

УДК 441.138.3

АНТИКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА МЕТИЗНЫХ ДЕТАЛЕЙ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЯМИ Ni-Sn

2. Фазовый состав, микроструктура и свойства покрытий

Рева О.В.*, к.х.н., доцент, Кузнецов Б.В.**, к.х.н., Углов В.В.**, д.ф-м.н., профессор,
Урбанович Е.А.*

*Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь

** Белорусский государственный университет

e-mail: volha107@rambler.ru

Проведено исследование зависимости фазового состава, микроструктуры и физико-механических свойств покрытий Ni-Sn, синтезированных электрохимическим осаждением из растворов, от их химического состава. Установлены оптимальные условия получения гальванических сплавов с высокой коррозионной стойкостью и обоснованы перспективы их применения для повышения надежности и сроков эксплуатации спасательных механизмов и автотехники.

The research of dependence the phase composition, microstructure, physical and mechanical properties of the Ni-Sn coverings, synthesized by electrochemical sedimentation from solutions, from their chemical compound is carried out. The optimal conditions for obtaining electroplating alloys with high corrosion resistance are established; and reasonable prospects of their application to improve the reliability and the service life of tools and rescue vehicles.

(Поступила в редакцию 22 декабря 2012 г.)

В первой части работы [1] рассмотрены особенности коррозии деталей аварийно-спасательной техники и предложен метод защиты уязвимых деталей (в основном трущихся, вращающихся, с резьбой) путем нанесения на них электролитических покрытий сплавами Ni-Sn. Проведен анализ сравнительных характеристик электролитов различных комплексных типов, применяемых для электроосаждения сплавов никеля и олова.

В результате исследований закономерностей осаждения сплавов Ni-Sn из растворов нового комплексного типа разработан стабильный полилигандный электролит, в котором преодолены проблемы катодной пассивации. В отсутствие подогрева электролита достигнута скорость осаждения сплава, которая ранее обеспечивалась только при температурах не ниже 50-60 °С [1]. Определены оптимальные условия синтеза плотных, однородных по толщине пленок сплава Ni-Sn с заданным химическим составом. Однако остается неясным, как неравновесные условия синтеза из дифосфатно-хлоридно-глицинового электролита влияют на фазовый состав, микроструктуру и физико-механические свойства электролитических сплавов Ni-Sn.

Известно, что структура гальванических сплавов сложным образом зависит от многих факторов: величины катодной поляризации, природы и концентрации лигандов, температуры электролита и состава анодов, наличия перемешивания и др. Как правило, при повышении поляризации катода, плотности тока, введении ПАВ, разбавлении электролита осадки становятся более мелкозернистыми. Однако при очень высоких плотностях тока (вблизи предельного тока диффузии ионов) происходит образование рыхлых дендритообразных осадков, преимущественное выделение водорода, образование продуктов неполного восстановления металлов [2-9]. Повышение температуры электролита обычно приводит к получению крупнозернистых покрытий, однако при этом снижаются содержание водорода и внутренние напряжения.

Процесс электроосаждения металлов и сплавов нередко сопровождается включением в осаждаемые покрытия различных примесей [2-12]. Однако в определенном количестве эти

примеси могут оказывать благотворное воздействие на структуру и свойства сплавов. Так, гальваносплавы часто характеризуются макроскопической анизотропией, обусловленной нанослоистостью пленок, различной ориентацией структурных и концентрационных неоднородностей, наличием микропустот, пузырьков водорода и других газов, захваченных матрицей частиц ПАВ, оксидно-гидроксидных соединений и т. д. Однако для каждого конкретного случая оптимальное содержание примесей определяется экспериментально, и, как правило, не превышает 1-3 мол. %

Фазовый состав гальванических сплавов в большинстве случаев определяется экспериментально, поскольку состав фаз, кристаллизующихся в неравновесных условиях, очень плохо прогнозируем. Как правило, кристаллические решетки металлов сильно искажены, покрытия поликристалличны и могут включать интерметаллические соединения и аморфные компоненты. Содержание аморфных фаз в сплаве растет с увеличением поляризации катода и содержания легирующего компонента, поскольку при этом увеличивается степень дисперсности осадков и дефектность кристаллической решетки [2-11]. Возможность образования аморфных сплавов определяют следующие факторы: достижение определенного перенапряжения катода, затрудненность кристаллизации фазы одного из компонентов; разница в атомных радиусах соосаждаемых металлов более 15 %, поскольку при большом количестве дефектов атомной упаковки кристаллизации не происходит; высокая концентрация легирующего компонента, адсорбция на катоде ПАВ, гидроксидов, водорода, основных солей [10-12].

В условиях, когда один из металлов разряжается на предельном диффузионном токе [2-5, 9], возможно образование пересыщенных твердых растворов. Коэффициент диффузии легирующего компонента в сплаве всегда больше, чем у металла-растворителя, причем, это различие тем больше, чем сильнее различается природа металлов [2, 3, 5, 7]. В таких системах мощный вакансионный поток приводит к диффузии атомов легирующего металла в объем основного компонента. Эти атомы, двигаясь по вакансиям, встраиваются в кристаллическую решетку основного металла и, как следствие, образуют пересыщенные твердые растворы [2, 4, 5].

Сочетание мелкокристалличности с необычным фазовым составом часто является причиной необычных физико-механических свойств гальванических покрытий. Так, электрохимические покрытия Ni-Sn проявляют высокую коррозионную устойчивость как в кислых, так и в щелочных средах, причем в присутствии сильных окислителей или лигандов, способных связывать ионы металлов; это связано как с их плотной беспористой микроструктурой, так и с наличием в составе интерметаллидов и аморфного олова [13-17]. В ряде источников [13,14] отмечается, что покрытия Ni-Sn по коррозионной устойчивости не уступают пленкам Ni-B, при этом часто они отличаются достаточно высокой микротвердостью (до 3800 Н/мм²), поскольку содержат в своем составе кристаллические интерметаллиды типа Ni₃Sn₄, Ni₃Sn₂, Ni₃Sn и др., равномерно распределенные в аморфной или очень дефектной матрице.

Как правило, электрохимические покрытия, содержащие олово, отличаются исключительной мелкозернистостью, что способствует как равномерному распределению компонентов сплава по толщине покрытия вследствие низкотемпературной диффузии по границам зерен, так и изотропности их физико-химических и механических свойств [14].

Особенно интересны фазовые и диффузионные преобразования в покрытиях Ni-Sn при их старении и прогреве: коррозионная и износостойкость покрытий существенно возрастают после прогрева без потери прочих полезных свойств вследствие особенностей твердофазной диффузии и кристаллизации аморфной составляющей [14-19]. Такая особенность очень благоприятна для защиты от коррозии покрытиями Ni-Sn деталей аварийно-спасательного оборудования, поскольку оно в процессе эксплуатации в зоне ликвидации ЧС может подвергаться многократным локальным разогревам.

Следует подчеркнуть, что в последнее время явление низкотемпературной диффузии в металлосистемах используется для целенаправленного придания композиционным материалам полезных свойств. Имеются разрозненные данные [18-20] о том, что в результате низкотемпературной диффузии свойства гальванопокрытий могут быть существенно модифицированы при условии, что металлическая матрица образована зернами с размерами не более 20-30 нм.

Цель данной части работы – изучить фазовый состав, микроструктуру и свойства композиционных покрытий на основе сплава Ni-Sn и определить оптимальные условия синтеза пленок с высокими функциональными свойствами, обеспечивающими антикоррозионную защиту и продление срока службы ответственных деталей аварийно-спасательной техники.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения фазового состава пленок использовали рентгеновский дифрактометр ДРОН-4.0. Съемку рентгенограмм проводили на кобальтовом излучении со скоростью 1 град/мин. Идентификацию линий на рентгенограммах проводили с использованием данных картотеки JSPDS. Для изучения микроструктуры поверхности осаждаемых покрытий использовали растровый сканирующий электронный микроскоп марки LEO-1420.

Коррозионную устойчивость полученных покрытий изучали ускоренным лабораторным методом путем измерения потери массы образцами с толщиной покрытия не менее 15 мкм после пребывания их в течение 30, 60 и 90 минут в 1 М растворе серной кислоты H_2SO_4 (pH=1) и карбоната натрия Na_2CO_3 (pH=13) при температуре 50 °С.

Износостойкость металлических покрытий определяли на трибометре ТАУ1-М методом сухого трения стального стержня по системе «палец-плоскость» при возвратно-поступательном движении индентора ВК8 (твердость 37 ГПа) со скоростью 4 мм/с при нагрузке 50 г. Микротвердость образцов измерялась по методике Виккерса на твердомере ПМТ-3 при нагрузке 100 г. Данная методика основана на вдавливании алмазной пирамидки в исследуемую поверхность с последующим измерением глубины вдавливания.

Прочность пайки определяли путем припаивания к поверхности покрытия медного проводника стандартным припоем ПОС и измерения усилия его отрыва под углом 90°. Величину адгезионной прочности сцепления покрытия с подложкой измеряли либо методом нанесения сетки царапин и механического отслоения, либо методом термоудара с перепадом температур 200-20 °С.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Данные рентгенографического исследования покрытий Ni-Sn, полученных из дифосфатно-хлоридных электролитов, свидетельствуют, что все пленки, осаждаемые в гальваностатическом режиме, являются микрогетерогенными системами и включают в свой состав несколько фаз. В покрытиях обнаружены кристаллические фазы твердого раствора олова в никеле, интерметаллического соединения Ni_3Sn , а также индивидуальных никеля и олова, таблица 1. В отдельных случаях обнаруживаются следовые количества интерметаллида Ni_3Sn_2 и меди, которая представляет собой модельную подложку.

Рентгенограммы изученных покрытий Ni-Sn характеризуются узкими четкими пиками, рис. 1; гало и неидентифицируемые пики на рентгенограммах отсутствуют; несовпадений между результатами количественного элементного анализа состава сплавов [1] и данными о фазовом составе нет. Таким образом, нет оснований для предположений о наличии в покрытиях аморфных фаз; и после прогрева пленок новых кристаллических фаз в них не обнаруживается. Данные результаты достаточно необычны для электрохимических сплавов Ni-Sn.

Таблица 1 – Зависимость фазового состава покрытий Ni-Sn, полученных из дифосфатно-хлоридных электролитов, от условий их синтеза и элементного состава

Плотность тока, А/дм ²	Соотношение [Ni ²⁺]:[Sn ²⁺] в электролите	Содержание Sn в покрытиях, ат. %	Кристаллические фазы
0,2	1:2	95,1	β-Sn, доминирующий рефлекс (220), Cu-следы, твердый раствор Sn в Ni
0,4		87,78	
0,6		68,35	β-Sn, Ni, Ni ₃ Sn, Ni ₃ Sn ₂ – следы
0,7		59,61	
0,2	1:1	87,57	β-Sn, Ni, Ni ₃ Sn
0,4		78,16	
0,6		65,2	
0,8		56,23	
0,2	2:1	62,58	β-Sn, Ni, Ni ₃ Sn
0,4		56,54	
0,6		49,84	
0,8		44,52	

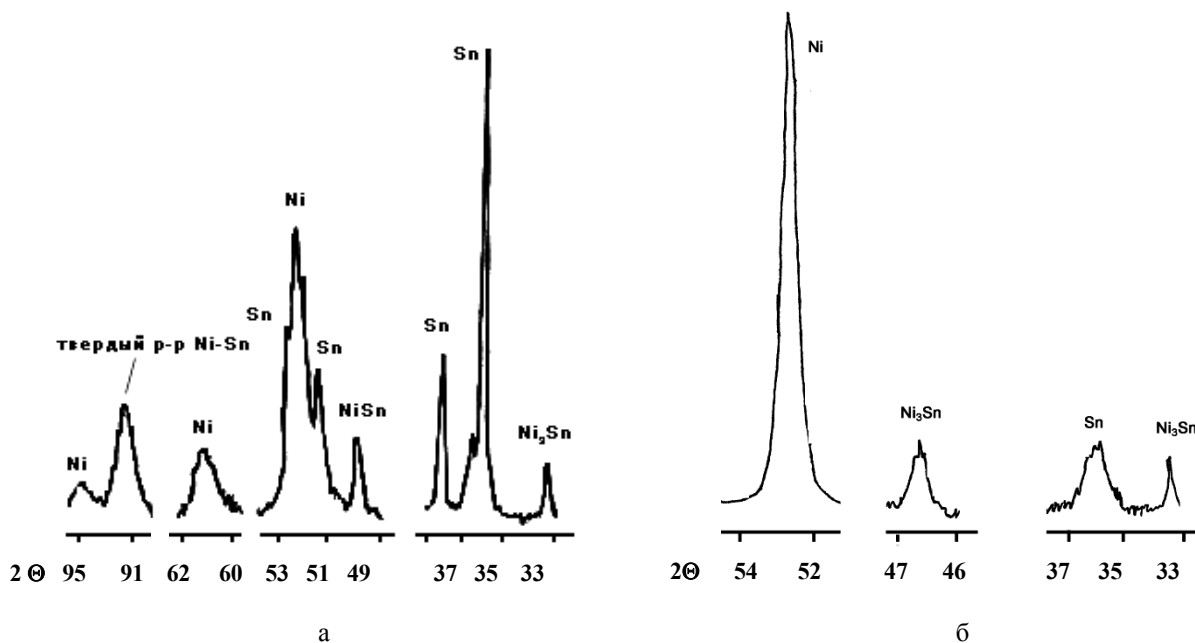


Рисунок 1 – Фрагменты рентгенограмм покрытий Ni-Sn, осажденных из электролитов с соотношением [Ni²⁺]:[Sn²⁺] = 1:2 (а) и [Ni²⁺]:[Sn²⁺] = 2:1 (б)

Фазовый состав исследованных покрытий отличается от состава пленок Ni-Sn, получаемых из хлоридно-фторидных и дифосфатных растворов [13-16], которые включают в себя значительное количество аморфной фазы, что иллюстрируется несовпадением данных элементного и фазового анализа, таблица 2. После тепловых обработок таких покрытий в них появляются новые кристаллические фазы, в том числе интерметаллиды Ni₃Sn и Ni₃Sn₄.

Таблица 2 – Зависимость фазового состава покрытий Ni-Sn, полученных из рекомендованных в литературе электролитов, от условий их синтеза и элементного состава [15]

Раствор, концентрация компонентов, моль/л	Толщина пленки, мкм	Содержание Sn, ат. % ± 2	Кристаллические фазы	
			5-7 суток после получения	после прогрева 250 °С
Пирофосфатный [SnSO ₄]=0,07 [CuSO ₄]=0,02	10	60	Sn	Ni ₃ Sn ₂ , Ni ₃ Sn ₄
Фторидно-хлоридный [SnCl ₂]=0,30 [NiCl ₂]=0,70	4	60	Ni ₃ Sn ₂ , Sn	Ni ₃ Sn, Ni ₃ Sn ₂ , Ni ₃ Sn ₄
	15	70	Ni ₃ Sn ₂	Ni ₃ Sn, Ni ₃ Sn ₂ , Ni ₃ Sn ₄

Таким образом, покрытия Ni-Sn, синтезированные из кислых дифосфатно-хлоридных электролитов нового комплексного типа, являются более перспективными для защиты от коррозии деталей аварийно-спасательного оборудования, чем описанные в литературе, поскольку они не содержат аморфных фаз и их физико-механические свойства не должны претерпевать изменений при многократных локальных разогревах, которым постоянно подвергается специальная пожарная техника. Действительно, после прогрева полученных покрытий новых кристаллических фаз в них не обнаружено.

Электронно-микроскопическое исследование показало, что при осаждении покрытий Ni-Sn из всех исследованных электролитов микроструктура их поверхности очень плотная и равномерная, без пор, трещин, щелей и других дефектов. Несмотря на то, что размеры кристаллитов могут достигать 5-10 мкм, на снимках отчетливо видно, что эти кристаллиты сформированы из практически неразличимых сросшихся воедино зерен, рис. 2. Наиболее гладкой и равномерной микроструктурой поверхности характеризуются сплавы, осажденные их электролита с преобладанием в составе ионов никеля; во всем допустимом диапазоне плотностей тока размеры кристаллитов составляют 2-5 мкм и они подобны плавно перетекающим друг в друга мелким волнам, рис. 2а.

Покрытия Ni-Sn, осажденные из электролита с равным соотношением концентраций ионов олова и никеля, характеризуются такой же плотной и равномерной микроструктурой поверхности, но более крупнокристаллической: размеры «булыжниковых» кристаллитов достигают 8-15 мкм, причем размеры кристаллитов увеличиваются с ростом плотности тока, что обычно для пленок гальваносплавов нехарактерно, рис. 2б.

Наиболее разнообразной микроструктурой отличаются покрытия Ni-Sn, синтезированные их электролита с преобладанием в составе ионов олова. При малых плотностях тока (0,2-0,4 А/дм²) она равномерно мелко волнистая, но с ростом плотности тока кристаллиты укрупняются и становятся угловато-выпуклыми, рис. 2в. При максимально допустимых плотностях тока (0,8-0,9 А/дм²) происходит качественный переход в строении покрытий и отдельные кристаллы становятся на порядок меньше размерами – 0,5-1,0 мкм, зато из них формируются крупно-дендритные «перья» и «морозные узоры», рис. 2а.

Эти результаты коррелируют с данными о химическом составе пленок – данные покрытия отличаются высоким содержанием олова (70-95 ат. %). Поэтому при синтезе покрытий с высоким содержанием олова во избежание кристаллизации дендритов оптимальная плотность тока не должна превышать 0,6 А/дм².

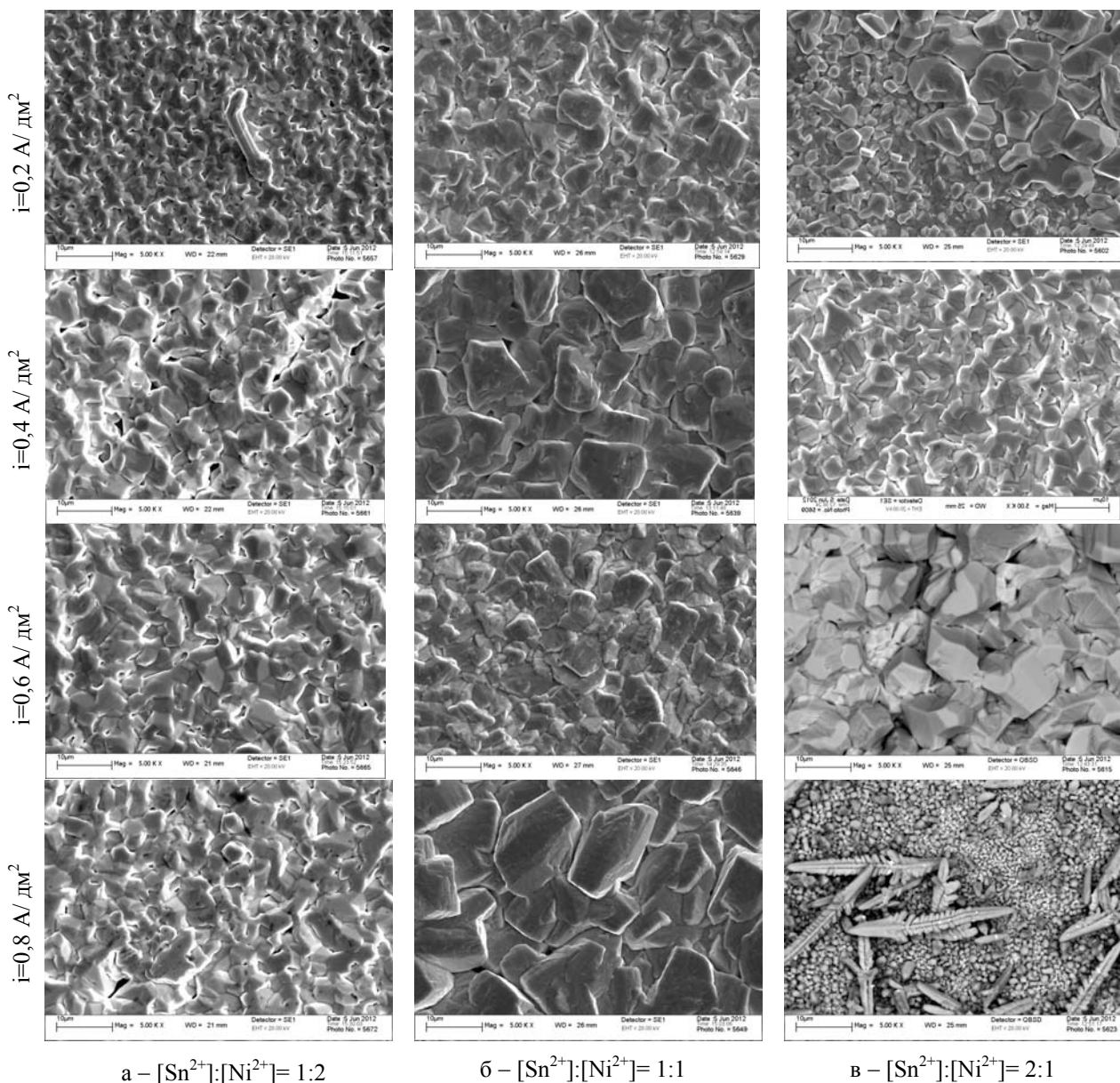
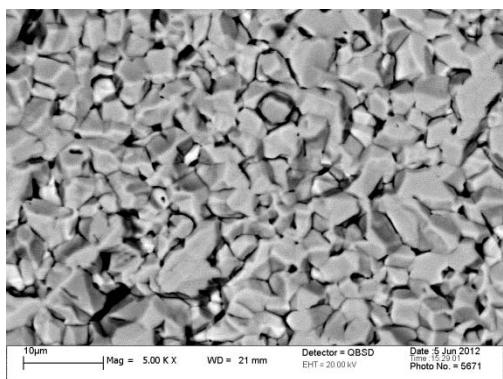
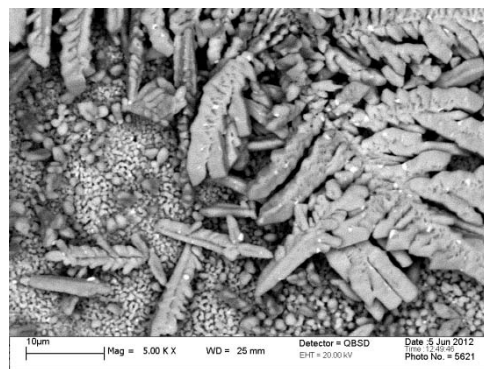


Рисунок 2 – Морфология поверхности покрытий Ni-Sn толщиной 15 мкм, полученных из дифосфатно-хлоридных электролитов при различных плотностях тока

Кроме того, при более подробном изучении особенностей элементов поверхности покрытий в отраженном свете было установлено, что покрытия Ni-Sn, синтезированные в оптимальных условиях ($i=0,2-0,6 \text{ A/dm}^2$, концентрация никеля в покрытии не менее 40 ат. %), имеют однородную плотную поверхность во всех случаях, рис. 3а. Элементы поверхности явно имеют поликристаллическую природу и однородный химический и фазовый состав по массе. Пленки, полученные из электролита с максимальной концентрацией ионов олова и содержащие более 80 ат. % олова, микронеоднородны: в отраженном свете наблюдаются наползающие друг на друга участки разной морфологии, образованные резко отличающимися по форме и размерам кристаллами, очевидно, и с различным фазовым составом, рис. 3б. По всей вероятности, для этих покрытий будет характерна микронеоднородность и в физико-механических свойствах, что подтверждается в дальнейшем исследовании микротвердости сплавов.



а – $[\text{Sn}^{2+}]:[\text{Ni}^{2+}] = 1:2$, 50 ат. % Ni

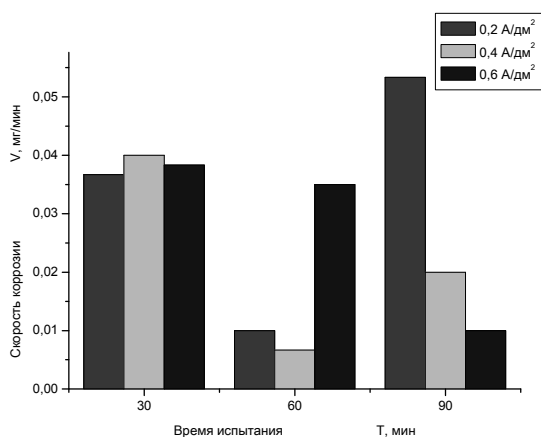


б – $[\text{Sn}^{2+}]:[\text{Ni}^{2+}] = 2:1$, 30 ат. % Ni

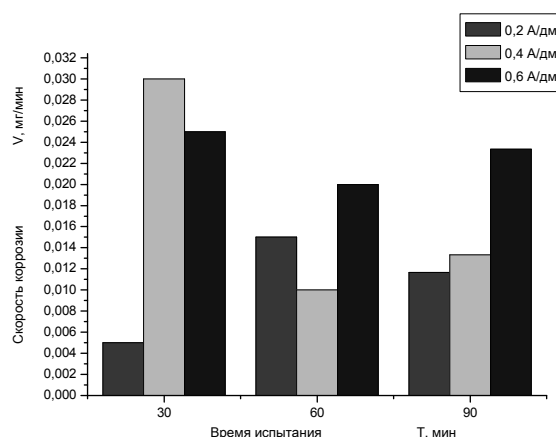
Рисунок 3 – Морфология поверхности покрытий Ni-Sn толщиной 10 мкм, полученных из дифосфатно-хлоридных электролитов при плотности тока 0,7 А/дм²

Таким образом, результаты электронно-микроскопического исследования позволяют сделать вывод, что покрытия Ni-Sn, электрохимически осажденные из дифосфатно-хлоридных электролитов, характеризуются наиболее гладкой и однородной поликристаллической беспористой поверхностью при концентрации ионов никеля в электролите не менее 0,3 моль/л, плотности тока 0,2-0,6 А/дм² и содержании никеля в покрытии не менее 35-50 ат. %.

При исследовании закономерностей коррозии синтезированных покрытий в кислых и щелочных средах были получены следующие данные. Для всех изученных покрытий в кислой среде наблюдается замедление растворения по мере проведения испытаний, рис. 4а.



а



б

Рисунок 4 – Диаграммы зависимости скорости коррозии покрытий Ni-Sn, осажденных из электролита с соотношением $[\text{Sn}^{2+}]:[\text{Ni}^{2+}] = 1:2$ при разных плотностях тока в 1 М серной кислоте (а) и в 1 М растворе Na₂CO₃ (б)

Наблюдаемый эффект вызван тем, что приповерхностная зона пленок (1-3 нм) содержит большое количество оксидов олова и никеля, которые растворяются достаточно быстро; после снятия верхнего окисленного слоя растворение покрытий резко замедляется.

Причем очень высокой коррозионной устойчивостью отличаются покрытия, полученные из электролита с преобладанием в составе ионов олова, для которых характерно практически полное отсутствие растворения в кислой среде. В отличие от других пленок Ni-Sn эти покрытия состоят не только из β -Sn, Ni, Ni₃Sn, но и твердого раствора Sn в Ni.

Наибольшая скорость коррозии $\sim 0,036$ мг/мин в кислой среде характерна для покрытий, синтезированных из электролита, где концентрация ионов никеля \sim в 2 раза больше концентрации ионов олова. Несмотря на то, что эти покрытия визуально выглядят светлыми и равномерными и образованы теми же кристаллическими фазами β -Sn, Ni, Ni₃Sn, количественное соотношение никеля и олова и, соответственно, фаз индивидуальных металлов в них изменяется. Образцы, содержащие больше индивидуального никеля и меньше – интерметаллида, по коррозионной стойкости в кислой среде заметно уступают образцам, синтезированным из электролита, где концентрация ионов олова вдвое больше, чем никеля (рис. 4а).

Изучение зависимости коррозионной устойчивости пленок Ni-Sn в щелочных средах показало, что в первые 30 минут испытаний, также как и в кислоте, происходит максимальный унос массы с поверхности пленки, в дальнейшем процесс коррозии продолжается, но значительно медленнее, и, вопреки ожиданиям, в щелочных растворах не происходит нарастания на поверхности покрытий продуктов коррозии (рис. 4б). Вероятно, вследствие высокого содержания в покрытиях олова основным продуктом коррозии является хорошо растворимый в щелочных средах гидроксид Sn(IV) Sn(OH)₄. Наибольшей коррозионной устойчивостью в щелочных средах отличаются пленки, которые состоят из β -Sn, Ni, Ni₃Sn и содержат не менее 40 ат. % никеля. Именно для них характерно наиболее быстрое образование в щелочных средах плотной защитной пленки из нерастворимых гидроксидов никеля.

Таким образом, в кислых средах наиболее устойчивы к коррозии покрытия, содержащие не менее 80 ат. % олова и состоящие из β -Sn и твердого раствора Sn в Ni; в щелочных средах – покрытия, в составе которых олова не более 60 ат. % и образованные фазами β -Sn, Ni, Ni₃Sn.

Как видно из данных, представленных в таблице 3, в целом все изученные покрытия Ni-Sn являются мягкими и упругими: их микротвердость находится в пределах от 160 до 300 МПа. Твердость сплавов несколько возрастает по мере увеличения содержания в них никеля; однако даже в покрытиях, содержащих ~ 45 -53 ат. % никеля, она не превышает 280 МПа.

Следует отметить, что в покрытии, полученном из раствора с максимальным содержанием ионов олова при плотности тока $0,7$ А/дм², имеются участки с различной микротвердостью. Это может объясняться тем, что поверхность полученного покрытия не однородна, а имеет микроучастки с различным как количественным, так и качественным составом, что подтверждается данными электронно-микроскопического исследования.

Все исследованные пленки Ni-Sn очень хорошо паяемы (прочность паянного соединения не менее 800 Н/м) и пластичны. Эти покрытия имеют адгезию к основе не менее 1000 Н/м, не отслаиваются как от медной модельной подложки, так и от стальных деталей при множественных изгибах и ударах.

Полученные данные свидетельствуют, что электрохимические сплавы Ni-Sn, полученные из новых дифосфатно-хлоридных электролитов, несмотря на их малую микротвердость благодаря сочетанию пластичности с химической стойкостью являются надежной антикоррозионной самоуплотняющейся защитой для деталей с резьбой, пружинных механизмов, редукторов.

Таблица 3 – Зависимость микротвердости покрытий Ni-Sn от элементного и фазового состава

Электролит	i , А/дм ²	Содержание Sn в покрытиях, ат. %	Фазовый состав	Микротвердость, МПа	
1	0,4	87,78	β -Sn, твердый раствор Sn в Ni	160,7	
	0,7	68,35	β -Sn, Ni, Ni ₃ Sn, Ni ₃ Sn ₂ – следы	170,2	300,1
2	0,2	87,57	β -Sn, Ni, Ni ₃ Sn	160,7	
	0,4	78,16		180,7	
	0,6	65,2		200,5	
	0,8	56,23		200,8	
3	0,4	56,54	β -Sn, Ni, Ni ₃ Sn	170,5	
	0,6	49,84		240,2	
	0,8	44,52		270,3	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом рентгенографии установлено, что все пленки Ni-Sn, осажденные в гальваностатическом режиме, являются микрогетерогенными системами и включают в свой состав несколько фаз. В покрытиях обнаружены кристаллические фазы твердого раствора олова в никеле, интерметаллического соединения Ni₃Sn, а также индивидуальных никеля и олова. Несмотря на мелкодисперсность кристаллической фазы в полученных сплавах, оснований для предположений о наличии аморфных компонентов нет – пики достаточно четкие и узкие, гало и неидентифицируемые пики на рентгенограммах отсутствуют; несовпадений между результатами количественного элементного анализа состава сплавов и данными о фазовом составе нет. Поскольку покрытия Ni-Sn, синтезированные из электролитов нового комплексного типа, не содержат аморфных фаз, их физико-механические свойства не должны претерпевать изменений при многократных локальных разогревах, которым постоянно подвергается специальная пожарная техника.

Методом сканирующей электронной микроскопии доказано, что микроструктура поверхности покрытий Ni-Sn очень плотная и равномерная, без пор, трещин, щелей и других дефектов. Покрытия состоят из кристаллитов с размерами 5-10 мкм, которые сформированы из практически неразличимых сросшихся воедино зерен. Наиболее гладкой и однородной поликристаллической беспористой поверхностью характеризуются покрытия Ni-Sn, осажденные из дифосфатно-хлоридного электролита при концентрации ионов никеля в электролите не менее 0,3 моль/л, плотности тока 0,2-0,6 А/дм² и содержании никеля в покрытии не менее 35-50 ат. %.

Как в кислых, так и в щелочных средах все полученные покрытия Ni-Sn обладают очень хорошими защитными свойствами и после растворения тонкого окисленного приповерхностного слоя их коррозия практически полностью прекращается.

Все изученные покрытия Ni-Sn являются мягкими и упругими, их микротвердость находится в пределах от 160 до 300 МПа, прочность сцепления покрытий Ni-Sn с подложкой составляет более 1000 Н/м. Несмотря на малую микротвердость, электрохимические сплавы Ni-Sn, полученные из новых дифосфатно-хлоридных электролитов, в сочетании с пластичностью и высокой химической стойкостью являются надежной антикоррозионной самоуплотняющейся защитой для деталей с резьбой, пружинных механизмов, нарезных соединительных колец, редукторов. Немаловажно, что возможна многократная сборка-разборка оборудования для технического обслуживания и ремонта без механического повреждения защитного слоя.

Таким образом, микрогетерогенные изотропные электрохимические покрытия сплавом Ni-Sn, синтезированные из новых дифосфатно-хлоридных электролитов с достаточно высокой скоростью и не имеющие ограничений по толщине, в перспективе являются надежной защитой от жидкостной и аэрозольной коррозии ответственных деталей аварийно-спасательного оборудования и могут существенно увеличить срок их эксплуатации. Методы получения этих покрытий технически просты, надежны и экономичны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рева, О.В. Упрочнение ответственных деталей аварийно-спасательного оборудования путем электрохимического осаждения устойчивых к коррозии гальванопокрытий Ni-Sn 1. Особенности осаждения и зависимость состава покрытий от условий синтеза / О.В. Рева, Б.В. Кузнецов, В.В. Углов, Е.А. Урбанович // Вестник КИИ МЧС. – 2013, № 1 (17). – С. 39.
2. Поветкин, В.К. Структура и свойства электролитических сплавов / В.К. Поветкин, И.М. Ковенский, Ю.М. Устиновщиков. – М.: Наука, 1992. – 254 с.
3. Гамбург, Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю.Д. Гамбург. – М.: РАН ИФХ, Янус-К. – 1997. – 384 с.
4. Гамбург, Ю.Д. Гальванические покрытия: Справочник по применению / Ю.Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2008. – 359 с.
5. Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П.С. Мельников. – М.: Машиностроение, 1991. – 380 с.
6. Burghardt, W. Electrodeposition of Functional Metal Coatings / W. Burghardt // Galvanotechnic. – 1993. – Vol. 84, № 8. – P. 2585-2590.
7. Стекольников, Ю.А. Физико-химические процессы в технологии машиностроения / Ю.А. Стекольников, Н.М. Стекольников // Елец: Изд. Ел. гос. ун-та, 2008. – 136 с.
8. Байрамов, Б.Ш. Основы электрохимии / М.: Академия, 2005. – 563 с.
9. Дамаскин, Б.Б. Современная электрохимия / Б.Б. Дамаскин, О.А. Петрий. – М.: Наука, 2006. – 344 с.
10. Судзуки, К. Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. – М.: Metallurgia, 1987. – 328 с.
11. Чуистов, К.В. Структура и свойства малых металлических частиц. Аморфное состояние. Твердофазные реакции / К.В. Чуистов, А.Е. Перекокс // Металлофизика и новые технологии. – 1997. – Т. 19, № 3. – С. 68-83.
12. Суздаев, И.П. Нанокластеры и нанокластерные системы. Организация, взаимодействия, свойства / И.П. Суздаев, П.И. Суздаев // Успехи химии. – 2001. – Т. 70, № 3. – С. 203-240.
13. Воробьева, Т.Н. Состав и структура электрохимически осажденных пленок никель-олово / Т.Н. Воробьева, В.П. Бобровская, В.В. Свиридов // Весці АН Беларусі. – Сер. хім. навук. – 1997. – № 3. – С. 38-43.
14. Воробьева, Т.Н. Процессы формирования тонких пленок олова и его сплавов при их электрохимическом и химическом осаждении из растворов / Т.Н. Воробьева, О.В. Рева // Тем. сб. трудов конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Ф. Ермоленко: «Синтез, структура и свойства неорганических веществ и коллоидных систем». – ИОНХ НАН Беларуси, НИИ ФХП БГУ. – Минск: ООО «Белэкс», 2000. – 264 с. – С. 196-206.
15. Воробьева, Т.Н. Процессы диффузии и фазовых превращений в электрохимически осажденных пленках Cu-Sn, Cu-Zn и Ni-Sn / Т.Н. Воробьева, В.П. Бобровская, О.В. Рева // Гальванотехн. и обраб. поверхн. – 1997. – Т. 5, № 3. – С. 26-35.
16. Воробьева, Т.Н. Свойства покрытий медь-олово и никель-олово, полученных электрохимическим осаждением из растворов, и пути их модификации / Т.Н. Воробьева, В.П. Бобровская, О.В. Рева // Современные материалы, оборудование и технологии упрочнения и восстановления деталей машин: темат. сб. – Новополоцк: Полоцкий госуниверситет, 1999. – 370 с. – С. 58-61.
17. Кузнецов, Б.В. Вольтамперометрическое исследование коррозионной устойчивости

- электроосажденных сплавов медь-никель и никель-олово / Б.В. Кузнецов, Т.Н. Воробьева // Свиридовские чтения: Сб. статей. – Вып. 1. – Мн.: БГУ. – 2004. – С. 98-104.
18. Лариков, Л.Н. Кинетика релаксационных процессов в нанокристаллических соединениях / Л.Н. Лариков // *Металлофизика и новые технологии*. – 1997. – Т. 19, № 1. – С. 19-31.
19. Кантор, М.М. Диаграммы состояния, дефекты кристаллической решетки и разработка металлических сплавов // *Фазовые равновесия, структура и свойства сплавов: Сб. ст. / под ред. В.Н. Еременко*. – Киев: Наукова думка, 1990. – С. 110-121.
20. Кузнецов, Б.В. Калориметрическое изучение электролитических сплавов медь-олово и никель-олово / Б. В. Кузнецов, Т. Н. Воробьева // *Вестник БГУ*. – Серия 2, Химия. Биология. География. – 2006. – № 1. – С. 17-22.