

ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫЕ ПОКРЫТИЯ СИСТЕМЫ Ag-W ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ СИЛОВОГО ШАХТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Романов Д.А., Московский С.В., Громов В.Е.

*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк,
Россия, romanov_da@physics.sibsiu.ru*

Электрической эрозии, то есть разрушению токопроводящего материала под действием электрических разрядов, подвержены многие металлические контакты. Как известно, величина эрозионного разрушения падает с возрастанием температуры плавления материала. Нанесение покрытий из тугоплавких материалов на контакты позволяет вместе с сохранением электропроводности защитить их от электрической эрозии, тем самым продлевая срок службы данных изделий.

В настоящее время ученые располагают различными методами нанесения покрытий с помощью концентрированных потоков энергии: нанесение гальванических покрытий, газотермический метод, метод электронно-лучевого испарения–конденсации в вакууме метод нанесения защитных покрытий плазменным распылением, метод ионноплазменного нанесения покрытий и др.

Немалую роль в современном развитии методов формирования защитных покрытий играет электровзрывное напыление. Электровзрывное напыление – это метод нанесения упрочняющих покрытий из продуктов электрического взрыва фольги и порошковых навесок на поверхность материалов. Этот метод позволяет получать на металлической подложке модифицированный материал с повышенными прочностными, дюрометрическими и трибологическими свойствами. Упрочнение достигается за счет формирования покрытий с образованием мелкодисперсных фаз в вязкой металлической матрице.

Таким образом, целью данной работы является изучение покрытий системы Ag-W, полученных с помощью электровзрывного напыления на медных контактах.

В данном исследовании на подложку из меди (контакты КПВ-604) были нанесены композиционные покрытия системы Ag-W методом электровзрывного напыления на электровзрывной установке ЭВУ 60/10 (Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк). Электровзрывная установка имеет следующие параметры плазмы, формирующейся при электрическом взрыве серебряной фольги с навеской порошка вольфрама: время воздействия плазмы ~ 100 мкс, поглощаемая плотность мощности на оси струи ~ 8,2 ГВт/м², давление в ударно-сжатом слое вблизи поверхности ~18,8 МПа.

Была применена торцевая схема взрыва, для того чтобы повысить интенсивность теплового воздействия на поверхность материала до ее оплавления и обеспечить этим условия для напыления. Серебряная фольга массой 0,2463 г зажималась между коаксиальными электродами, на которые через вакуумный разрядник подавалось регулируемое напряжение. На серебряную фольгу насыпался порошок вольфрама массой 0,434 г. Покрытия нанесены при тепловом воздействии, вызывающем нагрев поверхности подложки до температуры плавления при трех различных режимах энергетического воздействия, отличающихся значениями поглощающей плотности мощности на коаксиальных электродах: $U_1 = 2,4$ кВ, $U_2 = 2,5$ кВ, $U_3 = 2,6$ кВ. При разряде емкостного накопителя периферийная область фольги, прилегающая к внешнему электроду-соплу, становится источником конденсированной фазы продуктов взрыва, а участок фольги над центральным электродом, куда засыпается порошок вольфрама, работает как источник ионизированного пара.

После проведенного электровзрывного напыления полученные при различных режимах образцы были исследованы на микротвердость по методу Виккерса (микротвердомер HVS-1000A). Нагрузка была постоянной для всех режимов и составляла 0,05 НВ. Исследование структуры прямых шлифов было проведено на металлографическом микроскопе Olympus GX-51. Исследование пористости покрытия и зоны термического влияния образцов производили на атомно-силовом микроскопе NT-MDT Solver «NEXT».

С помощью программы Image Analysis 3.5, встроенной в интерфейс программного обеспечения атомно-силового микроскопа был проведен анализ шероховатости покрытия, слоя с измененным состоянием и материала подложки (меди), изучено распределение высоты рельефа поверхности прямого шлифа в зависимости от расстояния.

При анализе структуры на металлографическом микроскопе поперечного сечения всех трех образцов, выявлено формирование многослойной структуры, которая состоит из низкопористого покрытия, незначительно варьирующей толщины, слоя жидкофазного легирования и слоя термического влияния. Толщина покрытия равна $49,04 \pm 0,7$ мкм для режима 1, $68,5 \pm 0,9$ мкм для режима 2 и $61,26 \pm 0,6$ мкм для образца 3. Измерение толщины покрытий произведено с помощью метода вертикальных секущих.

Покрытия при режимах 2 и 3 получились более однородные по ширине, чем при режиме 1, что может быть объяснено, соответственно, более высокой температуры струи и, значит, скорость диффузии покрытия с подложной до охлаждения оказалась выше.

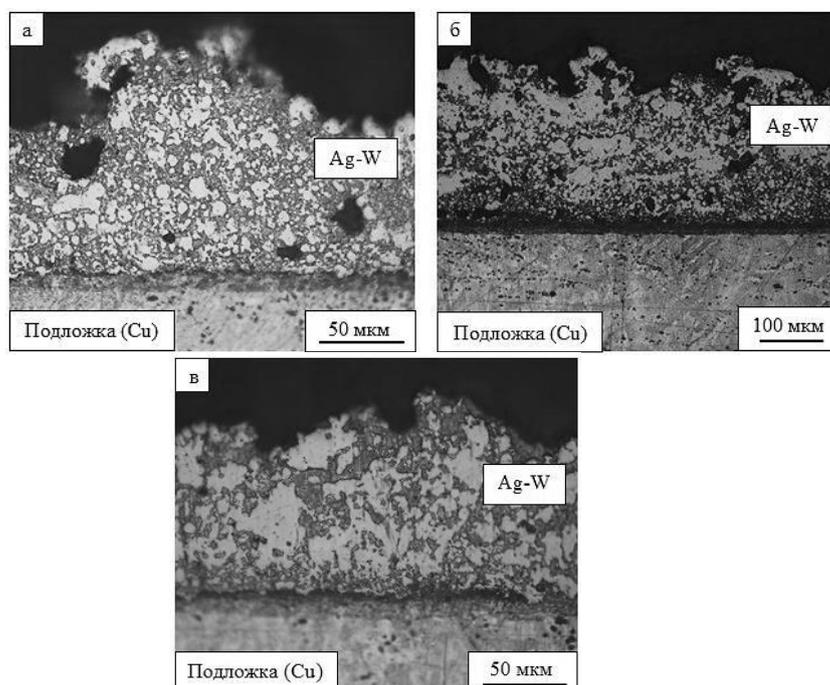


Рисунок 1 - Структура поперечных сечений электровзрывных покрытий системы Ag-W-Cu, полученных при различных режимах обработки (а – режим 1, б – режим 2, в – режим 3)

Из рисунка 1 видно, что при первом режиме обработки в покрытии имеются поры размером от 3-х до 30 мкм. При режиме обработки 2 размер пор уменьшается, по сравнению с режимом 1. Среднее значение размера пор при втором режиме составляет 16 мкм. При третьем режиме обработки средний размер пор составляет 8 мкм. Таким образом, с увеличением поглощающей плотности мощности средний размер пор в покрытии системы Ag-W уменьшается.

Среднее значение толщины слоя с измененным состоянием между покрытием и подложкой равно 14 мкм для режима 1, 18,5 мкм для режима 2 и 20 мкм для режима 3. Ширина слоя измененного состояния между подложкой и покрытием растет по мере увеличения значений поглощающей плотности мощности на коаксиальных электродах.

Анализ переходного слоя между покрытием и подложкой показал, что граница не является ровной. Формируется зона взаимного смешивания покрытия с подложкой. Анализируя данные сравнительной гистограммы, можно сделать вывод о том, что режим обработки № 2 имеет максимальное среднее значение микротвердости слоя покрытия, по сравнению с другими исследуемыми режимами. Оно составляет $457,5 \pm 55,2$. В подложке значения микротвердости меньше, по сравнению со слоем

покрытия, и составляют $119,4 \pm 2,5$ HV и $122,0 \pm 3,3$ HV на расстоянии 5 и 40 мкм от покрытия, соответственно.

Также важно отметить, что среднее значение микротвердости на расстоянии 5 мкм от покрытия при всех режимах обработки меньше, чем среднее значение микротвердости на 40 мкм от покрытия. Можно сделать предположение, что причиной этому является термическое влияние, которое реализуется при нанесении покрытия системы Ag-W методом элетровзрывного легирования.

Заключительным этапом комплексного исследования закономерностей формирования электровзрывных электроэрозионностойких покрытий системы Ag-W стала атомно-силовая микроскопия покрытия, полученного при оптимальном режиме воздействия.

Атомно-силовое изображение позволило установить, что нанесение методом электровзрывного напыления покрытий системы Ag-W на медный контакт при оптимальном режиме обработки приводит формированию структуры, состоящей из покрытия, слоя измененного состояния и материала подложки. Среднее значение толщины слоя с измененным состоянием, расположенного между покрытием и подложкой, составляет 16 мкм, что коррелирует с данными, полученными при металлографическом анализе.

Высота профиля покрытия выше высоты подложки, а также слоя с измененным состоянием. Наибольшее значение высоты рельефа достигается при 40 мкм. Среднее значение высоты в данной точке равно 661,5 нм – эта точка соответствует границе перехода от слоя с измененным состоянием к слою покрытия.

Изучение шероховатости покрытия, слоя с измененным состоянием и материала подложки (меди) при режиме 2 выявило следующие значения шероховатости. Среднее значение шероховатости подложки равно 25,397 нм. Среднее значение шероховатости слоя с измененным состоянием равно 52,563 нм. Среднее значение шероховатости покрытия равно 75,412 нм. Таким образом, анализ атомно-силового изображения показал, что среднее значение шероховатости покрытия, больше средних значений шероховатости подложки и слоя с измененным состоянием на 50,015 и 22,849 нм, соответственно.

В ходе данной работы по исследованию электровзрывных покрытий системы Ag-W, сформированных на медных контактах КПВ-604, были подобраны режимы напыления и массы навесок порошка Ag-W, нанесены покрытия методом электровзрывного напыления на медные контакты при различных режимах, проведены металлографические исследования, испытания на микротвердость и атомно-силовая микроскопия полученных покрытий.

Результаты проведения микроиндентирования позволили выявить оптимальный режим напыления ($U_2 = 2,5$ кВ), при котором слой покрытия имеет наибольшее среднее значение микротвердости, по сравнению с другими исследуемыми режимами. Это значение составляет $457,5 \pm 55,2$ HV, что в 3,8 раз превышает среднее значение микротвердости в медной подложке. Анализ шероховатости поперечного шлифа при режиме 2 показал, что среднее значение шероховатости покрытия больше средних значений шероховатости подложки и слоя с измененным состоянием на 50,015 нм и 22,849 нм, соответственно.

Таким образом, нанесение покрытий системы Ag-W на медные контакты способствует повышению их механических и физических свойств. Изученные режимы обработки позволяют значительно увеличить микротвердость поверхностного слоя контактов, а также повысить их электроэрозионностойкость за счет наличия в покрытии частиц вольфрама, а также сохранить необходимую электропроводность, чему способствует наличие частиц серебра.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук МД-89.2019.2.