

УДК 620.193.75

**С.М. Карабанов, Д.В. Суворов, Е.В. Сливкин,
Г.П. Гололобов, Д.Ю. Тарабрин, М.А. Серпова, А.И. Мороз**
**УВЕЛИЧЕНИЕ ЭРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ
ЭЛЕКТРОДОВ ВАКУУМНЫХ И ГАЗОРАЗРЯДНЫХ
КОММУТАЦИОННЫХ ПРИБОРОВ**

Представлены результаты численного моделирования термомеханических напряжений и тепловых полей для условий эрозионно стойких покрытий электродов вакуумных и газоразрядных коммутационных приборов со структурой W-Ti-Cu и W-Mo-Cu при локальном температурном и электротоковом воздействии в аксиально-симметричном приближении. Проведена оценка эффективности введения промежуточных слоев путем сопоставления межслоевых механических напряжений. Показано, что введение промежуточного слоя Ti в покрытие со структурой W-Cu приводит к существенному снижению внутренних термомеханических напряжений между слоями, что повышает стойкость покрытия к отслоению. Выявлено оптимальное значение толщины промежуточного слоя, при котором обеспечиваются минимальные термомеханические напряжения.

Ключевые слова: МЭМС, тепловое поле, термомеханические напряжения, эрозия, моделирование.

Введение. В настоящее время существует широкий спектр приборов вакуумной и газоразрядной электроники. Особую популярность получили искровые и псевдоискровые разрядники, тиратроны с дуговой формой разряда, а также приборы на основе сухого контакта – магнитоуправляемые контакты, МЭМС-коммутаторы. В основе работы таких приборов лежит использование импульсного сильноточного разряда. На срок службы данных приборов влияют несколько факторов. Во-первых, в процессе работы сильноточными импульсами тока эрозионная стойкость электродов ограничена [1-3]. Кроме того, в жестких режимах наблюдается деламинация (отслоение) покрытия от материала подложки, что также является причиной выхода коммутационных приборов из строя. Основная причина деламинации – значительные механические напряжения на границе подложка-покрытие. Их возникновение связано с разницей термомеханических свойств материалов подложки и коммутационного покрытия. В результате при локальном разогреве контактной площадки происходит «несогласованное» расширение и деформация коммутационного покрытия и приповерхностного слоя подложки.

Для снижения описанных термомеханических напряжений необходимы материалы с близкими по величине свойствами. В частности,

для выравнивания термомеханических напряжений в адгезионном слое контактного покрытия можно использовать дополнительный «согласующий» слой. Материал и толщина данного слоя чаще всего находятся эмпирическим путем. Для снижения затрат на поиски оптимальной конструкции целесообразно применять численные методы, которые на данный момент являются адекватными средствами описания большинства физических процессов.

Таким образом, для увеличения стойкости к отслоению покрытий и, следовательно, для повышения срока службы коммутационных приборов необходим расчет термомеханических напряжений между различными слоями покрытия [4-5].

Целью данной работы являются численное моделирование и расчет локального температурного и электротокового воздействий на пленочную структуру в аксиально-симметричном приближении для обеспечения высокой эрозионной стойкости покрытия.

Теоретическая часть. В промышленности для увеличения срока службы сильноточные электроды изготавливаются из тугоплавких материалов, таких как молибден, вольфрам и т.д. Как известно, характер и интенсивность электрической эрозии материалов зависят как от polarity их подключения, так и от теплофизи-

ческих констант материалов. Стойкость материалов к эрозии можно оценить с помощью критерия Палатника [6]:

$$P_{II} = C_T \rho \lambda T_{пл}^2, \quad (1)$$

где C_T — теплоемкость, кал·г/град; ρ — плотность материала, г/см³; λ — коэффициент теплопроводности, кал·см²/град; $T_{пл}$ — температура плавления, °С. Помимо перечисленных свойств, на величину термомеханических напряжений влияют такие характеристики материала, как коэффициент термического расширения, модуль Юнга, характеризующий свойства материала сопротивляться растяжению/сжатию при упругой деформации, и коэффициент Пуассона. Последний определяет отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению.

Как правило, в качестве материала контактного покрытия выступают тугоплавкие металлы. Недостатком данных материалов является повышение температуры поверхности электродов, причиной которого являются низкая теплопроводность и омический нагрев. При этом локальное увеличение температуры какого-либо участка способствует росту эмиссии электронов с него и увеличению плотности тока ионов, что, в свою очередь, приводит к еще большему локальному разогреву этого участка электрода. Такой механизм может привести к возникновению локальной эрозии отдельных участков электродов, провоцируя выход прибора из строя.

Увеличить срок службы вакуумных и газоразрядных коммутационных приборов возможно при использовании специализированных покрытий электродов типа «сэндвич» [3], т.е. покрытий, состоящих из нескольких слоев. В качестве верхнего слоя следует использовать тугоплавкий металл, обладающий максимально высокой эрозионной стойкостью. Нижний слой служит для выравнивания температурного профиля по поверхности электрода, поэтому он состоит из материала с высокой теплопроводностью и имеет большую толщину. Между двумя этими слоями вводится дополнительный слой, выполняющий функцию снижения термомеханических напряжений. Для промежуточного слоя следует выбирать материалы с достаточно высокой температурой плавления и средним коэффициентом термического расширения относительно верхнего и нижнего слоев. Определить оптимальные параметры эрозионной стойкости можно путем детального расчета локально-температурного и электротокowego воздействий на пленочную структуру.

Условия численного моделирования термомеханических напряжений и тепловых полей. Расчет теплового поля и термомеханических напряжений осуществлялся с помощью разработанной математической модели в пакете программ конечно-элементного анализа COMSOL Multiphysics, который обеспечивает высокую точность оценки в аксиально-симметричном приближении. В ходе моделирования исследовалась рабочая область электрода, представляющего собой усеченный цилиндр. Общий трехмерный вид рассчитываемой геометрии приведен на рисунке 1.

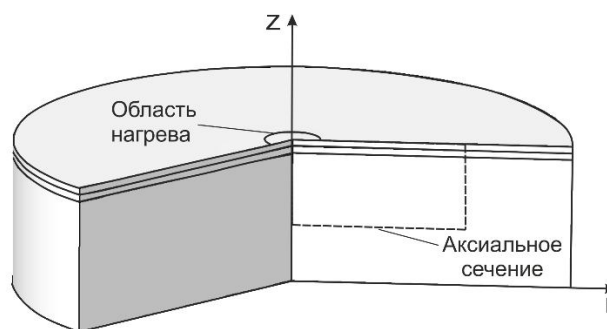


Рисунок 1 – Геометрия расчета

Данная модель учитывает растекание электрического тока, омический нагрев и изменение температурных и электрических характеристик материалов покрытия под действием нагрева. Точность расчета обеспечивается мультифизическим взаимодействием используемых модулей. Сначала проводится итерационный расчет теплового поля в конструкции и определение деформационного рельефа в структуре. Следом происходит расчет термомеханических напряжений, основанных на взаимном смещении материалов с учетом их свойств. После этого выполняется следующая итерация расчета теплового режима в деформированной структуре. Использование геометрии в виде усеченного цилиндра (рисунок 1) позволяет проводить расчет в аксиально-симметричном приближении, что снижает процессорное время. Пример расчетной геометрии модели с триангуляционной сеткой представлен на рисунке 2.

Модель выполняет численный расчет локального температурного и электротокowego воздействия на пленочную структуру при условии воздействия разряда канальной формы на электроды. В математической модели задавались граничные условия – теплоизоляция по краям расчетной геометрии (10 мм от оси симметрии модели) и постоянная температура (300 К) нижней границы многослойного покрытия [7].

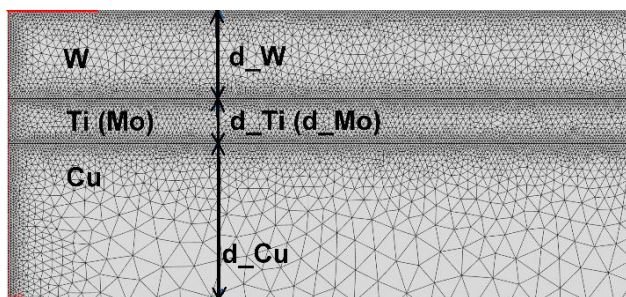


Рисунок 2 – Пример расчетной геометрии модели с триангуляционной сеткой

Для исследования локального температурного и электротокowego воздействия на пленочную структуру необходимо изменять параметры, такие как диаметр температурного и токового пятна (10 – 20 мкм), плотность тока (10 – 100 А/мм²), средняя мощность теплового потока (10 – 100 Вт). В качестве материала внешнего слоя покрытия был выбран вольфрам, а в качестве нижнего слоя – медь. При данном выборе наиболее подходящими материалами для промежуточного слоя являются титан и молибден, поэтому исследовались два типа эрозионно-стойких покрытий: W-Ti-Cu, W-Mo-Cu. Толщина слоя меди изменялась в пределах 200 – 500 мкм, толщина промежуточного слоя титана (молибдена) – 5–100 мкм, толщина слоя вольфрама – 10–200 мкм.

Результаты численного расчета. На рисунке 3 представлена картина теплового поля и поля термомеханических напряжений внутри пленочной структуры вблизи области локального теплового и электротокowego воздействий. Исследования структуры W-Ti-Cu и его численный расчет указывают на наличие наибольшего градиента температур в слое титана, что объясняется его малой теплопроводностью, а наибольшие термомеханические напряжения – на границе слоев W-Ti. Градиенты температур в слоях W и Mo для структуры W-Mo-Cu приблизительно одинаковы из-за схожих коэффициентов теплопроводности, при этом наибольшие термомеханические напряжения наблюдаются на границе слоев Mo-Cu.

Проводилась оценка эффективности введения промежуточных слоев путем сопоставления межслоевых механических напряжений для покрытий с введенным промежуточным слоем Ti и без него. Согласно расчетам, в структуре W-Cu (рисунок 4) основная часть термомеханических напряжений сосредоточена на поверхности, что является причиной отслоения эрозионно-стойких покрытий. Введение дополнительного слоя Ti (рисунок 5) существенно (более чем в 2 раза)

снижает возникающие термомеханические напряжения. Также установлено, что максимум межслоевых напряжений смещается в сторону от центра температурного воздействия. Оба этих фактора непосредственно влияют на стойкость покрытия. Таким образом, введение промежуточного слоя делает покрытие более стойким к отслаиванию.

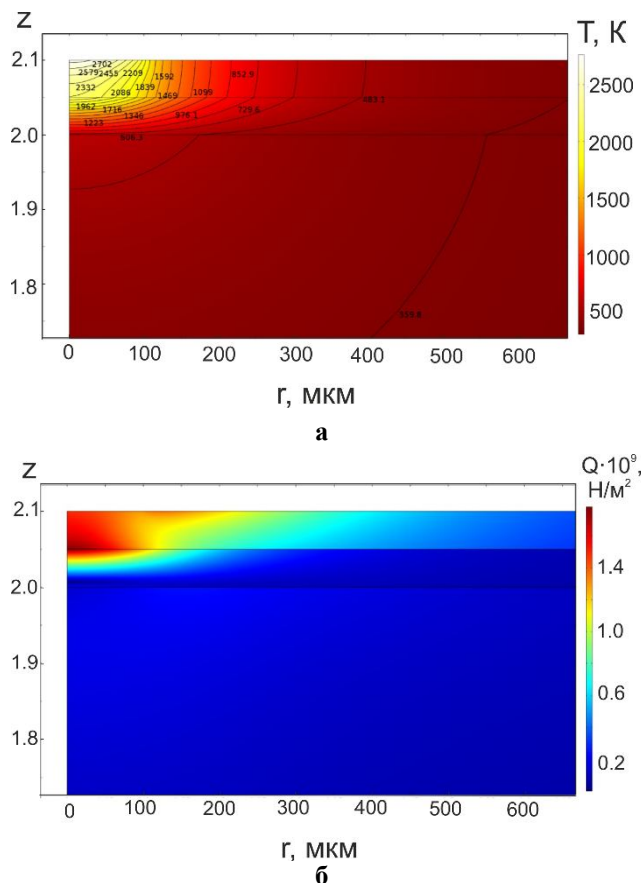


Рисунок 3 – Тепловое поле (а) и поле термомеханических напряжений (б) внутри пленочной структуры вблизи области локального теплового и электротокowego воздействий. Толщины слоев W – 50 мкм, Ti – 50 мкм, Cu – 100 мкм. Средняя мощность теплового потока – 100 Вт

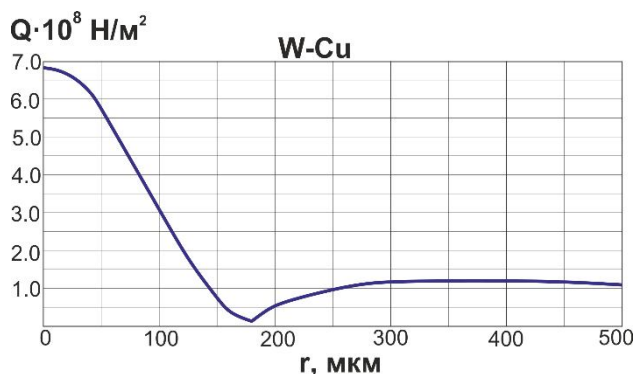


Рисунок 4 – Межслоевые механические напряжения для покрытия типа W-Cu. Толщины слоев W – 50 мкм, Cu – 200 мкм

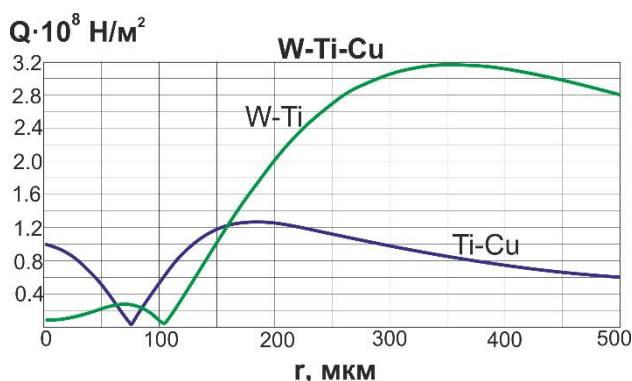


Рисунок 5 – Межслоевые механические напряжения для покрытия типа W-Ti-Cu. Толщины слоев W – 50 мкм, Ti – 50 мкм, Cu – 200 мкм

Оптимизация структуры покрытия. Для определения оптимальных параметров структуры многослойного покрытия был выполнен расчет, устанавливающий зависимость максимального значения межслоевого механического напряжения от различных толщин слоев покрытий со структурами W-Ti-Cu и W-Mo-Cu. Под оптимальными параметрами структуры многослойного покрытия предполагаются такие параметры, при использовании которых обеспечивалась бы максимальная стойкость покрытия к деламации.

Для исследования влияния толщины слоя вольфрама $d(W)$ на межслоевое механическое напряжение покрытия толщину слоя титана $d(Ti)$ задавали постоянной и равной 50 мкм, и наоборот, при исследовании влияния толщины слоя титана $d(Ti)$ толщину слоя вольфрама $d(W)$ задавали также постоянной и равной 50 мкм. Толщина слоя меди задавалась постоянной и составляла 200 мкм для обоих случаев. Аналогичным образом выполнялся расчет влияния толщин слоев вольфрама $d(W)$ и молибдена $d(Mo)$ на межслоевое механическое напряжение в структуре W-Mo-Cu. Результаты расчета представлены на рисунке 6.

Зависимости указывают на то, что в структуре типа W-Ti-Cu увеличение толщины слоя вольфрама в пределах 5 – 50 мкм приводит к снижению более чем в 10 раз термомеханических напряжений на границе W-Ti. Зависимости механических напряжений между слоями W-Ti и Ti-Cu от толщины слоя титана имеют минимумы. Сумма минимумов соответствует толщине слоя титана и равна 50 мкм. Наличие минимума можно объяснить двумя противоположно действующими факторами: с одной стороны, механические напряжения уменьшаются с ростом толщины слоя титана, с другой – низкая теплопроводность титана приводит к росту градиента температур и как следствие – увеличению термомеханических напряжений.

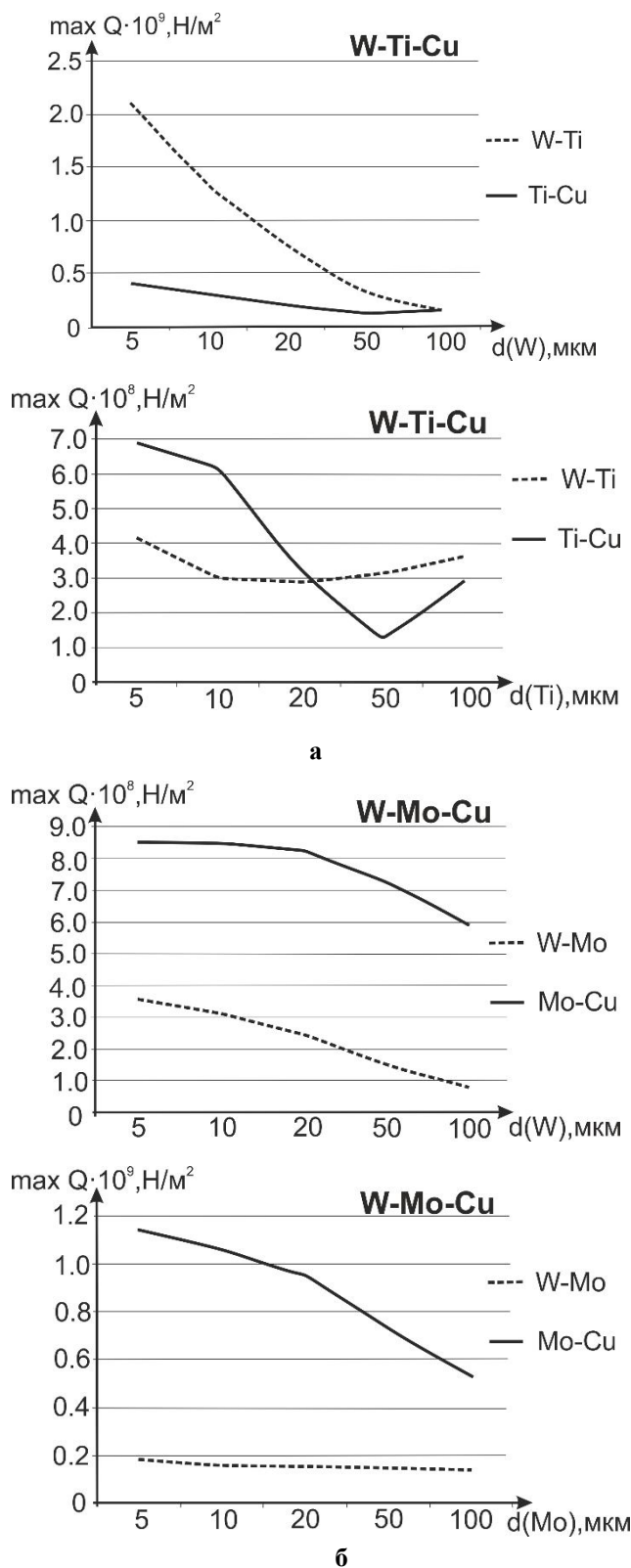


Рисунок 6 – Зависимость максимума межслоевого механического напряжения при различной структуре покрытия и толщинах составляющих его слоев. Средняя мощность теплового потока – 100 Вт: а – структура W-Ti-Cu; б – структура W-Mo-Cu

В структуре типа W-Mo-Cu увеличение толщины слоя вольфрама в пределах 5 – 100 мкм

приводит к незначительному снижению (менее чем в 1,5 раза) термомеханических напряжений на границе Mo-Cu, а также к снижению напряжений на границе W-Mo (приблизительно в 5 раз). Рост толщины слоя молибдена в пределах 5 – 100 мкм приводит к незначительному снижению (менее чем в 1,5 раза) термомеханических напряжений на границе W-Mo и к снижению напряжений на границе Mo-Cu приблизительно в 2 раза. Наблюдается монотонный характер уменьшения механических напряжений, что позволяет прогнозировать дальнейшее снижение механических напряжений в структуре W-Mo-Cu с ростом толщин слоев W и Mo.

В целом структура типа W-Ti-Cu обеспечивает примерно в 2 раза меньший уровень механических напряжений по сравнению со структурой типа W-Mo-Cu при одинаковом порядке толщин покрытий.

Выводы. В ходе работы было выполнено моделирование термомеханических напряжений и тепловых полей для условий эрозионно стойких покрытий электродов со структурой W-Ti-Cu и W-Mo-Cu при локальном температурном и электротоковом воздействии в аксиально-симметричном приближении, расчет которого показывает, что введение промежуточного слоя титана в покрытие со структурой W-Ti-Cu приводит к существенному (более чем в два раза) снижению внутренних термомеханических напряжений между слоями, который, в свою очередь, приводит к повышению температурной и эрозионной стойкости всего покрытия.

Исследование и сопоставление покрытий с отличающимися промежуточными слоями: W-Ti-Cu и W-Mo-Cu показывают, что структура W-Ti-Cu обеспечивает примерно в 2 раза меньший уровень механических напряжений по сравнению со структурой типа W-Mo-Cu при одинаковом порядке толщин покрытий. Кроме того, выявлено оптимальное значение толщины слоя Ti, при котором обеспечиваются минимальные тер-

момеханические напряжения. Для условий поставленного численного эксперимента эта толщина составляет 50 нм.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке эрозионно-стойких покрытий приборов вакуумной и газоразрядной электроники, а также приборов на основе сухого контакта, работающих в жестком режиме.

Библиографический список

1. Magnetically controlled mems switches with nanoscale contact coatings. Karabanov S.M., Karabanov, A.S., Suvorov D.V., Grappe B., Coutier C., Sibuet H., Sazhin B.N. (2012) IET Conference Publications 2012 (605 CP). P. 359 – 361. doi: 1049/cp.2012.0675.
2. A new magnetically actuated switch for precise position detection. Coutier, C., Grenoble, France ; Chiesi, L. ; Garnier, A. ; Fourier, J.C. Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2009. TRANSDUCERS 2009. International. P. 861 – 864.
3. Karabanov S.M., Maizels R.M., Shoffa V.N. Magnetically operated switches (reed switches) and products on their basis, Dolgoprudny, Publishing House “Intellect”, 2011. 408 p.
4. Karabanov S.M., Suvorov D.V., Sazhin B.N., Krutinin A.A., Karabanov A.S., Grappe B., Courier C., Sibuet H. Nanoscale ruthenium coatings of mems switches contacts // Materials Research Society Symposium Proceedings 2010 MRS Spring Meeting, San Francisco, CA, 2010. P. 277-280.
5. Karabanov S.M.; Maizels R.M.; Shoffa V.N. Magnetically operated contacts (reed switches) and units based thereof; Publishing house “Intellect”: Dolgoprudny, Russia, 2011).
6. Палатник Л.С., Ландау А.И. Фазовые равновесия в многокомпонентных системах. Изд. Харьковского университета, 1961.
7. Карabanov С.М., Суворов Д.В., Сливкин Е.В. Исследование режимов технологии экстракционной очистки металлургического кремния с учетом непрерывного выведения примесей из объема экстрагента // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2012. № 39-1. С. 87-92.