

**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).

В докладе представлены данные о закономерностях инкорпорирования полученных в разных условиях высокодисперсных оксидов вольфрама и/или молибдена в матрицу никеля при их совместном электрохимическом осаждении, а также сведения о микроструктуре и физико-механических свойствах формируемых при этом композиционных электрохимических покрытий (КЭП)  $\text{Ni-WO}_3$ ,  $\text{Ni-MoO}_3$ ,  $\text{Ni-W}_x\text{Mo}_{1-x}\text{O}_3$ .

**Методы исследований.** КЭП на основе никеля формировали при электрохимическом восстановлении ионов этого металла из стандартного никелевого электролита, в который вводились высокодисперсные оксиды вольфрама (молибдена) в виде порошка или суспензии. Ультрадисперсные частицы индивидуальных или смешанных оксидов вольфрама и молибдена синтезировали при термическом, механическом и ультразвуковом воздействиях на растворы молибденовой и гели вольфрамовой кислот или их смеси. В зависимости от условий синтеза размеры частиц варьировались в пределах от 10 – 50 нм до 3 – 5 мкм для  $\text{WO}_3$ , от 30 – 250 нм до 1 – 10 мкм для  $\text{MoO}_3$  и от 20 – 25 нм до 7 – 8 мкм для  $\text{W}_x\text{Mo}_{1-x}\text{O}_3$ .

Триботехнические испытания осуществляли по схеме шар – плоскость при возвратно-поступательном скольжении индентора на микротрибометре ММТ при средней скорости трения 13,5 мм/с и нагрузке на индентор 0,2 Н. Длина дорожки трения составляла 13 мм. КЭП наносили на шаровые инденторы диаметром 6 мм из закаленной до 56 – 58 HRC стали 45. Контртелом являлась плоская подложка из закаленной стали 45 с шероховатостью поверхности  $R_a < 0,05$  мкм. Трение осуществлялось при граничной смазке моторным маслом, а также без смазки. Величина линейного износа определялась по размеру пятен износа покрытия на шаровом инденторе после фиксированного числа циклов истирания с помощью оптического микроскопа МИМ-7. В процессе испытаний регистрировалось изменение коэффициента трения.

Триботехнические испытания покрытий проводились также на машине трения СМТ-1 по схеме вал – плоскость (стандарт ASTM G77), без смазки, при начальном давлении в зоне контакта по Герцу 70 МПа и скорости трения 0,5 м/с. В качестве контртела использовали полированный до  $R_a < 0,05$  мкм ролик диаметром 40 мм, выполненный из закаленной стали 45. Испытываемые покрытия толщиной 30 мкм наносились на кубики с размером стороны 5 мм из стали ШХ15. Испытания проводились в течении 10 мин до установления давления в зоне контакта 1 – 2,5 МПа.

Морфология исходной поверхности КЭП, поверхности контртела и дорожек трения исследовалась при помощи металлографического оптического

ского микроскопа МИМ-7, а также просвечивающего электронного микроскопа ЭМВ-100ЛМ.

Микротвердость КЭП измеряли на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 200 г. Покрытия предварительно полировали до шероховатости  $R_a < 0,05$  мкм для исключения влияния шероховатости поверхности на форму и размеры отпечатков индентора.

**Результаты и обсуждение.** Установлено, что при концентрации оксида 0,1 – 3,0 г/л средняя скорость осаждения КЭП из электролита-суспензии практически не отличается от скорости осаждения индивидуального никеля и в никелевую матрицу инкорпорируется от 1 до 4 масс.% оксидов. С возрастанием концентрации дисперсной фазы в электролите до 10 г/л содержание оксида в КЭП достигает 9 – 12 масс.%, однако скорость осаждения на катоде снижается тем больше, чем выше эта концентрация.

В исследуемых КЭП рентгенографически регистрируется одна фаза с параметром решетки, соответствующим металлическому никелю. Внедрение оксидов в никелевую матрицу мало изменяет размеры областей когерентного рассеяния (40 – 50 нм). Морфология поверхности КЭП заметно отличается от морфологии поверхности никеля как на нано-, так и на микроуровне. Электронно-микроскопические исследования показывают, что она во многом определяется формой, размерами, концентрацией и способом синтеза вводимых в электролит частиц. Последние внедряются в композит в виде агломератов, скопления частиц или отдельных частиц, могут распределяться по поверхности достаточно равномерно или неравномерно. Во всех случаях пленки композитов характеризуются менее развитой поверхностью, меньшим размером зерна и более плотной их упаковкой, чем пленки никеля.

Установлено, что используемые в исследовании высокодисперсные оксиды характеризуются индивидуальной редокс-активностью, наличие которой позволяет протекать процессу восстановления ионов никеля как на поверхности катода, так и на поверхности инкорпорируемых оксидных частиц. Результаты поляризационных измерений свидетельствуют о том, что наличие на электродной поверхности редокс-активных оксидных частиц облегчает катодное осаждение металла на ранних стадиях формирования КЭП по сравнению с процессом осаждения чистого никеля.

Наличие в составе композиционных покрытий оксидных наночастиц и связанное с этим увеличение дисперсности, естественно, сказывается на их механических свойствах. Микротвердость исследуемых покрытий зависит от природы частиц дисперсной фазы, их размеров и габитуса, концен-

трации в электролите. При одинаковой концентрации оксида в электролите (0,5 г/л) и примерно равном содержании в композитной пленке (1,0 – 1,5 масс.%) максимальная микротвердость, равная 6,1 ГПа, зафиксирована для композита с включенными частицами смешанного оксида. Для КЭП Ni-WO<sub>3</sub> (MoO<sub>3</sub>) этот параметр лишь незначительно превышает аналогичный показатель для никеля без дисперсных частиц (3,05 – 3,75 и 3,05 – 3,50 ГПа соответственно), и только в случае крупных ультрадисперсных частиц MoO<sub>3</sub> достигает 4,9 ГПа.

Композиты, осажденные из электролитов, содержащих смешанные оксиды, при трении в режиме граничной смазки характеризуются практически постоянным коэффициентом трения  $f = 0,28 - 0,35 \pm 0,01 - 0,05$  на протяжении всего времени триботехнических испытаний. Это несколько ниже аналогичного параметра гальванических покрытий из чистого никеля. Инкорпорирование триоксида вольфрама в никелевую матрицу снижает потери на трение и повышает несущую способность трущихся поверхностей. На примере этих КЭП показано, что характерным является значительное снижение коэффициента трения по мере приработки с  $f = 0,4 - 0,6$  до 0,1, соответствующего устойчивому режиму эксплуатации.

Износостойкость исследуемых КЭП при использовавшихся режимах испытаний выше износостойкости никелевых покрытий в 2 – 15 и более раз, конкретные значения этого параметра зависят от природы, размеров, количества и способа синтеза оксидов.

Для КЭП Ni-W<sub>x</sub>Mo<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub> вплоть до 2 тыс. циклов истирания имеет место период приработки, характеризующийся интенсивным увеличением номинальной площади контакта и, как следствие, снижением контактного давления. В этот период величина линейной интенсивности изнашивания  $I_L$  достигает  $2,2 \cdot 10^{-7}$ . В процессе дальнейших испытаний (до 9 тыс. циклов) по мере уменьшения контактного давления до 1 МПа наблюдается переход к режиму установившегося изнашивания, при котором величина интенсивности изнашивания снижается до  $I_L = 1 \cdot 10^{-9}$ . Для никелевого покрытия такой переход обнаружить не удастся. Интенсивность изнашивания на протяжении 9 тыс. циклов истирания практически не изменяется и составляет величину порядка  $1 \cdot 10^{-7}$ . При равных контактных давлениях порядка 1 МПа, установившихся после 4 тыс. циклов испытаний, интенсивность изнашивания КЭП составляет  $2 \cdot 10^{-9}$ , что в 50 раз ниже интенсивности изнашивания покрытия никеля. Значение  $I_L$  для КЭП и после 9 тыс. циклов продолжает снижаться при практически постоянном давлении, т.е. устанавливается стационарный режим трения, который характеризуется минимальным износом пары трения и постоянным значением коэффициента трения.

Глубина износа стали при трении по ней шарового индентора с покрытием из никеля в восемь раз превышает износ стали при трении по ней индентора с КЭП  $Ni-W_xMo_{1-x}O_3$ . Суммарный линейный износ пары трения КЭП  $Ni-W_xMo_{1-x}O_3$  – сталь при установившемся режиме изнашивания (2000 – 9000 циклов истирания) составляет 0,2 мкм, в то время как суммарный износ пары  $Ni$  – сталь – 18,6 мкм.

Сравнительные исследования процесса сухого трения показали, что если для никеля более характерен адгезионный механизм изнашивания, то для композитов – преимущественно абразивный, что приводит к значительно меньшему износу как покрытия, так и контртела.

UDK 621.81

## THE INFLUENCE OF PROCESSING CONDITIONS ON SURFACE LAYER PROPERTIES OF ANTIFRICTION CAST IRON GJS2131 PARTS

E.E. Feldshtein

*University of Zielona Gora, Poland;*

H. Golenbiovska

*State High Technical School in Leshno, Poland*

**Introduction.** The destruction processes of machines and equipment begins in the material surface layers [1]. The conditions of the contact areas of the team-worked elements influence on it. It is necessary to meticulously forming of surface layers properties, counteracted the destructive action of the machine work conditions on the material, from which the part is produced [2]. The usage durability of machine parts closely connects with the properties of the surface layer. Therefore, different technological and exploitation methods may be used to form these layers, based on the various methods, among them cutting process. The results of researches of the surface layers properties of parts produced from antifriction cast iron GJS2131 when turning by cutters from different tool materials are introduced below.

**Materials researched.** The purpose of the research was to define the tool material, which is possible to obtain the most suitable surface properties with the maintenance of shape dimension tolerances. EN-GJS2131 cast iron was been tested, which has high wear resistant and used in piston inserts and piston rings in combustion engines. It is a material designed by industrial factories producing mould parts, which widely used in the constructions of motor vehicles. The