ОТЗЫВ
на автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата химических наук
Филиппова Вадима Леонидовича
на тему:
«Электрохимическое и контактное осаждение меди в глубоких эвтектических растворителях на основе холинхлорида»
по специальности 1.4.6 – Электрохимия

Электрохимическое осаждение меди является важным технологическим процессом, широко применяемым в микроэлектронике, машиностроении и технологиях защиты металлов. При этом прямое меднение электроотрицательных металлических подложек осложняется протеканием контактного обмена и наличием пассивирующих поверхностных слоев в случае нержавеющих сталей. Традиционные подходы к решению данной проблемы зачастую предполагают использование цианидных или других комплексных электролитов, обладающих рядом экологических и эксплуатационных недостатков. В связи с этим исследование глубоких эвтектических растворителей (ГЭР) как альтернативных сред для электрохимического и контактного осаждения металлов является актуальным и представляет значительный фундаментальный и практический интерес.

В работе В. Л. Филиппова проведено комплексное исследование закономерностей контактного и электрохимического осаждения меди в ГЭР на основе холинхлорида. Для эталайна установлен электрохимический ряд активности металлов Ni > Cu ~ Co > Sn > Fe > In, существенно отличающийся от соответствующего ряда в водных растворах вследствие особенностей комплексообразования. Впервые количественно исследована скорость контактного осаждения меди на железе и сталях в растворах Cu(I) и Cu(II), выявлены принципиальные различия механизмов этих процессов. Проведено систематическое исследование влияния природы донора водородной связи и содержания воды на электрохимические свойства ГЭР. Установлены количественные взаимосвязи между вязкостью среды, коэффициентами диффузии комплексных ионов Cu(I) и Cu(II) и скоростью электроосаждения меди. Показана ограниченная применимость классических гидродинамических моделей для описания массопереноса в данных системах, а для безводного релайна предложено объяснение наблюдаемых отклонений возможным вкладом флуктуационных пустот («дырок»).

Работа имеет очевидную практическую направленность. Продемонстрирована возможность прямого получения адгезионно-прочных медных покрытий на железе и углеродистой стали, а для нержавеющей стали предложен двухимпульсный потенциостатический режим в сочетании с перемешиванием электролита. Показано также, что введение воды существенно снижает вязкость среды и ускоряет электроосаждение без критического ухудшения качества получаемых покрытий. Эти результаты создают предпосылки для разработки технологически более простых процессов меднения на основе ГЭР.

В работе использован широкий набор современных экспериментальных методов, включая электрохимические подходы (вольтамперометрия, хроноамперометрия и потенциометрия), масс-спектрометрию с индуктивно-связанной плазмой, сканирующую электронную микроскопию, энергодисперсионную рентгеновскую спектроскопию и атомно-силовую микроскопию. Такой комплекс методов позволил автору сопоставить электрохимические закономерности с морфологией и составом поверхности, а также получить количественные характеристики контактного осаждения и массопереноса.

Во время прочтения автореферата возникли следующие вопросы и комментарии:

1. При построении электрохимического ряда активности металлов в эталайне потенциалы начала растворения осадков, определённые из анодных ветвей ЦВА, фактически рассматриваются как соответствующие равновесные потенциалы. Насколько корректно данное приближение для всех исследованных металлов, и оценивалось ли возможное влияние кинетических факторов, состояния поверхности и различий в составе образующихся комплексов металлов на определяемые значения потенциалов?
2. При анализе массопереноса в релайне отклонение экспериментальной диффузии от классических гидродинамических моделей связывается с возможным вкладом т.н. «дырочного» механизма. Интересно обсудить, насколько однозначна такая интерпретация, и можно ли предложить альтернативные причины наблюдаемого поведения, например, изменение ионной ассоциации или локальной сольватной структуры?
3. В экспериментальной части указано, что электрохимические измерения и исследования контактного осаждения проводились в инертной атмосфере аргона, тогда как одним из практически значимых выводов является принципиальная возможность проведения электроосаждения в атмосферных условиях при наличии воды. Проводились ли контрольные эксперименты непосредственно на воздухе при неконтролируемой атмосферной влажности, или данный вывод сделан преимущественно на основании экспериментов с контролируемым добавлением воды в ГЭР?
4. Адгезия медных покрытий на нержавеющей стали оценивалась качественно методом изменения температур, при этом отсутствие вздутий и отслаивания рассматривается как подтверждение хорошей адгезии. Для более полного сравнения разработанных режимов осаждения может быть полезна количественная оценка прочности сцепления покрытия с подложкой, например методом отрыва, царапания или другим подходящим методом.

Безусловно, указанные вопросы и замечания носят преимущественно уточняющий и рекомендательный характер и не снижают научной ценности полученных результатов. Автором выполнено последовательное и логически завершённое исследование, сочетающее фундаментальное изучение электрохимии и массопереноса в глубоких эвтектических растворителях с решением практически значимой задачи прямого меднения железа и сталей. Полученные результаты обладают научной новизной, полностью апробированы и опубликованы, в том числе в ведущих профильных журналах *Journal of Electroanalytical Chemistry* и *Electrochimica Acta*.

Можно констатировать, что диссертационная работа В. Л. Филиппова «Электрохимическое и контактное осаждение меди в глубоких эвтектических растворителях на основе холинхлорида» полностью соответствует требованиям пп. 9-11, 13 и 14 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 в действующей редакции, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук. Работа заслуживает высокой оценки, а её автор достоин присуждения учёной степени кандидата химических наук по специальности 1.4.6. Электрохимия.

Кандидат химических наук,
Доцент Центра энергетических технологий
«Сколковский институт науки и технологий» (Сколтех)

Федотов Станислав Сергеевич

21.09.2026

Контактная информация:
Станислав Сергеевич Федотов,
кандидат химических наук по специальностям 02.00.01 – неорганическая химия и 02.00.21 – химия твердого тела; доцент, заведующий лабораторией, заместитель директора Центра энергетических технологий Сколковского института науки и технологий.
121205, Москва, территория Инновационного центра Сколково, Большой бульвар 30 стр. 1.
Тел.: +7 (919) 997-80-42, e-mail: s.fedotov@skoltech.ru

Я, Федотов Станислав Сергеевич, даю согласие на обработку моих персональных данных, связанных с работой диссертационного совета 24.1.141.02.

Федотов С. С.

21.09.2026

Подпись С. С. Федотова заверяю:

Руководитель отдела
кадрового администрирования
Гук О.С.

М.П.