

**МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТИТАНА
ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ****А. И. Иванов**

*Республиканское инновационное унитарное предприятие
«Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»,
г. Минск, Республика Беларусь*

Научный руководитель В. М. Асташинский

Представлены результаты электролитно-плазменной цементации образцов из технически чистого титана BT1-0. Показано, что в результате обработки формируется цементованный слой толщиной до 260 мкм. Максимальная твердость приповерхностной зоны увеличивается до трех раз по сравнению с исходным значением. Отмечено, что наблюдается значительное снижение коэффициента трения, который уменьшается в 4,6 раза, что свидетельствует о повышении износостойкости поверхности обработанных образцов.

Ключевые слова: электролитно-плазменный нагрев, титан, цементация, диффузионный слой, твердость, коэффициент трения.

В настоящее время все более широкое распространение получают методы модификации поверхностных свойств материалов, основанные на высокоэнергетическом воздействии. Одним из таких методов является электролитно-плазменное упрочнение. Его суть заключается в осуществлении процесса электролитно-плазменного нагрева в насыщающей среде (электролите). Благодаря достижению высоких температур (до 1200 °С) и скоростей нагрева (до 250 °С /с), данный метод позволяет реализовывать процессы химико-термического упрочнения, такие как азотирование, цементация, нитроцементация, борирование и другие в зависимости от состава используемого электролита [1].

В работе рассматривалось влияние электролитно-плазменной цементации (ЭПЦ) на механические и трибологические свойства титана. В качестве образцов были использованы пластины изготовленные из технически чистого титана BT1-0 размерами 10 × 10 × 1 мм. Все исследования проводились на базе государственного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». ЭПЦ осуществлялась в электролите, содержащем по 10 % глицерина и аммиака водного. Температура электролита поддерживалась на уровне 20 °С с точностью до 2 °С. Выбор температуры электролита обуславлен результатами исследований, представленных в работе [2]. Время обработки составляло 5 мин. Рабочее напряжение устанавливалось в диапазоне от 200 до 260 В с шагом в 20 В. Величина рабочего напряжения контролировалась при помощи осциллографа марки OWON XDS3102A. После ЭПЦ охлаждение образцов проводилось в рабочем электролите, без их извлечения, путем прекращения подачи напряжения.

В результате ЭПЦ на поверхности образцов образуется оксидный слой толщиной от 10 до 20 мкм. С повышением напряжения толщина диффузионного слоя увеличивается. Разница между его толщиной при 200 В и при 260 В составляет 1,4–1,6 раза. Вместе с тем следует отметить, что данный слой обладает низкими адгезионными свойствами, в результате чего он является хрупким, несплошным и зачастую быстро отслаивается от подложки.

Под оксидным слоем непосредственно в приповерхностной зоне образцов формируется диффузионный (цементованный) слой. Для измерения его микротвердости изготавливались микрошлифы. Образцы разрезались по среднему сечению, запрессовывались в компаунд, затем шлифовались с использованием шлифовальной бума-

ги и полировались алмазными пастами. Измерения проводились на микротвердомере AFFRI MVDM8 по методу Виккерса при нагрузке 0,1 кг и времени воздействия индентора 15 с. Твердость измерялась в центре образца, начиная с глубины 10 мкм от его поверхности и далее по сечению. Толщина диффузионного слоя устанавливалась по глубине, на которой величина микротвердости снижалась до уровня исходного (необработанного) материала. Полученные результаты измерений микротвердости и толщины диффузионного слоя представлены на рис. 1.

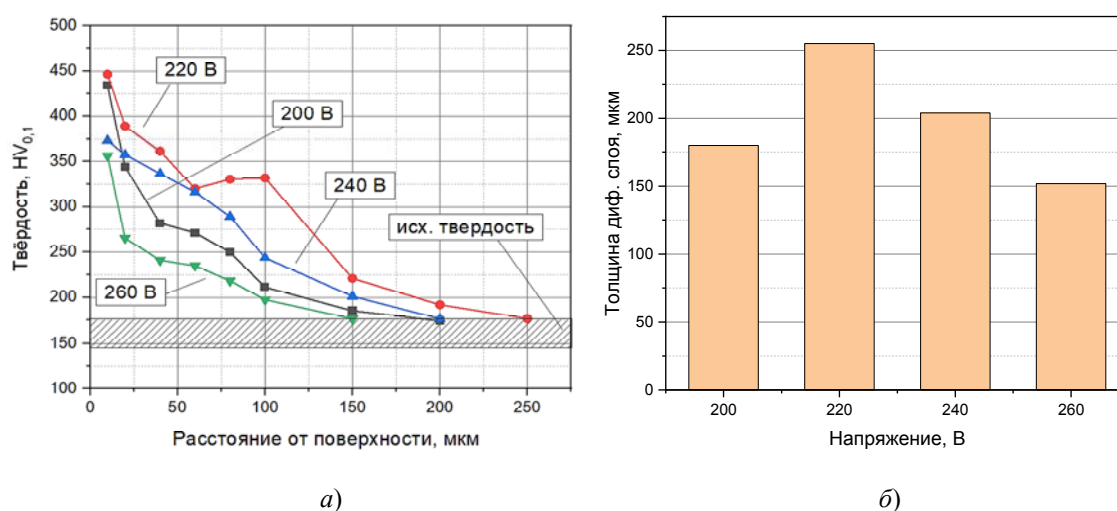


Рис. 1. Распределение микротвердости в поверхностном слое образцов (а) и толщина образующегося диффузионного слоя (б) после ЭПЦ

В результате ЭПЦ наибольшую толщину и твердость цементованный слой приобретает при обработке при 220 В. Увеличение напряжения выше этого значения приводит к снижению толщины и твердости слоя, что связано с избыточным нагревом образцов и выходом за оптимальный температурный диапазон цементации титана ВТ1-0. Максимальная твердость наблюдается в приповерхностной зоне на расстоянии 10 мкм от края и составляет 450 HV, что в 2,8–3 раза выше твердости исходных образцов.

Для исследования трибологических характеристик поверхности образцов после ЭПЦ были проведены испытания на трибометре FT-3 по схеме с возвратно-поступательным движением индентора. В качестве индентора применялся шар из нитрида кремния диаметром 6 мм. Во время испытаний индентор совершал возвратно-поступательные движения, передавая заданную нагрузку неподвижно закрепленному в держателе образцу. Нагрузка составляла 220 г, скорость прохода – 3000 мм/мин, расстояние за цикл – 10 мм, общее пройденное расстояние – 200 м. На основе полученных данных были построены графики, отражающие изменение глубины канавки износа и коэффициента трения в зависимости от пути, пройденного индентором (рис. 2). Также предварительно было установлено, что коэффициент трения для необработанных образцов равен 0,55–0,6.

Для образцов, подвергшихся ЭПЦ при напряжении 200 В при температуре электролита 20 °С (рис. 2), установлено, что индентор достигает подложки после прохождения 82 м. В этом случае коэффициент трения оксидного слоя составляет 0,04–0,05. С увеличением рабочего напряжения расстояние, необходимое индентору для достижения подложки, сокращается: при 220 В оно составляет 64 м, при 240 В – 45 м,

а при 260 В – 7 м. Коэффициент трения при этом остается в пределах 0,03–0,05. Для образцов после ЭПЦ при 260 В установить четкое значение коэффициента трения не удалось, что может быть связано с тем, что образовавшееся покрытие является слишком хрупким и в процессе исследований оно не стиралось индентором, а отслаивалось.

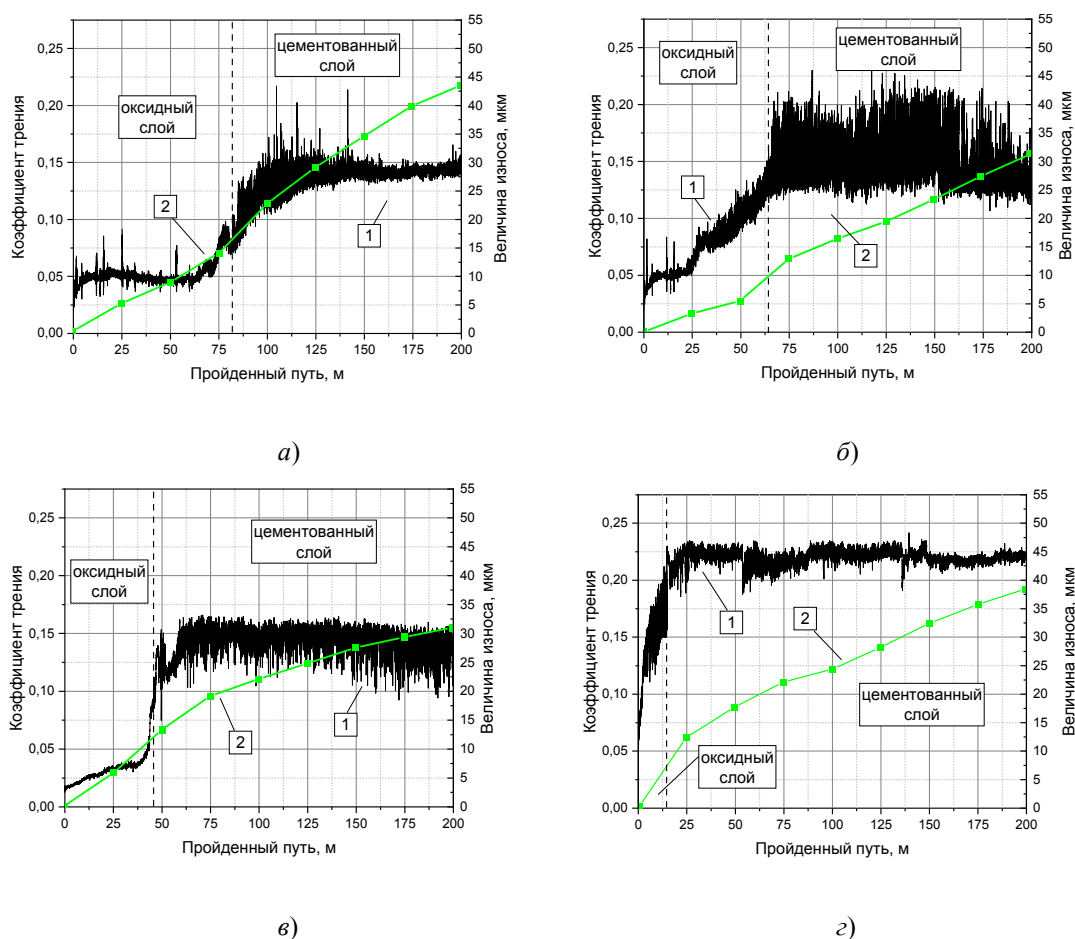


Рис. 2. Изменение коэффициента трения (1) и глубины канавки износа (2) в зависимости от пройденного индентором пути для образцов, обработанных при различном рабочем напряжении:
а – 200 В; б – 220 В; в – 240 В; г – 260 В

За оксидным слоем, как было отмечено выше, следует зона диффузионного упрочнения подложки атомами углерода. Коэффициент трения этой зоны изменяется от 0,15 для образцов, обработанных при 200 В, и до 0,13–0,14 – для образцов, обработанных при 220–240 В. Повышение напряжения до 260 В приводит к увеличению данного показателя до 0,22. Полученные данные демонстрируют обратную корреляцию с толщиной диффузионного слоя, а именно, при увеличении напряжения с 200 до 220 В происходит рост толщины диффузионного слоя и уменьшение коэффициента трения. Дальнейшее повышение напряжения до 260 В приводит к снижению толщины диффузионного слоя и повышению коэффициента трения.

Литература

1. Plasma electrolysis for surface engineering / A. L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland [et al.] // Surface and Coating Technologies. – 1999. – Vol. 122. – P. 73–93.
2. Иванов, А. И. Влияние температуры электролита на толщину и твердость модифицированного слоя при электролитно-плазменном упрочнении титановых сплавов / А. И. Иванов, А. Ю. Королёв // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки. Технология – Оборудование – Инструмент – Качество : тез. докл. 38-й Междунар. науч.-техн. конф. в рамках междунар. специализир. выставки «Металлообработка–2024», Минск, 11 апр. 2024 г. / редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2024. – С. 37–38.

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ КАТИОНАМИ
МОНОЭТАНОЛАММОНΙΑ И ЭТИЛЕНДИАММОНΙΑ
НА СТРУКТУРУ И СВЕТОПОГЛОЩЕНИЕ
МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ ПЕРОВСКИТНЫХ ПЛЕНОК**

В. С. Будник, А. К. Тучковский

*Учреждение образования «Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники», г. Минск*

Научный руководитель И. А. Врублевский

Продemonстрированы результаты исследований металлоорганического галогенплюмбатного йодного перовскита до и после включения в его состав аминоксодержащих соединений (алкиламмониевых йодидов) с различным строением углеродного заместителя. Отмечено, что модификация добавками солей раствора перовскита приводит к поверхностным и оптическим изменениям при исследовании перовскитных образцов. В зависимости от конкретного соединения, которым был допирован исходный перовскит, выявляются изменения в структуре поверхности пленок, выраженные в наличии перовскитных микрокристаллов либо зерен разного размера, а также в характере промежутков между ними. Показано, что оптические изменения определяются изменением значений светопоглощения в зависимости от структуры аминного соединения, включенного в первоначальный перовскитный раствор.

Ключевые слова: перовскит; допирование; алкиламмониевые йодиды; светопоглощение; видимый спектр.

Внимание ученых уже давно привлечено к разработке эффективных средств преобразования солнечной энергии в электроэнергию. Повышенный интерес к фотоэлектрическому методу обусловлен реальной возможностью создания относительно стабильных, недорогих и простых в изготовлении солнечных элементов с относительно высоким коэффициентом преобразования энергии. По этим причинам в фотовольтаике востребованы гибридные металлоорганические перовскитные элементы [1].

Кристаллическая структура гибридных галогенплюмбатных металлоорганических перовскитов вида $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ рассматривается как неорганический блок соединенных по вершинам октаэдрических соединений PbI_6 , в кубооктаэдрических пустотах которого расположены метиламмониевые органические катионы CH_3NH_3^+ , связанные с анионной подрешеткой за счет электростатического взаимодействия (рис. 1, а) [2].

Управляемая кристаллизация имеет практическое значение для получения высококачественных тонких пленок перовскита с уменьшенным количеством структурных дефектов. Такие доноры электронных пар, как азот, кислород и сера, в качестве посторонних добавок связывают катионы металлов в перовскитах и влияют на латеральный рост кристаллитов. Образцы, модифицированные N- и O-донорами,