

**ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕКТРОЛИЗА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА
ЭЛЕКТРООСАЖДЕННЫХ Ni-Mo-W ПОКРЫТИЙ**

Хромовые покрытия обладают высокой твердостью, коррозионной и термостойкостью, а также декоративными свойствами. Однако их производство связано с использованием токсичных электролитов на основе хромового ангидрида, что делает поиск безопасных альтернатив актуальной задачей.

Перспективной заменой хрома могут стать покрытия на основе никеля, молибдена и вольфрама [1].

Никелевые покрытия обладают высокой коррозионной стойкостью и декоративными свойствами, широко применяются в промышленности и служат основой для создания новых композиционных материалов и электрохимических сплавов.

Вольфрам относится к той же подгруппе, что и хром, и предположительно может демонстрировать схожие свойства, включая высокую твердость. Однако его осаждение в чистом виде затруднено, поэтому он обычно осаждается совместно с железом, никелем или кобальтом в присутствии комплексообразователей.

Молибденовые покрытия широко используются для легирования сталей с целью повышения их жаропрочности и коррозионной стойкости.

Комбинирование никеля, вольфрама и молибдена в составе электрохимического сплава открывает возможность создания покрытий с высокой твердостью и коррозионной стойкостью, что делает их перспективной альтернативой хрому.

Функциональные преимущества электрохимически осажденных сплавов

Ni-Mo-W [1 – 3]:

1. Термостойкость и высокотемпературная стабильность. Сплавы Ni-Mo-W демонстрируют исключительную термическую стабильность, сохраняя структурную целостность при температурах до 600 – 800°C.

2. Коррозионная стойкость в агрессивных средах. Скорость коррозии в 3,5% NaCl составляет 0,8 – 1,5 мА/см² (сопоставимо с

хромовыми покрытиями). Сплав устойчив в кислых средах (рН 2 – 4) и в щелочных средах (до рН=12).

3. Высокая микротвердость (900 – 1200 HV).

4. Прочность: сплав может выдерживать повторяющиеся нагрузки без разрушения или деформации.

5. Магнитные свойства.

6. Биосовместимость: из-за своей биосовместимости и химической инертности, сплав Ni–Mo–W может использоваться в медицинских имплантах, таких как стенты или протезы.

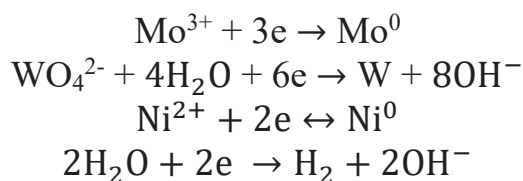
7. Высокая плотность: сплав Ni–Mo–W обладает высокой плотностью, что позволяет применять его в радиационных экранх или компонентах ядерных реакторов.

Электрохимический сплав Ni–Mo–W находит широкое применение в ядерной энергетике, медицинских имплантатах, аэрокосмической технике. Электрохимический сплав Ni–Mo–W может использоваться для изготовления сложных фигурных заготовок с криволинейными поверхностями: деталей цилиндров втулок, роторов гироскопов, инерционных масс, эрозионностойких электродов, воронок для кумулятивных зарядов, биологической защиты от проникающей радиации.

В работе использовали электролит следующего состава (г/л): NiSO₄ 62; C₆H₈O₇ 33; NaCl 20; NiCl₂ 13; Na₂WO₄·2H₂O 20. Электролиз проводили при различных температурах (25°C и 50°C) и плотностях тока ($i = 1 \text{ А/дм}^2 - 9 \text{ А/дм}^2$).

Электродные процессы:

на катоде:



на аноде:



В работе установлено, что покрытия, полученные при плотности тока 1 А/ дм², образуют глобулы диаметром 2–3 мкм (рис. 1).

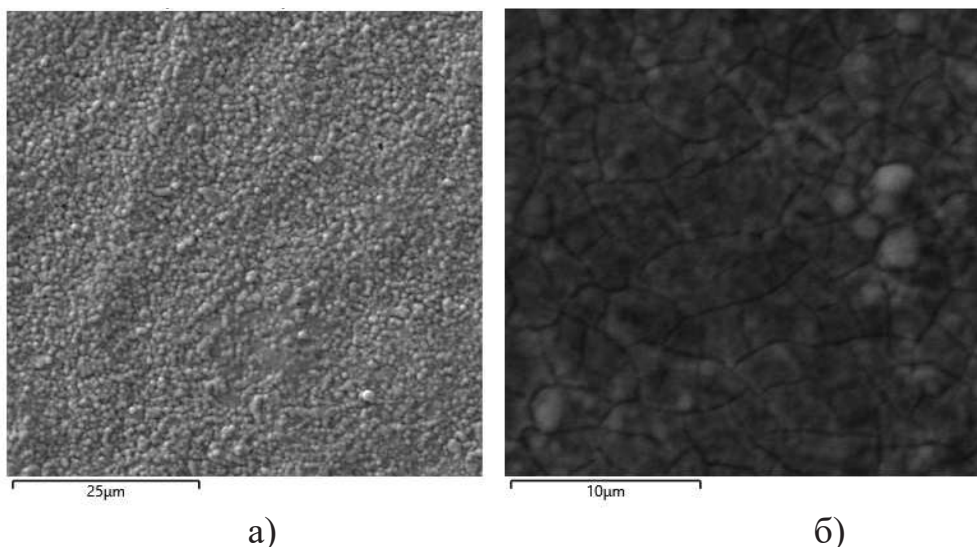


Рисунок 1 – СЭМ-изображения покрытий сплавом Ni–Mo–W, полученных при $T=25^{\circ}\text{C}$, $\text{pH}=8$ и плотности тока:
a – 1 A/дм^2 ; *б* – 9 A/дм^2

Наличие глобул объясняется ростом вторичных зародышей поверхностного слоя, образовавшихся в фазе первичного зародышеобразования. Покрытия, полученные при плотности тока $i = 5 \text{ A/дм}^2$, образованы гладким, равномерным слоем. Высокие плотности тока привели к растрескиванию тройного покрытия

Температура электролита незакономерно изменяет потенциал начала осаждения покрытия. При температуре электролита 25°C потенциал начала осаждения сплава Ni–Mo–W составляет $-0,82 \text{ В.}$, при температуре 40°C наблюдалось активное выделение газообразных продуктов реакции. Это может быть связано с pH раствора во время электролиза.

Стоит отметить, что при температуре 25°C и плотностях тока $1 - 4 \text{ A/дм}^2$ наблюдаются полуматовые серые покрытия. При повышении температуры и плотности тока 5 A/дм^2 наблюдается появление радужной пленки. Это предположительно, связано с наличием в структуре покрытия оксидов металлов в различной степени окисления.

Энергодисперсионный анализ показал, что при повышении плотности тока до 9 A/дм^2 содержание никеля в покрытии составляет $20,51 \text{ атом. \%}$, молибдена – $3,88 \text{ атом. \%}$, вольфрама – $0,78 \text{ атом. \%}$. Остальное составляет кислород O и медь Cu.

Для исследуемых покрытий установлено, что наименьшее значение тока коррозии составляет $9,33 \cdot 10^{-8} \text{ А}$ и соответствует сплаву, полученному при плотности тока 9 A/дм^2 . При этом потенциал начала коррозии составляет $-0,29 \text{ В.}$ Таким образом, несмотря на маленькую толщину покрытий ($2 - 3 \text{ мкм}$) они являются коррозионностойкими.

Таким образом, сплавы Ni–Mo–W представляют собой многофункциональный класс материалов, сочетающий: уникальное сочетание физико-механических свойств и экологическую безопасность производства

Дальнейшая оптимизация состава (особенно в области Ni–25W–10Mo) и разработка нанокompозитных систем открывают новые возможности и области применения сплавов Ni–Mo–W.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцев В.Н. Электролитические сплавы на основе никеля (Ni-W, Ni-Mo, NiW-B) как возможная замена твердых хромовых покрытий, осаждаемых из хромовокислых электролитов. Электрохимия, гальванотехника и обработка поверхности: автореф., канд хим наук. Москва, 2001.— С. 68.

2. Нанесение покрытия из тройного сплава Ni-W-Mo на медь методом импульсного электроосаждения с повышенной коррозионной стойкостью и механическими свойствами. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2023.100423> – Дата доступа: 09.04.2025.

3. Перспективы повышения коррозионной и износостойкости простой стали за счет электроосаждения толстого тройного сплава Ni–Mo–W. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.03.192> – Дата доступа: 10.04.2025.