

*А. Н. АЛТЕНОВА, С. К. КИЛИБАЕВА, Ж. Е. ЯХИЯЕВА,
Л. Я. АГАПОВА*, З. С. АБИШЕВА, Б. М. СУКУРОВ*

*АО «Центр наук о Земле, металлургии и обогащения»
Алматы, *rm.303.imo@mail.ru*

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДЫ МАТЕРИАЛА ПОДЛОЖКИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА АДГЕЗИЮ И МИКРОТВЕРДОСТЬ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ РЕНИЙ-НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ

В статье приведены результаты исследований влияния природы материала подложки (нержавеющая сталь и медь) и термической обработки на адгезию и микротвердость рений-никелевых покрытий. Электролитические покрытия на основе рений-никелевых сплавов осаждали из аммонийно-сернокислых растворов с добавками глицерина в условиях мембранного электролиза. Полученные покрытия подвергали термической обработке в токе инертного газа аргона при температуре 400 °С в течение 1 ч. Проведена оценка степени адгезии Re-Ni покрытий к подложкам методом нанесения решетчатых и параллельных сеток царапин (метод рисок). Значение оценки адгезии образцов покрытий до отжига с нанесением решетчатых надрезов составило по четырехбалльной шкале: на медной подложке 1 балл, на стальной подложке 4 балла. После отжига значение оценки адгезии образцов покрытий составило: на медной подложке 1 балл, на стальной подложке 2 балла. Значение оценки адгезии образцов покрытий к подложкам методом нанесения параллельных надрезов составило по трехбалльной шкале на медной и стальной подложках до отжига 2, балла, после отжига на медной подложке 1, балл, на стальной 2, балла. В целом адгезия Re-Ni покрытий на медных подложках выше, чем на стальных, а термическая обработка покрытий повышает адгезию независимо от материала подложки. Микротвердость покрытий после отжига повысилась: на медной подложке – от 6990 до 9211 МПа, на стальной подложке – от 3732 до 4204 МПа.

Ключевые слова: сплав, покрытия, рений, никель, мембранный электролиз, медная подложка, стальная подложка, отжиг, адгезия, микротвердость.

Введение. Техника сегодняшнего дня существенно ужесточает требования к условиям эксплуатации конструкций различного применения, прежде всего для повышения срока службы за счет нанесения функциональных металлических покрытий с высокой микротвердостью и соответственно высокой износостойкостью.

Металлические покрытия разделяются по способу их получения. Для нанесения тугоплавких металлов применяют плазменное напыление, а также осаждение из газовой фазы. Используется вакуумная металлизация изделий путём конденсации паров металла в вакууме на защищаемую металлическую поверхность. Широко распространены, особенно в машиностроении, гальванические покрытия, химические методы осаждения металлов путём их вос-

становления из водных растворов солей. Получает применение осаждение гальванических покрытий из расплавленных солей. При этом совмещается катодное осаждение металлов с термодиффузионными процессами, что позволяет получить покрытия с высокими защитными и адгезионными свойствами.

Благодаря сочетанию износостойкости, твёрдости и коррозионной стойкости покрытия на основе сплавов редких, тугоплавких и цветных металлов могут найти применение в ответственных узлах авиационной, военной и космической техники для деталей и контактов. Среди тугоплавких металлов можно выделить рений и его сплавы с никелем, вольфрамом и молибденом, которые обладают ценными физико-химическими свойствами [1-6].

Электролитические сплавы, в отличие от литейных, обладают качественно новыми техническими характеристиками: у них может быть повышена в несколько раз микротвердость, пластичность, жаропрочность, коррозионностойкость [7-9]. Известны работы по электроосаждению сплавов на основе рения и никеля из водных растворов электролитов [10-13]. Использование мембранного электролиза дает возможность заменить дорогие платиновые аноды более дешевыми анодными материалами, например графитом, не загрязняя при этом получаемый конечный продукт [14]. Вопрос получения электролитических сплавов, особенно в виде покрытий на других металлах, представляет значительный интерес.

Сцепление покрытия (осадка) с основой (адгезия покрытия к основе) является одной из основных характеристик гальванопокрытия. В гальванотехнике обычно требуется либо очень высокая, либо очень низкая адгезия. Низкая адгезия нужна в случае, когда покрытие должно отделяться от основы и использоваться самостоятельно, высокая адгезия – во всех остальных случаях. Высокая адгезия обеспечивается непосредственным межатомным взаимодействием материалов осадка и основы (например, при эпитаксиальном росте, когда структура осадка воспроизводит структуру основы) или является следствием взаимной диффузии этих материалов, в результате чего образуется промежуточный слой. Также сцепление может быть высоким просто за счет чисто механического взаимного зацепления неровностей поверхностей осадка и основы. Из этого следует, что адгезия в сильнейшей степени зависит от предварительной обработки поверхности основы, условий формирования первых слоев покрытия, обработки системы «основа – покрытие» после осаждения (например, прогрева при температуре, обеспечивающей взаимную диффузию компонентов) [8].

Микротвердость материала важна для технических приложений, что делает ее одним из важнейших параметров, характеризующих механические свойства гальванопокрытий.

В связи с этим исследование адгезии и микротвердости электролитических покрытий на основе рений-никелевых сплавов на различных подложках представляет значительный интерес с точки зрения практического использования таких покрытий.

Экспериментальная часть. В процессе исследований использовали рентгенофазовый (D8 ADVANCE, ДРОН 4-07), химический (Optima 8300DV), кристаллооптический (OLYMPUS BX-51), электронно-микроскопический (JEOL JXA-8230) методы анализа.

В качестве объекта исследования использовали электролитические покрытия на основе рений-никелевых сплавов на медных и стальных подложках. Покрытия осаждали в мембранном четырехкамерном электролизере (анод – графит, катод – пластина из меди или нержавеющей стали) из аммонийно-серноокислых растворов с добавками глицерина при катодной плотности тока 500 А/м^2 , продолжительности процесса 4 ч. Поверхность медных и стальных подложек перед нанесением покрытий обрабатывали в растворе серной кислоты (10 г/дм^3). Площадь покрытия на подложке $6,4 \text{ см}^2$, при этом нанесение покрытий осуществлялось на одной стороне подложки.

Полученные образцы с покрытием сушили при комнатной температуре, взвешивали и определяли их прочность сцепления с подложкой и микротвердость до и после отжига покрытий в инертной среде. Микротвердость рений-никелевых покрытий измеряли на микротвердомере ПМТ-3, вдавливая в поверхность покрытия алмазную пирамиду нагрузкой 50 или 100 г. С точки зрения эксплуатационных характеристик покрытий все изменения, происходящие при термической обработке, могут быть и положительными и отрицательными, поэтому каждый конкретный случай требует отдельного рассмотрения.

Термическая обработка. Отжиг электролитических покрытий выполняли в трубчатой печи в токе аргона при температуре 400°C в течение 1 ч. Остывание образцов покрытий проводили в той же печи в токе аргона до 50°C .

Испытания покрытий на адгезионную прочность с основой. Для оценки адгезии на практике используют так называемые качественные, полуколичественные и количественные методы. Качественные методы позволяют различить только высокое и низкое сцепление, полуколичественные дают оценку, например, по 3- или 4-балльной шкале. С помощью количественных методов сцепление определяется в каких-либо единицах [8, 15].

Испытания на прочность сцепления с материалом подложки Re-Ni покрытий до и после

отжига проводили согласно ГОСТ 9.302-88 и ИСО 4524-1-85 (Покрyтия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля) [16] и ГОСТ 15140-78 и ИСО 2409-72 (Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии) [17] методами решетчатых и параллельных надрезов.

Одним из качественных методов оценки адгезии является метод нанесения сетки царапин (метод рисок). Рекомендyется для покpытий толщиной не более 20 мкм. На поверхность покpытия острием наносят не менее трех параллельных рисок с расстоянием между ними 2-3 мм и перпендикулярно к ним также не менее трех рисок. Риски наносят в одном направлении глубиной до основного металла. После испытаний не должно быть отслаивания покpытия между линиями и в сетке квадратов [16].

Для сравнения адгезии рений-никелевых покpытий к разным подложкам до и после отжига образцов нами условно принята полуколичественная оценка адгезии покpытий с материалом подложки по 3- и 4-балльной шкале согласно [17].

Ход работы:

1. Перед испытанием поверхности образцов покpытий очищали спиртом.

2. По методу решетчатых надрезов на поверхности образца наносят режущим инструментом не менее 6 параллельных надрезов до металла длиной не менее 20 мм на расстоянии 1, 2 или 3 мм друг от друга. Аналогичным образом делают надрезы в перпендикулярном направлении. В результате на покpытии образуется решетка из квадратов одинакового размера.

3. При нанесении решетчатого надреза на поверхность Re-Ni покpытия – по диагонали проводим мягкой кистью, дальше анализируем визуально (с лупой).

4. По методу параллельных надрезов на поверхности образца необходимо сделать не менее 5 параллельных надрезов длиной не менее 20 мм до металла на расстоянии 1, 2 или 3 мм друг от друга. Перпендикулярно надрезам накладывают полоску липкой ленты размером 10x100 мм и плотно ее прижимают, оставляя один конец полоски неприклеенным, затем резким движением ленту отрывают от покpытия.

Сущность метода решетчатого надреза заключается в нанесении на исследуемые рений-никелевые покpытия решетчатых надрезов и визуальной оценке состояния покpытий по че-

тырехбалльной системе, которая представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Четырехбалльная шкала адгезии покpытий

Четырехбалльная шкала	Описание поверхности покpытия после нанесения надрезов в виде решетки
1	Края надрезов полностью гладкие, нет признаков отслаивания ни в одном квадрате решетки
2	Незначительное отслаивание покpытия в виде мелких чешуек в местах пересечения линий решетки. Нарушение наблюдается не более, чем на 5 % поверхности решетки
3	Частичное или полное отслаивание покpытия вдоль линий надрезов решетки или в местах их пересечения. Нарушение наблюдается не менее, чем на 5 % и не более, чем на 35 % поверхности решетки
4	Полное отслаивание покpытия или частичное, превышающее 35 % поверхности решетки

Метод параллельного надреза базируется на нанесении на исследуемые рений-никелевые покpытия параллельных надрезов, перпендикулярном наложении полоски липкой ленты и ее быстром отрыве от покpытия и визуальной оценке состояния покpытий по трехбалльной системе (таблица 2).

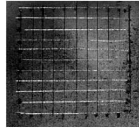
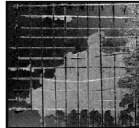
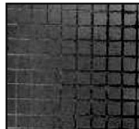
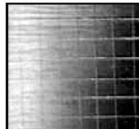
Таблица 2 – Трехбалльная шкала адгезии покpытий

Трехбалльная шкала	Описание поверхности покpытия после нанесения надрезов и снятия липкой ленты
1 ₁	Края надрезов гладкие
2 ₁	Незначительное отслаивание пленки по ширине полосы вдоль надрезов (не более 0,5 мм)
3 ₁	Отслаивание покpытия полосами

Результаты и их обсуждение. Проведена оценка адгезии Re-Ni покpытий с медной и стальной подложками до и после отжига образцов в токе инертного газа аргона по методу решетчатых и параллельных надрезов. Полученные результаты исследования по прочности сцепления Re-Ni покpытий с подложкой сравнивались с данными таблиц 1 и 2.

В таблице 3 представлены результаты оценки по четырехбалльной шкале прочности сцеп-

Таблица 3 – Оценка адгезии Re-Ni покрытий к подложкам по методу решетчатых надрезов

№ пробы	Балл	Описание поверхности рений-никелевых покрытий после нанесения надрезов в виде решетки	Внешний вид покрытий	
До отжига				
2	1	На медной подложке – края надрезов гладкие, нет признаков отслаивания в квадрате решетки.		
	4	На стальной подложке – частичное или полное отслаивание, превышающее 35 % поверхности решетки.		
После отжига				
2	1	На медной подложке – края надрезов гладкие, нет признаков отслаивания в квадрате решетки.		
	2	На стальной подложке – имеется незначительное отслаивание по краям покрытия в местах пересечения линий решетки. Нарушение наблюдается не более, чем на 5 % поверхности решетки.		

ления Re-Ni покрытий с медной и стальной подложками до и после отжига образцов в токе аргона по методу решетчатых надрезов. Прочность сцепления рений-никелевых покрытий с медной и стальной подложками по методу решетчатых надрезов по четырехбалльной шкале составляет до отжига соответственно 1 и 4 балла, после отжига – 1 и 2 балла. На фотогра-

фиях поверхности покрытий видно, что адгезия покрытий к медным подложкам высокая как до отжига, так и после него. Адгезия покрытий к стальным подложкам низкая, особенно на неотожженном образце.

В таблице 4 представлены результаты оценки по трехбалльной шкале прочности сцепления Re-Ni покрытий с медной и стальной подложка-

Таблица 4 – Оценка адгезии Re-Ni покрытий к подложкам по методу параллельных надрезов

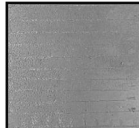
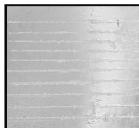
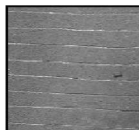
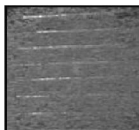
№ пробы	Балл	Описание поверхности рений-никелевых покрытий после нанесения надрезов и снятия липкой ленты	Внешний вид покрытий	
До отжига				
6	2 ₁	На медной подложке – имеется незначительное отслаивание покрытия по ширине полосы вдоль надрезов (не более 0,5 мм).		
	2 ₁	На стальной подложке – имеется незначительное отслаивание покрытия по ширине полосы вдоль надрезов (не более 0,5 мм).	На медной подложке	На стальной подложке
После отжига				
6	1 ₁	На медной подложке – края надрезов гладкие.		
	2 ₁	На стальной подложке – имеется незначительное отслаивание покрытия по ширине полосы вдоль надрезов (не более 0,5 мм).	На медной подложке	На стальной подложке

Таблица 5 – Значение микротвердости Re-Ni покрытий, на медных и стальных подложках до и после отжига

Свойства Re-Ni покрытий	Материал подложки			
	нержавеющая сталь		медная подложка	
	без отжига	с отжигом	без отжига	с отжигом
Микротвердость, МПа	3732	4204	6990	9211

ми по методу параллельных надрезов до и после отжига образцов в токе аргона.

Из данных таблицы 4 следует, что прочность сцепления рений-никелевых покрытий с медной и стальной подложками до отжига по трехбалльной шкале составляет соответственно 2₁ и 2₁ балла, после отжига – 1₁ и 2₁ балла. На фотографиях поверхности покрытий видно, что прочность сцепления покрытий с медными подложками выше, чем со стальными.

Результаты оценки прочности сцепления рений-никелевых покрытий с медными и стальными подложками по методу решетчатых и параллельных надрезов показали, что отжиг образцов покрытий способствует росту адгезии покрытий к подложкам, вероятно, за счет взаимной диффузии компонентов покрытия и подложки.

В целом адгезия рений-никелевых покрытий к медным подложкам заметно выше, чем на подложках из нержавеющей стали.

Исследована микротвердость рений-никелевых покрытий, осажденных при плотности тока 500 А/м², температуре 20 °С и продолжительности электролиза 4 ч на медных и стальных подложках, до отжига образцов в токе инертного газа и после отжига (таблица 5). На медной подложке получены плотные покрытия светло-серого цвета. Покрытия, осажденные на подложках из нержавеющей стали, темно-серого цвета, грубодисперсные.

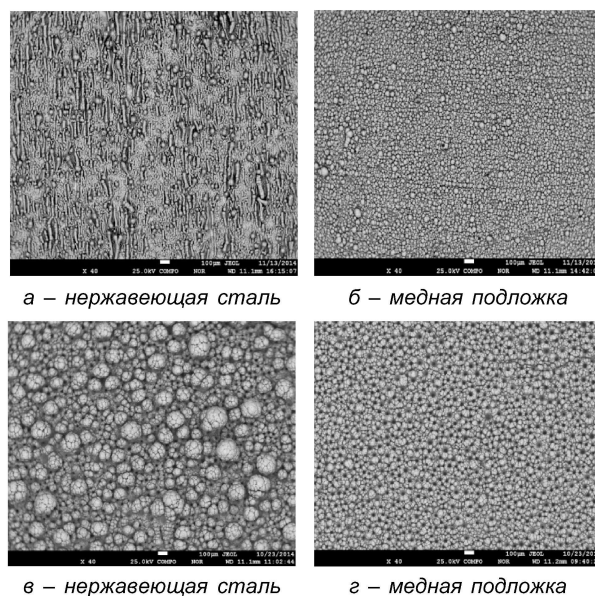
Из данных таблицы 5 следует, что микротвердость рений-никелевых покрытий независимо от материала подложки после отжига образцов в токе инертного газа заметно возрастает, что, вероятно, связано с упорядочиванием структуры Re-Ni сплавов.

По данным рентгенофазового анализа, сплавы без отжига представляют собой твердые растворы никеля в рении и рения в никеле. Размер зерен (субзерен) определен равным 1,7-2,0 нм. Сплавы Re-Ni с отжигом покрытий представляют собой твердые растворы рения в никеле и никеля в рении. По уширению линии на дифрактограмме покрытий определено, что после отжига кристаллизация сплавов Re-Ni происходит

с выделением мелкодисперсных фаз с размером зерен 20 нм.

Анализ осадков покрытий, выполненный на электронно-зондовом микроанализаторе, показал содержа-

ние в сплавах на медных подложках, мас. %: рения – 52,9-71,4, никеля – 28,5-46,7; на стальных подложках, мас. %: рения – 39,0-83,8, никеля – 16,2-61,0. Микроструктуры рений-никелевых покрытий на стальных и медных подложках до отжига и после отжига образцов в токе инертного газа, определенные с помощью электронно-зондового микроанализатора, показаны на рисунке 1. Как видно, на медных подложках структура покрытий более мелкозернистая и однородная по сравнению со структурой покрытий на нержавеющей стали. Однако независимо от материала подложки после отжига образцов покрытий в токе инертного газа структура покрытий становится более крупнозернистой.



а, б – до отжига; в, г – после отжига

Рисунок 1 – Микроструктура Re-Ni покрытий на подложках из нержавеющей стали и медных подложках до отжига и после отжига

Выводы. Проведена оценка степени адгезии Re-Ni покрытий к подложкам методом нанесения решетчатых и параллельных сеток царапин (метод рисок).

Значение оценки адгезии образцов покрытий с нанесением решетчатых надрезов по четырехбалльной шкале:

До отжига:

на медной подложке – 1 балл,
на стальной подложке – 4 балла.

После отжига:

на медной подложке – 1 балл,
на стальной подложке – 2 балла.

Значение оценки адгезии образцов покрытий к подложкам методом нанесения параллельных надрезов по трехбалльной шкале:

До отжига:

на медной и стальной подложках – 2₁ балла,

После отжига:

на медной подложке – 1₁ балл,
на стальной подложке – 2₁ балла.

В целом адгезия Re-Ni покрытий на медных подложках выше, чем на стальных, а термическая обработка покрытий повышает адгезию независимо от материала подложки. Микротвердость покрытий после отжига повышается:

на медной подложке – от 6990 до 9211 МПа,
на стальной подложке – от 3732 до 4204 МПа.

По данным рентгенофазового анализа, сплав без отжига представляет собой твердые растворы никеля в рении и рения в никеле. Размер зерен (субзерен) определен как 1,7-2,0 нм.

Сплавы Re-Ni с отжигом покрытий представляют собой твердые растворы рения в никеле и никеля в рении. По уширению линии на дифрактограмме покрытия установлено, что после отжига кристаллизация сплавов Re-Ni происходит с выделением мелкодисперсных фаз с размером зерен 20 нм.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Космин А.А. Жаростойкие ионно-плазменные покрытия для жаропрочных никелевых ренийсодержащих сплавов для монокристалльного литья: сб. статей по матер. 1 Междунар. конф. // Деформация и разрушение материалов. – Москва. – 2006. – Т. 1. М.: Интерkontakt Nauka. 2006. – 443 с.
- 2 Lipmann A. Rhenium // Mining Annu. Rev. 2003. PXLIII/1-XLIII/ 11-1.
- 3 Савицкий Е.М., Тылкина М.А., Левин А.М. Сплавы рения в электронике. – М.: Энергия, 1980. – 216 с.
- 4 Тылкина М.А., Савицкий Е.М. Сплавы рения в народном хозяйстве // Физико-химические свойства сплавов рения / отв. ред. Е.М.Савицкий. – М.: Наука, 1979. – 215 с.
- 5 Кириллова В.М., Бурханова Г.С. Микроструктура монокристаллов сплава «никель – 15 %, молибдена – 10 %, рения» // Металлические монокристаллы. – М.: Наука, 1990. – С. 192-196.
- 6 Арская Е.П. Структура и свойства твердых растворов тройной системы «никель-рений-молибден» // Металлические монокристаллы. – М.: Наука, 1990. – С. 220-224.

7 Поветкин В.В., Ковенский И.М., Устиновских Ю.И. Структура и свойства электролитических сплавов. – М.: Наука, 1992. – 255 с.

8 Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия: справочник по применению. – М.: Техносфера, 2006. – 206 с.

9 Ваграмян А.Т., Петрова Ю.С. Физико-механические свойства электролитических осадков. – М.: АН СССР, 1960.

10 Соминская З.М., Никитина А.А., Тылкина М.А., Склярченко С.И., Савицкий Е.М. Гальванические покрытия сплавами рений-никель, рений-кобальт, рений-хром, рений-никель-хром: сб. науч. трудов. – М.: АН СССР, 1961. – С. 209-213.

11 Naora A., Eliaz N., Gileadib E. Electrodeposition of rhenium-nickel alloys from aqueous solutions // Electrochimica Acta. – 2009. – 54. – P. 6028-6035.

12 Kopyto D., Kwarcinski M., Benke G., Leszczynska-Sejda K., Chmielarz A., Hanke M., Baranek W. // Electrochemical method for rhenium-nickel alloys production: Abstracts of 3rd International Conference By-Product Metals in Non-Ferrous Metals Industry. Poland, Wroclaw, 15-17 June 2013. P. 15.

13 Novak P., Mordarski G. // Electrocrystallization of rhenium and its alloys from aqueous solutions: Abstracts of 3rd International Conference By-Product Metals in Non-Ferrous Metals Industry. Poland, Wroclaw, 15-17 June 2013. P. 16.

14 Agapova L.Ya., Abisheva Z.S., Ponomareva E.I., Kilibayeva S.K., Aytekeeva S.N. Deposition of Electrolytic Coatings Based on Rhenium-tungsten Alloys from Aqueous Solutions // Non-ferrous Metals. 2011. – No. 1. – P. 12-16.

15 Ковенский И.М., Поветкин В.В. Испытания гальванических покрытий: справ. изд. – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 136 с.

16 ГОСТ 9.302-88 Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Методы контроля. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.

17 ГОСТ 15140-78 Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.

REFERENCES

- 1 Muboyadzhyan S.A., Budinovskij S.A., Gayamov A.M., Kos'min A.A. Zharostoikie ionno-plazmennye pokrytiya dlya zharoprochnykh nikel'evykh renijsoderzhashih splovov dlya monokristal'nogo lit'ya (Heat resistant ion-plasma coating for heat-resistant nickel rhenium-containing alloys for monocrystal casting) Sb. statej po materialam 1 Mezhdunar. Konf. Deformatsiya i razrushenie materialov» (The collection of articles on materials of 1-th International Conference «Deformation and destruction of materials»), 2006. Vol. 1. Moscow: Interkontakt Nauka. 2006, 443 (in Russ.).
- 2 Lipmann A. Rhenium. Mining Annu. Rev. 2003. PXLIII/1-XLIII/ 11-1 (in Eng.).
- 3 Savickij E.M., Tylkina M.A., Levin A.M. Splavy reniya v ehlektronike (Rhenium alloys in electronics) – Moscow: Ehnergiya (Energy), 1980. – 216 (in Russ.).
- 4 Tylkina M.A., Savitskij E.M. Splavy reniya v narodnom khozyaistve. Fiziko-khimicheskie svoistva splavov

vov reniya. (Rhenium alloys in national economy. Physical and chemical properties of rhenium alloys.). Moscow: Nauka, **1979**. 215 (in Russ.).

5 Kirillova V.M., Burhanova G.S. *Mikrostruktura monokristallov splava nikel'-15% molibdena-10% reniya* (Microstructure of single crystal alloy nickel-15 % molybdenum-10% rhenium). Metallicheskie monokristally (Metal single crystals). Moscow: Nauka, **1990**. 192-196 (in Russ.).

6 Arskaya E.P. *Struktura i svoistva tverdykh rastvorennykh sistem nikel'-renij-molibden* (Structure and properties of solid solutions of triple system nickel-rhenium-molybdenum). Metallicheskie monokristally (Metal single crystals). Moscow: Nauka, **1990**. 220-224 (in Russ.).

7 Povetkin V.V., Kovenskij I.M., Ustinovshchikov Yu.I. *Struktura i svoistva ehlektroliticheskikh splavov* (Structure and properties of electrolytic alloys). Moscow: Nauka, **1992**. 255 (in Russ.).

8 Gamburg Yu.D. *Gal'vanicheskie pokrytiya: spravochnik po primeneniyu* (Galvanic coatings: a handbook on the application). Moscow: Techno-sphere, **2006**. 206 (in Russ.).

9 Vagramyan A.T., Petrova Yu.S. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva ehlektroliticheskikh osadkov*. (Physical-mechanical properties of electrolytic deposits). Moscow: USSR AS, **1960**, 199 (in Russ.).

10 Sominskaya Z.M., Nikitina A.A., Tylkina M.A., Sklyarenko S.I., Savitskiy E.M. *Gal'vanicheskie pokrytiya splavami renij-nikel', renij-kobal't, renij-khrom, renij-nikel'-khrom. Sbornik nauchnykh trudov* (Galvanic coatings by the alloys of rhenium-nickel, rhenium-cobalt, rhenium-chromium, rhenium-nickel-chromium. Collected papers). Moscow: USSR AS, **1961**.

209-213 (in Russ.).

11 Naora A., Eliaz N., Gileadib E. Electrodeposition of rhenium-nickel alloys from aqueous solutions. *Electrochimica Acta*. **2009**, 54. 6028-6035 (in Eng.).

12 Kopyto D., Kwarcinski M., Benke G., Leszczynska-Sejda K., Chmielarz A., Hanke M., Baranek W. Electrochemical method for rhenium-nickel alloys production. *Abstracts of 3rd International Conference: By-Product Metals in Non-Ferrous Metals Industry*. Poland, Wroclaw, 15-17 June **2013**. 15 (in Eng.).

13 Novak P., Mordarski G. Electrocrystallization of rhenium and its alloys from aqueous solutions. *Abstracts of 3rd International Conference: By-Product Metals in Non-Ferrous Metals Industry*. Poland, Wroclaw, 15-17 June 2013. 16 (in Eng.).

14 Agapova L.Ya., Abisheva Z.S., Ponomareva E.I., Kilbayeva S.K., AYTEKEEVA S.N. Deposition of electrolytic coatings based on rhenium-tungsten alloys from aqueous solutions. *Non-ferrous metals*. **2011**. 1. 12-16 (in Eng.).

15 Kovenskij I.M., Povetkin V.V. *Ispytaniya gal'vanicheskikh pokrytij. Spravochnoe izdanie*. (The testing of galvanic coatings. Reference book). Moscow: Inter-met Engineering, **2001**. 136 (in Russ.).

16 GOST 9.302-88 *Edinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya. Pokrytiya metallicheskie i nemetallicheskie neorganicheskie. Metody kontrolya* (Unified system of corrosion and ageing protection. Metal and non-metal inorganic coating. Control methods). Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, **2001** (in Russ.).

17 GOST 15140-78 *Materialy lakokrasochnye. Metody opredeleniya adgezii* (Paintwork materials. Methods for determination of adhesion). Moscow: IPK Izdatelstvo standartov, **2001** (in Russ.).

ТҮЙІНДЕМЕ

Мақалада рений-никелді қаптамалардың адгезиясы мен микроқаттылығына термиялық өңдеу мен төсеніш материал (татталмайтын болат және мыс) табиғатының әсерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Рений-никелді қорытпа негізіндегі электролиттік қаптамалар, мембранды электролиз жағдайында глицерин қоспасы бар аммонийлі-күкірт қышқылды ерітінділерден отырғызылды. Алынған қаптамалар 1 сағат бойында 400 °C температурада инертті газ аргон ағымында термиялық өңдеуге жіберілді. Торлы және параллельді тор сызат түсіру әдісімен Re-Ni қаптаманың төсенішке адгезиясының дәрежесін бағалау жүргізілді (сызу әдісі). Төрт балды шкала бойынша күйдірісиз алынған қаптамаларда торлы сызат түсіру арқылы адгезияны бағалау мәндері: мыс төсеніште 1 баллды, болат төсеніште 4 баллды құрады. Күйдірілген қаптама сынамалары үшін адгезияны бағалау мәндері: мыс төсеніште 1 балды, болат төсеніште 2 балды құрады. Параллельді сызат түсіру әдісімен қаптама сынамаларының төсеніштерге адгезиясын бағалау мәндері үш балдық шкала бойынша күйдірілмеген мысты және болатты төсеніштерде 2, балды, күйдіруден кейін алынған мысты төсеніште 1, балды, болатты төсеніште 2, балды құрады. Негізгі мысты төсеніштердегі Re-Ni қаптамаларының адгезиясы болатты төсеніштердегіге қарағанда жоғары, сонымен қатар қаптаманы термиялық өңдеу төсеніш материалынан тәуелсіз адгезияны жоғарылатады. Күйдіруден кейін алынған қаптамалардың микроқаттылығы: мысты төсеніште – 6990-нан 9211 МПа-ға, болатты төсеніште – 3732-ден 4202 МПа-ға дейін көтерілді.

Түйінді сөздер: қорытпа, қаптама, рений, никель, мембранды электролиз, төсеме, күйдіру, адгезия, микроқаттылық.

SUMMARY

The results of research of the substrate's material nature (stainless steel and copper) and heat treatment impact on adhesion and microhardness of rhenium-nickel coatings are presented in the article. The electrolytic coatings based on rhenium-nickel alloys were precipitated by method of membrane electrolysis from ammonium sulfurous solutions with addition of glycerol. The obtained coatings were subjected to thermal treatment in a stream of the inert gas argon at a temperature of 400 °C during one hour. The evaluation of the degree of

adhesion of Re-Ni coatings to substrates was carried out by method of plotting latticed and parallel scratches (scratches method). The value of adhesion of coatings by method of latticed scratches on the surface was assessed according to the 4-point scale. It is established that an adhesion of coatings without annealing was on copper substrates – 1 point, on stainless steel substrates – 4 points. The coatings after annealing have an adhesion on copper substrates – 1 point, on stainless steel substrates – 2 points. The value of adhesion of coatings by method of parallel scratches was assessed according to the 3-point scale. The values of adhesion of coatings on copper and stainless steel substrates without annealing are 2 points. The coatings after annealing have an adhesion on copper substrates – 1 point, on stainless steel substrates – 2 points. The Re-Ni coatings adhesion on copper substrates is higher than on steel. The heat treatment of coatings increases the adhesion regardless of the substrate material. The microhardness of coatings after annealing has increased: on a copper substrate from 6990 up to 9211 MPa, on a steel substrate from 3732 up to 4204 MPa.

Key words: alloys, coatings, rhenium, nickel, membrane electrolysis, annealing, adhesion, microhardness, copper-substrate, steel-substrate.

Поступила 05.08.2015



УДК 629.76/78.0022

**Комплексное использование
минерального сырья. № 3. 2015**

*М. Б. ИСМАИЛОВ, Ж. М. РАМАЗАНОВА, Г. Б. НИГМЕТЧАНОВА,
С. ТОЛЕНДЫУЛЫ, Л. М. МУСТАФА*

*АО «Национальный центр космических исследований и технологий»
Алматы, m.ismailov@spaceres.kz*

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МАГНИЕВОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Mg-Al-Zn-Mn

Исследовано влияние деформации и термической обработки на структуру и свойства экспериментального магниевого сплава системы Mg-Al-Zn-Mn. Деформируемые сплавы данной системы предназначены для изготовления полуфабрикатов различными методами обработки давлением (прессование, ковка на гидравлических прессах, штамповка и т. п.). Химический состав полученных в лабораторных условиях образцов составил, вес. %: алюминий – 8,3; цинк – 0,61; марганец – 0,25; остальное – магний. Пористость сплава составила 5,9 %. Полученный сплав по составу аналогичен стандартному сплаву МА5 и европейскому аналогу AZ80A. Деформация осуществлялась при температурах образцов 150-350 °С и до степеней сжатия 20 % и 40 (20+20) %. При температуре 150 °С деформация приводит к разрушению образцов. При температурах 200 °С и выше пластическая деформация идет без образования трещин. Показано, что с увеличением температуры прессования прилагаемое давление пресса уменьшается. Исследована микроструктура образцов. Установлено, что после гомогенизационного отжига размеры зерен находятся в пределах 13-15 мкм. Деформация сплава в 20 % приводит к измельчению зерен до 10-11 мкм. Деформация до 40 % приводит к уменьшению размера зерна до 9-10 мкм. Получены значения давления прессования для степени деформации 20 и 40 % и диапазона температур прессования 200-350 °С. Установлено, что при степени деформации 20 и 40 % максимальные значения прочности достигаются при температуре 250 °С. Прочностные характеристики для исследованного экспериментального магниевого сплава приближаются к характеристикам российского сплава МА5 и европейского сплава AZ80A при степени деформации 40 %.

Ключевые слова: магниевый сплав, деформация, термическая обработка, микропористость, микротвердость, прочностные характеристики.

Введение. Магниевого сплавы находят большое применение в производстве авиационной, космической, автомобильной техники. Ос-

новными преимуществами магниевых сплавов являются малая плотность, высокая удельная прочность, жесткость, виброустойчивость. Вви-