ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/391

ПОВЫШЕНИЕ СВОЙСТВ МЕДНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТАКТА ЗА СЧЕТ ЕГО ОБРАБОТКИ ПЛАЗМОЙ, СФОРМИРОВАННОЙ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ФОЛЬГИ СЕРЕБРА С НАВЕСКОЙ ПОРОШКА ОКСИДА ЦИНКА

¹Романов Д.А., ¹Московский С.В., ²Иванов Ю.Ф., ¹Громов В.Е., ¹Соснин К.В., ¹Филяков А.Д.

¹*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк*

²*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск*

Объектом исследований являлись медные электрические контакты электромагнитного пускателя CJ20, на контактных поверхностях которых электровзрывным методом было сформировано электровзрывное покрытие системы ZnO-Ag. В качестве взрывающего токопроводящего материала была использована фольга серебра массой 250 мг, на поверхность которой в область взрыва помещалась навеска порошка ZnO массой 80 мг. Время воздействия плазмы на поверхность образца ~100 мкс, поглощаемая плотность мощности на оси струи ~5,5 ГВт/м², давление в ударно-сжатом слое вблизи облучаемой поверхности ~12,5 МПа, остаточное давление газа в рабочей камере ~100 Па; температура плазмы на срезе сопла ~10⁴ К, толщина зоны термического влияния ~50 мкм. Исследования элементного и фазового состава, состояния дефектной субструктуры поверхностного слоя, сформированного в результате электровзрывного напыления (ЭВН), проводили методами сканирующей электронной микроскопии (прибор Carl Zeiss EVO50, оснащенный микроанализатором EDAX), просвечивающей дифракционной электронной микроскопии тонких фольг (прибор JEOL JEM-2100 F) и атомно-силовой микроскопии (прибор Solver NEXT). Фольги изготавливали методами ионного утонения пластинок, вырезанных в плоскости, расположенной перпендикулярно поверхности модифицирования. Свойства материала характеризовали нанотвердостью и модулем Юнга (нанотвердомер DUN-211S (Shimadzu, Япония), нагрузка на индентор 30 мН). Атомно-силовую микроскопию проводили в слое покрытия, расположенном на расстоянии 10 мкм от поверхности покрытия, а также на границе раздела между покрытием и медной подложкой. Трибологические исследования (определение износостойкости и коэффициента трения) проводили на трибометре Pin on Disc and Oscillating TRIBOtester (TRIBOtechnic, Франция) при следующих параметрах: шарик из твердого сплава ВК6 диаметром 6 мм, радиус трека – 3 мм, нагрузка на индентор 3 Н; длина трека варьировалась в зависимости от уровня износостойкости исследуемого материала. Испытания на электроэрозионную стойкость покрытий в условиях дуговой эрозии проводили на контактах электромагнитных пускателей марки CJ20 при переменном токе и индуктивной нагрузке в соответствии с требованиями режима испытаний АС-3 на коммутационную износостойкость при работе в трехфазной цепи со значением низкого напряжения 400/230 В, частотой 50 Гц для тока до 320 А и $\cos\varphi = 0,35$ и числе коммутационных циклов 6000.

Механические свойства модифицированного слоя меди характеризовали нанотвердостью. Нанотвердость и модуль Юнга определяли на поперечных шлифах, проводя индентирование вдоль прямой, расположенной параллельно поверхности модифицирования на расстоянии ~15 мкм от поверхности обработки. Результаты выполненных испытаний показали, что твердость электровзрывного покрытия изменяется в пределах от 750 МПа до 2250 МПа при среднем значении твердости 1600 МПа, что в 3,8 раза превышает микротвердость отожженной меди. Модуль Юнга электровзрывного покрытия изменяется в пределах от 56,1 ГПа до 89,0 ГПа при среднем значении модуля 75,1 ГПа. Отметим, что модуль Юнга отожженной меди изменяется в пределах (110-130) ГПа, модуль Юнга серебра 80 ГПа. ЭВН меди сопровождается незначительным (в ~1,1 раза) увеличением износостойкости модифицированного слоя; коэффициент трения при этом повышается в ~1,3 раза. Обращает на себя внимание изменение коэффициента трения в процессе трибологических испытаний. А именно, на начальной стадии испытаний коэффициент трения модифицированной поверхности существенно ниже коэффициента трения исходной меди. Последнее может свидетельствовать о том, что упрочненный слой тонкий и быстро теряет свои износостойкие свойства.

Секция 8. Сварка, родственные процессы и технологии для создания технических систем ответственного и специального назначения, в том числе для эксплуатации в экстремальных условиях и низких климатических температур Арктики и Крайнего Севера

Повышение электрического сопротивления в ходе испытаний электровзрывных покрытий системы ZnO-Ag на коммутационную износостойкость вызвано испарением легкоплавкой серебряной матрицы под воздействием электрической дуги и обогащением поверхности покрытия частицами ZnO. Электрические контакты, упрочнённые электровзрывными покрытиями системы ZnO-Ag способны к механической очистке поверхности от частиц ZnO. Сформированные покрытия системы ZnO-Ag удовлетворяют испытаниям пускателей на коммутационную износостойкость.

Дефектную субструктуру электровзрывного покрытия системы ZnO-Ag изучали путем анализа поперечных травленных шлифов. Установлено, что ЭВН меди сопровождается формированием многослойной структуры. Толщина поверхностного слоя, имеющего субмикроструктурную (150-230 нм) структуру, изменяется в широких пределах и варьируется от 30 мкм до 60 мкм. Поверхностный слой отделен от слоя термического влияния переходным слоем толщиной (1,0-1,3) мкм. Следует отметить, что переходный слой содержит большое количество микропор. Методами микрорентгеноспектрального анализа выполнены исследования элементного состава модифицированного слоя медного электрического контакта. Результаты исследований свидетельствуют о том, что серебро является основным элементом поверхностного слоя. В переходном слое концентрация атомов серебра быстро снижается и в основном объеме медного электрического контакта атомы серебра обнаружены в минимальном количестве. Фазовый и элементный состав, состояние дефектной субструктуры медного электрического контакта, подвергнутого ЭВН покрытия системы ZnO-Ag, анализировали методами просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Выполненные исследования показывают, что в поверхностном слое толщиной до 60 мкм формируется, независимо от расстояния до поверхности облучения, структура высокоскоростной ячеистой кристаллизации. Ячейки имеют округлую форму. Размер ячеек изменяется в пределах от 150 нм до 400 нм. Ячейки разделены прослойками, толщина которых изменяется в пределах от 15 нм до 50 нм. В объеме ячеек выявляется дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций. Скалярная плотность дислокаций $\approx 2,1 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Переходный слой имеет структуру дендритной кристаллизации со стороны слоя электровзрывного напыления и структуру пластинчатого типа со стороны слоя термического влияния. Слой термического влияния медного электрического контакта имеет зеренно-субзеренную структуру. В объеме зерен меди наблюдается дислокационная субструктура в виде хаотически распределенных дислокаций. Величина скалярной плотности дислокаций составляет $\approx 1,3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$. Следует отметить, что на электронно-микроскопическом изображении структуры слоя термического влияния присутствует большое количество изгибных экстинкционных контуров, что указывает на высокий уровень кривизны-кручения материала, обусловленный внутренними полями напряжений. Распределение атомов серебра, цинка и кислорода в электровзрывном покрытии изучали методами микрорентгеноспектрального анализа тонких фольг. В структуре высокоскоростной ячеистой кристаллизации, образующейся в поверхностном слое, объем ячеек сформирован преимущественно атомами серебра, атомы цинка и кислорода расположены преимущественно по границам ячеек, формируя протяженные прослойки. В структуре переходного слоя (слоя с дендритной кристаллизацией) атомы серебра и цинка располагаются преимущественно вдоль границ дендритов.

Полученные в настоящей работе результаты позволяют предположить, что увеличение прочностных (нанотвердость), электроэрозионная стойкость и трибологических (износостойкость) свойств и электроэрозионной стойкости медного электрического контакта, подвергнутого электровзрывному напылению покрытия системы ZnO-Ag, обусловлено формированием в поверхностном слое многоэлементного многофазного субмикронаноразмерного состояния, обогащенного атомами различных элементов.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 18-79-00013).