

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ НИКЕЛЯ, ФОСФОРА И СЕРЫ

С. С. ПЕРЕВОЗНИКОВ¹⁾, Л. С. ЦЫБУЛЬСКАЯ¹⁾, Т. В. ГАЕВСКАЯ¹⁾

¹⁾Учреждение БГУ «Научно-исследовательский институт физико-химических проблем»,
ул. Ленинградская, 14, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Методом электрохимического осаждения из кислого электролита никелирования с использованием фосфористой кислоты в качестве поставщика фосфора получены покрытия Ni – P, при дополнительном введении сахарина – покрытия Ni – P – S. Показано, что концентрация фосфористой кислоты, наличие сахарина в электролите никелирования и катодная плотность тока оказывают существенное влияние на химический состав покрытия, его структуру и морфологию, а также на физико-механические свойства. При увеличении содержания фосфора до 21,5 ат. % в покрытии Ni – P происходит трансформация его структуры из поликристаллической с ярко выраженными пирамидальными кристаллитами в аморфную с узелковой структурой и сглаживание микрорельефа поверхности. Наиболее высокие значения микротвердости, износостойкости, прочности микросварных соединений характерны для аморфно-кристаллических (11,7 ат. %) и аморфных (21,5 ат. %) покрытий Ni – P, а также для поликристаллических покрытий, содержащих одновременно фосфор (5,5 ат. %) и серу (0,2 ат. %).

Ключевые слова: электрохимически осажденные покрытия; структура; морфология; микротвердость; износостойкость; микросварных соединений.

THE STUDY OF STRUCTURE AND PROPERTIES OF ELECTRODEPOSITED COATINGS ON THE BASE OF NICKEL, PHOSPHORUS AND SULFUR

S. S. PEREVOZNIKOV^a, L. S. TSYBULSKAYA^a, T. V. GAEVSKAYA^a

^aResearch Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University,
Leningradskaya street, 14, 220030, Minsk, Republic of Belarus

Ni – P coatings were obtained by electrochemical deposition from acid electrolyte of nickel plating containing phosphoric acid as phosphorus supplier. Adding of saccharine to electrolyte led to formation of Ni – P – S coatings. It was shown that varying cathodic current density and phosphoric acid and saccharine concentrations effects dramatically on composition, structure, surface morphology

Образец цитирования:

Перевозников С. С., Цыбульская Л. С., Гаевская Т. В. Исследование структуры и свойств электрохимически осажденных покрытий на основе никеля, фосфора и серы // Вестн. БГУ. Сер. 2, Химия. Биология. География. 2016. № 3. С. 21–28.

For citation:

Perevoznikov S. S., Tsybulskaya L. S., Gaevskaya T. V. The study of structure and properties of electrodeposited coatings on the base of nickel, phosphorus and sulfur. *Vestnik BGU. Ser. 2, Khimiya. Biol. Geogr.* 2016. No. 3. P. 21–28 (in Russ.).

Авторы:

Сергей Сергеевич Перевозников – научный сотрудник лаборатории химии тонких пленок.

Людмила Сергеевна Цыбульская – кандидат химических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории химии тонких пленок.

Татьяна Васильевна Гаевская – кандидат химических наук, доцент; директор.

Authors:

Sergey Perevoznikov, researcher at the laboratory of thin films chemistry.

perevoznikovs@yandex.ru

Liudmila Tsybulskaya, PhD (chemistry); leading researcher at the laboratory of thin films chemistry.

tsybul@bsu.by

Tat'yana Gaevskaya, PhD (chemistry), docent; director.

and physical and mechanical properties of coatings. Increasing of phosphorus content in coatings to 21,5 at. % leads to smooth surface morphology and transformation of coating structure from polycrystalline with pronounced pyramidal crystallites to amorphous with nodular structure. The highest values of microhardness, wear resistance and strength of micro welded connections were observed for amorphous-crystalline (11,7 at. %) and amorphous (21,5 at. %) Ni – P coatings and for polycrystalline coatings containing phosphorus (5,5 at. %) and sulfur (0,2 at. %) simultaneously.

Key words: electrodeposited coatings; structure; morphology; microhardness; wear resistance; micro welded connections.

Электрохимически осажденные покрытия Ni – P представляют значительный интерес для таких отраслей промышленности, как микроэлектроника, приборостроение, космическая техника и др. Благодаря наличию в составе данных покрытий фосфора, они обладают комплексом полезных физико-механических, электрических и коррозионно-химических свойств [1–5]. Химически осажденные покрытия Ni – P широко используются в микроэлектронике при производстве корпусов интегральных микросхем, в приборостроении – при изготовлении контактов для измерительных приборов. Однако метод химического осаждения покрытия Ni – P не является технологичным из-за высокой температуры проведения процесса (90–95 °C) и низкой скорости осаждения покрытия, которая уменьшается по мере убыли концентрации основных компонентов и накопления продуктов реакции; ввиду нестабильности раствора (может произойти его спонтанное каталитическое разложение в объеме); из-за невозможности автоматизации процесса. При химическом осаждении покрытий Ni – P не удается в широком диапазоне изменять содержание в них фосфора: из кислых гипофосфитных растворов оно составляет 13–18 ат. %, из щелочных – не превышает 7–13 ат. %. Получить покрытие Ni – P с меньшим или большим содержанием фосфора химическим способом не удается.

Всех вышеперечисленных недостатков лишен процесс электрохимического осаждения покрытия Ni – P. Он осуществляется при более низкой температуре, позволяет осаждать покрытия с достаточно высокой скоростью и варьировать содержание в них фосфора в широком диапазоне [4]. Кроме того, электрохимический метод дает возможность модифицировать состав покрытия Ni – P посредством введения в электролит никелирования серосодержащих соединений (сахарин, тиомочевина, хлорамин Б и др.), что приводит к включению серы от 0,02 до 0,5 ат. % и формированию покрытий Ni – P – S. В работах [4, 5] исследовано влияние фосфора и серы на коррозионно-электрохимическое поведение изучаемых покрытий в нейтральной хлоридсодержащей среде.

Надежность изделий приборостроения и микроэлектроники в значительной степени определяется такими свойствами покрытий, как износостойкость и коррозионная стойкость, микротвердость и способность к пайке, а также качеством сварки внутренних проволочных межсоединений, электрически связывающих контактные площадки кристаллов интегральных микросхем с золочеными контактными площадками корпуса или платы. На долю микросварных соединений приходится до 30–60 % отказов изделий. Обусловлено это тем, что при использовании золотых покрытий в местах соединения Al – Au образуются энергетически неустойчивые интерметаллиды, что и приводит к разрушению контактов. Альтернативой золотому покрытию по вышеуказанным параметрам могут служить химически и электрохимически осажденные покрытия Ni – В [6, 7]. В литературе отсутствуют сведения о возможности получения надежных и прочных сварных соединений алюминиевой проволоки с электрохимически осажденными покрытиями Ni – P и Ni – P – S, нет также информации о влиянии серы на структуру и триботехнические свойства покрытий.

Цель настоящей работы – исследование влияния структуры и морфологии формируемых покрытий на основе никеля, фосфора и серы на их износостойкость и микротвердость, а также на эффективность ультразвуковой микросварки алюминиевых проводников с электрохимически осажденным покрытием, выявление факторов, влияющих на качество межсоединений.

Методика эксперимента

Покрытия Ni – P и Ni – P – S осаждали электрохимическим методом из раствора следующего состава (г/дм³): NiSO₄ · 7H₂O – 180; NiCl₂ · 6H₂O – 10; H₃PO₄ – 10; KH₂PO₄ – 14; H₃PO₃ – 0,5...30; сахарин – 0...2; pH составляла 2. Никелевые покрытия осаждали из электролита аналогичного состава, но не содержащего источника фосфора – фосфористой кислоты. В качестве анодов использовали пластины из никеля марки НПА-1. Подложкой служила медная фольга размером 25 × 25 мм. Осаждение покрытий проводили в термостатируемой ячейке (60 ± 2 °C) при вертикальном колебании катода с частотой 30 мин⁻¹. pH электролита в процессе осаждения поддерживали на одном уровне с помощью H₂SO₄. Для определения содержания фосфора в покрытии Ni – P его растворяли в горячей концентрированной азотной кислоте и находили колориметрически – по образованию фосфорно-ванадиево-молибденового комплекса с применением фотоколориметра КФК-2. Химический состав покрытия также устанавливали путем энергодисперсионного анализа с помощью рентгеноспектрального микроанализатора при проведении

электронно-микроскопического исследования поверхности покрытия на основе никеля, фосфора и серы с использованием растрового электронного микроскопа Leo-1455 VP. Структуру и фазовый состав покрытия изучали рентгенодифракционным методом на дифрактометре HZG-4A (*Carl Zeiss, Jena, Germany*), применяя монохроматизированное CoK_α -излучение в условиях прецизионной съемки. Триботехнические испытания проводили в режиме трения без смазочного материала на трибометре [8], работающем по схеме возвратно-поступательного движения торцевой поверхности цилиндрического образца по контртелу со скоростью 0,1 м/с при контактном давлении 1 МПа. В качестве контртела использовали пластину из закаленной углеродистой стали У8 (800 HV 30). Потерю массы образцов определяли путем взвешивания на аналитических весах АДВ-200М. Погрешность измерения массы составляла 0,05 мг, путь трения – 1200 м. Разварку микросварных соединений типа «клин – клин» осуществляли на универсальной полуавтоматической установке ЭМ-4320У. При оценке свариваемости покрытий предварительно были определены оптимальные параметры стабильной микросварки на кремниевой пластине при использовании проволоки из Al диаметром 25 мкм.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Электрохимический метод позволяет осаждать покрытия Ni – P с содержанием фосфора в широком диапазоне – от 1,5 до 21,5 ат. %. На рис. 1 представлены зависимости содержания фосфора в покрытиях Ni – P и Ni – P – S от концентрации фосфористой кислоты ($[\text{H}_3\text{PO}_3]$) в электролите и катодной плотности тока (i), полученные в отсутствие и в присутствии сахарина (1 г/дм³). В отсутствие сахарина с увеличением $[\text{H}_3\text{PO}_3]$ до 8–12 г/дм³ содержание фосфора в покрытии заметно растет и достигает предельных значений, составляющих 21,5 ат. % при $[\text{H}_3\text{PO}_3] = 18$ г/дм³ и более. При увеличении катодной плотности тока от 1 до 4 А/дм² происходит снижение содержания фосфора в покрытии от 21,5 до 16,3 ат. %, дальнейшее ее увеличение оказалось нецелесообразным, так как не обеспечивается получение качественного покрытия: на краях и кромках подложки появляются дендриты. В присутствии сахарина происходит включение серы в покрытие на уровне $0,20 \pm 0,02$ ат. %. При этом процесс включения фосфора в покрытие заметно тормозится и максимальное его содержание составляет не более 7 ат. % при $[\text{H}_3\text{PO}_3] = 18$ г/дм³ и $i = 1$ А/дм². Увеличение катодной плотности тока от 1 до 4 А/дм² приводит к снижению содержания фосфора в покрытии от 7,0 до 5,0 ат. %, которое при дальнейшем росте i до 8 А/дм² остается неизменным (см. рис. 1). Скорость осаждения покрытий Ni – P и Ni – P – S мало зависит от содержания фосфористой кислоты, а также наличия сахарина в электролите и составляет 21 ± 1 мкм/ч при плотности тока 3 А/дм².

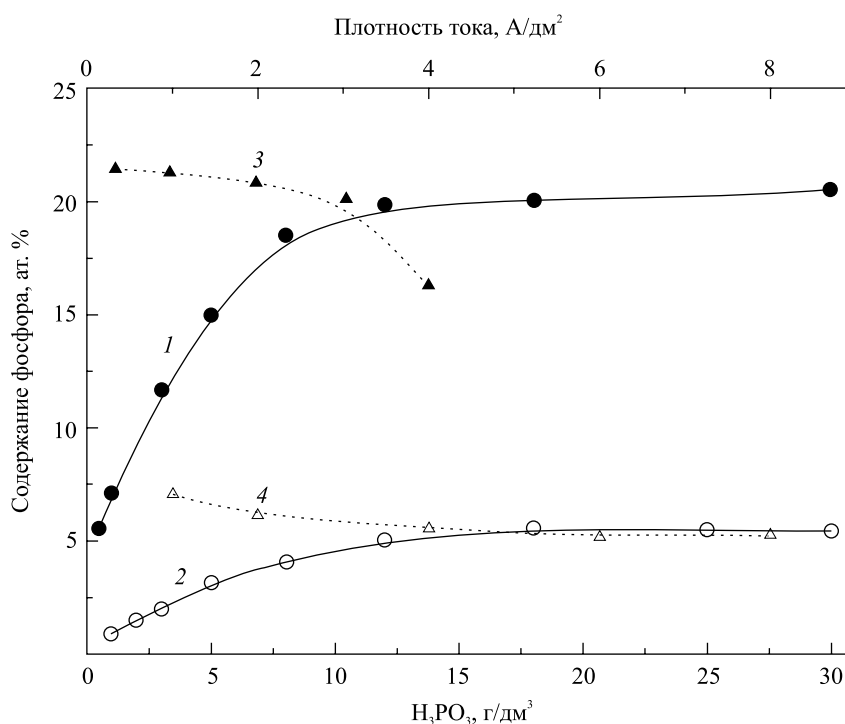


Рис. 1. Зависимости содержания фосфора в покрытиях Ni – P, осажденных в отсутствие (1, 3) и в присутствии (2, 4) сахарина, от концентрации фосфористой кислоты в электролите при $i = 3$ А/дм² (1, 2) и от катодной плотности тока при $[\text{H}_3\text{PO}_3]$, равной 18 г/дм³ (3, 4)

Было проведено исследование способности свежесажженных покрытий к ультразвуковой микро-сварке с алюминиевым проводником. Качество сварки определяли по измерению силы отрыва приваренной алюминиевой проволоки, а также виду разрушения микросварных соединений (табл. 1). Типичные микросварные соединения типа «клин – клин» проводников круглого сечения приведены на рис. 2.

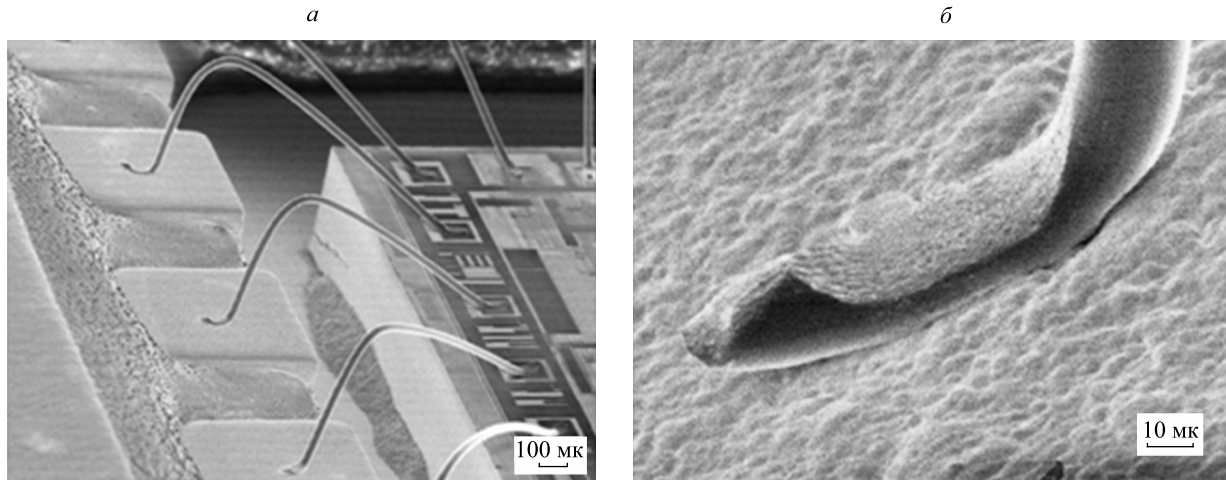


Рис. 2. Микрофотографии сварных соединений типа «клин – клин» с алюминиевой проволокой с нанесенным покрытием при увеличении 500× (а) и 5000× (б)

Таблица 1

Прочность микросварных соединений и шероховатость поверхности свежесажженных покрытий Ni, Ni – S, Ni – P и Ni – P – S

Покрытие	Концентрация металлоида		Усилие отрыва, г	Шероховатость (R_a), мкм	Качество сварки
	P, ат. %	S, ат. %			
Ni	–	–	3–4	0,267	Нестабильная*
Ni – S	–	0,2	8–9	0,146	Стабильная
Ni – P	1,5	–	5–6	0,242	Нестабильная*
Ni – P	5,5	–	6–8	0,190	Стабильная
Ni – P	11,7	–	8–10	0,163	Стабильная
Ni – P	21,5	–	9–11	0,124	Стабильная
Ni – P – S	5,5	0,2	8–11	0,155	Стабильная

*Сварка происходит, но наблюдается отслаивание соединения на границе контакта проволоки с покрытием.

Из таблицы видно, что для свежесажженных никелевых покрытий, не содержащих фосфор и серу, а также для покрытий Ni – P с малым содержанием фосфора (1,5 ат. %) характерны небольшие значения усилий отрыва (3–6 г), в ряде случаев было зафиксировано отслаивание межсоединений на границе контакта проволоки с покрытием. Стабильная и качественная сварка отмечается для свежесажженных покрытий Ni – S, Ni – P и Ni – P – S, причем с ростом содержания фосфора в покрытии и уменьшением коэффициента шероховатости поверхности сформированного покрытия усилие отрыва приваренной проволоки возрастает до 8–11 г и обеспечивается стабильная сварка.

Для объяснения улучшения качества микросварных соединений никелевых покрытий, содержащих фосфор и серу, было проведено исследование влияния концентрации неметаллических компонентов в никелевой матрице на структуру покрытия и морфологию поверхности. По данным рентгенофазового анализа, никелевое покрытие, осаждаемое в отсутствие фосфористой кислоты и сахарина, имеет поликристаллическую структуру с гранецентрированной кубической (ГЦК) решеткой (параметр решетки $a = 0,3524$ нм) с незначительным уширением дифракционных линий ($\beta_{222} = 5,1 \cdot 10^{-3}$ рад). Для никелевого покрытия характерна текстура с преимущественным расположением кристаллографических плоскостей {100} параллельно плоскости покрытия (рис. 3). Внедрение небольших количеств фосфора в никель (1,5 ат. %) приводит к уменьшению a до 0,3520 нм, перераспределению интенсивностей между рефлексами 111 ($2\theta = 52,2$ град), 200 ($2\theta = 61,1$ град) и 220 ($2\theta = 91,8$ град) и увеличению физического уширения дифракционных линий до $\beta_{222} = 24,9 \cdot 10^{-3}$ рад (см. рис. 3). При этом $\beta \sim \text{tg}\theta$,

что указывает на большое количество дефектов кристаллической решетки (дислокации, вакансии, примесные атомы), присутствующих в осажденном покрытии. Уменьшение параметра решетки никеля при соосаждении фосфора свидетельствует о формировании твердого раствора замещенного типа. При увеличении содержания фосфора до 11,7 ат. % покрытие Ni – P все еще сохраняет преимущественно кристаллическую структуру. В то же время в области углов рассеяния, отвечающих положению рефлекса 111, формируется интенсивный дифракционный максимум, остальные дифракционные линии сильно уширяются и их интенсивность существенно уменьшается. В области углов рассеяния 2θ , равных 90–110 град, регистрируется существенное повышение фоновой интенсивности (см. рис. 3). Указанные особенности рентгеновской дифракционной картины свидетельствуют о формировании смешанной аморфно-кристаллической структуры покрытий Ni – P. Величина физического уширения дифракционных линий кристаллической фазы выходит на самый высокий уровень ($\beta_{222} = 70...80 \cdot 10^{-3}$ рад). Параметр кристаллической решетки покрытия при этом значительно возрастает ($a = 0,3535$ нм), что указывает на образование твердого раствора фосфора в никеле внедренно-замещенного типа. При концентрации фосфора в покрытии 21,5 ат. % на дифрактограмме регистрируется только один размытый максимум-гало, характерный для дифракции от аморфных материалов (см. рис. 3).

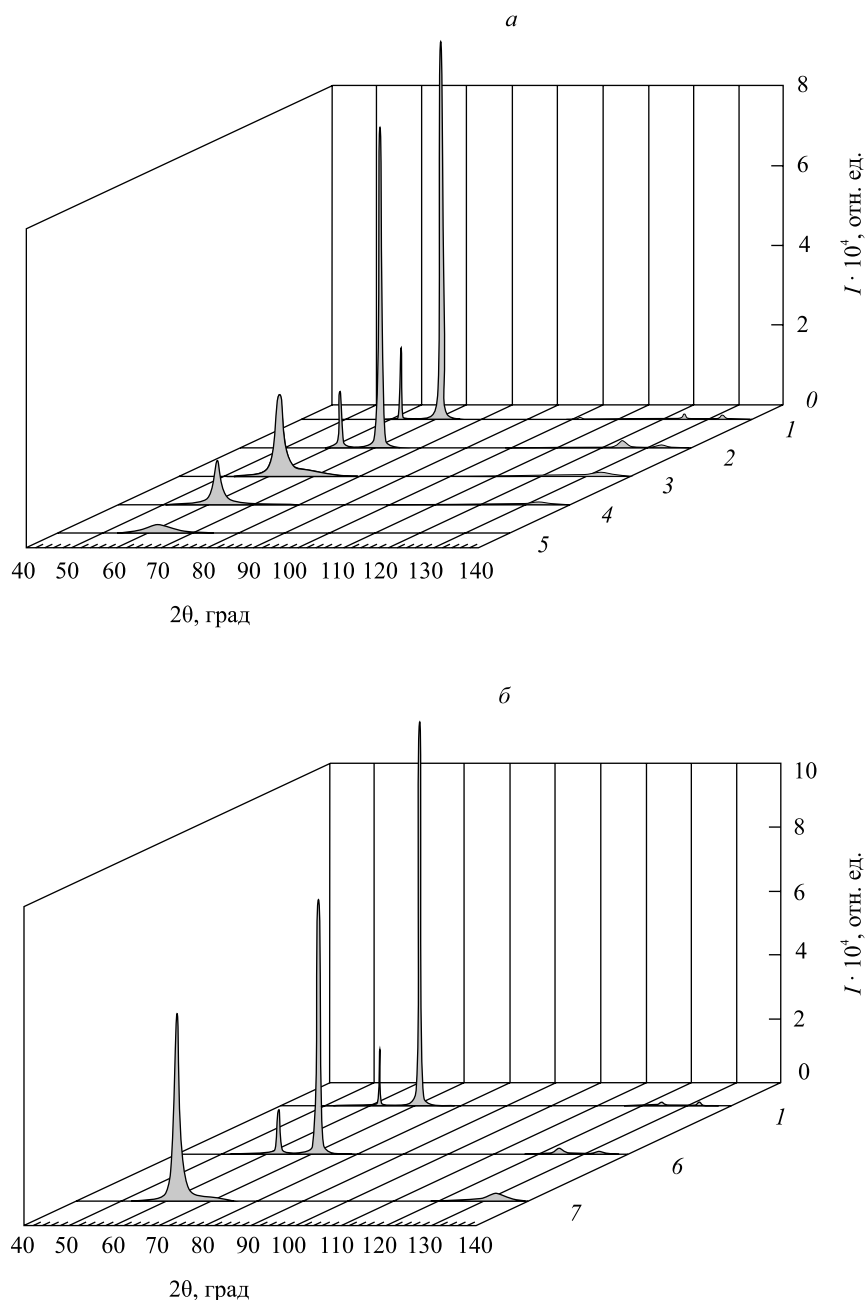


Рис. 3. Рентгенограммы покрытий из Ni (1) и Ni – P (2–5) с содержанием фосфора, ат. %: 2 – 1,5; 3 – 5,5; 4 – 11,7; 5 – 21,5 (а), а также из Ni – S с содержанием серы 0,2 ат. % (б) и Ni – P – S (5,5 ат. % P и 0,2 ат. % S) (7) (б)

Внедрение небольших количеств серы в никелевое покрытие ($0,2 \pm 0,02$ ат. %) не приводит к изменению параметра ГЦК решетки никеля ($a = 0,3525$ нм) и положения основных рефлексов 111, 200, а только к уменьшению их интенсивности (см. рис. 3) и увеличению физического уширения ($\beta_{222} = 39,5 \cdot 10^{-3}$ рад). При дополнительном включении фосфора (5,5 ат. %) в покрытие Ni – S рефлекс от никеля 200, 220 и 311 исчезают, а рефлекс 111 и 222 сильно уширены ($\beta_{222} = 127,9 \cdot 10^{-3}$ рад). В диапазоне углов 2θ , равных 44–60 и 90–110 град, наблюдается повышение фоновой интенсивности, что свидетельствует об образовании как кристаллической, так и аморфно-кристаллической фазы.

Результаты исследований микрорельефа поверхности покрытий Ni, Ni – P и Ni – P – S, выполненных с помощью сканирующего электронного микроскопа, представлены на рис. 4 и 5. Из микроснимков видно, что включение фосфора и увеличение его концентрации в покрытии от 5,5 до 11,7 ат. % приводит к трансформированию микрокристаллической структуры с ярко выраженными пирамидальными кристаллитами в нанокристаллическую с узелковой структурой; дальнейшее увеличение фосфора в покрытии до 21,5 ат. % обуславливает уменьшение размеров кристаллитов и сглаживание микрорельефа поверхности (см. рис. 4).

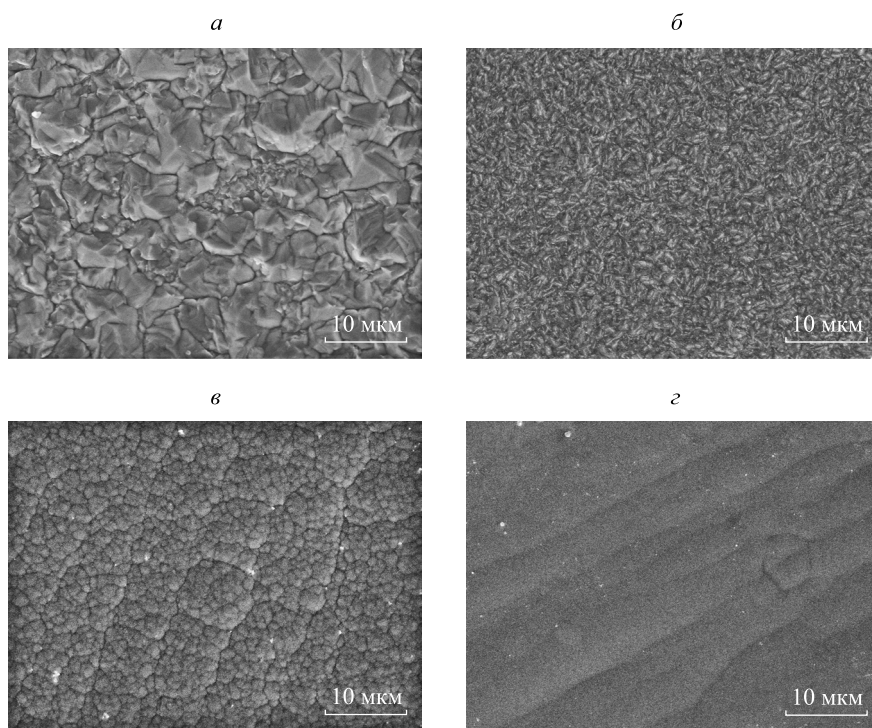


Рис. 4. Микрофотографии поверхности покрытий Ni (а) и Ni – P (б – г) с содержанием фосфора (ат. %): 5,5 (б); 11,7 (в); 21,5 % (г)

Из микроснимков (см. рис. 5) покрытий Ni – S и Ni – P – S, осажденных из электролита никелирования в присутствии сахарина, видно, что включение малых количеств серы ($0,2 \pm 0,02$ ат. %) также приводит к изменению микрорельефа поверхности.

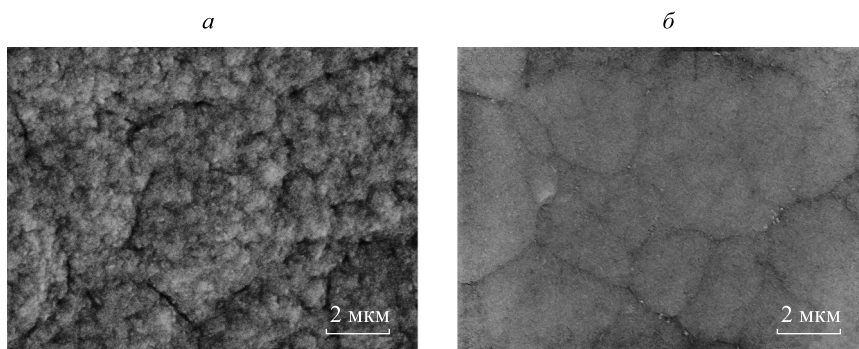


Рис. 5. Микрофотографии поверхности покрытий Ni – S (0,2 ат. % серы) (а) и Ni – P – S (0,2 ат. % серы и 5,5 ат. % фосфора) (б), полученных из электролита никелирования, содержащего сахарин

В покрытии Ni – S отсутствует ярко выраженная пирамидальная структура, характерная для чисто никелевых покрытий, наблюдается уменьшение размеров кристаллитов. Более гладким микрорельефом с узелковой микроструктурой характеризуются покрытия Ni – P – S (см. рис. 5, б).

Влияние неметаллических компонентов – фосфора и серы – на микротвердость и износостойкость электроосажденных никелевых покрытий представлено в табл. 2. Из данных табл. 2 видно, что соосаждение с никелем небольших количеств неметаллических компонентов фосфора и серы приводит к увеличению микротвердости и износостойкости покрытий. Микротвердость для никелевого покрытия составляет 264 HV 0,05, интенсивность изнашивания (I_q) – 46 мкг/м. Включение 0,2 ат. % серы приводит к росту микротвердости до 420 HV 0,05 и снижению интенсивности изнашивания до 30 мкг/м; включение 1,5 ат. % фосфора – до 650 HV 0,05 и 37 мкг/м соответственно. Поликристаллические и аморфно-кристаллические покрытия Ni – P с содержанием фосфора 5,5 и 11,7 ат. % соответственно характеризуются наиболее высокой микротвердостью (680 и 700 HV 0,05 соответственно) при относительно высокой интенсивности изнашивания в условиях сухого трения ($I_q \sim 20$ мкг/м).

Таблица 2

Микротвердость, по Виккерсу, (HV 0,05) и износостойкость в условиях сухого трения (I_q) для свежесаженных покрытий Ni, Ni – S, Ni – P и Ni – P – S

Покрытие	Концентрация металлоида, ат. %		Микротвердость, HV 0,05	Интенсивность изнашивания, мкг/м
	P	S		
Ni	–	–	264	46
Ni – S	–	0,2	420	30
Ni – P	1,5	–	650	37
Ni – P	5,5	–	680	20
Ni – P	11,7	–	700	20
Ni – P	21,5	–	550	5
Ni – P – S	5,5	0,2	717	3

Аморфные покрытия Ni – P, наоборот, обладают более высокой износостойкостью ($I_q \sim 5$ мкг/м), но несколько меньшей микротвердостью (540...550 HV 0,05) по сравнению с покрытиями Ni – P поликристаллической и аморфно-кристаллической структуры, что указывает на отсутствие корреляции между этими характеристиками. Наиболее высокой твердостью (717 HV 0,05) и износостойкостью ($I_q \sim 3$ мкг/м) обладают покрытия, содержащие одновременно серу и фосфор (см. табл. 2).

Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что включение неметаллических компонентов – фосфора и серы, увеличение их концентрации в покрытии оказывают существенное влияние на структуру и морфологию формируемого покрытия, а также на проявляемые ими физико-механические свойства. Самыми стабильными и высокими значениями микротвердости (717 HV 0,05) и износостойкости ($I_q \sim 3$ мкг/м) характеризуются покрытия, содержащие одновременно серу и фосфор. Наилучшее качество микросварных соединений алюминиевой проволоки с покрытием при высоком усилии ее отрыва (8–11 г) достигнуто для Ni – P – S, а также для Ni – P с аморфно-кристаллической и аморфной структурой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)

1. Krolkowski A., Butkiewicz P. Anodic behaviour of Ni – P alloys studied by impedance spectroscopy // *Electrochim. Acta.* 1993. Vol. 38, № 14. P. 1979–1983 [Krolkowski A., Butkiewicz P. Anodic behaviour of Ni – P alloys studied by impedance spectroscopy. *Electrochim. Acta.* 1993. Vol. 38, No. 14. P. 1979–1983 (in Engl.)].
2. Krolkowski A., Karbownicka B., Jaklewicz O. Anodic dissolution of amorphous Ni – P alloys // *Electrochim. Acta.* 2006. Vol. 51, № 27. P. 6120–6127 [Krolkowski A., Karbownicka B., Jaklewicz O. Anodic dissolution of amorphous Ni–P alloys. *Electrochim. Acta.* 2006. Vol. 51, No. 27. P. 6120–6127 (in Engl.)].
3. Ганавати Б., Кукареко В. А., Цыбульская Л. С., Перевозников С. С. Структурное состояние и износостойкость покрытий Ni – P // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов* : сб. науч. тр. : в 3 кн. Минск, 2014. Кн. 1 : Материаловедение. С. 68–79 [Ganavati B., Kukareko V. A., Tsybul'skaya L. S., Perevoznikov S. S. Strukturnoe sostoyanie i iznosostoikost' pokrytii Ni – P. *Sovremennye metody i tekhnologii sozdaniya i obrabotki materialov* : sb. nauch. tr. : v 3 kn. Minsk, 2014. Kn. 1 : Materialovedenie. P. 68–79 (in Russ.)].
4. Перевозников С. С., Позняк С. К., Цыбульская Л. С., Кукареко В. А., Кононов А. Г. Структура, механические свойства и электрохимическое поведение электроосажденных сплавов Ni – P // *Свиридовские чтения* : сб. ст. Минск, 2012. Вып. 8. С. 123–130 [Perevoznikov S. S., Poznyak S. K., Tsubul'skaya L. S., Kukareko V. A., Kononov A. G. Structure, mechanical properties and electrochemical behavior of electrodeposited Ni – P alloys. *Sviridov readings* : sb. statei. Minsk, 2012. Vol. 8. P. 123–130 (in Russ.)].

5. *Перевозников С. С., Цыбульская Л. С., Позняк С. К.* Защитная способность химически и электрохимически осажденных покрытий никель – фосфор в хлоридсодержащей среде // Свиридовские чтения : сб. ст. Минск, 2015. Вып. 11. С. 105–112 [Perevoznikov S. S., Tsybul'skaya L. S., Poznyak S. K. Protective ability of electrodeposited and electroless Ni – P alloy coatings on mild steel in saline media. *Sviridov readings* : sb. statei. Minsk, 2015. Issue 11. P. 105–112 (in Russ.)].

6. *Ланин В. Л., Цыбульская Л. С., Бекши Ю. Н., Петухов И. Б., Гаевская Т. В.* Свариваемость покрытий никель – бор ультразвуковой микросваркой // Технологии в электронной промышленности. 2012, № 8. С. 82–85 [Lanin V. L., Tsybul'skaya L. S., Bekish Yu. N., Petukhov I. B., Gaevskaya T. V. Svarivaemost' pokrytii nikel' – bor ul'trazvukovoi mikrosvarкои. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*. 2012. Vol. 8. P. 82–85 (in Russ.)].

7. *Bekish Yu. N., Poznyak S. K., Tsybul'skaya L. S., Gaevskaya T. V.* Electrodeposited Ni – B alloy coatings: structure, corrosion resistance and mechanical properties // *Electrochim. Acta*. 2010. Vol. 55, № 7. P. 2223–2231 [Bekish Yu. N., Poznyak S. K., Tsybul'skaya L. S., Gaevskaya T. V. Electrodeposited Ni – B alloy coatings: structure, corrosion resistance and mechanical properties. *Electrochim. Acta*. 2010. Vol. 55, No. 7. P. 2223–2231 (in Engl.)].

8. *Караваев М. Г., Кукареко В. А.* Автоматизированный трибометр с возвратно-поступательным движением // Надежность машин и технических систем : в 2 т. Минск, 2001. Т. 1. С. 37–39.

*Статья поступила в редколлегию 26.04.2016.
Received by editorial board 26.04.2016.*