

Научная статья

УДК 620.193

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-4-209-220>

Улучшение антикоррозионных свойств некоторых сплавов меди как потенциальных материалов для электрических контактных соединений

Борисова Елена Михайловна, Решетников Сергей Максимович, Фатхутдинова Алия Маратовна
Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия

Аннотация. В работе представлен обзор литературных данных по методам исследования и улучшения технических и технологических свойств меди и медных материалов, используемых для изготовления электротехнических изделий. Выявлен недостаток, связанный с понижением стойкости к атмосферной коррозии, особенно во влажных средах. Предложен метод высокоэнергетического воздействия на поверхность с целью формирования защитных покрытий. Представлены результаты коррозионно-электрохимических испытаний образцов, подвергнутых короткоимпульсному лазерному воздействию. В ходе исследований варьировались параметры лазерного излучения: мощность, скорость сканирования поверхности, частота, защитная атмосфера. Установлены оптимальные значения параметров, обеспечивающие повышение коррозионной стойкости чистой меди и медных сплавов. Определены величины контактных сопротивлений обработанных образцов. Сделаны предварительные выводы о взаимосвязи параметров обработки с улучшением антикоррозионных свойств и изменением величины контактного сопротивления. Необходимы исследования состав и структуры образующихся поверхностных слоев.

Ключевые слова: медь; медные сплавы; коррозионная стойкость; короткоимпульсная лазерная обработка.

Для цитирования: Борисова Е.М., Решетников С.М., Фатхутдинова А.М. Улучшение антикоррозионных свойств некоторых сплавов меди как потенциальных материалов для электрических контактных соединений // Вестник Пермского университета. Серия «Химия». 2022. Т. 12, № 4. С. 209–220. <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-4-209-220>.

Original Article

<http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-4-209-220>

Improvement of anticorrosion properties of some copper alloys as potential materials for electrical contact connections

Elena M. Borisova, Sergey M. Reshetnikov, Aliya M. Fathutdinova
Udmurt State University, Izhevsk, Russia

Abstract. The paper presents a review of literature data on methods for researching and improving the technical and technological properties of copper and copper materials used for the manufacture of electrical products. A disadvantage associated with a decrease in resistance to atmospheric corrosion, especially in humid environments, has been identified. A method of high-energy impact on the surface is proposed in order to form protective coatings. The results of corrosion-electrochemical tests of samples subjected to short-pulse laser action are presented. In the course of the research, the parameters of laser radiation were varied: power, surface scanning speed, frequency, protective atmosphere. Optimal values of the parameters are established, which provide an increase in the corrosion resistance of pure copper and copper alloys. The values of contact resistances of the processed samples are determined. Preliminary conclusions are made about the relationship between processing parameters and the improvement of anti-corrosion properties and a change in the value of contact resistance. It is necessary to study the composition and structure of the resulting surface layers.

Key words: copper; copper alloys; corrosion resistance; short-pulse laser processing.

For citation: Borisova, E.M., Reshetnikov, S.M. and Fathutdinova, A.M.(2022) "Improvement of anticorrosion properties of some copper alloys as potential materials for electrical contact connections", *Bulletin of Perm University. Chemistry*, vol. 12, no. 4, pp. 209–220. (In Russ.). <http://doi.org/10.17072/2223-1838-2022-4-209-220>.

Развитие современных технологических процессов, внедрение новых методов производства, увеличение объемов потребляемой мощности вызывает повышенные требования по надежности энергоснабжения предприятий и обеспечение качественного изготовления элементов электротехнического оборудования. Электротехника является не только отдельной значительной областью промышленности, но и вносит существенный вклад во все отрасли хозяйственной деятельности. В результате обеспечение надежности производства и эксплуатации электротехнических изделий является ответственным этапом любого технологического процесса.

Материалы, используемые для изготовления электротехнического оборудования, должны характеризоваться малым удельным сопротивлением, достаточными прочностью и пластичностью, коррозионной стойкостью, а также способностью подвергаться сварке и пайке [1, 2]. Основным материалом высокой проводимости является медь, удельное сопротивление которой составляет $0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ и уступает лишь серебру. Среди недостатков меди наряду с высокой стоимостью можно отметить снижение химической стойкости в атмосфере воздуха при повышении влажности, что приводит к сокращению срока эксплуатации электротехнических деталей.

Наличие любых примесей в составе меди приводит к существенному негативному влиянию на значение электропроводности. Однако наряду с чистой медью в электротехнике и электроэнергетике широкое применение нашли сплавы меди с добавлением цинка (латуни) и бериллия и кадмия (бериллиевые и кадмиевые бронзы). Для них значение удельного сопро-

тивления лежит в диапазоне $0,02\text{--}0,065 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$, что в совокупности с повышенной прочностью определяет использование в различных областях промышленности.

В настоящее время продолжается активное изучение материалов на основе меди, которые подвергаются модификации путем легирования другими компонентами. Так, в работе [3] показаны результаты разработки бериллиевой бронзы, имеющей базовую композицию с добавлением кобальта. Полученный сплав отличается повышенными технологическими характеристиками, такими, как предел прочности, твердость, ударная вязкость и теплопроводность. Авторы работы [4] исследуют возможность получения субмикроструктурных высокопрочных электротехнических бронз, модифицированных механически легированными наноструктурными лигатурами. Рассматриваемая технология позволяет получить материалы, обладающие повышенными механическими свойствами. В результате исследований, проводимых авторами работы [5], показано изменение физико-химических (твердость, плотность, теплопроводность, коэффициент электросопротивления) и эксплуатационных свойств меди и оловянистой бронзы под влиянием облучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами. Изучение структуры и свойств сплава «медь–хром», подвергнутого высокотемпературной обработке в среде крупнокристаллического порошка оксида алюминия, представлено в работе [6].

Отметим работы, посвященные повышению различными методами надежности меди и медных сплавов. Так, например, описано получение термостойкого покрытия на медной электролитической фольге путем ввода в раствор

хроматирования различных легирующих компонентов [7]; получение защитного покрытия посредством электрического разряда в жидкости для определения влияния электрогидравлического эффекта [8]. Как было отмечено выше, одним из основных недостатков меди является снижение стойкости к атмосферной коррозии во влажных средах и при повышении температуры. Учитывая условия эксплуатации электротехнических контактов, сопровождающиеся протеканием коррозионно-электрохимических процессов, можно видеть, что одним из важнейших направлений повышения надежности изделий из меди и медных сплавов является повышение коррозионной стойкости. В настоящее время используются различные методы, включающие в себя пассивацию поверхности, нанесение защитных покрытий [9–11], ингибиторы коррозии [12]. Известны также некоторые другие технологические приемы, способствующие повышению надежности электрических контактов [13–15].

Одним из перспективных методов повышения коррозионной стойкости материалов является высокоэнергетическое, в том числе лазерное, воздействие [16–18], в результате которого происходит модификация поверхностного слоя материала. В связи с тем, что одним из определяющих свойств электротехнических изделий является удельное сопротивление, необходимо исследовать влияние изменения структуры и состава поверхности на величину контактного сопротивления.

Таким образом, цель работы – определение параметров короткоимпульсной лазерной обработки для повышения коррозионной стойкости меди и медных сплавов при сохранении значения контактного сопротивления.

Объекты и методы исследования

Образцы представляли собой пластины площадью 1 см^2 и толщиной 2 мм, изготовленные из меди со степенью чистоты 99,96% марки М0, латуни марок Л80 и Л96, бериллиевой бронзы марки БрБ2. Поверхность подвергали механической шлифовке, полировке, последующей промывке и обезжириванию этиловым спиртом в ультразвуковой ванне. Часть образцов была оставлена в исходном состоянии, что обеспечивало наличие на поверхности самопроизвольно образованного оксидно-гидроксидного слоя. Серия образцов подвергалась короткоимпульсной лазерной обработке с использованием оптоволоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1,065 мкм, позволяющей в достаточно широких интервалах варьировать мощность излучения, частоту следования импульсов и скорость сканирования поверхности лазерным лучом. Обработка образцов осуществлялась в атмосфере воздуха и в контролируемой по составу газовой среде.

Все образцы исследовали путем снятия анодных потенциодинамических кривых в нейтральной среде боратного буферного раствора при $\text{pH} = 7,4$ с использованием потенциостата EcoLab 2A-100. Растворы готовили на дистиллированной воде. Аэрация растворов естественная, температура $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Использовалась электрохимическая ячейка Э-7СФ. Электрод сравнения – насыщенный хлоридсеребряный, относительно которого и приведены далее электродные потенциалы E , мВ в тексте и на рисунках. Скорость сканирования потенциала при снятии потенциодинамических кривых 2 мВ/с. Плотность тока I ($\text{мкА}/\text{см}^2$) приведена в расчете на видимую (геометрическую) поверхность электрода.

Результаты и их обсуждение

При проведении короткоимпульсной лазерной обработки варьировались следующие параметры: мощность лазерного излучения в диапазоне $4,5 \div 33,7$ Вт, частота в диапазоне $40 \div 100$ кГц, скорость сканирования поверхности в диапазоне $500 \div 900$ мм/с. В ходе проведения электрохимических исследований было принято решение для серии образцов проводить катодную поляризацию, для снятия поверхностного слоя, образовавшегося в ходе хранения образцов. Для этого образцы помеща-

лись в раствор и выдерживались при постоянном значении потенциала в катодной области в течение некоторого времени. Влияние выдержки образцов при разных значениях потенциала будут показаны ниже.

На рис. 1 представлены потенциодинамические кривые для образцов меди в исходном состоянии, после лазерного воздействия, часть из которых подвергалась предварительной катодной поляризации. Представлена выборка из множества режимов, демонстрирующая наиболее значительные изменения.

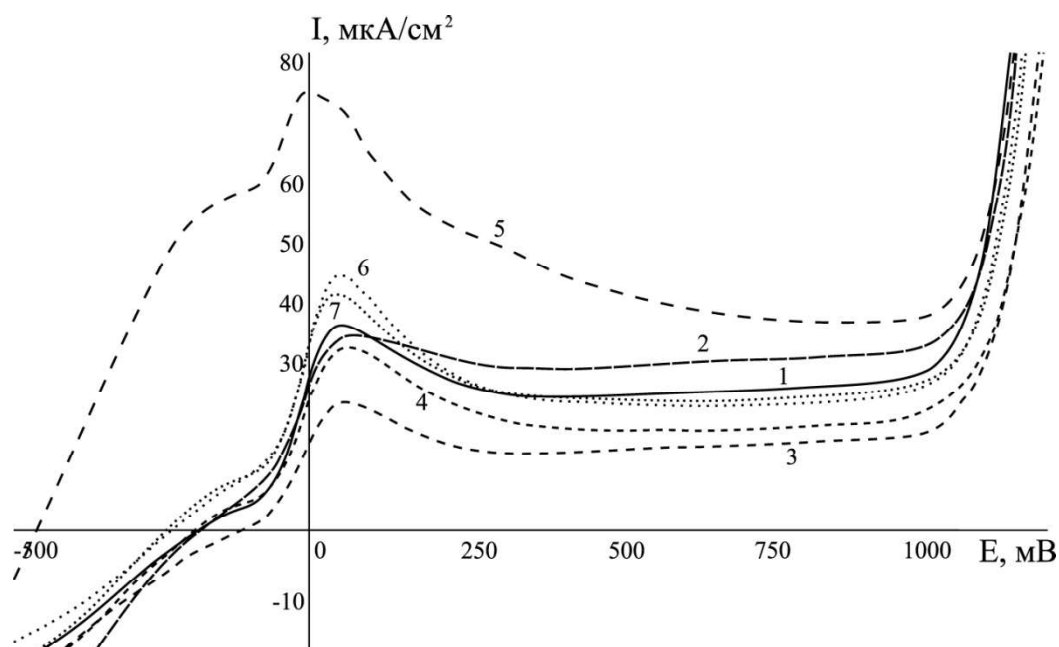


Рис. 1. Потенциодинамические кривые меди M0 в боратном буферном растворе: 1 – в исходном состоянии без предварительной катодной поляризации; 2 – в исходном состоянии с выдержкой при $E = -1000$ мВ в течение 30 мин; 3, 4 – после лазерной обработки в атмосфере воздуха; 5 – после лазерной обработки в атмосфере воздуха с выдержкой при $E = -1000$ мВ в течение 30 мин; 6, 7 – после лазерной обработки в среде аргона

В случае образцов в исходном состоянии выдержка при потенциале $E = -1000$ мВ в течение 30 минут (кривая 2) дает заметное сглаживание анодной кривой, но при этом наблюдается увеличение токов в области пассивного состояния. После лазерной обработки выдержка при катодном потенциале (кривая 5) приводит к существенной активации поверхности образца, росту токов как в области условно активного

растворения, так и в области пассивации. Таким образом, в случае образцов меди предварительная катодная поляризация привела не только к снятию поверхностного слоя, но и способствовала значительной активации. Это дает возможность отрицательной оценки результатов такой обработки в сравнении с исходным состоянием.

В целом по представленным потенциодинамическим кривым на рис. 1 можно сделать вывод о том, что обработка лазером в среде инертного газа аргона не способствует повышению коррозионной стойкости. Это, вероятно, связано с недостаточным количеством кислорода для образования плотной оксидной пленки. Высокоэнергетическое воздействие в атмосфере воздуха приводит к уменьшению анодных токов в области пассивного состояния в 1,5–2 раза по сравнению с исходным состоянием. Значения потенциалов перепассивации для всех образцов практически равны и лежат в диапазоне 1100–1150 мВ. Наилучшие результаты получены для образца, обработанного в атмосфере воздуха при низком значении мощности лазерного излучения $P = 4,5$ Вт, высокой скорости сканирования поверхности $v = 900$ мм/с.

Исследовались электрохимические свойства марок латуни Л96 с содержанием цинка 4% и

Л80 с содержанием цинка не более 20%. Латунь Л96 характеризуется достаточно высоким значением электропроводности, значение удельного электросопротивления составляет 0,038 мкОм·м и широко применяется в электро-технической промышленности. Латунь марки Л80 была выбрана для исследования с целью определения влияния количества легирующего компонента на характеристики коррозионной стойкости и зависимость от высокоэнергетического воздействия.

На рис. 2 и рис. 3 показаны результаты электрохимических исследований латуни Л80 в боратном буферном растворе с выдержкой (рис. 2) и без выдержки (рис. 3) при катодном потенциале. Характер анодных кривых отличается от результатов для меди, что связано с большим содержанием цинка. Помимо стандартных пиков, характеризующих область условно активного растворения, наблюдаются размытые максимумы.

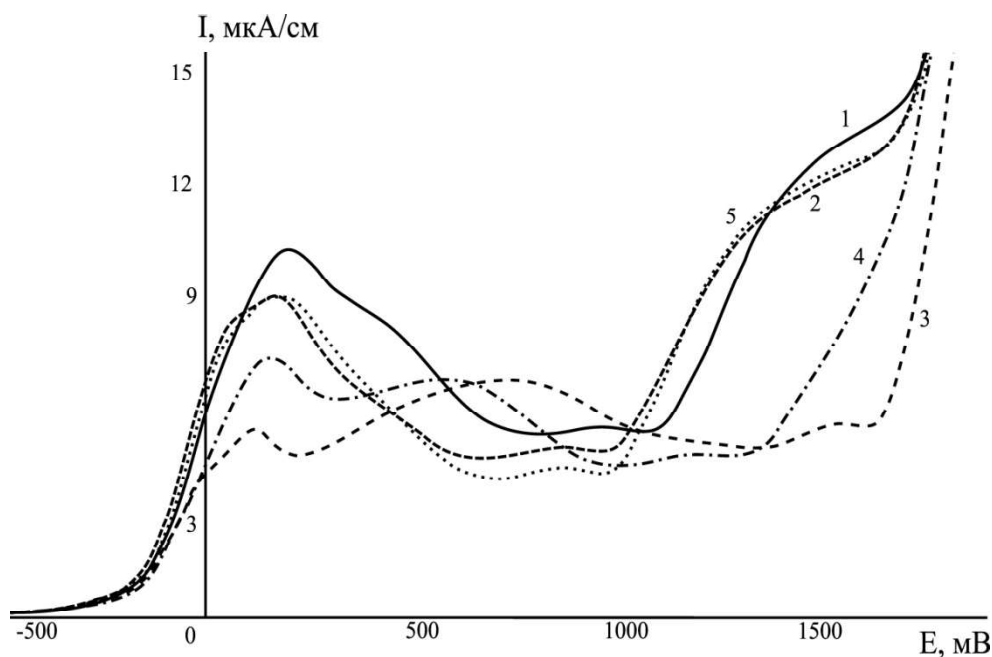


Рис. 2. Потенциодинамические кривые латуни Л80 в боратном буферном растворе с предварительной выдержкой при $E = -1000$ мВ в течение 30 мин: 1 — в исходном состоянии; 2, 3 — после лазерной обработки в атмосфере воздуха; 4, 5 — после лазерной обработки в среде аргона

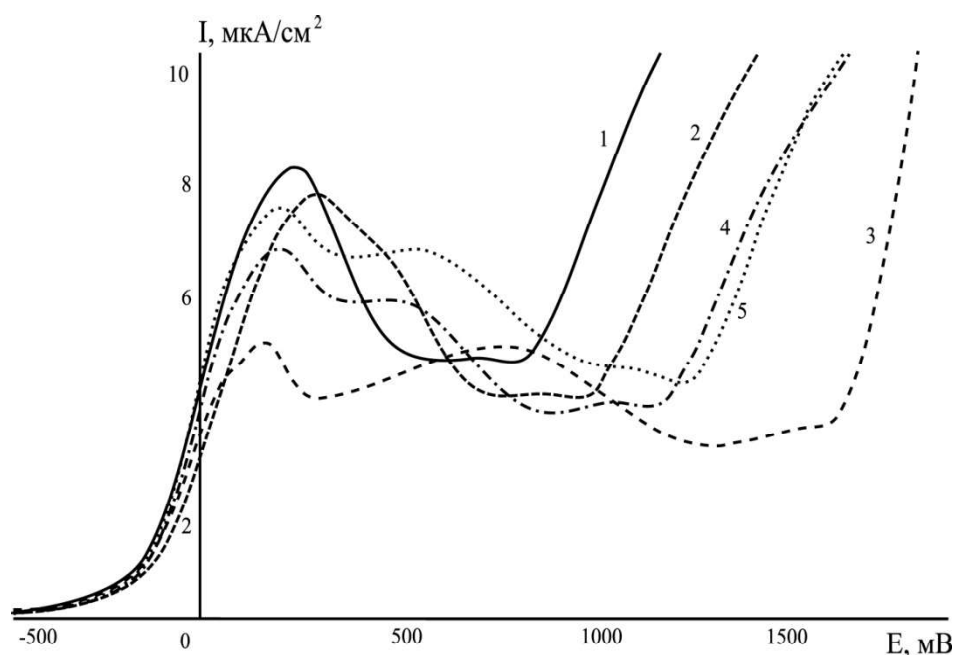


Рис. 3. Потенциодинамические кривые латуни Л80 в боратном буферном растворе: 1 – в исходном состоянии; 2, 3 – после лазерной обработки в атмосфере воздуха; 4, 5 – после лазерной обработки в среде аргона

Стоит также отметить изменяющийся характер кривых при проведении предварительной катодной выдержки. В первую очередь для всех образцов наблюдается некоторый рост анодных токов в области пассивного состояния. Это вероятно также, как и в случае с чистой медью, связано с процессом активации поверхности образцов. Можно наблюдать также изменение значений потенциалов перепассивации. Таким образом, можно сделать вывод, что предварительная длительная выдержка материалов при некотором постоянном значении катодного потенциала носит скорее негативный характер, усложняет процесс проведения эксперимента и не является необходимой. Последующие испытания проводились без нее.

На рис. 4 представлены потенциодинамические кривые для образцов латуни марки Л96 в исходном состоянии и после лазерного воздействия. Полученные потенциодинамические кривые в большей степени по характеру соот-

ветствуют кривым для чистой меди. Отметим, что относительно небольшое содержание цинка в составе сплава не оказывает существенного влияния на электрохимическое поведение образцов. Наряду с образцом, обработанным в атмосфере воздуха с параметрами, идентичными наилучшим для чистой меди $P = 4,5$ Вт, $v = 900$ мм/с (кривая 2), улучшение коррозионно-электрохимических свойств продемонстрировал образец, подвергнутый лазерному воздействию в среде аргона (кривая 4). В этом случае отличным параметром было значение мощности $P = 30,5$ Вт. Такой характер кривых вновь можно связать с наличием цинка в составе сплава. Стоит отметить, что окончательные выводы можно будет сделать после проведения исследований структуры и состава получаемых поверхностных слоев.

На рис. 5 показаны результаты коррозионно-электрохимических исследований образцов бериллиевой бронзы марки БрБ2.

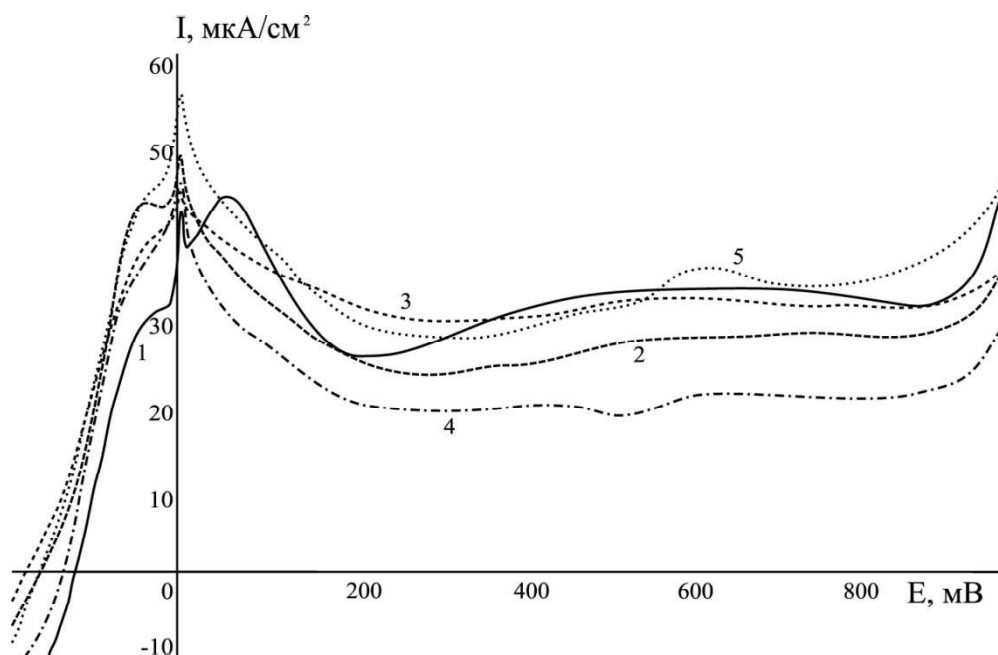


Рис. 4. Потенциодинамические кривые латуни Л96 в боратном буферном растворе: 1 – в исходном состоянии; 2, 3 – после лазерной обработки в атмосфере воздуха; 4, 5 – после лазерной обработки в среде аргона

Согласно полученным результатам, более заметное улучшение электрохимического поведения демонстрирует образец, подвергнутый лазерному воздействию с низким значением мощности лазерного излучения: $P = 4,5$ Вт, вы-

сокой скоростью сканирования поверхности: $v = 900$ мм/с, что аналогично чистой меди. Можно отметить, что небольшое содержание легирующего компонента вносит незначительный вклад в изменение поведения образцов.

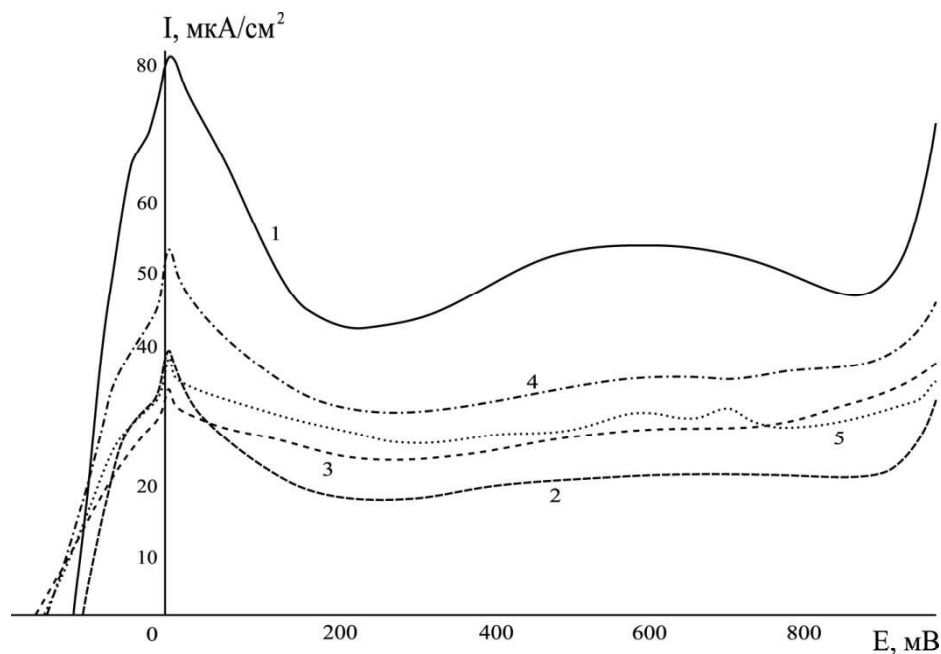


Рис. 5. Потенциодинамические кривые бронзы в боратном буферном растворе: 1 – в исходном состоянии; 2, 3 – после лазерной обработки в атмосфере воздуха; 4, 5 – после лазерной обработки в среде аргона

Важным этапом в ходе исследований также было определение контактного сопротивления образцов, подвергнутых лазерной обработке, для оценки влияния образующихся поверхностных слоев на возможность применения в качестве электрических контактов. Контактное сопротивление измерялось при помощи потенциостата по четырехэлектродной схеме. При этом при каждом измерении обеспечивались одинаковое усилие при сжатии в месте контакта и одинаковая видимая поверхность площади контактов. Для сравнения предварительно снимались значения для образцов в исходном со-

стоянии. Некоторые результаты полученных усредненных значений представлены в таблице

Таким образом, можно сделать вывод, что наблюдается изменение контактного сопротивления в зависимости от режима обработки. Одновременно с увеличением коррозионной стойкости поверхности электрических контактов, например, в релейных устройствах, можно при сохранении технических показателей добиться повышения надежности и долговечности работы элементов, которые весьма чувствительны к образованию продуктов коррозии с высоким омическим сопротивлением.

Контактное сопротивление образцов в исходном состоянии и после лазерной обработки

Материал	Режим обработки	Контактное сопротивление до/после обработки, Ом/см ²
Медь	Мощность P = 4,5 Вт. Частота 100 кГц. Скорость v = 900. Воздух.	0,092432/0,037037
	Мощность P = 30,5 Вт. Частота 40 кГц. Скорость v = 900 мм/с. Аргон.	0,08737/0,034824
Латунь	Мощность P = 33,7 Вт. Частота 60 кГц. Скорость v = 700 мм/с. Воздух.	0,05357/0,024293
	Мощность P = 33,7 Вт. Частота 60 кГц. Скорость v = 700 мм/с. Аргон.	0,083921/0,020933

Заключение

Таким образом, на основе изученных материалов о методах улучшения различных свойств меди и медных сплавов было предложено исследовать влияние высокоэнергетической лазерной обработки на коррозионно-электрохимическое поведение. Образцы чистой меди и сплавов с небольшим содержанием легирующих компонентов показали подобные результаты, характеризующиеся повышением коррозионной стойкости при обработке лазерным излучением с высоким значением скорости и низким значением мощности в атмосфере воздуха. Большое содержание компонентов приводит к существенному изменению харак-

тера анодных кривых, поведения обработанных образцов.

Определены величины контактного сопротивления. Влияние высокоэнергетического воздействия имеет неоднозначный характер. Для выявления зависимости данной характеристики от параметров лазерного излучения необходимы дальнейшие исследования состава и структуры образующихся поверхностных слоев на металле.

Финансирование

Работа выполнена с использованием средств гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-1670.2022.4).

Благодарности

Выражаем благодарность сотрудникам лаборатории физики и химии Института математики, информационных технологий и физики

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» и лично заведующему лабораторией, профессору, д.т.н. Евгению Викторовичу Харанжевскому.

Список источников

1. Петрова Л.Г., Потапов М.А., Чудина О.В. Электротехнические материалы. М.: МАДИ (ГТУ), 2008. 198 с.
2. Евстифеев В.В., Корытов М.С. Электротехнические материалы, пластмассы, резины, композиты. Омск: СибАДИ, 2009, 36 с.
3. Тебякин А.В., Фоканов А.Н., Подуражная В.Ф. Многофункциональные медные сплавы // Труды ВИАМ. 2016. №12. С. 37–44.
4. Ловшенко Ф.Г., Ловшенко Г.Ф., Лозиков И.А. Бронзы электротехнического назначения и особенности их производства // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. №3. С. 36–52.
5. Ри Э.Х., Дорофеев С.В., Живетьев А.С., и др. Влияние обучения жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами на процессы кристаллизации и структурообразования, свойства меди и оловянистой бронзы // Литье и металлургия. 2012. №3. С. 136–139.
6. Коржов В.П. Модифицирование поверхности электрических контактов из сплава Cu-30% Cr // Вестник Томского государственного университета. 2010. № 3. С. 943–944.
7. Кравченко О.В., Быстров В.П. Исследование влияния состава электролита на качество защитного покрытия на меди // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 3. С. 310–316.
8. Кравченко О.В., Быстров В.П., Кравченко Л.Л. Влияние физических методов воздействия на процесс пассивации меди // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. №3. С. 317.
9. Тихомирова С.А., Григорян Н.С., Абрашов А.А., и др. Пассивация черных и цветных металлов // Успехи в химии и химической технологии. 2015. Т.29, № 3. С. 51–52.
10. Бурнышев И.Н., Валиахметова О.М., Лыс В.Ф. Многокомпонентное диффузионное насыщение медных сплавов // Химическая физика и мезоскопия. 2010. Т. 12, №4. С. 519–525.
11. Перинский В.В., Перинская И.В., Петрова Н.А. Методики ионно-лучевой защиты поверхности микроразъемных изделий от внешних и химических воздействий, коррозии и локализации гальванического осадка // Технические науки – от теории к практике. 2013. № 20. С. 128–133.
12. Харина Г.В., Алешина Л.В., Шихалев И.А. Коррозионное поведение латуни в нейтральных и кислых хлорсодержащих средах // Наука, техника и образование. 2017. №2. С. 24–29.
13. Пьянков И.Б., Ерофеев В.А., Страхова Е.А. Критерии оценки условий эксплуатации электродов при контактной точечной сварке // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 11. Ч. 2. С. 71–83.
14. Измайлов В.В., Новоселова М.В. Оценка ресурса электроконтактных материалов по результатам форсированных испытаний // Инновационная наука. 2016. №7–8. С. 40–42.
15. Дзекец Н.Н., Морозов Ю.К., Стройман И.М. Повышение надежности электрических контактов // Видеонаука: сетевой журнал. 2017. № 2. URL: <https://videonauka.ru/stati/18-elektrotekhnika/132->

повышение-nadjozhnosti-elektricheskikh-kontaktov (дата обращения 12.12.2022).

16. *Борисова Е.М., Решетников С.М., Гильмутдинов Ф.З. и др.* Короткоимпульсная лазерная обработка алюминия как метод синтеза наноразмерных оксидных слоев // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии: тезисы докладов. 2016. С. 202.

17. *Шрон Л.Б., Ягьяев Э.Э. Абхаирова С.В. и др.* Повышение коррозионной стойкости сварных соединений из углеродистых сталей методом лазерной абляции // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2022. № 1–2. С. 48–52.

18. *Борисова Е.М., Решетников С.М., Гильмутдинов Ф.З. и др.* Влияние короткоимпульсной лазерной обработки на коррозионно-электрохимические свойства меди // От синтеза полиэтилена до стереодивергентности: развитие химии за 100 лет: материалы Междунар. науч.конф., посвящ. 100-летию кафедры органической химии ПГНИУ. Пермь: ПГНИУ, 2018. С. 218–221.

Информация об авторах

Борисова Елена Михайловна, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики, Институт нефти и газа им. М.С. Гучериева, Удмуртский государственный университет» (426034, УР, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 7), borisovayelena@mail.ru

Решетников Сергей Максимович, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры фундаментальной и прикладной химии, Институт естественных наук, Удмуртский государственный университет (426034, Россия, УР, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 1.), smr41@mail.ru

Фатхутдинова Алия Маратовна, магистрант кафедры теплоэнергетики, Институт нефти и газа им. М.С. Гучериева, Удмуртский государственный университет (426034, Россия, УР, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 7), aliafatyhova@yandex.ru

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила 15 ноября 2022 г; одобрена 1 декабря 2022 г; принята к публикации 7 декабря 2022 г.

References

1. Petrova, L.G., Potapov, M.A. and Chudina, O.V. (2008) *Elektrotekhnicheskiye materialy* [Electrotechnical materials], Moscow. (In Russ.).

2. Evstifeev, V.V. and Korytov, M.S. (2009) *Elektrotekhnicheskiye materialy, plastmassy, reziny, kompozity* [Electrotechnical materials, plastics, rubbers, composites: textbook], Omsk. (In Russ.).

3. Tebekin, A.V., Fokanov, A.N. and Podurazhnaya, V.F. (2016) Multifunctional copper alloys, *Trudy VIAM*, no. 12, pp. 37–44. (In Russ.).

4. Lovshenko, F.G., Lovshenko, G.F. and Lozikov, I.A. (2012) Bronzes for electrical purposes and features of their production, *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo Universiteta*, no. 3, pp. 36–52. (In Russ.).

5. Ree, E.Kh., Dorofeev, S.V., Zhivetiev, A.S., Zhernova, T.S. and Knyazev, G.A. (2012) Influence of liquid phase training by nanosecond electromagnetic pulses on the processes of crystallization and structure formation, properties of copper and tin bronze, *Lit'e i metallurgiya*, no. 3, pp. 136–139. (In Russ.).

6. Korzhov, V.P. (2010) Modification of the surface of electrical contacts from Cu-30% Cr alloy, *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 3, pp. 943–944. (In Russ.).
7. Kravchenko, O.V. and Bystrov, V.P. (2014) Study of the effect of electrolyte composition on the quality of the protective coating on copper, *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, no. 3, pp. 310–316. (In Russ.).
8. Kravchenko, O.V., Bystrov, V.P. and Kravchenko, L.L. (2014) Influence of physical methods of influence on the copper passivation process, *Gornyyi nformatsionno-analiticheskiy byulleten'*, no. 3. pp. 317–322. (In Russ.).
9. Tikhomirova, S.A., Grigoryan, N.S., Abrashov, A.A., Smirnov, K.N. and Vahramyan, T.A. (2015) Passivation of ferrous and non-ferrous metals, *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, vol. 29, no. 3, pp. 51–52. (In Russ.).
10. Burnyshev, I.N., Valiakhmetova, O.M. and Lys, V.F. (2010) Multicomponent diffusion saturation of copper alloys, *Chimicheskaya fizika i mesoscopya*, vol. 12, no. 4, pp. 519–525. (In Russ.).
11. Perinsky V.V., Perinskaya I.V. and Petrova, N.A. (2013) Techniques of ion-beam protection of the surface of microelectronic products from external and chemical influences, corrosion and localization of galvanic sediment, *Technicheskie nauki – ot teorii k praktike*, no. 20, pp. 128–133. (In Russ.).
12. Kharina, G.V., Aleshina, L.V. and Shikhalev, I.A. (2017) Corrosion behavior of brass in neutral and acidic chlorine-containing media, *Nauka, tehnika i obrazovanie*, no. 2, pp. 24–29. (In Russ.).
13. Pyankov, I.B., Erofeev, V.A. and Strakhova, E.A. (2016) Criteria for assessing the operating conditions of electrodes in contact spot welding, *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, no. 11, pp. 71–83. (In Russ.).
14. Izmailov, V.V. and Novoselova, M.V. (2016) Evaluation of the resource of electrical contact materials based on the results of forced tests, *Innovacionnaya nauka*, no. 7–8, pp. 40–42. (In Russ.).
15. Dzektsler, N.N., Morozov, Yu.K. and Stroyman, I.M. (2017) Improving the reliability of electrical contacts, *Videonauka: setevoy zhurnal*, no. 2. Available at: <https://videonauka.ru/stati/18-elektrotekhnika/132-povyshenie-nadjozhnosti-elektricheskikh-kontaktov> (Accessed 12 December 2022).
16. Borisova, E.M., Reshetnikov, S.M., Gilmutdinov, F.Z., Bakieva, O.R. and Pavlova, A.Yu. (2016) Short-pulse laser processing of aluminum as a method for the synthesis of nanosized oxide layers, In: *Abstract of XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry*, pp. 202. (in Russ.).
17. Shron, L.B., Yagyaev, E.E. Abkhairova, S.V. and Gumerov, A.K. (2022) Improving the corrosion resistance of welded joints from carbon steels by laser ablation, *Transport i chranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syriya*, no. 1–2, pp. 48–52. (In Russ.).
18. Borisova, E.M., Reshetnikov, S.M., Gilmutdinov, F.Z. and Kharanzhevsky, E.V. (2018) Influence of short-pulse laser treatment on the corrosion-electrochemical properties of copper, In: *Proceedings of the International Conference «From polyethylene synthesis to stereodivergence: development of chemistry over 100 years»*, pp. 218–221. (In Russ.).

Information about the authors

Elena M. Borisova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Thermal Power Engineering, Institute of Oil and Gas, Udmurt State University (1, Universitetskaya str., Izhevsk, Russia, 426034), <https://orcid.org/0000-0003-3492-7173>, borisovayelena@mail.ru

Sergei M. Reshetnikov, Doctor of Chemistry Sciences, Professor, Professor of the Department of Fundamental and Applied Chemistry, Institute of Natural Sciences, Udmurt State University (1, Universitetskaya str., Izhevsk, Russia, 426034), smr41@mail.ru

Aliya M. Fatkhutdinova, student, Department of Thermal Power Engineering, Institute of Oil and Gas, Udmurt State University (1, Universitetskaya str., Izhevsk, Russia, 426034), aliafatyhova@yandex.ru.

Conflicts of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Submitted 15 November 2022; approved after reviewing 1 December 2022; accepted 7 December 2022.