

УДК 669.24 : 541.138.2

ЗАЩИТНЫЕ БРОНЗОВЫЕ ГАЛЬВАНОПОКРЫТИЯ: ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И СРОКОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

1. Зависимость состава покрытий от условий синтеза

Рева О.В., к.х.н., Михалюк С.А., Богданова В.В., д.х.н., ст.н.с., доцент
Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь
e-mail: volha107@rambler.ru

Проведено исследование зависимости фазового и химического состава синтезированных электрохимическим осаждением из растворов бронзовых пленок от условий синтеза и комплексного состава электролитов. Разработаны способы регулирования содержания компонентов в сплаве. Обоснованы критерии выбора электролитов для синтеза защитных бронзовых пленок в неравновесных условиях. Показано, что фазовый состав электрохимических сплавов является неравновесным (не соответствует металлургическим аналогам), но стабильным во времени и при разогреве, что может быть основой их принципиально новых физико-механических свойств.

The research has been carried out of the dependence the phase and chemical composition of bronze films, synthesized by electrochemical sedimentation from solutions, on conditions of synthesis and complex structure of electrolytes. The ways of regulation the components maintenance in an alloy are developed. Criteria of choice the electrolytes for protective bronze films synthesis in non-equilibrium conditions have been proved. It has been shown that the phase structure of electrochemical alloys is non-equilibrium (mismatches metallurgical analogues) but stable in time and at a warming up; it can be a basis of their essentially new physical and mechanical properties.

(Поступила в редакцию 5 сентября 2009 г.)

Введение

В настоящее время существует проблема повышенного износа и преждевременного выхода из строя аварийно-спасательной автотехники и специального оборудования вследствие интенсивной коррозии деталей, находящихся в контакте с огнетушащими растворами и суспензиями: емкостей для пенообразователей, деталей насосов, сварных швов цистерн, резьбовых соединений шлангов и др. Применяемые ныне поверхностно-активные вещества имеют сильноокислую или сильнощелочную среду и активно взаимодействуют со сплавами железа и алюминия, из которых, в основном, изготавливается пожарная аварийно-спасательная техника. В результате происходит нарушение герметичности и образование протечек баков и стволов, падение давления в насосах. Кроме того, серьезной проблемой является преждевременная потеря упругости, механической прочности и геометрической конфигурации трущихся или находящихся под давлением деталей в условиях резких многократных перепадов температур, агрессивных газовых и жидкостных сред.

Проблема может быть решена путем нанесения на уязвимые детали защитных покрытий, устойчивых в агрессивных средах, износостойких и ударопрочных. К таковым относятся, в частности, электрохимически осажденные сплавы Cu-Sn. Методы гальванотехники не требуют высоких энергетических затрат и сложного оборудования, обеспечивают равномерность толщин на массивных деталях сложной формы. Экономически нанесение защитных покрытий толщиной 20–40 мкм на черные металлы значительно более выгодно, чем изготовление деталей из металлургических цветных сплавов; тогда как срок службы таких изделий не уступает литым конструкциям.

Электрохимические сплавы – это микрогетерогенные системы, полученные совместной кристаллизацией металлов из растворов путем восстановления их ионов электрическим током [1, 2]. Гидрометаллургические процессы сплавообразования имеют практически

неисчерпаемые возможности регулирования состава и микроструктуры синтезируемых материалов с получением стабильных неравновесных систем, в отличие от металлургических аналогов, которые при низких температурах характеризуются весьма ограниченным набором фаз, определяемым соотношением компонентов [1, 3]. Помимо этого, низкотемпературный синтез сплавов из растворов позволяет получать композиты с однородным распределением наноразмерных частиц модифицирующих примесей в металлической матрице, что в случае металлургических процессов крайне трудно вследствие явления ликвации. Поскольку почти все свойства сплавов являются структурно чувствительными, ультрамелкозернистые структуры, получаемые электрохимически, могут обладать принципиально иными оптическими, механическими и физическими свойствами в сравнении с металлургическими сплавами, размеры зерен в которых составляют десятки микрон [1–4].

Электрохимически осажденные покрытия сплавом Cu–Sn обладают высокой коррозионной и износостойкостью, способностью к пайке, твердостью, пластичностью [1, 2, 4–7]. Вследствие этого они востребованы в различных областях машино- и приборостроения. Однако их применение сдерживается недостаточной изученностью процессов, протекающих на границе раздела фаз сплав/электролит и в объеме растворов, что не позволяет синтезировать пленки с заданными свойствами. Множество литературных данных носит, в основном, рецептурный характер, и только в некоторых источниках фазовый состав и структура полученных покрытий сопоставляются с условиями синтеза.

Осаждение сплава Cu–Sn возможно из ряда электролитов – цианидных, станнатных, фенилсульфоновых, оксалатных, дифосфатных, цитратных, тартратных, гексацианоферратных, фтороборатных, триполифосфатных и других, различающихся доминирующими в них лигандами [4–11]. Условие совместного разряда ионов олова и меди на катоде достигается путем сближения их электродных потенциалов в результате комплексообразования и регулирования поляризации электрода; тем не менее во многих электролитах протекают гидролиз и окислительно-восстановительные превращения в отсутствие электрического тока: окисление Sn (II) ионами Cu (II) и растворенным кислородом с выпадением осадков, пассивация электродов продуктами неполного восстановления металлов. Существенной проблемой являются низкая скорость осаждения сплавов, ограничения по содержанию легирующего компонента (олова) или по толщине покрытий вследствие пассивации катода.

С учетом литературных данных и нашего опыта работы наиболее перспективными для синтеза защитных толстых (20–100 мкм) пленок сплава Cu–Sn являются сульфатно-тартратные, дифосфатные и кремнефтористые растворы, поскольку модификация их состава позволяет преодолеть их недостаточную устойчивость по отношению к редокс-процессам взаимодействия Cu (II) и Sn (II) и гидролизу, устранить пассивацию поверхности и ограничения толщины осаждаемых покрытий [12–15]. Особый интерес вызывают кремнефтористые электролиты в связи с высокой скоростью осаждения покрытий, достигающей 40–130 мкм/ч.

Цель данной работы заключалась в исследовании зависимости химического и фазового состава гальванических бронзовых покрытий от условий их синтеза из электролитов трех комплексных типов и определении оптимальных условий скоростного осаждения толстых защитных пленок заданного состава.

Методика исследований

Осаждение сплавов Cu–Sn проводили в гальваностатическом режиме из дифосфатных (I), сернокисло-тартратных (II) и кремнефтористых (III) электролитов, содержащих ионы обоих металлов при комнатной температуре [14, 15]. Варьировали соотношение концентраций солей осаждаемых металлов, природу лигандов, pH растворов (2–8), плотность тока (0,1–15 А/дм²). Для каждого из электролитов за минимальную плотность тока принимали ту, при которой еще конкурентоспособны процессы контактного вытеснения и пассивации, а за максимальную – когда становится возможным неполное восстановление металлов или осаждение одного из них на предельном токе диффузии. В качестве подложек применяли стальные или никелированные пластины (на детали из сплавов алюминия традиционно химически наносят барьерный слой никеля).

Гравиметрические исследования проводили на аналитических весах ВЛР-200. Вольтамперометрические исследования окислительно-восстановительных процессов проводили в трехэлектродной ячейке, включающей платиновый вспомогательный электрод и хлорсеребряный электрод сравнения.

Химический состав покрытий определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС), анализируя растворы, получаемые после полного растворения пленок, на спектрометре Carl Zeiss, Jena, модель ААС-3. Фазовый состав пленок изучали методом рентгенографии с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3.0 (CoK_{α}).

Обсуждение результатов

При исследовании методом ААС химического состава пленок, синтезированных из электролитов трех комплексных типов при различных плотностях тока и соотношениях концентраций меди и олова, установлено, что пределы варьирования относительного содержания металлов в покрытиях главным образом зависят от комплексной природы электролита. Наиболее широк интервал концентраций олова в сплавах Cu–Sn, осаждаемых из дифосфатных электролитов (1–80 ат. %), поскольку особенности лиганда позволяют в очень широких пределах варьировать соотношение ионов в электролите; при осаждении из сернокислотартратных растворов содержание олова в пленках колеблется от 1 до 30 ат. %, в случае кремнефтористых – от 25 до 35 ат. %. В меньшей степени можно регулировать состав покрытий изменением соотношения концентраций ионов олова и меди в растворе и плотности тока (табл.). Для всех изученных комплексных типов электролитов доля более активного металла в осаждаемом сплаве (олова) существенно увеличивается с повышением плотности тока и в меньшей степени – с повышением концентрации ионов этого металла в растворе. Отличительной особенностью кремнефтористых электролитов является то, что содержание компонентов в сплаве очень мало зависит от плотности тока в допустимом диапазоне (1–3 А/дм²) и регулируется только соотношением меди и олова в электролите (см. табл.).

Таблица – Химический и фазовый состав пленок Cu–Sn с толщиной 10 мкм при различных условиях синтеза

Электролит	Соотношение концентраций ионов Cu : Sn в растворе	Плотность тока, А/дм ²	Содержание олова в покрытиях, ат. % ± 2	Концентрация олова в твердом растворе (α-фаза), ат. % ± 0,5	Кристаллические фазы
Дифосфатный	1 : 10	0,08	10	–	Cu, Cu ₆ Sn ₅ , Sn*
		0,4	58		Cu, Sn, Cu ₆ Sn ₅
		0,8	77		Cu*, Sn, Cu ₆ Sn ₅
	10 : 1	0,08	2	7	Cu, α-фаза
		0,6	30	10	Cu, α-фаза
		0,8	37	9	Cu, CuSn*, α-фаза
	1 : 3	0,1	36	–	Cu, Cu ₆ Sn ₅ , Sn*
		0,3	65		Cu ₆ Sn ₅ , Sn
		0,5	74		Cu ₆ Sn ₅ , Sn
	3 : 1	0,1	6	–	Cu, CuSn
		0,3	28		Cu ₅ Sn
		0,5	36		Cu ₅ Sn
Сульфатно-тарtratный	2 : 1	0,5–1	8	8	α-фаза
	1 : 1	0,5–1	12	12	α-фаза
	1 : 2	1	27	3	α-фаза, Cu ₆ Sn ₅ , CuSn

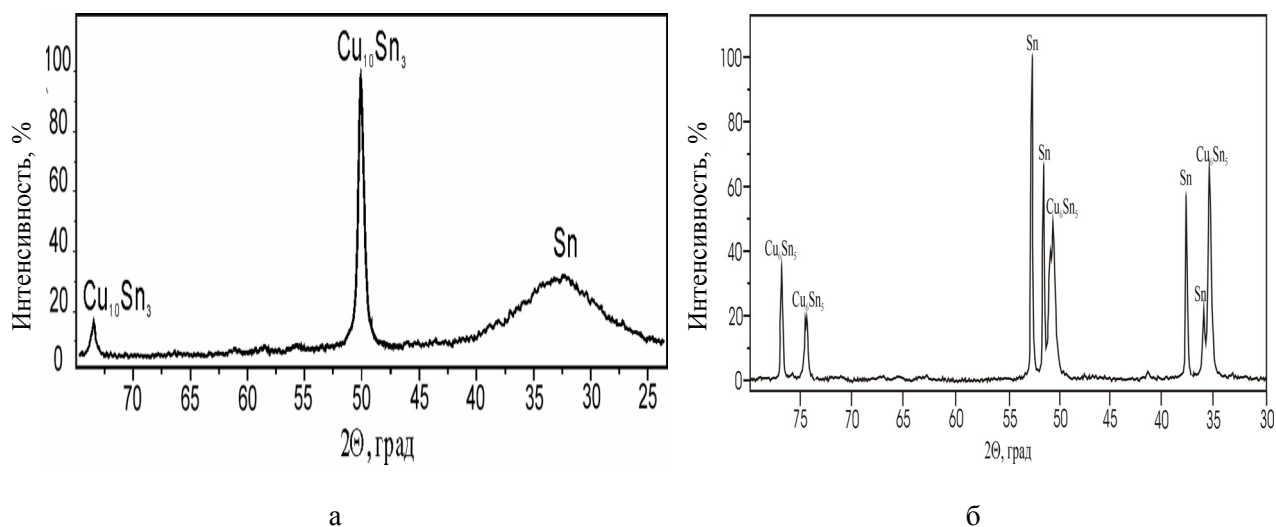
Окончание табл.

Кремне-фтористый	3 : 1	0,5–3	25	–	$\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$
	1 : 3	0,5–1 3	38 45	–	$\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$

Примечание. * – фазы, содержание которых не превышает нескольких процентов.

Все пленки бинарных сплавов, полученные из серноокисло-тарtratных кремнефтористых и дифосфатных электролитов в гальваностатическом режиме, являются микрогетерогенными системами и включают несколько фаз. В покрытиях обнаружены кристаллические фазы твердых растворов олова в меди, причем часто пересыщенных (7–12 ат. % олова, тогда как в металлургических сплавах – не более 3–4 ат. %), интерметаллических соединений Cu_6Sn_5 , $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$, индивидуальных – меди и олова (см. табл.).

Необходимо особо подчеркнуть, что все электроосажденные пленки изученных сплавов включают в свой состав рентгеноаморфную фазу. Ее наличие доказано по присутствию на рентгенограммах неидентифицируемых гало, по уширению оснований ряда пиков и несовпадению данных химического и рентгенофазового анализа. Последний факт свидетельствует в подавляющем большинстве случаев о наличии олова, не обнаруживаемого в составе кристаллических фаз, но многократно и воспроизводимо определяемого методом ААС. Так, данные рентгенографического исследования покрытий, полученных из кремнефтористых электролитов, свидетельствуют, что независимо от соотношения концентраций ионов меди и олова в растворе, пленки сплавов включают не только интерметаллическое соединение $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$, но и плохо закристаллизованное олово, о чем можно судить по соответствующим пикам первого и размытому гало второго (рис. 1, а).



а – сплавы Cu–Sn, осажденные из кремнефтористого электролита; б – сплавы Cu–Sn, осажденные из дифосфатного электролита, модифицированного органическими лигандами

Рисунок 1 – Рентгенограммы сплавов Cu–Sn

На долю рентгеноаморфного олова, судя по разнице его количества в интерметаллиде и сплаве в целом, приходится от 2 до 12 мол. % олова. В сплавах, синтезированных из дифосфатных электролитов, на долю аморфного олова приходится до 20–25 мол. %, сульфатно-тарtratных – до 5 мол. %. Очень важным является тот факт, что фазовый состав всех изученных электролитических сплавов нехарактерен для металлургической бронзы с таким же соотношением компонентов. Аномально высокое (для комнатных температур) содержание в электролитических бронзовых покрытиях интерметаллидов и аморфного олова может являться причиной их принципиально новых физико-механических свойств.

Скорость осаждения сплава из сульфатных электролитов составляет ~12–15 мкм/ч, и после достижения пленкой толщины 20–25 мкм она замедляется вследствие накопления на поверхности оксо- и гидроксосоединений олова и меди. Даже при введении в электролит органических лигандов не удается преодолеть проблем пассивации поверхности и невозможности введения в электролит высоких концентраций ионов олова, что ограничивает возможность варьирования фазового состава покрытий.

Дифосфатные электролиты характеризуются наибольшим диапазоном содержания олова в синтезируемых пленках и разнообразием их фазового состава, что представляет значительный практический интерес, однако они имеют ряд существенных недостатков: низкую скорость осаждения сплава (8–10 мкм/ч), быстрое прекращение роста пленки (после 15 мкм) вследствие процессов пассивации поверхности продуктами неполного восстановления олова и меди. Введение в дифосфатные электролиты органических лигандов (сульфосалицилатов) позволило предотвратить протекание процессов гидролиза и диспропорционирования ионов в электролите, которые приводят к пассивации поверхности катода, что существенно повысило скорость осаждения сплава (до 20–25 мкм/ч), особенно при преобладании в составе раствора олова, и сняло ограничения по толщине синтезируемых пленок. Более того, концентрация олова в сплаве при тех же плотностях тока увеличилась от 30–40 до 70–80 ат. %.

Столь высокое содержание олова в сплаве не соответствует составу известных интерметаллидов системы «олово–медь» и может свидетельствовать о наличии олова в виде индивидуальной фазы. Действительно, по данным рентгенографического анализа из дифосфатного электролита, модифицированного органическими лигандами, с преобладанием в составе олова осаждаются кристаллические фазы Cu_6Sn_5 и в значительных количествах – белого олова $\text{Sn}(\text{syn})$ (рис. 1, б), тогда как в состав сплава, осажденного из электролита с преобладанием в составе меди, входит только одна кристаллическая фаза Cu_5Sn . В литературе упоминается [1, 4–7], что наиболее ценными физико-механическими свойствами и мелкозернистой структурой отличаются покрытия с высоким содержанием легирующего компонента. Таким образом, модифицированные дифосфатные электролиты, в отличие от сульфатно-тарtratных, являются перспективными для промышленного синтеза защитных покрытий.

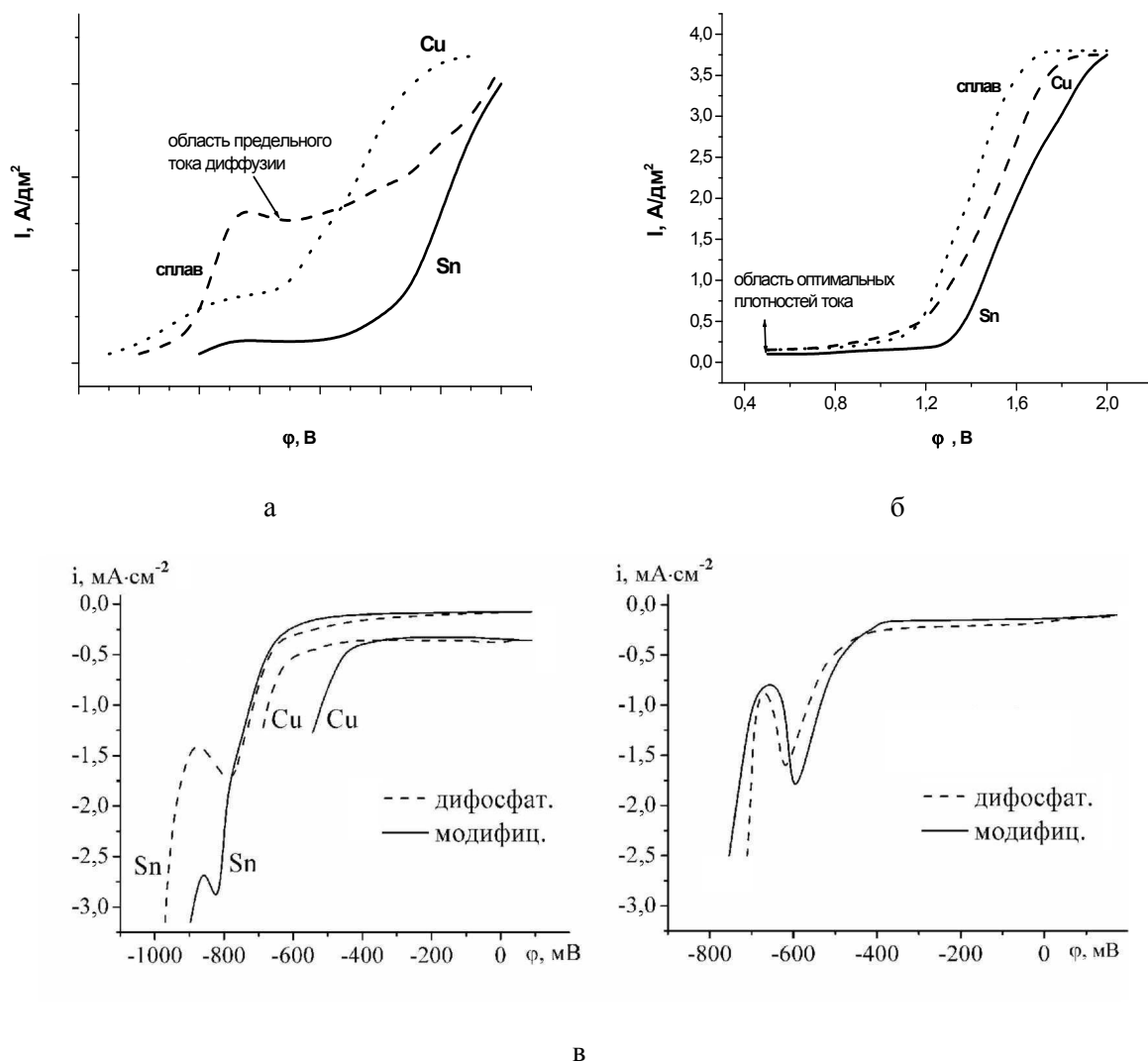
Предположительно, причины столь различных свойств сульфатно-тарtratных и дифосфатных электролитов заключаются как в скорости диффузии различных комплексных ионов олова и меди в объеме растворов, так и в особенностях процессов, протекающих на границе раздела фаз сплав/электролит при электрокристаллизации (значения потенциалов совместного восстановления ионов олова и меди, наличие побочных процессов). Как показало вольтамперметрическое исследование, и для сульфатных, и для дифосфатных электролитов характерно восстановление ионов олова со значительно большим перенапряжением, чем ионов меди, а также очень узкий диапазон допустимых токов при формировании сплава, которое протекает с незначительной деполяризацией по отношению к осаждению обоих металлов (рис. 2). Однако для сульфатных электролитов характерно также наличие значительного плато предельных токов диффузии (изгиб на кривых), когда осаждение сплава в широком диапазоне потенциалов происходит на предельном токе диффузии меди (рис. 2, а).

Очевидно, диффузионные затруднения являются причиной неудачи модификации сульфатно-тарtratных электролитов в отличие от дифосфатных, где введение лиганда приводит к деполяризации разряда ионов олова (более чем на 100 мВ) и эффекту сверхполяризации для разряда ионов меди за счет формирования смешанных комплексов и увеличения буферной емкости раствора (рис. 2, в). Наличие пика при потенциалах порядка 600 мВ на кривой совместного осаждения олова и меди, по-видимому, обусловлено формированием интерметаллического соединения.

Скорость осаждения бронзы из кремнефтористых электролитов достигает 30–50 мкм/ч в присутствии лигандов только одного типа – $[\text{SiF}_6]^{2-}$. Вольтамперметрическое исследование свидетельствует, что из кремнефтористых электролитов совместное осаждение олова и меди происходит с деполяризацией восстановления олова и сверхполяризацией восстановления

меди, причем в широком диапазоне плотностей тока и при отсутствии диффузионных затруднений (рис. 3, кривая 3). Поэтому с учетом особенностей фазового состава сплавов, получаемых из кремнефтористых растворов (только $\text{Cu}_{10}\text{Sn}_3$ и аморфное олово), эти электролиты также являются очень перспективными для синтеза толстых защитных покрытий.

Важно отметить, что во всех изученных случаях соотношение металлов в пленках бинарных сплавов изменяется по мере роста толщины пленок в процессе электроосаждения вплоть до толщины 5–8 мкм, после чего стабилизируется. При изучении зависимости химического состава формирующихся бронзовых пленок от их толщины было установлено, что тонкие пленки (1–2 мкм) обогащены оловом – его содержание достигает 60–90 % (рис. 4, 5) вне зависимости от комплексной природы электролита. По всей вероятности, в начальный момент осаждения потенциал катода имеет максимальное значение и облегчено выделение олова. В процессе дальнейшего роста толщины пленок содержание олова снижается до определенного значения для каждого типа электролитов и далее остается практически неизменным. Сложная зависимость состава покрытий, осаждаемых из дифосфатных электролитов, от их толщины (рис. 4, б) вызвана, по всей видимости, большим количеством образующихся фаз (см. табл. 1).



а – восстановление олова, меди и сплава Cu–Sn из сульфатно-тарtratных электролитов; б – восстановление олова, меди и сплава Cu–Sn из дифосфатных электролитов; в – восстановление олова, меди и сплава Cu–Sn из дифосфатных электролитов, модифицированных сульфосалицилатами

Рисунок 2 – Вольтамперные кривые восстановления олова, меди и сплава Cu–Sn

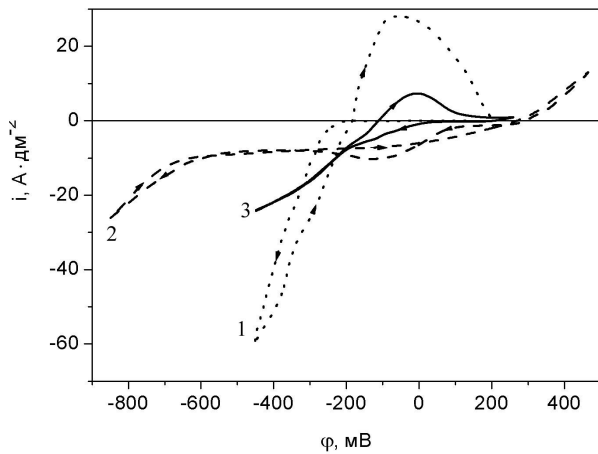
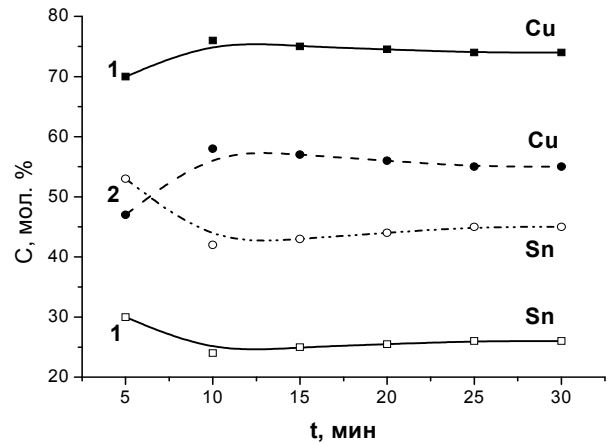
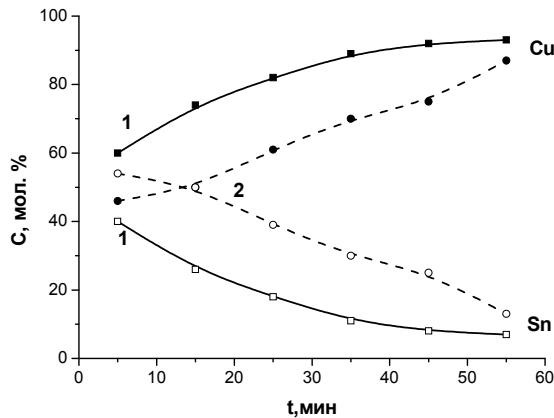


Рисунок 3 – Вольтамперные кривые восстановления олова (1), меди (2) и их совместного восстановления (3) из кремнефтористых электролитов

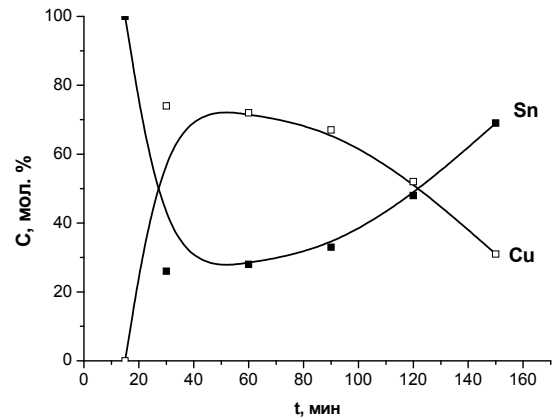


1 – преобладание меди в составе раствора;
2 – преобладание олова в составе раствора

Рисунок 5 – Зависимость химического состава покрытий Cu-Sn, полученных из кремнефтористых электролитов при плотности тока 2,8 А/дм², от времени осаждения



а



б

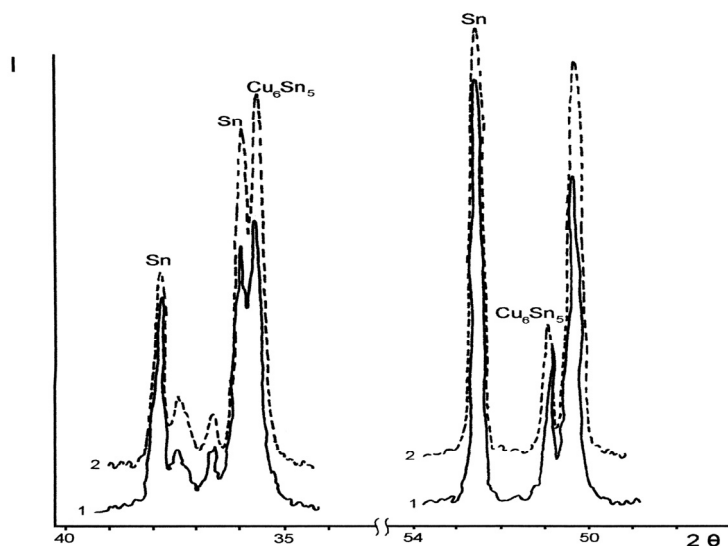
1 – преобладание меди в составе раствора; 2 – преобладание олова в составе раствора

Рисунок 4 – Зависимость химического состава покрытий, полученных в гальваностатическом режиме из сульфатно-тарtratных (а) и дифосфатных (б) электролитов при плотности тока 1 А/дм², от времени осаждения

Содержание олова в сплавах, осажденных из кремнефтористых электролитов, также нелинейно зависит от толщины покрытий (см. рис. 5). Состав покрытий меняется по мере роста до 5 мкм, сплав обедняется оловом, что можно, по-видимому, связать с влиянием подложки на первоначальную стадию роста покрытий. При дальнейшем осаждении сплавов из этих электролитов в оптимальном режиме формируются покрытия с постоянным составом (24–45 мол. %), не изменяющимся при увеличении их толщины в пределах от 5 до 80 мкм и одинаковым по всей глубине.

Такая особенность электроосаждения сплавов часто наблюдается в случае формирования на катоде однофазной системы на основе интерметаллического соединения [1]; в случае кремнефтористых электролитов этой фазой является $Cu_{10}Sn_3$. Следует подчеркнуть, что изменение состава сплава по мере осаждения оказывает влияние на свойства только очень тонких (1–5 мкм) пленок. При синтезе толстых (от 20 до 100 мкм и более) покрытий влияние подложки нивелируется, а компоненты сплава (как будет показано ниже) перераспределяются по глубине достаточно равномерно.

Поскольку наши исследования показали, что практически все изученные покрытия имеют постоянно воспроизводимый неравновесный фазовый состав, очень важным представлялось выяснить, будет ли состав гальванически синтезированных сплавов стабильным во времени и при разогреве. Было установлено, что при длительном хранении (6–12 месяцев) или прогреве изучаемых пленок до температур 250–300 °С их фазовый состав изменяется весьма незначительно: происходит повышение степени кристалличности интерметаллидов и твердых растворов, частичная кристаллизация аморфного олова с образованием более насыщенных оловом твердых растворов (рис. 6).



1 – свежеполученные покрытия; 2 – покрытия после прогрева при 250 °С

Рисунок 6 – Рентгенограммы пленок Cu–Sn, осажденных из дифосфатного электролита

Иногда при прогреве в следовых количествах (не более 2–4 ат. %) кристаллизуются интерметаллиды олова с металлом подложки – никелем или железом, – такие как Ni_3Sn_4 , Ni_4Sn_4 и др. Полученные результаты свидетельствуют о стабильности фазового состава электролитических бронзовых пленок и имеют особенно важное значение в случае защиты изучаемыми покрытиями деталей спасательной техники, которые подвергаются резким многократным локальным перегревам.

Заключение

Путем сопоставительного исследования химического и фазового состава сплавов Cu–Sn, электрохимически синтезированных из растворов разного комплексного состава, установлено, что все они являются микрогетерогенными системами с неравновесным, но стабильным фазовым составом, включающим как кристаллические, так и аморфные фазы.

Методом вольтамперометрии определено, что неперемным условием электроосаждения толстых пленок с высокой скоростью является отсутствие диффузионных затруднений при электровосстановлении ионов обоих металлов, а формирование сплавов с высоким (до 80 ат. %) содержанием олова происходит при условии выделения олова в сплав с сильно выраженным эффектом деполяризации по отношению к индивидуальному восстановлению олова. Из исследованных групп электролитов для синтеза защитных бронзовых покрытий наиболее перспективными представляются дифосфатные и кремнефтористые растворы – как по составу получаемых сплавов, так и по особенностям электрокристаллизации.

Установлено, что соотношение компонентов в сплаве легко регулировать изменением плотности тока при электролизе и соотношения концентраций ионов меди и олова в электролите: количество олова в покрытиях существенно возрастает при повышении плотности тока, в меньшей степени – концентрации ионов олова в электролите.

Несомненно, формирование при комнатных температурах пересыщенных твердых растворов и интерметаллических соединений может являться основой наличия в изучаемых покрытиях высокой твердости и коррозионной устойчивости, а значительное количество аморфной составляющей – пластичности и паяемости. Детальное рассмотрение микроструктуры изучаемых пленок и их физико-механических свойств представлено во второй части работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Структура и свойства электролитических сплавов / В.К. Поветкин, И.М. Ковенский, Ю.М. Устиновщиков. – М. : Наука, 1992. – 254 с.
2. Гамбург, Ю.Д. Электрохимическая кристаллизация металлов и сплавов / Ю.Д. Гамбург. – М. : РАН ИФХ; Янус-К, 1997. – 384 с.
3. Структура двойных сплавов : справочник в 2 т. / М. Хансен, К. Андерко. – М. : Металлургиздат, 1962. – 380 с.
4. Мельников, П.С. Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении / П.С. Мельников. – М. : Машиностроение, 1991. – 380 с.
5. Burhhardt, W. Electrodeposition of Functional Metal Coatings / W. Burhhardt // *Galvanotechnic*. – 1993. – Vol. 84, № 8. – P. 2585–2590.
6. Бронзирование деталей из титановых сплавов / А.И. Рябой, Е.В. Ховрин, С.М. Вашенцева // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 1993. – Т. 2, № 2. – С. 52–54.
7. Физико-химические свойства покрытий белой бронзой, полученных из полилигандного электролита / И.В. Одинокова, Л.В. Космодамианская, К.М. Тютин // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 2002. – Т. 10, № 1. – С. 23–26.
8. Дудник, В.В. Емкость двойного электрического слоя в концентрированных растворах электролитов / В.В. Дудник // *Коллоидный журнал*. – 1998. – Т. 60, № 1. – С. 132–134.
9. Электродинамика границы металл/электролит / А.М. Бродский, М.И. Урбах. – М. : Наука, 1989. – 276 с.
10. Салем, Р.Р. Электронная модель границы раздела металл/электролит / Р.Р. Салем // *Поверхность*. – 1998. – № 4. – С. 57–60.
11. Электрохимические и химические покрытия. Теория и практика / С.Я. Гриллихес, К.И. Тихонов. – Л. : Химия, 1990. – 280 с.
12. Справочник гальванотехника / под ред. А.М. Гинберга. – М. : Metallurgiya, 1987. – 736 с.
13. Фоппелиус, Т. Новый более экологически чистый метод лужения металлических поверхностей / Т. Фоппелиус // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 1993. – Т. 2, № 3. – С. 55.
14. Электролиты скоростного меднения для восстановления деталей машин и осаждения защитных и уплотняющих покрытий / О.В. Рева, Т.Н. Воробьева, Б.В. Кузнецов // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2004. – № 1. – С. 9–12.
15. Электроосаждение и коррозионная устойчивость сплава медь-олово / Б.В. Кузнецов, Т.Н. Воробьева, А.И. Варвашевич // *Свиридовские чтения : сб. ст. – Вып. 2. – Минск : Універсітэцкае*. – 2005. – С. 196–202.
16. Сплавообразование при совместном осаждении меди и олова из кремнефтористых электролитов / О.В. Рева, Т.Н. Воробьева, Б.В. Кузнецов // *Электрохимия*. – 2006. – Т. 42, № 1. – С. 44–51.