

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕДИ, ЛЕГИРОВАННОЙ АТОМАМИ ТИТАНА ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПРЕССИОННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ

Н.Н. Черенда¹⁾, А.П. Ласковнев²⁾, А.В. Басалай²⁾, В.М. Анищик¹⁾,
В.М. Асташинский³⁾, А.М. Кузьмицкий³⁾, Ч. Карват⁴⁾

¹⁾Белорусский государственный университет,
220030, Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 4; e-mail: cherenda@bsu.by

²⁾Физико-технический институт НАН Беларуси,
220141, Беларусь, Минск, ул. Купревича, 10; e-mail: anna.basalay@mail.ru

³⁾Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси
220072, Беларусь, Минск, ул. П. Бровки 15; e-mail: ast@imaph.bas-net.by

⁴⁾Люблинский технический университет, Люблин, Польша

Представлены результаты исследования трибологических свойств и микротвердости поверхностного слоя меди М1, легированного атомами титана при воздействии компрессионных плазменных потоков на систему «покрытие Ti-медь». Установлено, что легирование приводит к увеличению микротвердости, уменьшению коэффициента трения и увеличению износостойкости поверхностного слоя. Основными причинами улучшения трибологических характеристик поверхностного слоя являются увеличение микротвердости и формирование развитого рельефа поверхности.

Введение

Медь и сплавы на ее основе широко используются в технике как конструкционные материалы. Однако, для работы в условиях повышенных температур, коррозии и износа медные сплавы обладают недостаточной стойкостью [1, 2]. Одним из препятствий применения меди и ее сплавов также является низкая твердость [2]. Этим и объясняется поиск и разработка технологий формирования защитных слоев, повышающих сопротивление медных сплавов коррозии, эрозионному и кавитационному износу, улучшающих механические свойства с сохранением физических свойств объема материала (электро- и теплопроводности).

Перспективным и экономичным способом создания защитных слоев является поверхностное легирование, т.е. модификация структуры и механических свойств поверхностного слоя толщиной несколько десятков микрометров различными способами, такими как обработка материала лазерными пучками [1] и компрессионными плазменными потоками (КПП) с предварительно нанесенным покрытием [3, 4].

Эффективность такого воздействия обусловлена процессами сверхбыстрого нагрева, жидкофазного перемешивания расплава и последующего сверхбыстрого охлаждения поверхностного слоя (скорость до 10^7 К/с), что обуславливает диспергирование структуры и формирование метастабильных фаз. Данный способ воздействия позволяет легировать поверхностные слои обрабатываемого материала элементами покрытия и плазмообразующего вещества на глубину до нескольких десятков микрометров [3].

Целью настоящей работы являлось исследование трибологических свойств и микротвердости меди М1, легированной атомами титана. В качестве покрытия был выбран титан, легирование атомами которого согласно [2] позволяет повысить коррозионную стойкость, износостойкость и твердость меди и ее сплавов.

Материал и методика исследований

Объектом исследования являлись образцы меди М1 с покрытием титана, нанесенного методом вакуумного катодно-дугового осаждения (ток горения дуги 100 А, напряжение смещения — 120 В, время нанесения 10 мин). Толщина покрытия составляла ~ 2 мкм.

Обработка одним, тремя и шестью импульсами (п) компрессионных плазменных потоков осуществлялась в газоразрядном магнитоплазменном компрессоре (МПК) компактной геометрии. Длительность разряда составляла ~ 100 мкс. Перед разрядом предварительно откачанная вакуумная камера МПК заполнялась рабочим газом (азотом) до давления 400 Па. Напряжение на конденсаторной батарее составляло 4 кВ. В камере образцы располагались на расстоянии 8 - 12 см от среза внутреннего электрода перпендикулярно набегающему потоку. Значения плотности поглощенной энергии варьировались от 14 до 23 Дж/см² за импульс.

Трибологические испытания проводились на установке ТАУ-1М (по схеме «палец – плоскость») при возвратно-поступательном движении индентора, изготовленного из твердого сплава ВК8, со скоростью 4 мм/с в условиях сухого трения в течение 30 минут. Нагрузка на индентор составляла 0,5 Н. Для исследования характера треков использовался оптический микроскоп МИКРО – 200. Микротвердость исследуемых образцов измерялась на приборе ПМТ-3 в диапазоне нагрузок 0,5 - 2 Н. Фазовый состав исследовался методом рентгеноструктурного анализа с помощью дифрактометра общего назначения ДРОН-3 с фокусировкой по Брэггу – Брентано в $\text{Cu K}\alpha$ -излучении. Шероховатость поверхности измерялась на профилометре цеховом с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем, модель № 296. Длина трассы при измерении составила 3 мм, отсечка шага – 0,8 мм.

Результаты исследований и их обсуждение

Одной из характеристик поверхностных слоев материалов, свидетельствующих об изменении прочностных свойств, является микротвердость. На рисунке 1 представлены экспериментальные результаты изменения микротвердости исходного образца меди и образцов системы титан-медь, обработанных тремя импульсами КПП с различной плотностью поглощенной энергии, а также обработанных различным количеством импульсов при плотности поглощенной энергии 23 Дж/см² за импульс.

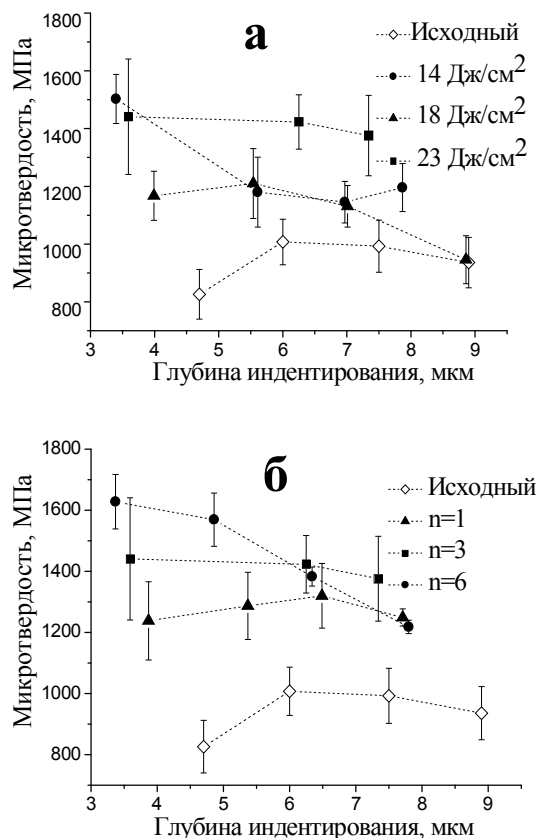


Рис. 1. Зависимость микротвердости от глубины проникновения индентора в исходном образце и образцах системы "титан-медь", обработанных КПП в зависимости от плотности поглощенной энергии (число импульсов $n=3$) (а), в зависимости от количества импульсов n при плотности поглощенной энергии 23 Дж/см² (б)

При легировании меди титаном под действием КПП наблюдается значительное увеличение микротвердости для всех исследуемых режимов. Увеличение плотности поглощенной энергии приводит к увеличению микротвердости во всем анализируемом слое (рис. 1а). Рост количества импульсов обуславливает увеличение микротвердости приповерхностного слоя (рис. 1б), микротвердость объема легированного слоя не зависит от количества импульсов.

Согласно данным РСА основной фазовой составляющей слоя, легированного под действием КПП, является пересыщенный твердый раствор

замещения титана в меди. В поверхностном слое также возможно образование нитрида титана TiN. Увеличение плотности поглощенной энергии ведет к увеличению объемной доли пересыщенного твердого раствора, что коррелирует с результатами измерения микротвердости (рис. 1а). Увеличение микротвердости поверхностного слоя при обработке КПП с плотностью поглощенной энергии 14 Дж/см² ($n=3$) может быть связано с большей концентрацией азота при этом режиме воздействия и увеличением объемной доли нитрида. Согласно данным работы [5], уменьшение плотности поглощенной энергии или увеличение количества импульсов приводит к увеличению содержания азота, как плазмообразующего газа, в поверхностном слое. Это позволяет объяснить повышение микротвердости с увеличением количества импульсов. Максимальное ее значение достигает 1628 МПа при обработке КПП шестью импульсами плазмы с плотностью поглощенной энергии 23 Дж/см².

Важной характеристикой рабочих поверхностей деталей является коэффициент трения и износостойкость. Трибологические свойства определяются структурно-фазовым состоянием, прочностными и химическими свойствами поверхности, а также ее морфологией. Результаты исследований показали, что в исходном образце коэффициент трения после 8 м пути, пройденного индентором, составляет 0,25 (рис. 2). После легирования меди под действием КПП коэффициент трения уменьшается и составляет ~ 0,1 и не зависит от режимов обработки.

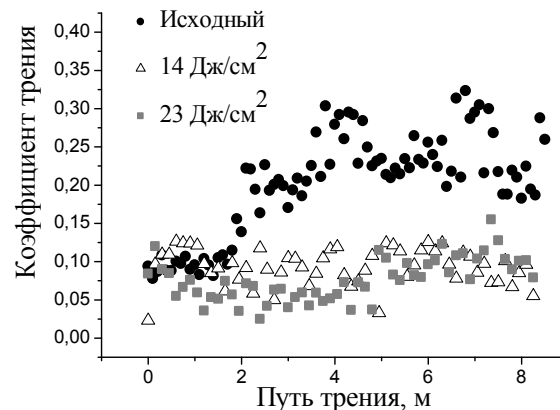


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения исходной меди и поверхностных слоев меди, легированной атомами титана под действием КПП ($n=3$), от длины пути трения

Возможной причиной уменьшения коэффициента трения может являться повышение микротвердости. Согласно [6] уменьшение коэффициента трения коррелирует с упрочнением поверхности, однако, величина коэффициента трения не определяется строго величиной твердости, так как в процессе трения на него оказывают влияние одновременно несколько характеристик поверхности. Анализ шероховатости поверхности показал, что величина среднего арифметического отклонения профиля шероховатости у исходного образца меди составила 1,1 мкм. После обработ-

ки КПП эта величина увеличилась до 3,5 мкм (при 14 Дж/см²) и до 1,9 мкм (при 23 Дж/см²). Увеличение шероховатости поверхности по сравнению с исходным образцом приводит к уменьшению площади фактического контакта взаимодействующих тел, что также обуславливает уменьшение коэффициента трения.

На рис. 3 представлены треки износа исходного образца и образца, легированного титаном под действием КПП с плотностью поглощенной энергии 23 Дж/см² за импульс ($n=6$). На рисунке видно, что ширина трека после воздействия КПП уменьшается (рис. 3б), что свидетельствует об увеличении износостойкости поверхностного слоя. Воздействие КПП приводит к изменению характера треков износа. По сравнению с исходной медью они представляют собой отдельные пятна касания между индентором и исследуемым материалом, что связано с наличием развитой поверхности, характерной для быстрозатвердевшей жидкой фазы.

Заключение

При воздействии КПП на систему «покрытие титана-медь» наблюдается увеличение микротвердости поверхностного слоя меди, что связывается с формированием пересыщенного твердого раствора титана в меди и формированием нитрида титана. Максимальное значение микротвердости 1628 МПа меди М1 достигается при легировании поверхностного слоя атомами титана под действием КПП с плотностью поглощенной энергии 23 Дж/см² за импульс ($n=6$). Обработка КПП приводит к снижению коэффициента трения в ~ 2,5 раза для всех исследуемых режимов, а также увеличению износостойкости. Основными причинами улучшения трибологических характеристик поверхностного слоя являются увеличение микротвердости и формирование развитого рельефа поверхности.

Список литературы

1. Земсков Г.В., Коган Р.Л. Многокомпонентное диффузное насыщение металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
2. Wong P.K., Kwok C.T., Man H.C., Cheng F.T. // Corrosion Science. – 2012. – № 57. – P. 228–240.

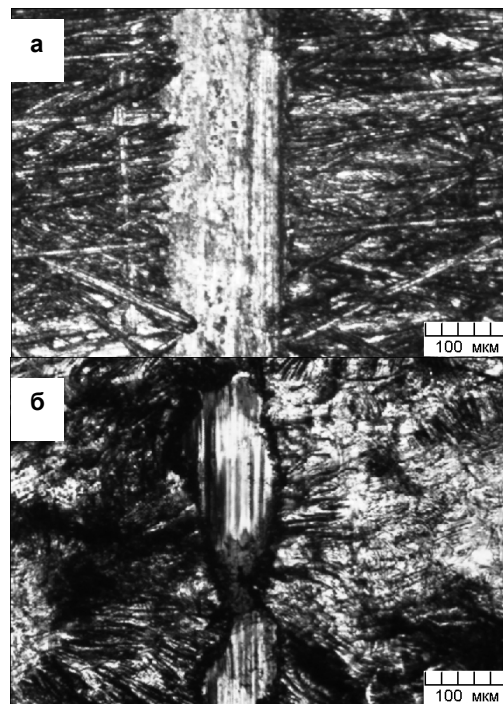


Рис. 3. Фотографии треков износа исходного образца меди (а) и образца, легированного атомами титан.

3. Углов В.В., Черенда Н.Н., Стальмошенков Е.К., Тарасюк Н.С., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М., Ухов В.А. // Физика и химия обработки материалов. – 2007. – № 1. – С. 40 – 45.
4. Углов В.В., Анищик В.М., Черенда Н.Н., Стальмошенков Е.К., Асташинский В.М., Кузьмицкий А.М. // Физика и химия обработки материалов. – 2005. – № 2. – С. 36 – 41.
5. Черенда Н. Н., Шиманский В. И., Углов В. В., Асташинский В. М., Ухов В.А. // Поверхность. рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2012. – № 4. – С. 35–42.
6. Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учебник для вузов. – Самара: Изд-во Самар. гос. техн. ун-та, 2000. – 268 с.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COPPER ALLOYED BY TITANIUM ATOMS UNDER THE ACTION OF COMPRESSION PLASMA FLOWS

N.N. Cherenda¹⁾, A.P. Laskovnev²⁾, A.V. Basalai²⁾, V.M. Anisichik¹⁾, V.M. Astashynski³⁾,
A.M. Kuzmitski³⁾, C. Karwat⁴⁾

¹⁾Belarusian state university, 220030, Belarus, Minsk, ave. Nezavisimosti, 4; e-mail: cherenda@bsu.by

²⁾State Scientific Institution "The Physical Technical Institute of the National Academy of sciences of Belarus", 220141, Belarus, Minsk, Kuprevicha, 10; e-mail: anna.basalay@mail.ru

³⁾A.V. Lykov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of sciences of Belarus, 220072, Belarus, Minsk, P. Brovka, 15; ast@imaph.bas-net.by

⁴⁾Lublin University of Technology, Lublin, Poland

The results of tribological properties and microhardness investigation of copper M1 surface layer alloyed by titanium atoms under the action of compression plasma flows on the «Ti coating-copper» system are presented. The findings showed that alloying results in microhardness and wear resistance increase as well as friction coefficient decrease. Microhardness and surface roughness growth are main reasons of tribological properties improvement.