693 – 2700.
5. A. Zhecheva [et all]. – Surf. and Coat Technol. 200 (2005). – P. 2192 – 2207.
6. В.М. Асташинский [и др.] // Инж.-физич. журнал. – 62 (1992) – С. 386 – 390.
7. N.N. Cherenda [et all]. – Surf. and Coat Technol. 200 (2006). – P. 5334 – 5342.

УДК 539.211: 620.179

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЬ – ОКСИД ВОЛЬФРАМА И/ИЛИ МОЛИБДЕНА

Л.И. Степанова, Т.И. Бодрых

*НИУ «Институт прикладных физических проблем БГУ», Минск;*

**В.П. Казаченко, О.С. Киселевский**

*УО «Белорусский государственный университет транспорта», Гомель;*

**Т.В. Свиридова**

*Белорусский государственный университет, Минск*

**Введение.** Разработка новых технологий нанесения износостойких покрытий на детали, работающие в условиях трения – актуальная проблема современного материаловедения. Использование метода гальванического нанесения покрытий из растворов позволяет проводить процесс при низких температурах, одновременно обрабатывать большое количество деталей, наносить покрытия «в размер», что устраняет необходимость последующей механической обработки. Повысить износостойкость гальванических покрытий можно, увеличив их микротвердость или снизив коэффициент трения. Это достигается при изменении микроструктуры покрытий путем введения в электролит специальных модифицирующих добавок, включения в состав покрытия нового металлического или неметаллического компонента (осаждение сплавов) или соосаждения с металлом дисперсных частиц различной природы (осаждение композитов).