

Н.И. Цынцару*, Ж.И. Бобанова*, Д.М. Кроитору*, В.Ф. Чебан**,
Г.И. Поштару**, А.И. Дикусар*

ВЛИЯНИЕ МНОГОСЛОЙНОСТИ И СМАЗКИ НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ СПЛАВОМ Fe-W

*Институт прикладной физики АНМ,

ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова, ashra_nt@yahoo.com

**Технический университет Молдовы,

бул. Штефана чел Маре, 180, г. Кишинев, MD-2009, Республика Молдова

Введение

Индукцированное соосаждение металлов группы железа с тугоплавкими металлами (W и Mo) (см., например, [1–3]) из цитратных растворов можно использовать в качестве эффективного метода получения покрытий, обладающих улучшенными коррозионными и трибологическими характеристиками [4–8]. В последнее время такие покрытия рассматриваются как альтернатива электролитическим хромовым в связи с тем, что экологические условия их получения являются более безопасными по сравнению с экологическими особенностями технологии получения электролитического хрома из токсичных электролитов [9].

Одна из особенностей этих Fe-W сплавов состоит в том, что, как правило, такие покрытия являются аморфными (нанокристаллическими) [3, 10–14]. Ранее были исследованы их механические свойства при осаждении из различных электролитов в интервале плотностей тока 10–350 мА/см² и температур осаждения 40–90°C (см., в частности, [3, 7, 9, 10, 14]). Максимальные значения микротвердости были получены для покрытий из цитратно-аммиачного электролита, осажденных при 70°C.

Материалы, известные как многослойные покрытия, в последние десятилетия также являются объектом многочисленных исследований. Такие материалы, состоящие из чередующихся наноразмерных слоев различных металлов и сплавов, обладают улучшенными физико-механическими, оптическими, электрическими, магнитными и магнитооптическими свойствами по сравнению с традиционными сплавами [15–20]. Многослойные покрытия микрометрических [20–23] и нанометрических размеров [23–28] могут быть получены электроосаждением.

Цель данной работы – изучение механических и трибологических свойств покрытий из сплавов железо-вольфрам в сравнении с хромовыми покрытиями при трении со смазкой, а также многослойных покрытий Fe-W/Cu при сухом трении.

Методика эксперимента

Сплавы Fe-W и Fe-W/Cu осаждали из электролитов в вариантах А и Б.

А). Электроосаждение Fe-W покрытий осуществляли из электролита следующего состава (г/л): сульфат железа (FeSO₄·7H₂O) – 55; вольфрамат натрия (Na₂WO₄·2H₂O) – 132; цитрат натрия (Na₃C₆H₅O₇) – 112; лимонная кислота (C₆H₈O₇) – 33. Полученный раствор доводили до pH 7,6 – 7,8 аммиаком. Плотность тока 1–5 А/дм².

Б). Электроосаждение Fe-W/Cu покрытий осуществляли из одной ванны – электролит А с добавлением сульфата меди (CuSO₄·5H₂O) концентрацией в 100 раз меньшей (по массе), чем сульфата железа. Полученный раствор доводили до pH 7. Осаждение проводили из ячейки с неразделенными анодным и катодным пространствами в гальваностатических условиях при 70 °С. Анодом служила пластина из нержавеющей стали. Толщина покрытий в зависимости от плотности тока осаждения изменялась в пределах ~ 8–15 мкм.

Покрытия на основе Fe-W и Fe-W/Cu наносили на два типа подложек. Для исследования механических и трибологических характеристик электроосаждение покрытий проводилось на механически полированную сталь (Ст3). Для поляризационных измерений в качестве подложки использовали медные электроды. Перед электроосаждением подложка обезжиривалась в ультразвуковой ванне с ацетоном, затем – в воде с мягким моющим средством и промывалась водой. После этого на нее наносился подслой никеля из электролита никелирования, содержащего NiCl₂·6H₂O 240 г/л + HCl 80 г/л в течение одной минуты.

Поляризационные кривые были получены из *электролита Б* в трехэлектродной ячейке с разделенным анодным и катодным пространством на потенциостате Parstat 2273, электродом сравнения служил насыщенный хлорсеребряный электрод, относительно которого измерялись значения потенциала. Поляризационные кривые снимались при развертке потенциала 2 мВ/сек на катоде из медной проволоки. На основе полученных поляризационных кривых (рис. 1) рассчитаны оптимальные токи осаждения меди и для сплавов Fe-W по предельному току диффузии. С помощью поляризационной кривой осаждения эмпирически подбирался гальваностатический режим осаждения. Электроосаждение многослойных покрытий проводили в импульсно-гальваностатическом режиме (см. таблицу). Плотность тока электроосаждения сплавов и плотность тока осаждения меди были постоянными во всех экспериментах. После периода осаждения меди (t_{Cu}) и сплава (t_{FeW}) использовали паузу ($t_{паузы}$) – рис. 2, таблица.

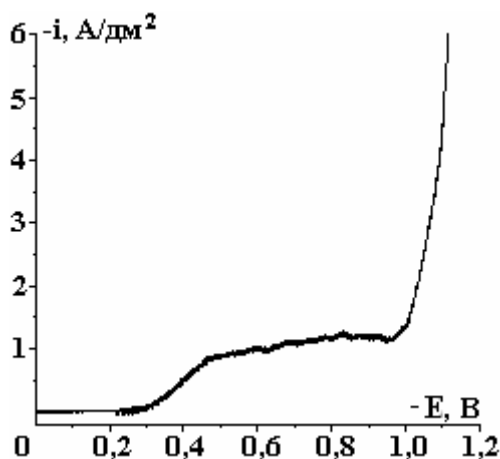


Рис. 1. Поляризационная кривая электроосаждения сплава Fe-W/Cu, полученная на плоском электроде из электролита Б

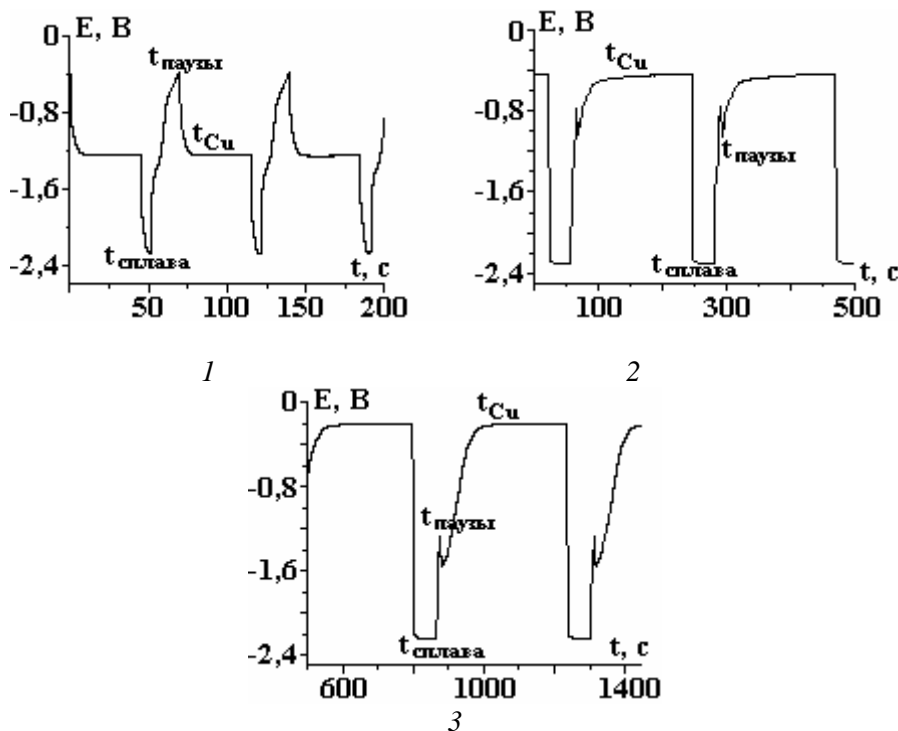


Рис. 2. Типичные кривые зависимости потенциала от времени при импульсно-гальваностатическом электроосаждении многослойных покрытий Fe-W/Cu для режимов 1–3. Потенциал указан без учета омической составляющей

Шероховатость поверхности осажденных покрытий исследовалась бесконтактной белой световой интерферометрией (WYKO NT 3300). Такая же методика использовалась для определения объема износа после испытаний на трение покрытий при сухом трении. Твердость определяли с помощью Nano-Hardness Tester, CSM.

Условия электроосаждения и шероховатость многослойных покрытий

Режим осаждения Fe-W/Cu	t_{Cu} , сек	i_{Cu} , А/дм ²	t_{Fe-W} , сек	$t_{наузы}$, сек	i_{Fe-W} , А/дм ²	Толщина слоев	R_a , мкм
1	45	0,1	6.8	19.5	2	~ 10 нм	0,98
2	180		34	10		~ 50 нм	2,01
3	360		68	10		~ 100 нм	0,09

Тестирование покрытий при сухом трении. Электролитические покрытия, осажденные на Ст.3, исследовались на трение и степень износа при сухом трении с помощью трибосистемы для определения износостойкости твёрдосмазочных покрытий по схеме «шарик по плоскости» («метод трения I»). Электроосажденные многослойные покрытия тестировали при следующих условиях: нормальной силе 10 Н, амплитуде перемещения контртела 200 мкм, частоте возвратно-поступательного движения 5 Гц, количестве циклов 50 000. Покрытия подвергались трению при осцилляции против твердо установленного противотела – шарика корунда (модуль упругости 300 ГПа) диаметром 10 мм. Все испытания выполнялись при температуре окружающей среды $23 \pm 2^\circ\text{C}$ и 50% относительной влажности. Покрытия были должным образом подготовлены до проведения испытаний на трение обезжириванием в ацетоне и этиловом спирте и просушке. После тестов покрытия очищались в ультразвуковой ванне в этаноле, чтобы удалить излишек продуктов износа перед исследованием профилей износа.

Тестирование покрытий на износ при наличии масел. Испытания проводили на лабораторной установке МВПД-1КПИ по методике [29]. Схема испытаний предусматривала изнашивание верхнего неподвижного цилиндрического образца (диаметром 10.04 мм и длиной рабочей части 30 мм) с покрытием Fe-W по плоской поверхности нижнего образца из закаленной стали 45 (HRC 46–47, размеры 110*50 мм), совершающего возвратно-поступательное движение (с частотой 280 двойных ходов/мин и длиной хода 100 мм) под нагрузкой 300 Н. Пары трения смазывались маслом “М – 10 G₂K”. Масло подавалось с помощью микродозатора с программным управлением, обеспечивающим точность его расхода и синхронность подачи в зону трения. Линейный износ образцов Fe-W и электролитического хрома в конце испытаний определяли по средней ширине площадки износа с помощью микроскопа ПМТ-3.

Для сравнения были определены трибологические характеристики покрытий Fe-W, осажденных из электролита А при плотности тока 1 А/дм², и электролитического хрома, осажденного при 55 А/дм² из стандартного электролита.

Результаты и их обсуждение

Исследование покрытий на износ при наличии масел. Ранее было показано [30], что электроосажденные сплавы железо-вольфрам можно получать в нанокристаллическом состоянии. Так, при концентрации вольфрама в покрытии выше 22–25% (ат.) размер зерна в нем становится меньше 10 нм, что должно приводить к изменению трибологических и механических свойств (рис. 3 и 4 [31]). Действительно, такой малый размер зерна дает увеличение твердости покрытий, и ее величина становится сравнимой или даже выше, чем твердость хромовых покрытий.

Но, как показали трибологические испытания железвольфрамовых покрытий при сухом трении и нагрузке 2Н, такие покрытия подвергаются трибоокислению в процессе трения (рис. 5), что, естественно, тормозит их применение. Как видно из рисунка, покрытия Fe-W претерпевают большой износ (более темный цвет на рисунке показывает большую глубину) из-за окисления поверхности [30].

Чтобы расширить возможное применение этих сплавов, нами были проведены исследования покрытий на основе Fe-W сплавов при трении в присутствии масел, а также в варианте многослойных покрытий с медью.

Один из методов уменьшения износа – это использование смазки. Характер поведения пар трения при наличии масел во многом зависит от способности масла проникать в места износа и оставаться там. В сравнении с износом без смазок доступ кислорода к месту контакта может быть значительно уменьшен при наличии масел, и этот факт оказывается крайне важным в случае пар трения с участием покрытий на основе железа [32].



Рис. 3. Влияние концентрации вольфрама в сплавах Co-W и Fe-W на размер блоков (зерна), электроосажденных на постоянном (DC) и импульсном (PC) токах электроосаждения. 1 – DC, pH 6,7; 2 – PC, pH 6,7; 3 – DC/PC, pH 8



Рис. 4. Нанотвердость, измеренная при различной нагрузке индентора на сплавах Fe-W, Co-W и Cr покрытиях. 1 – Fe-W; 2 – Co-W; 3 – хром

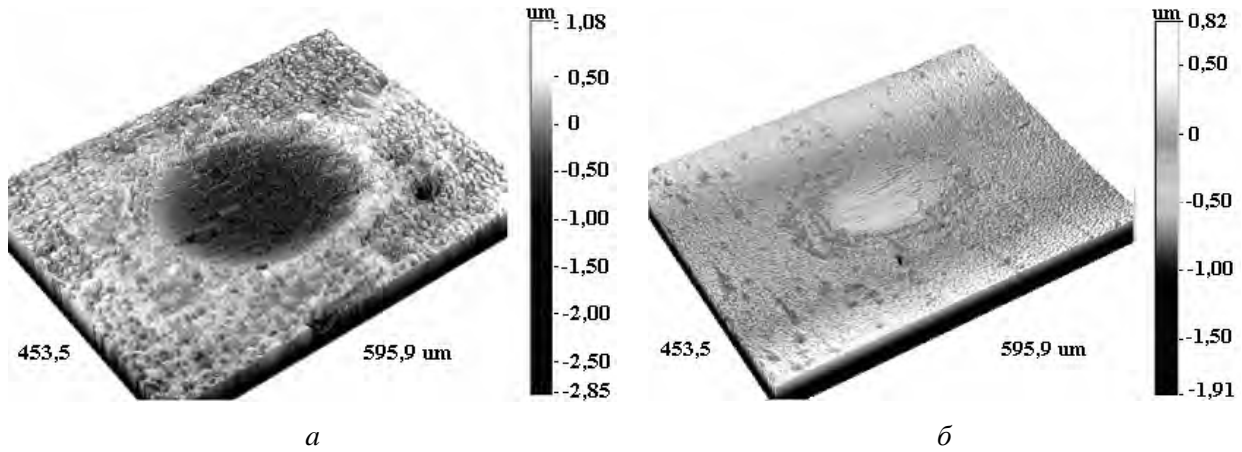


Рис. 5. 3D фото после сухого трения при 2 Н и 10 000 циклов электроосажденных покрытий: а – Fe-W (26 ат % W); б – Co-W (24 ат % W)

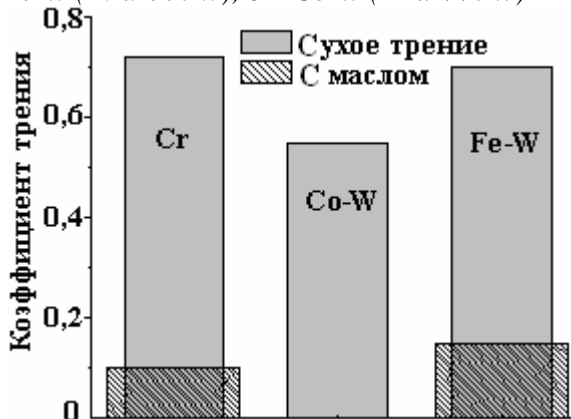


Рис. 6. Коэффициент трения электроосажденных покрытий Co-W, Fe-W и хрома при сухом трении и в присутствии масла

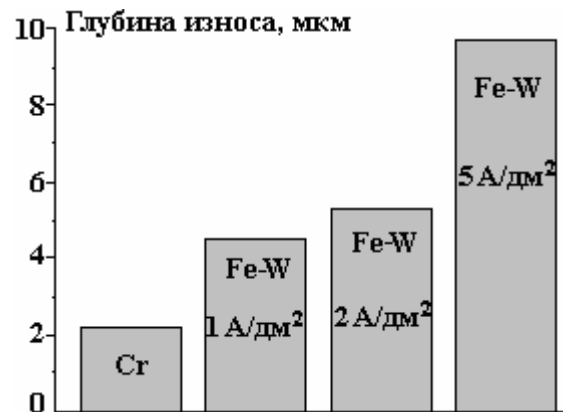


Рис. 7. Глубина износа электроосажденных Fe-W покрытий, полученных при различных плотностях тока, и покрытий электролитического Cr. Тестирование покрытий на трение производилось при наличии масла и нагрузке 300 Н (после 21000 циклов)

В связи с вышесказанным нами было исследовано поведение Fe-W покрытий при наличии масел с контртелом из стали 45. Действительно, при трении в присутствии масел происходит улучшение трибологических свойств железвольфрамовых покрытий. Коэффициент трения уменьшается при наличии масел, показывая тем самым проникновение смазки в место контакта (рис. 6). Однако измеренный коэффициент трения все же не так низок, как в случае хромовых покрытий. Это может быть связано с тем, что даже в присутствии масла в случае Fe-W покрытий образуются оксиды, повышающие коэффициент трения [32], что сказывается и на износных характеристиках (рис. 7).

Видно, что Fe-W сплавы, осажденные при различных плотностях тока, имеют глубину износа больше, чем для хромового покрытия (рис. 7). Причем большая глубина износа отмечается у покрытий Fe-W, электроосажденных при более высоких плотностях тока. Это объясняется несколько более высоким содержанием вольфрама при осаждении при низких плотностях. Таким образом, даже при трении в присутствии масел износ для Fe-W покрытий остается значительным, что связано, видимо, как с выбором масла для данной пары трения, так и с высокой нагрузкой, которая не позволяет достигать необходимого гидродинамического режима при данных условиях нагружения.

Исследование многослойных покрытий Fe-W/Cu на износ при сухом трении. При анализе трибологических свойств полученных многослойных Fe-W/Cu покрытий сравнение проводилось с покрытиями сплавами Fe-W, осажденными при 1 А/дм^2 .

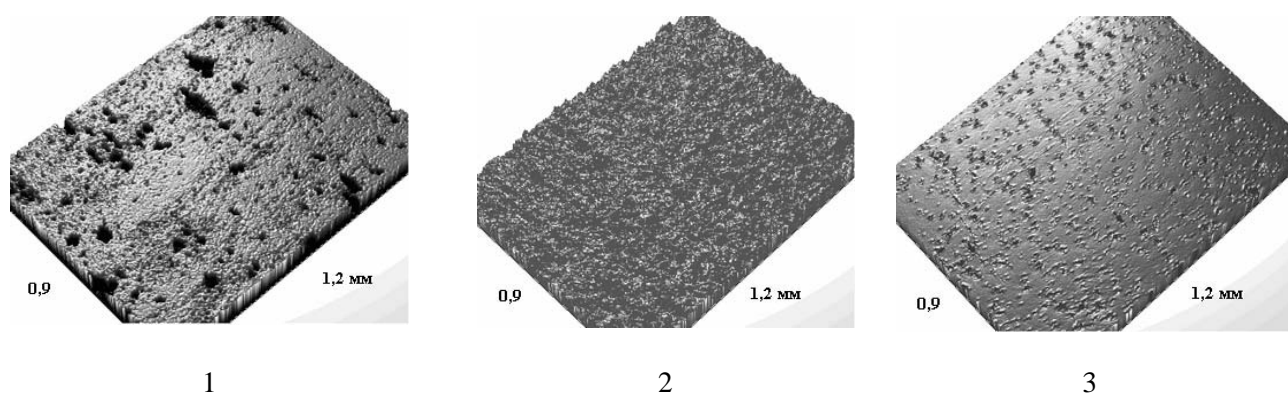


Рис. 8. 3D фото поверхности многослойных покрытий Fe-W/Cu для режимов электролиза 1 – 3 и толщиной в многослойном покрытии слоя, нм: 10 (1), 50 (2), 100 (3)

Изучение поверхности многослойных электроосажденных покрытий показало, что шероховатость достигает значительных величин (рис. 8 и таблица), что обусловлено, видимо, неоднородностью получаемых слоев и ростом размеров зерен при осаждении слоев с маленькой толщиной. В связи с этим высокая шероховатость наблюдается для индивидуальных слоев с толщиной меньше 100 нм. При 100 нм наблюдается самая низкая шероховатость, что, видимо, связано с более однородным осаждением слоев меди и сплава железо-вольфрам.

Достаточно высокая шероховатость и неоднородность покрытий, конечно, должны сказываться на трибологических и механических свойствах. Так, при проведении испытаний многослойных покрытий на сухое трение при 10Н и для 50000 циклов полученные лунки износа зависят от начальной шероховатости покрытий (рис. 9). В среднем глубина износа при данной нагрузке составляла $\sim 6 \text{ мкм}$ при слоях толщиной 10 нм, что практически одинаково с величиной глубины износа для чистых железвольфрамовых покрытий, осажденных при 1 А/дм^2 . При этом следует учесть, что для покрытий, шероховатость которых большая, как, например, в случае 50 нм толщины слоя, о точности значения глубины износа говорить трудно (рис. 9). Тем не менее можно отметить, что слои толщиной меньше 50 нм не дают особого улучшения износных характеристик, связанных с трибоокислением железвольфрамовых покрытий при сухом трении.

Так, объем износа для многослойных покрытий с величиной индивидуальных слоев 10 нм равен износу для чистых железвольфрамовых покрытий (рис. 10). С увеличением толщины индивидуальных слоев наблюдается уменьшение объема износа (рис. 10) с минимумом износа при толщине слоев при 50 нм.

На рис. 11 приведено изменение коэффициента трения полученных многослойных покрытий при 10 Н и соответствующем количестве циклов. Как видно, для образца, осажденного со слоями $\sim 50 \text{ нм}$, наблюдается некоторое уменьшение коэффициента трения по сравнению с другими покрытиями. Этот факт коррелирует с более низким значением износа, полученным именно для этих покрытий.

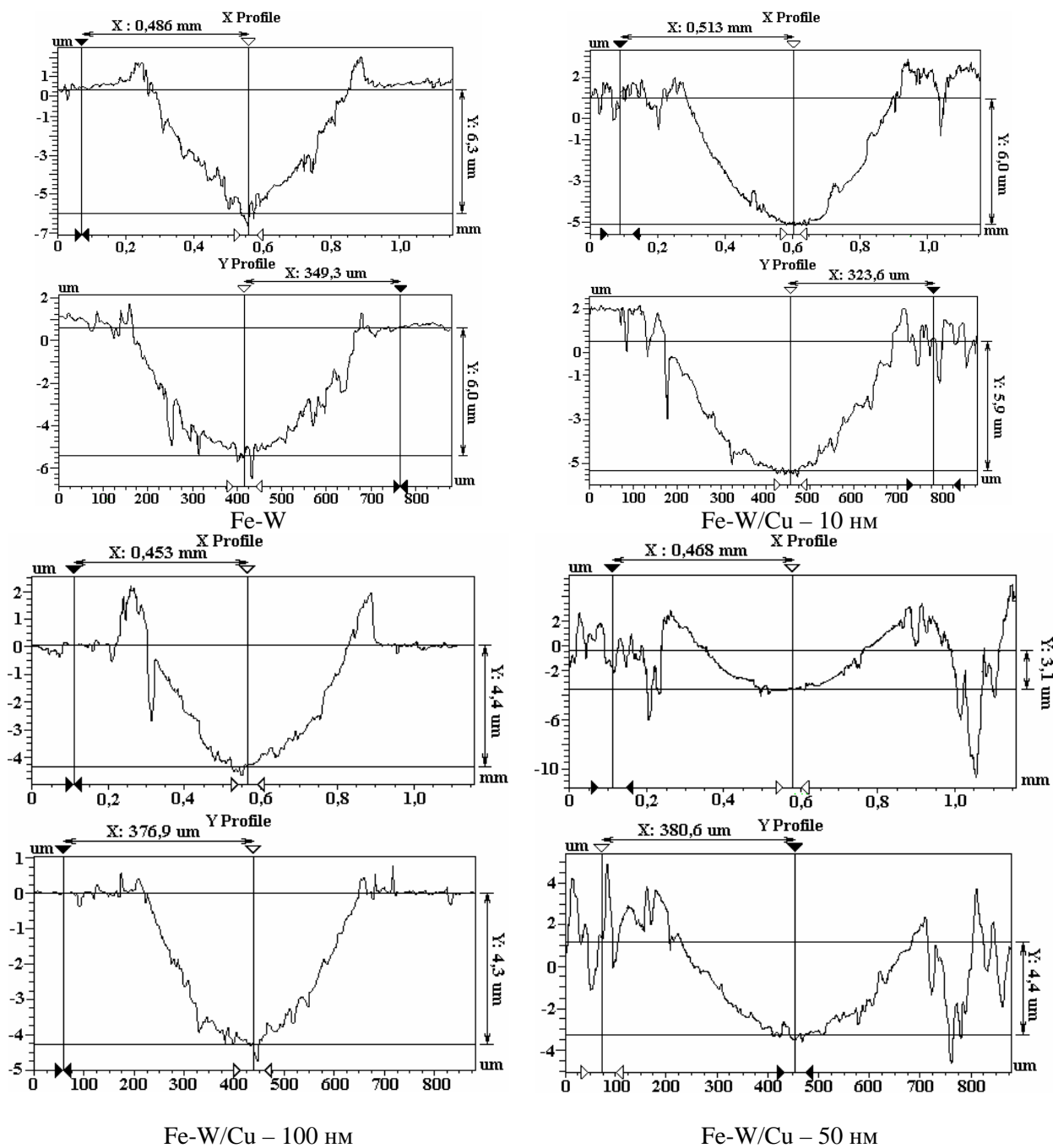
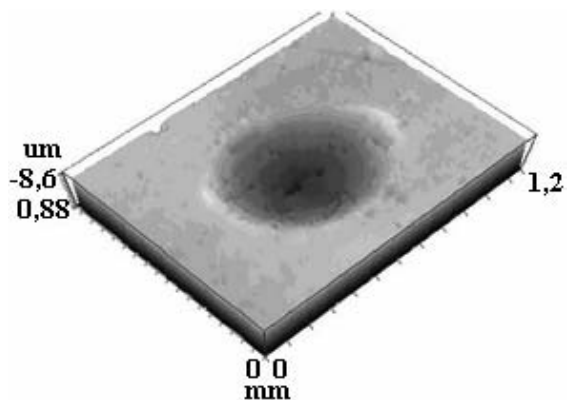
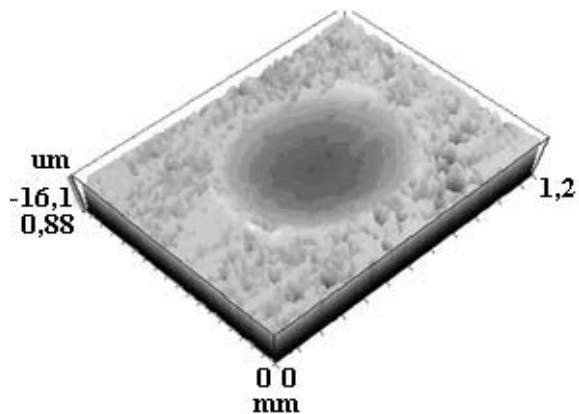


Рис. 9. Профили многослойных покрытий после износа, измеренные в различных направлениях для режимов осаждения 1–3 (таблица), и покрытия Fe-W



Fe-W - $707 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$



Fe-W/Cu - 10 нм - $717 \cdot 10^3 \text{ мкм}^3$

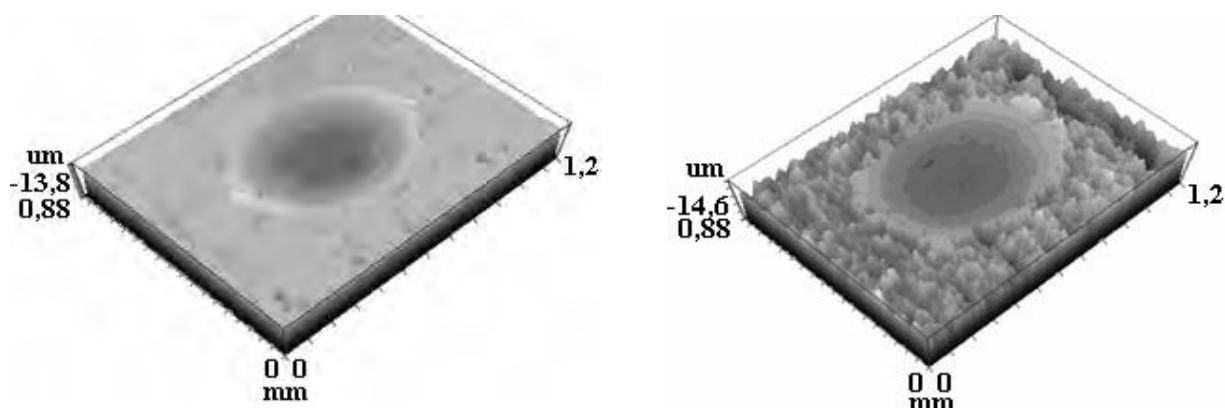


Рис. 10. 3D изображение поверхности многослойных покрытий и чистого Fe-W после износа

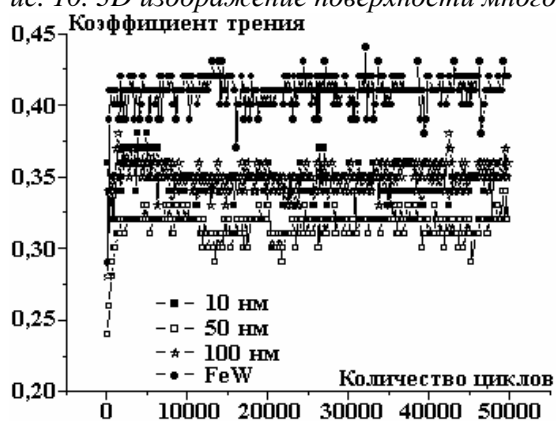


Рис. 11. Зависимость коэффициента трения от количества циклов при сухом трении «шарик по плоскости» при 10 Н для многослойных покрытий Fe-W/Cu и Fe-W покрытий

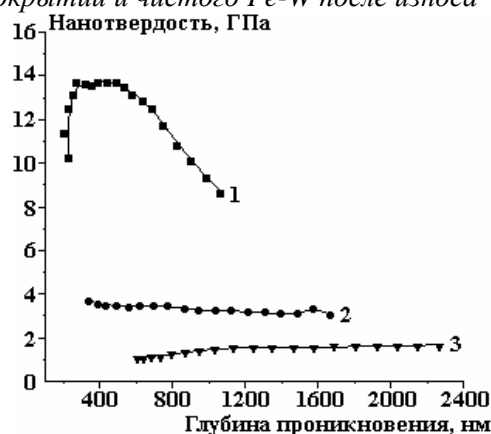


Рис. 12. Твердость, измеренная НМЦ методом для 1–3 режимов осаждения покрытий (см. таблицу) с толщиной слоя, нм: 1–50; 2 – 100; 3–10. Остальные пояснения в тексте

Измерение твердости. Исследование механических свойств, в частности твердости осажденных многослойных покрытий, было проведено многоциклическим методом (НМЦ) на нанотвердомере. Используемый метод позволяет оценить влияние различных нагрузок индентора (соответственно при этом достигается различная глубина проникновения) на твердость покрытий. Тем самым можно в одном месте покрытия оценить, как меняется твердость покрытия по толщине электроосадка в отличие от моноиндентирования, проводимого в нескольких местах. На рис. 12 представлены результаты исследования НМЦ методом нанотвердости многослойных покрытий, осажденных при режимах электролиза 1–3 (см. таблицу). Видно, что наличие меди резко уменьшает твердость многослойных покрытий, особенно в случае слоев толщиной 10 нм. В меньшей степени это касается твердости, полученной для слоев толщиной 50 нм. Значения твердости этих покрытий практически идентичны твердости Fe-W покрытий (рис. 4). При этом следует принять во внимание, что наличие высокой шероховатости затрудняет при этом оценку твердости. Данные на рис. 12 приведены для более ровного участка (рис. 13,а), на более шероховатых оценка твердости невозможна (рис. 13,б).

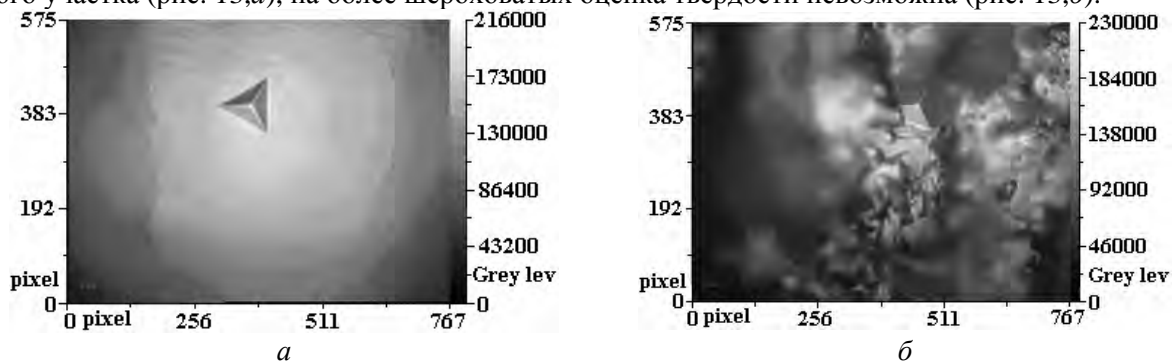


Рис. 13. Микроструктура отпечатков и прилегающих зон после индентирования многослойных покрытий методом НМЦ: а, б – режим электролиза 2 (отпечатки в разных местах покрытия)

Заклучение

Результаты настоящего исследования показывают принципиальную возможность расширения применения нанокристаллических электролитических сплавов Fe-W. При трении в присутствии смазки удастся снизить коэффициент трения и возможности проникновения кислорода к поверхности трения, тем самым улучшить износные характеристики Fe-W покрытий в сравнении с сухим трением, где преобладает трибоокисление поверхности.

Изучение трибологических и механических свойств многослойных покрытий FeW/Cu электроосаждением из одной ванны приводит в определенных условиях к улучшению износных характеристик покрытий даже при сухом трении и достаточно высокой нагрузке в 10 Н, а также позволяет сохранить твердость этих покрытий, несмотря на присутствие меди в случае индивидуальных слоев толщиной около 50 нм.

Работа выполнена в рамках Государственной программы Академии наук Молдовы Nr.09.836.05.06F, а также в рамках программы FP7-PEOPLE-2009-IRSES – Proposal n° 247659. Авторы выражают благодарность др. Х. Йе и инж. М. Питерсу (Департамент МТМ Католического Университета, Левен, Бельгия) за ценные советы, высказанные при обсуждении данных трибологических измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Podlaha E.J., Landolt D. Induced codeposition I. An experimental investigation of Ni-Mo Alloys // J. Electrochem. Soc. 1996. V. 143. P. 885.
2. Podlaha E. J., Landolt D. Induced codeposition III. Molybdenum alloys with Nickel, Cobalt, and Iron // J. Electrochem. Soc. 1997. V. 144. P. 1672.
3. Donten M., Cesiulis H., Stojek Z. Electrodeposition and properties of Ni-W, Fe-W and Ni-Fe-W amorphous alloys. A Comparative Study // Electrochim. Acta, 2000, v.45, N. 20, P. 3389.
4. Bobanova Zh.I., Dikusar A.I., Cesiulis H., Celis J.P., Tsyntsaru N.I., Prosycevas I. Micromechanical and tribological properties of nanocrystalline coatings electrodeposited from citrate-ammonia solutions // Russian J. Electrochem. 2009. V. 45. No. 8. P.895.
5. Brenner A. Electrodeposition of Alloys, Volume II: Principles and practice, practical considerations and specific information // Electrodeposition of Alloys. New York, Academic Press Inc. 1963.
6. Васько А.Т. Электрохимия молибдена и вольфрама. Киев, 1977.
7. Бондарь В.В., Гринина В.В., Павлов В.Н. Электроосаждение двойных сплавов // Итоги науки и техники. Серия Электрохимия. М., 1980. 329 с.
8. Захаров А.А., Вячеславов П.М. Электролитическое осаждение сплавов. Л., 1977. С. 92.
9. Capel H., Shipway P.H., Harris S.J. Sliding wear behaviour of electrodeposited cobalt-tungsten and cobalt-tungsten-iron alloys // Wear. 2003. V. 255. P. 917.
10. Гамбург Ю.Д., Захаров Е.Н., Горюнов Г.Е. Электрохимическое осаждение, структура и свойства сплава железо-вольфрам // Электрохимия. 2001. Т. 37 № 7. С. 789.
11. Захаров Е.Н., Гамбург Ю.Д. Некоторые закономерности осаждения сплава железо-вольфрам из цитратно-аммиакатных растворов // Электрохимия. 2005. Т. 41. № 8. С. 1001.
12. Захаров Е.Н., Гамбург Ю.Д., Горюнов Г.Е., Ляхов Б.Ф. Влияние катионов щелочных металлов и аммония на процесс осаждения и структуру сплавов железо-вольфрам // Электрохимия. 2006. Т. 42. № 8. С. 993.
13. Гамбург Ю.Д., Захаров Е.Н. Влияние водорода на аморфизацию сплавов железо-вольфрам, получаемых при электрохимическом синтезе // Электрохимия. 2008. Т. 44. № 6. С. 792.
14. Вячеславов В.П. Электрохимическое осаждение сплавов. Л.: Машиностроение, 1968. С. 60.
15. Vaibich M.N., Broto J.M., Fert A., Nguyen Van Dau F., Petroff F., Eitenne P., Creuzet G., Friederich A. and Chazelas J. Giant magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr magnetic superlattices // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. P. 2472.
16. Ludwig K., Hauch J., Mattheis R., Barholz K.U., Rieger G. Adapting GMR sensors for integrated devices // Sens. Actuators A, 2003. V. 106. P. 15.
17. Zhang X., Misra A., Wang H., Shen T.D., Nastasi M., Mitchell T. E., Hirth J.P., Hoagland R.G., Embury J.D. Enhanced hardening in Cu/330 stainless steel multilayers by nanoscale twinning // Acta Mater. 2004. V. 52. P. 995.
18. Anderson P.M., Bingert J.F., Misra A., Hirth J.P. Rolling Texture in nanoscale Cu/Nb multilayers // Acta Mater. 2003. V. 51. P. 6059.
19. Liu Z.J., Vyas A., Lu Y.H., Shen Y.G. Structural properties of sputter-deposited CN_x/TiN multilayer films // Thin Solid Films. 2005. V. 479. P. 31.

20. Haseeb A.S.M.A., Celis J.P., Roos J.R. Fretting wear of metallic multilayer films // *Thin Solid Films* 2003. V.444. P.199.
21. Kirilova I., Ivanov I., Rashkov St. Anodic behaviour of one and two-layer coatings of Zn and Co electro-deposited from single and dual baths // *J. Appl. Electrochem.* 1998. V. 28. P. 637.
22. Jensen J.D., Gabe D.R., Wilcox G.D. The practical realisation of zinc-iron CMA coatings // *Surf. Coat. Technol.* 1998. V.105. P. 240.
23. Chawa G., Wilcox G.D., Gabe D.R. Compositionally modulated Zinc alloy coatings for corrosion protection // *Trans IMF.* 1998. V.76. P. 117.
24. Kalantary M.R., Wilcox G.D., Gabe D.R. Alternative layers of zinc and nickel electrodeposited to protect steel // *Br. Corrosion J.* 1998. V. 33. P. 197.
25. Herman A.M., Mansour M., Badri V. Deposition of smooth Cu(In,Ga)Se₂ films from binary multilayers // *Thin Solid Films*, 2000. V.361–362. P. 74.
26. Pasa A.A., Schwarzacher W. Electrodeposition of thin films and multilayers on silicon // *Phys. Stat. Sol.* 1999. V.173. P. 73.
27. Toth Kadar E., Peter L., Becsei T., Schwarzacher W. Preparation and magnetoresistance characteristics of electrodeposited Ni-Cu alloys and Ni-Cu/Cu multilayers // *J. Electrochem. Soc.* 2000. V.147. P.3311.
28. Jyoko Y., Kashiwabara S., Hayashi Y., Schwarzacher W. Preparation of Perpendicular Magnetization Co/Pt nanostructures by electrodeposition // *Electrochem. Solid Stat. Lett.* 1999. V. 2. P. 67.
29. Аждер В.В., Дроздов Ю.Н., Комендант В.И. и др. Основные закономерности трения, смазки и заедания при ускоренном и замедленном циклическом скольжении // *Трение и износ.* 1988. Т. 9. № 4. С. 581.
30. Tsyntsar N., Bobanova J., Ye X., Cesiulis H., Dikusar A., Prosycevas I., Celis J.-P. Iron-Tungsten alloys electrodeposited under direct current from citrate-ammonia plating baths // *Surface&Coatings Technology*, 2009. V. 203, Issues 20–21. P. 2983.
31. Tsyntsar N., Cesiulis H., Bobanova J., Croitoru D., Dikusar A., Celis J.-P. Electrodeposition and tribological characterization of nanostructured Co-W and Fe-W alloys // *Proceedings of the International Conference BALTTTRIB'2009, Kaunas, 19–21 November, 2009.* P. 59.
32. Czupryk W. Frictional transfer of iron in oxidative wear conditions during lubricated sliding // *Wear* 2000, V. 237. P. 288.

Поступила 21.04.10

Summary

The ways of expanding the application of nanocrystalline electrolytic FeW alloys in the presence of multilayers and of an oil lubricant have been investigated. It is shown that the friction in the presence of lubricants can reduce the coefficient of friction and the penetration of oxygen into sliding pairs, thereby improving wear resistance behaviour of FeW coatings as compared to their behaviour at dry friction, where the surface tribo-oxidation is the dominating process. The electrodeposition of multilayer coatings FeW/Cu from a single bath is shown to be possible, and their tribological and mechanical properties are investigated. It is demonstrated that multilayers also lead to an improvement of wear resistance characteristics of the coatings, even at dry friction and a relatively high normal load of 10 N.
