

На правах рукописи



Шаненкова Юлия Леонидовна

**НАНЕСЕНИЕ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ  
КОНТАКТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

05.14.12 – Техника высоких напряжений

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в Инженерной школе энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, старший научный сотрудник, **Сивков Александр Анатольевич**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук **Королев Юрий Дмитриевич**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск, профессор, главный научный сотрудник;

доктор физико-математических наук **Рыжков Сергей Витальевич**, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва, доцент, профессор кафедры Э6 «Теплофизика».

**Защита состоится** «29» мая 2019 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.19 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

**С диссертацией можно ознакомиться** в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, и на сайте: <http://dis.tpu.ru/>

Автореферат разослан «    » марта 2019 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС.ТПУ.19, к.т.н.



Ивашутенко А.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Согласно статистическим данным потери электрической энергии на контактных соединениях в электрических сетях составляют до 10% от всей потребляемой электроэнергии. В условиях развивающейся электроэнергетики снижение доли этой составляющей потерь может дать ощутимый вклад в решение проблемы энергосбережения в целом. Основными материалами токоведущих элементов в электрических сетях и установках являются медь и алюминий. Как правило, из меди выполняются вводы электроустановок, электрических машин и аппаратов, которые соединяются с алюминиевыми проводами, шинпроводами и токопроводами электрических сетей с помощью болтовых контактных соединений. Известно, что контактная пара медь-алюминий (*Cu-Al*) характеризуется относительно высоким переходным сопротивлением, в основном, из-за образования на алюминиевой поверхности тонкой оксидной плёнки, обладающей высоким удельным сопротивлением. Кроме того, контактные соединения двух разнородных металлов *Cu-Al* представляют из себя электрохимическую пару. Электрохимические процессы, активизируемые протеканием токов силовой нагрузки, приводят к быстрой деградации контактного перехода и повышению его сопротивления вплоть до полного нарушения электрического контакта. Это, естественно, приводит к значительному повышению джоулевых потерь энергии и возможности возникновения аварийной ситуации. Поэтому проблема электрического совмещения контактной пары *Cu-Al* и снижение её переходного сопротивления до сих пор остаётся актуальной.

Существующие способы решения данной проблемы недостаточно эффективны и имеют ряд недостатков. При использовании биметаллических прокладок (*Cu-Al*) обеспечивается надёжное совмещение контактной пары, но существенно увеличивается переходное сопротивление из-за появления дополнительного переходного контакта алюминий-алюминий (*Al-Al*). При длительной эксплуатации контактов с токопроводящими смазками на основе меди их качество сильно ухудшается из-за высыхания и затвердевания связующего. При ревизии соединений требуется очистка поверхностей и нанесение нового слоя смазки. Традиционные электролитические и газодинамические покрытия характеризуются плохой адгезией и низкой устойчивостью к динамическим и термическим воздействиям, что практически исключает их повторное использование.

В работе рассматривается новый плазмодинамический способ нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью высоковольтного сильноточного коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ) эрозионного типа с медными электродами и ускорительным каналом (УК). В отличие от существующих способов он реализуется при атмосферном давлении и комнатной температуре, обеспечивает нанесение устойчивого покрытия, отличается экологичностью, не требует предварительной подготовки обрабатываемой поверхности и дозированной подачи основного расходного материала.

**Степень разработанности темы исследования.** Различным аспектам проблемы совмещения контактных элементов из меди и алюминия с низкой величиной переходного сопротивления посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых: R. Gravina, N. Pèbère, A. Laurino, C. Blanc, X.G. Wang, F.J. Yan,

C.G. Wang, M. Winnicki, A. Małachowska, A. Baszczuk, M. Rutkowska-Gorczyca, A. Ambroziak, Алхимов А. П., Косарев В. Ф., Плохов А. В. и др. Несмотря на это, поиск эффективного решения проблемы по-прежнему остаётся актуальным.

**Цель диссертационной работы:** разработка плазмодинамического метода нанесения медного покрытия на алюминиевые поверхности на основе коаксиального магнитоплазменного ускорителя с медными электродами.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи:**

1. Анализ современного состояния проблемы нанесения медных покрытий на металлические поверхности и совмещения контактной пары  $Cu-Al$ ;

2. Разработка импульсного сильноточного высоковольтного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозионного типа с медными электродами и ускорительным каналом;

3. Изучение основных закономерностей влияния конструктивных и энергетических параметров ускорителя на электроэрозионную наработку основного рабочего материала с поверхности ускорительного канала;

4. Исследование микроструктуры, фазового состава и физико-механических характеристик медных покрытий на алюминиевых контактных поверхностях и их влияния на переходное сопротивление контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$ ;

5. Разработка и реализация системы на основе КМПУ для нанесения медных покрытий на внутренние конусные алюминиевые контактные поверхности.

**Идея работы:** использование сверхзвуковой импульсной струи электроэрозионной плазмы, создаваемой высоковольтным сильноточным коаксиальным магнитоплазменным ускорителем, для распыления меди и нанесения устойчивого медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности.

**Научная новизна и основные защищаемые положения:**

1. Разработаны системы на основе высоковольтного сильноточного импульсного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозионного типа с медными электродами и ускорительным каналом с электропитанием от емкостного накопителя энергии для сверхзвукового распыления и нанесения устойчивых медных покрытий на плоские и внутренние конические алюминиевые контактные поверхности.

2. Определены оптимальные условия, конструктивные и энергетические параметры ускорителя, обеспечивающие нанесение медного покрытия регулируемой толщины порядка 100 мкм, площадью до 200 см<sup>2</sup> и высокой прочностью сцепления до 2500 МПа с алюминиевой подложкой.

3. Экспериментально установлено, что плазмодинамическое медное покрытие с естественной шероховатостью на алюминиевой поверхности обеспечивает надежное совмещение плоской или конической контактной пары медь-алюминий и снижение переходного сопротивления в 2,5÷4 раза за счёт образования граничного слоя взаимного перемешивания материалов и высокотвёрдых интерметаллидных фаз.

**Практическая значимость работы:**

1. Определены оптимальные параметры и разработаны научно-технические основы системы, базирующейся на использовании высоковольтного сильноточного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозионного типа с медными электродами для создания промышленной технологии нанесения устойчивых медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности различной конфигурации, обес-

печивающие надёжное совмещение сильноточных контактных пар медь-алюминий и снижение переходного сопротивления контактных соединений при монтаже силовых электрических цепей.

2. Показаны возможности применения разработанной системы для нанесения медных покрытий на контактные поверхности стандартных алюминиевых шинопроводов, электроконтактных наконечников и конусных отверстий контактных терминалов вакуумных выключателей.

**Реализация работы.** Результаты диссертационной работы реализованы в ходе выполнения ряда научно-исследовательских работ по темам: «У.М.Н.И.К.» «Разработка технологии нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности», Российского научного фонда «Разработка плазмодинамического метода на основе уникальной высокоомощной системы распыления материалов для синтеза многофункциональных покрытий на основе титана» (№15-19-00049), Российского фонда фундаментальных исследований «Получение ультрадисперсного порошка оксида меди – компонента материала, обладающего высокотемпературной сверхпроводимостью» (№14-08-31122), Российского фонда фундаментальных исследований «Разработка метода получения объёмных оксидно-цинковых материалов с управляемыми электрическими характеристиками» (№ 18-32-00115).

**Личный вклад автора:** планирование, постановка и проведение исследований, обработка и интерпретация полученных данных.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы представлены на следующих конференциях и форумах: Международная научно-практическая конференция «International Conference on Industrial Engineering» (Санкт-Петербург, 2017 г.), 5<sup>th</sup> International Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE-2016, Томск, 2016), IFOST-2016: The 11<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology-2016 (Новосибирск, 2016), «4<sup>th</sup> International congress on radiation physics and chemistry of condensed matter, high current electronics and modification of materials with particle beams and plasma flows» (Томск, 2014), XX Юбилейная Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 2014).

**Достоверность результатов** диссертационного исследования подтверждается современными методами исследования, которые соответствуют поставленным в работе целям и задачам. Научные положения и выводы, сформулированные в диссертации, подкреплены фактическими данными, наглядно представленными в приведенных таблицах и рисунках.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 5 статей в журналах, индексируемых в базах данных Web of Science/Scopus, получен 1 патент РФ.

**Структура и объём диссертации.** Текст диссертационной работы изложен на 157 страницах, в том числе 57 рисунках, 10 таблицах. Список цитируемой литературы – 121 наименование. Основной текст разделен на введение, пять глав и заключение.

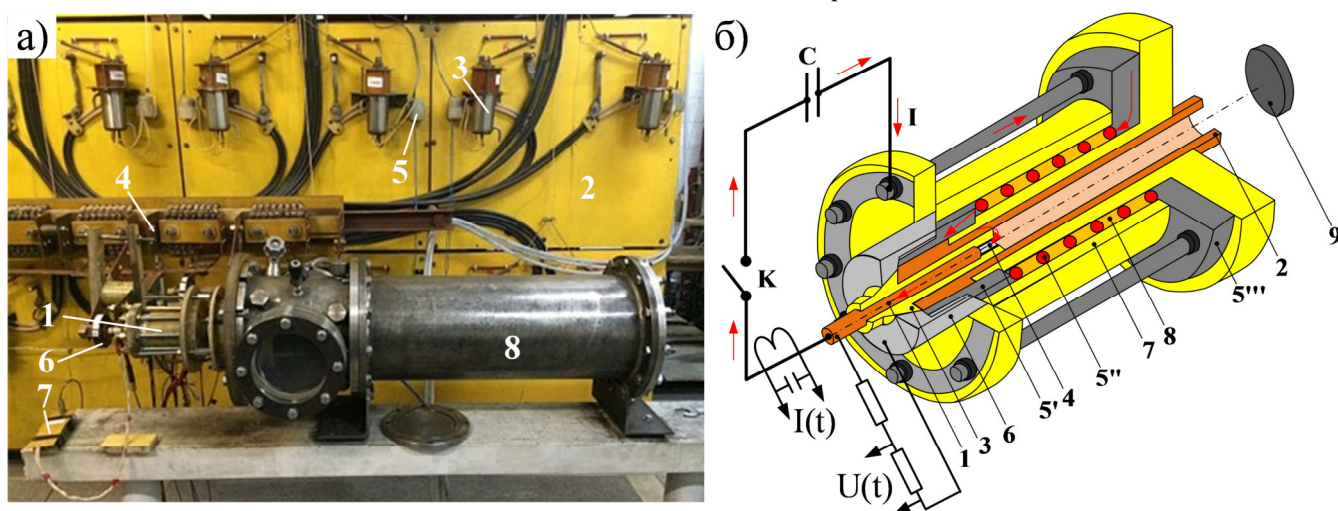
## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована актуальность темы исследования, обозначены цель и задачи, приведены выносимые на защиту положения научной новизны и практи-

ческая значимость результатов, указаны данные о структуре диссертационной работы, её апробации и количестве опубликованных работ по теме.

**В первой главе** приведены результаты анализа литературных данных по возможности совмещения контактных элементов из меди и алюминия. Отмечены основные достоинства и недостатки существующих методов решения рассматриваемой проблемы и показаны преимущества плазодинамического метода нанесения медных покрытий для совмещения контактных пар медь-алюминий и уменьшения их переходного сопротивления.

**Во второй главе** рассмотрены методы проведения экспериментальных и аналитических исследований. Описано устройство системы по нанесению медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности, основными элементами которой являются коаксиальный магнитоплазменный ускоритель эрозионного типа с медными электродами (КМПУ), емкостной накопитель энергии (ЕНЭ), регистрирующая аппаратура и другие приборы, обеспечивающие корректное и безопасное проведение эксперимента (*рис.1а*). Импульсное электропитание КМПУ осуществляется от ЕНЭ с ёмкостью  $C=28,8$  мФ и зарядным напряжением  $U_{зар}$  до 5 кВ.



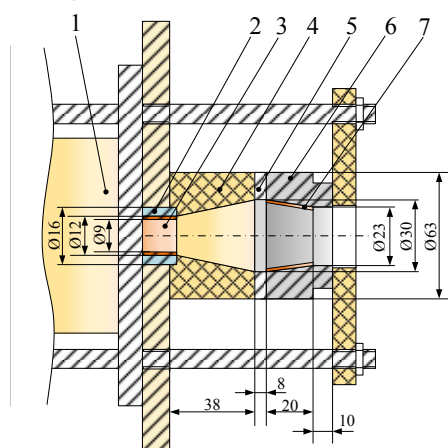
**Рис. 1** – а) Конструкция экспериментальной установки для нанесения покрытий:

1 – КМПУ, 2 – ЕНЭ, 3 – управляемые разрядники ИРТ-6, 4 – шины сборного коллектора, 5 – импульсный трансформатор, 6 – трансформатор Роговского,

7 – делитель напряжения, 8 – камера-реактор; б) КМПУ: 1 – центральный электрод, 2 – электрод-ствол, 3 – изолятор центрального электрода, 4 – канал формирования плазменной структуры, 5 – индуктор, 5' - контактный цилиндр индуктора, 5'' – соленоид, 5''' – контактный фланец, 6 – заглушка, 7 – корпус, 8 – межвитковая изоляция, 9 – алюминиевая мишень

В исходном состоянии центральный электрод  $I$  и поверхность ускорительного канала (УК) соединены углеродной разрушаемой перемычкой, нанесённой на изоляционную поверхность канала формирования плазменной структуры  $4$  (КФПС) (*рис.1б*), сопротивление которой  $300\div 600$  Ом обеспечивает инициирование дугового разряда с минимальной длительностью безтоковой паузы  $\sim 10$  мкс между подачей напряжения и началом дуговой стадии. При замыкании ключа  $K$  (управляемых разрядников  $3$ ) (*рис.1а*) по обозначенному стрелками контуру начинает протекать ток электропитания  $I(t)$  (*рис.1б*). При достижении током определённого уровня в КФПС возникает дуговой разряд типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой. За счёт

собственного магнитного поля и аксиального поля индуктора обеспечивается устойчивое состояние плазменной структуры, ускоряющейся в коаксиальной системе УК под действием газодинамических и электродинамических сил. По мере перемещения плазмы происходит её ускорение до сверхзвуковых скоростей и электроэрозионная наработка меди с поверхности УК. Сверхзвуковая струя медной электроэрозионной плазмы выносится в герметичную камеру-реактор (КР), заполненную воздухом при нормальном давлении и комнатной температуре, и воздействует на алюминиевую мишень (алюминиевый сплав АД-31), расположенную на некотором расстоянии  $l_{ст-м}$  от среза УК, обеспечивая нанесение медного покрытия. В случае нанесения медных покрытий на внутренние конусные поверхности алюминиевый образец устанавливался в соответствие со схемой, показанной на **рис.2**.



**Рис. 2** – Конструкция экспериментальной сборки для нанесения покрытий на внутренние конусные алюминиевые поверхности:

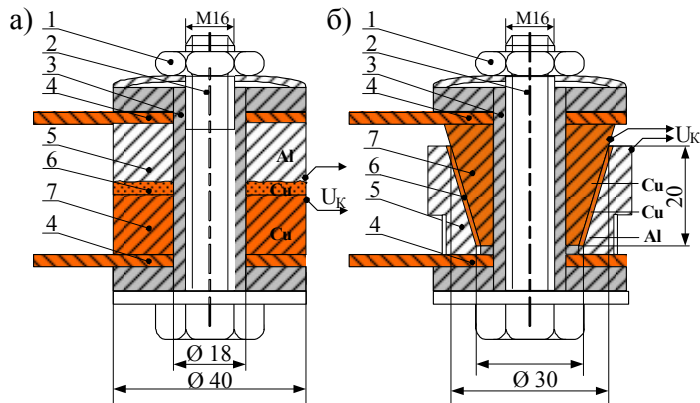
1 – КМПУ, 2 – труба из нержавеющей стали, 3 – медный электрод-ствол, 4 – промежуточная вставка, 5 – стальная защитная шайба, 6 – алюминиевый образец, 7 – медное покрытие

Энергетические характеристики плазменных выстрелов: ток разряда  $I(t)$ , и напряжение на электродах ускорителя  $U(t)$  регистрировались с помощью трансформатора Роговского и омического делителя напряжения с использованием цифровых осциллографов. На основе этих характеристик строились кривые мощности разряда  $P(t)$  и подведённой к ускорителю энергии  $W(t)$ . Динамические характеристики плазменной струи в свободном пространстве регистрировались методом синхронизированной высокоскоростной видеосъёмки с помощью камеры Photron FastCAM SA1.1.

Фазовый состав материала покрытий исследовался методом рентгеноструктурного анализа (XRD) с помощью рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD 7000S (CuK $\alpha$ -излучение  $\lambda_1=1,540598 \text{ \AA}$ ) при использовании специализированной программы PowderCell 2.4 и базы структурных данных PDF4. Микроструктура покрытий исследовалась методами сканирующей электронной микроскопии (SEM) (микроскопы Hitachi TM3000 и Quanta 200 3D) с возможностью проведения элементного анализа (EDAX) и оптической микроскопии (микроскоп Olympus GX-71). Исследования топологии покрытия проведены с помощью трёхмерного профилометра Micro Measure 3D Station. 3D-модели поверхности медного покрытия строились с использованием программы «MountainsMap Премиум 7.2», по которым определялись характеристики микрогеометрии. Твёрдость покрытий определялась методом Виккерса с помощью твердомера NANO Hardness Tester NHT-S-AX-000X. Скретч-тестирование покрытий проведено на установке Micro Scratch Tester Revetest.

Определение величины переходного контактного сопротивления  $R_k$ , порядка  $10^{-6} \div 10^{-7} \text{ Ом}$ , производилось вольтамперным способом с помощью генератора импульсных токов (ГИТМ-360) на основе молекулярных конденсаторов МИГ-100, ко-

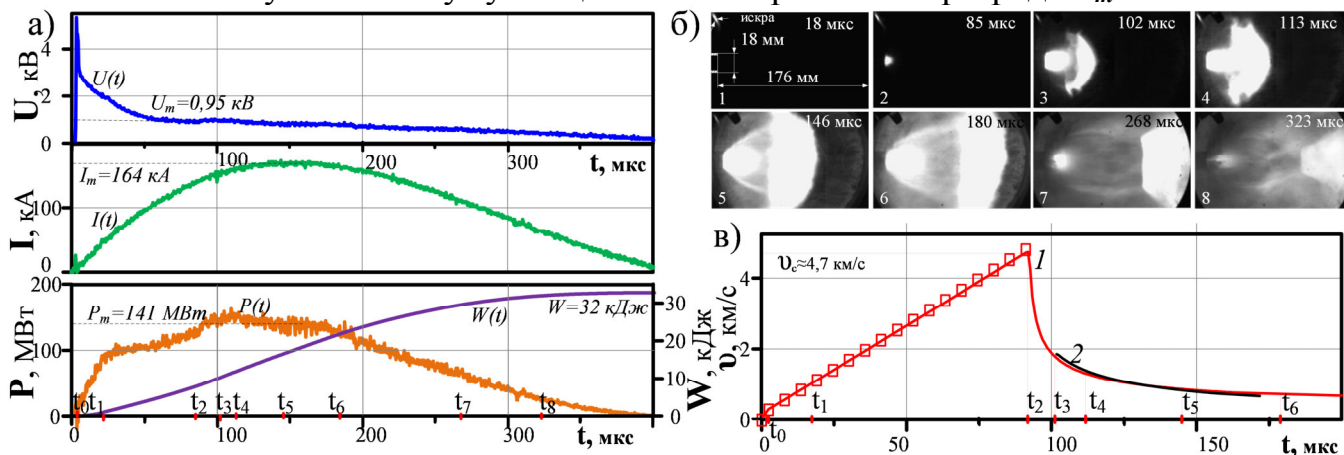
торый при  $C=72 \text{ Ф}$  и  $U_{зар}=100 \text{ В}$  генерировал аperiодический импульс тока до 54 кА длительностью до 1 с. Измерения тока  $I_k(t)$  и падения напряжения  $U_k(t)$  на контактном переходе производилось с помощью цифровых осциллографов. На **рис.3** показаны сборки для измерения  $R_k$  контактных пар на основе исследуемых и тестовых контактных элементов, которые стягивались болтовым соединением динамометрическим ключом с контролируемым усилием сжатия  $N=12,5 \div 31,1 \text{ кН}$ .



**Рис. 3** – Сборки для измерения  $R_k$  контактных переходов: а) плоского; б) внутреннего конического; 1 – гайка, 2 – стяжной болт, 3 – изолятор; 4 – токоподводящие шины, 5 – алюминиевый контактный элемент, 6 – медное покрытие, 7 – медный контактный элемент

В третьей главе рассмотрены способы инициирования дугового разряда и проанализировано влияние энергетических и конструктивных параметров плазмодинамической системы на динамические характеристики сверхзвуковой плазменной струи, электроэрозионную наработку материала с поверхности УК, величину площади и качество медного покрытия при работе КМПУ в одноимпульсном и двухимпульсном режимах.

На **рис.4** приведены осциллограммы  $U(t)$  и  $I(t)$ , кривые  $P(t)$  и  $W(t)$ , а также фотокадры скоростной видеосъёмки с характерными моментами формирования ударно-волновой структуры сверхзвуковой плазменной струи, полученные при:  $C=14,4 \text{ мФ}$ ,  $U_{зар}=2,5 \text{ кВ}$ , диаметре УК  $d_{УК}=14 \text{ мм}$ , длине УК  $l_{УК}=213 \text{ мм}$ . Сопоставление представленных данных показывает, что момент выхода плазмы из УК  $t_2=85 \text{ мкс}$  практически соответствует максимуму мощности электрического разряда  $P_m$ .



**Рис. 4** – а) Осциллограммы  $U(t)$ ,  $I(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W(t)$ , б) фотограммы истечения плазмы из УК, в) кривые ускорения в УК и затухания скорости фронта плазменной струи в свободном пространстве (1) и затухания скорости расширения фронта (2)

По полученным фотокадрам процесса (**рис.4б**) строились кривые закона движения ударного фронта, дифференцирование которых позволило построить функцию затухания скорости плазменной структуры во времени. Кривая затухания скорости от 4,7 км/с на срезе УК до 1,2 км/с на расстоянии  $\sim 180 \text{ мм}$  приведена на **рис.4в**). Харак-



терной особенностью процесса истечения плазмы является экспоненциальное затухание скорости фронта (1) и скорости увеличения площади максимального сечения плазменной струи (2) по мере её приближения к обрабатываемой поверхности.

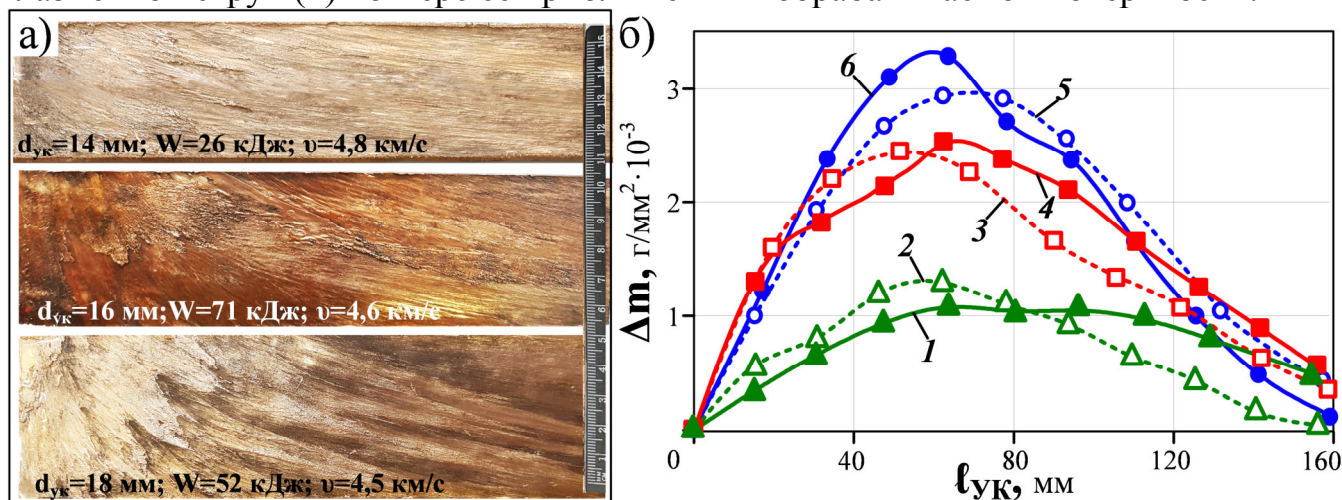


Рис. 5 – а) Фотографии развёрнутых медных стволов с эродированной поверхностью УК после выстрелов; б) эпюры  $\Delta m(\ell_{УК})$

Процесс наработки медного материала за счёт электроэрозионного износа поверхности УК совмещён во времени с ускорением плазменной структуры. Фотографии развёрнутых медных стволов после выстрелов, представленные на рис.5а), демонстрируют, что эродированная поверхность УК представляет собой совокупность конечного числа параллельных треков из затвердевшего расплава меди. Точки контакта токоведущих каналов ускоренно перемещаются по спиралевидной траектории. При этом происходит плавление медного материала за счёт высокой плотности протекающего тока (джоулевые тепловыделения). С увеличением  $d_{УК}$  уменьшается скорость медной плазменной струи, которая определяет степень наклона треков к образующей поверхности УК.

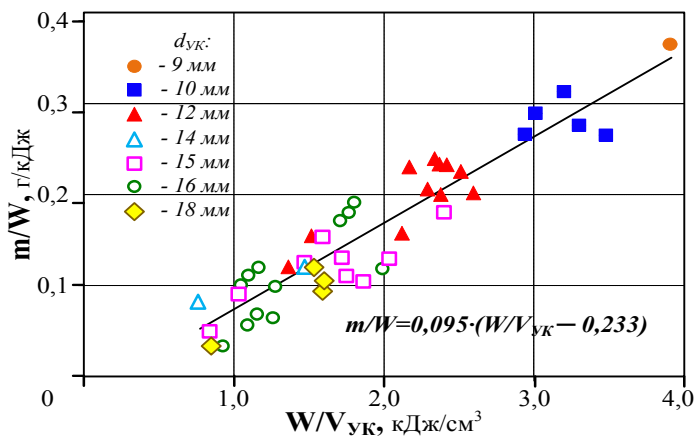
Табл.1 – Параметры экспериментов

| №                                | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $d_{УК}$ , мм                    | 15   | 15   | 12   | 12   | 10   | 10   |
| $W$ , кДж                        | 43,6 | 54,9 | 47,0 | 44,3 | 34,0 | 37,7 |
| $W/V_{УК}$ , кДж/см <sup>3</sup> | 1,59 | 1,99 | 2,62 | 2,51 | 3,30 | 3,01 |
| $m$ , г                          | 6,65 | 5,51 | 7,94 | 9,87 | 9,4  | 10,9 |
| $m/W$ , г/кДж                    | 0,15 | 0,10 | 0,17 | 0,22 | 0,27 | 0,28 |

Влияние энергетических и конструктивных параметров КМПУ на величину электроэрозионной наработки материала с поверхности УК демонстрируют эпюры дифференциального износа  $\Delta m$  по  $\ell_{УК}$  (рис.5б) соответствующие данным в табл.1. Эпюры  $\Delta m$  имеют

приблизительно одинаковый характер – максимальная эрозия на длине 50÷60 мм от начала с последующим более плавным снижением. Их можно разделить на три группы, соответствующие разным  $d_{УК}$  – 10 мм, 12 мм, 15 мм, которые позволяют судить о том, что с уменьшением  $d_{УК}$  уменьшается объём УК  $V_{УК}$  и повышается плотность и удельная энергия  $W/V_{УК}$ . Это приводит к росту температуры, скорости плавления металла и эродированной массы.

Определена основная зависимость удельного интегрального электроэрозионного износа ствола  $m/W$  от удельной подведенной энергии  $W/V_{УК}$  для медного УК КМПУ (рис.6), которая аппроксимируется выражением:  $m/W = 0,095 \cdot (W/V_{УК} - 0,233)$ .

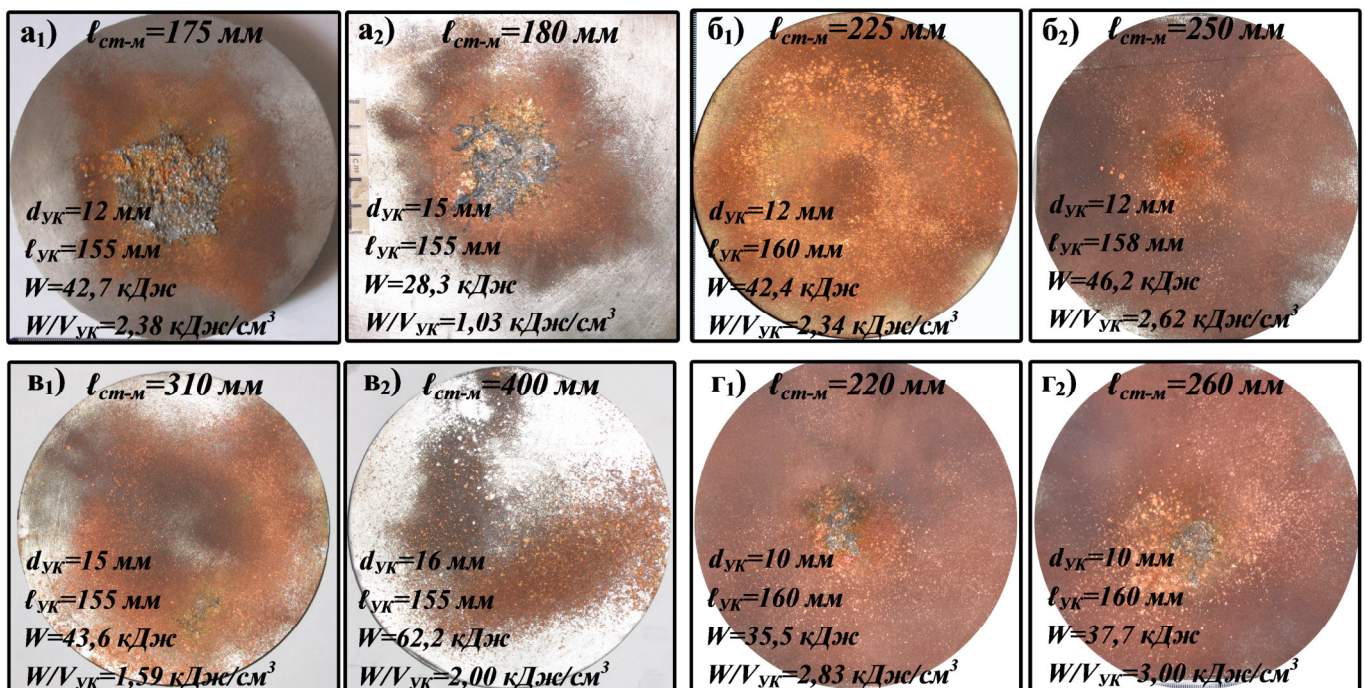


**Рис. 6** – Зависимость  $m/W$  от  $W/V_{ук}$

На **рис.7** представлены фотографии поверхностей алюминиевых мишеней, показывающие что при  $\ell_{ст-м}=175\div 180$  мм ( $a_{1-2}$ ) с изменением  $W$  наблюдается сильная эрозия центральной области на фоне увеличения общей площади покрытия  $S$ . При  $W=42,4$  кДж и  $\ell_{ст-м}=225$  мм обеспечивается наилучшее качество покрытия с достаточно равномерной плотностью и максимальной  $S$  ( $b_1$ ). Высокое качество и равномерность покрытия сохраняются при некотором уменьшении  $S$  с увеличением  $\ell_{ст-м}$  до 250 мм ( $b_2$ ). Дальнейшее увеличение  $\ell_{ст-м}$  до 310÷400 мм ( $b_{1-2}$ ) сопровождается прогрессирующей неравномерностью покрытия без эрозии алюминиевой поверхности.

Критическая величина, при которой электроэрозионная наработка меди практически отсутствует, составляет  $W/V_{ук}=0,233$  кДж/см<sup>3</sup>.

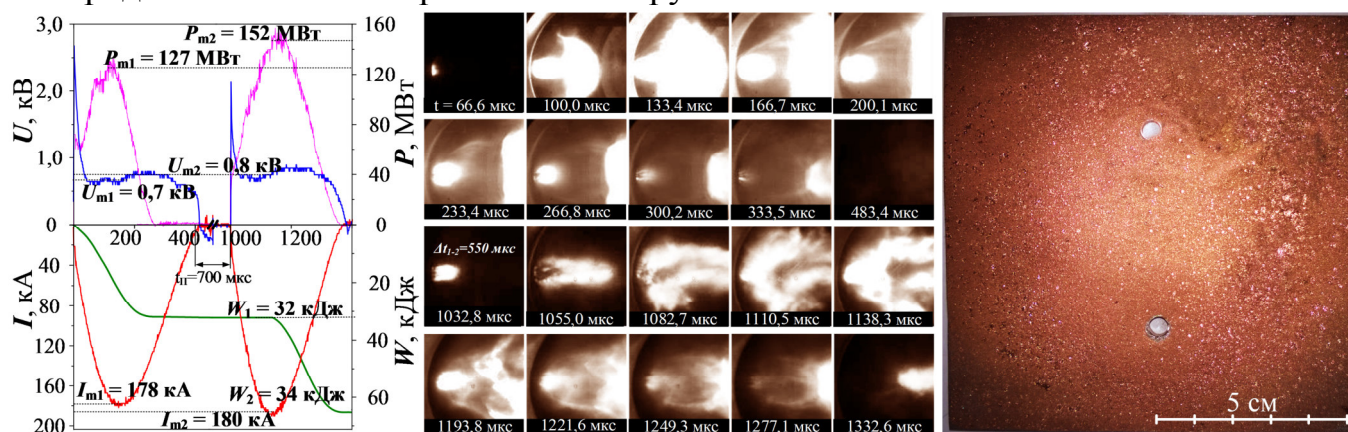
Для рассматриваемых условий полученная характеристика и выражение позволяют определить параметры ускорителя, обеспечивающие получение требуемого количества материала для нанесения качественного покрытия.



**Рис. 7** – Фотографии поверхностей алюминиевых мишеней с медными покрытиями: а) с эрозией; б) качественные; в) неравномерные; г) с частичной эрозией

Анализ фотограмм высокоскоростной видеосъёмки дал основания для предположения о том, что качество наносимого покрытия связано с местоположением поверхности мишени относительно положения стабилизации в пространстве прямого скачка уплотнения (диск Маха) первой «бочки» ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи. В рассматриваемых условиях это расстояние от среза УК составляет ~120 мм. То есть наилучшее качество покрытия достигается при расположении ми-

шени на  $\ell_{cm-m} \approx 225 \div 250$  мм в области вероятного формирования диска Маха второй «бочки» структуры струи. Однако при некотором снижении  $W$  (рис. 7г<sub>1-2</sub>) при прочих близких к оптимальным условиям наблюдается небольшая эрозия в центральной области мишени. Одной из наиболее вероятных причин этого является воздействие на мишень дозвуковой струи расплава меди, истекающей из УК на заключительном этапе работы КМПУ. Этот эффект удалось исключить за счёт реализации двухимпульсного режима работы КМПУ, основные данные которого представлены на рис. 8. Из приведённой фотограммы видно, что плазменная струя второго импульса (кадр 11) разрушает низкоскоростной пест расплава меди первой струи, предотвращая его воздействие на мишень. Вторая струя распространяется в разряженном пространстве, что обеспечивает снижение плотности выносимого материала, исключение эрозии поверхности мишени и повышение равномерности и качества покрытия. При одинаковой исходной энергетике электропитания КМПУ, двухимпульсный режим работы позволяет значительно снизить уровень  $I_m$ , который при одноимпульсном режиме достигает 220 кА, и следовательно, электродинамические и термические нагрузки на элементы системы.



**Рис. 8** – Осциллограммы  $U(t)$ ,  $I(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W(t)$ , фотограмма сверхзвуковой плазменной струи и фотография поверхности мишени с медным покрытием при двухимпульсном режиме работы КМПУ

В четвертой главе диссертации представлены результаты экспериментальных исследований влияния параметров плазмодинамической системы и характеристик медного покрытия на переходное сопротивление  $R_k$  контактных пар. В том числе проанализированы микротвёрдость по линии подложка-покрытие, фазовый состав, топология, микроструктура, прочность сцепления с подложкой.

Исследование  $R_k$  производилось на образцах с качественным покрытием в виде дисков диаметром 40 мм с осевым отверстием диаметром 18 мм, толщиной 15 мм и площадью кольцевой контактной поверхности  $S_k = 1002$  мм<sup>2</sup>, полученных при параметрах системы КМПУ, указанных в табл. 2. На рис. 9 представлены зависимости  $R_k$  от усилия сжатия  $N$  в диапазоне от 12,5 кН до 31,1 кН. Минимальный уровень  $R_k = 1,81$  мкОм контактной пары медь-алюминий с медным покрытием ( $Cu-Al_{Cu}$ ) достигается при  $d_{yк} = 12$  мм и  $\ell_{cm-m} = 250$  мм, что в 2,5 раза меньше по сравнению с тестовой контактной парой медь-алюминий ( $Cu-Al$ ). Отклонение  $\ell_{cm-m}$  от этой близкой к оптимальной величине в большую или меньшую сторону (кривые 2-5 рис. 9) влечёт относительное ухудшение качества покрытия и увеличение переходного сопро-

тивления, которое приближается к  $R_k$  тестовой пары **Cu-Al** (кривая 15 рис.9). Установлено, что величина сопротивления между медным покрытием и алюминиевой подложкой  $R_{II}$  может быть оценена, как разница между сопротивлениями контактных пар **Cu-Cu** (п.13 табл.2) и **Cu-Al<sub>Cu</sub>** (п.1 табл.2), которая при  $N=31,1$  кН составляет  $\Delta R_{II} \cong 0,67$  мкОм, что в  $\sim 4,0$  раза меньше сопротивления пары **Cu-Al**.

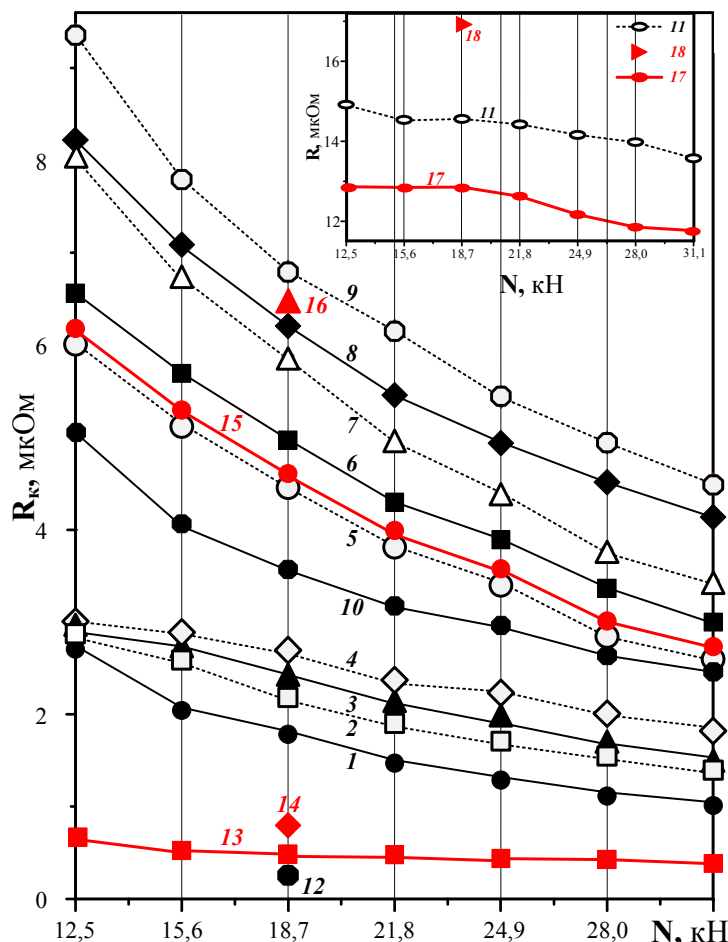


Табл. 2 – Параметры опытов

| №  | Тип контактной пары                        | $W_c$ | $W$  | $W/V_{ук}$          | $d_{ук}$ | $l_{см-м}$ | $R_k$             |
|----|--|-------|------|---------------------|----------|------------|-------------------|
|    |  | кДж   | кДж  | кДж/см <sup>3</sup> | мм       | мм         | $N=18,5Н$<br>мкОм |
| 1  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 73,5  | 46,2 | 2,62                | 12       | 250        | 1,81              |
| 2  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 73,5  | 42,4 | 2,34                | 12       | 225        | 2,14              |
| 3  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 73,5  | 50,0 | 1,75                | 12       | 300        | 2,15              |
| 4  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 73,5  | 46,4 | 3,50                | 10       | 215        | 2,65              |
| 5  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 81,0  | 44,3 | 2,51                | 12       | 290        | 4,45              |
| 6  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 73,5  | 43,5 | 1,59                | 15       | 310        | 4,85              |
| 7  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 73,5  | 40,6 | 1,47                | 15       | 400        | 5,84              |
| 8  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 81,0  | 48,0 | 1,72                | 15       | 300        | 6,20              |
| 9  | Cu-Al <sub>Cu</sub>                        | 96,0  | 62,2 | 2,00                | 15       | 420        | 6,79              |
| 10 | Al <sub>Cu</sub> -Al <sub>Cu</sub>         |       |      |                     |          |            | 3,55              |
| 11 | Cu-Al-Al                                   |       |      |                     |          |            | 14,50             |
| 12 | Al <sub>Cu</sub> -Cu <sub>смазка</sub> -Cu |       |      |                     |          |            | 0,36              |
| 13 | Cu-Cu                                      |       |      |                     |          |            | 0,48              |
| 14 | Cu-Cu <sub>смазка</sub> -Al                |       |      |                     |          |            | 0,77              |
| 15 | Cu-Al                                      |       |      |                     |          |            | 4,60              |
| 16 | Cu-Al/Cu-Al                                |       |      |                     |          |            | 6,46              |
| 17 | Al-Al                                      |       |      |                     |          |            | 12,85             |
| 18 | Cu-Cu/Al-Al                                |       |      |                     |          |            | 16,97             |

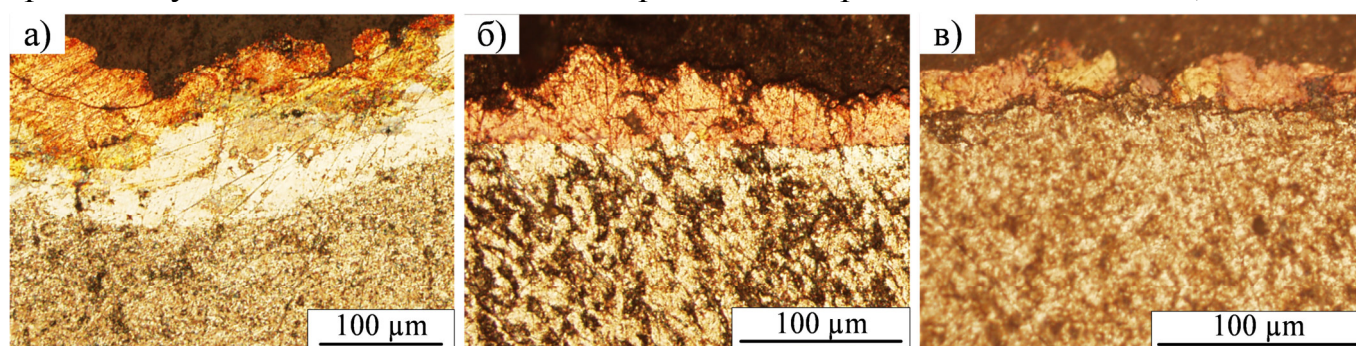
Рис. 9 – Зависимость  $R_k$  от  $N$  контактных пар

Проведённые измерения показали, что наибольшим  $R_k=12,85$  мкОм обладает тестовая контактная пара **Al-Al** (п.18 табл.2). Нанесение медного покрытия на обе алюминиевые поверхности **Al<sub>Cu</sub>-Al<sub>Cu</sub>** позволило снизить  $R_k$  до 3,55 мкОм (п.10 табл.2), то есть в  $\sim 4,0$  раза. Этот результат является одним из наиболее важных, так как значительно снижаются переходные сопротивления и потери электроэнергии на промежуточных контактных соединениях алюминиевых проводников, повсеместно встречающихся в электрических цепях.

Применение электропроводящих смазок на основе медного порошка (точка 14 рис.9) обеспечивает снижение  $R_k$  пары **Cu-Al** до 0,77 мкОм при однократном использовании. Дополнительное применение медной смазки в контактной паре **Cu-Al<sub>Cu</sub>** (точка 12 рис.9) обеспечивает ещё большее снижение  $R_k$  до 0,36 мкОм, в сравнении с парой **Cu-Cu**, сопротивление которой при той же нагрузке составляет 0,48 мкОм (кривая 13 рис.9). Можно отметить, что использование биметаллических пластин **Al/Cu** обеспечивает совмещение контактной пары, но при этом её  $R_k$  многократно увеличивается до 16,97 мкОм за счёт последовательного включения переходов **Al-Al** и **Cu-Cu** (точка 18 (рис.9)). Аналогичное решение может быть реализовано путём использования медного контактного элемента с алюминиевым плазмоди-

намическим покрытием, который в соединении с алюминиевым контактом ( $Cu_{Ag}-Al$ ) показывает несколько меньше уровень  $R_k=14,5$  мкОм (*кривая 11 рис.9*).

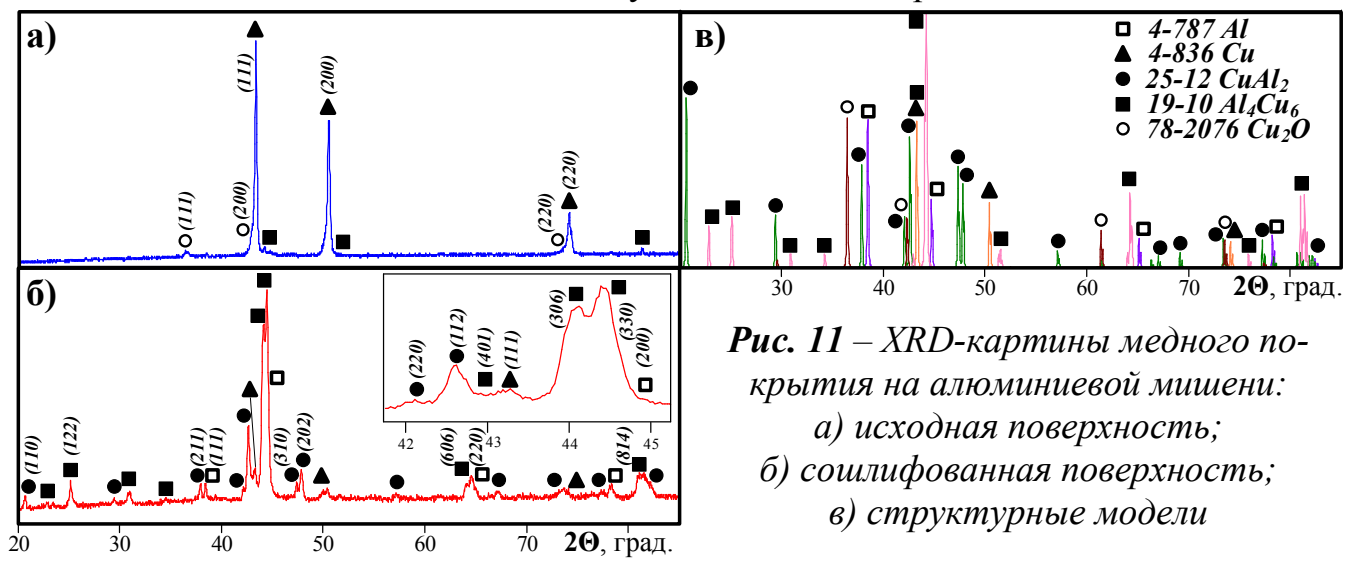
Анализ микроструктуры и исследование микротвёрдости производились на шлифах поперечного среза алюминиевых образцов с медным покрытием. Типичные оптические микроснимки на *рис.10* показывают различия структуры покрытия на алюминиевых образцах в зависимости от условий их нанесения, указанных в *табл.2* а) п.2, б) п.5, в) п.8. В случаях *а)* и *б)* покрытия абсолютно плотно прилегают к поверхности подложки, повторяя все её микронеровности. Принимая допущение о равенстве длин линий контакта по двум координатам, проведено оценочное сравнение площадей граничной поверхности контакта  $S_{\Pi}$  с геометрической площадью единичного плоского квадрата  $S_2$ , ограничивающего  $S_{\Pi}$ . В случае а)  $S_{\Pi}/S_2=4,8$ , а в случае б)  $S_{\Pi}/S_2=3,4$ , то есть фактическая контактная площадь между покрытием и подложкой значительно превышает площадь плоского квадрата. В толще покрытий этих образцов можно выделить более светлый слой взаимного перемешивания материалов, толщина которого повышается с увеличением интенсивности воздействия плазменной струи при расположении мишени на  $l_{cm-m}=225$  мм. Эти особенности являются основными причинами получения низкого сопротивления  $R_k=2,14$  мкОм при использовании образца с медным покрытием, условия нанесения которого соответствуют *п.2 табл.2*, а микроструктура представлена на *рис.10а*). Медное покрытие становится очень тонким и неравномерным, как это видно на *рис.10в*), из-за увеличения  $l_{cm-m}$  до 300 мм при  $d_{yк}=15$  мм (*п.8 табл.2*). В его структуре не образуется приграничный светлый слой, но становятся заметными зазоры на отдельных участках границы раздела. Частичное отслоение медного покрытия является основной причиной увеличения  $R_k$  контактной пары с этим образцом до величины 6,2 мкОм.



*Рис. 10* - Оптические микроснимки шлифов алюминиевых образцов с медным покрытием, условия нанесения которых приведены в *табл.2*: а) п.2; б) п.5; в) п.8

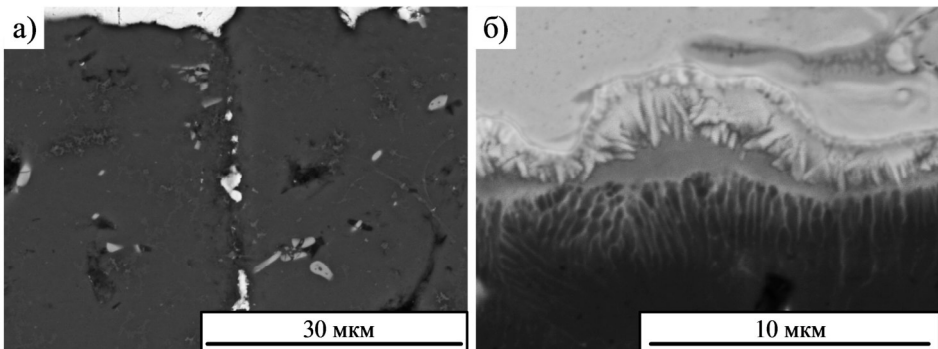
Представленная на *рис.11а*) XRD-картина поверхности медного покрытия на алюминиевом образце, обеспечивающем минимальное сопротивление  $R_k$  контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$ , показывает, что его основной кристаллической фазой является медь. Однако на уровне следов обнаруживаются рефлексы кристаллического оксида меди  $CuO_2$  и интерметаллидной фазы  $Al_4Cu_6$ . Предположение об образовании интерметаллидных фаз однозначно подтверждается XRD-картиной отшлифованной на глубину около 60 мкм поверхности медного покрытия этого образца (*рис.11б*), где суммарное содержание интерметаллидных фаз  $Al_4Cu_6$  и  $CuAl_6$  достигает ~80%. Известно, что кристаллические интерметаллидные фазы системы  $Cu-Al$  обладают до-

статочной высокой электропроводностью и являются высокотвёрдыми материалами, что может способствовать повышению устойчивости покрытий и снижению  $R_k$ .



**Рис. 11** – XRD-картины медного покрытия на алюминиевой мишени:  
 а) исходная поверхность;  
 б) сошлифованная поверхность;  
 в) структурные модели

Установлено, что ещё одним фактором снижения  $R_{II}$  является эффект сверхглубокого проникания (СГП) материала покрытия в подложку. На SEM-снимке образца, показавшего минимальное  $R_k$  (рис.10а), показан трек СГП (шириной 1÷3 мкм, длиной до 30 мкм), вскрывшийся в плоскости шлифа, в котором выделяются фрагменты медной кумулятивной струи. Кроме того, обнаружены граничные слои, состоящие из многочисленных более мелких струйных образований с поперечным размером порядка 100 нм, проникающих в материал алюминиевой подложки на глубину не менее 3,0 мкм (б). Наличие внедрившихся кумулятивных струй из меди, соединяющих медное покрытие с подложкой, способствует снижению  $R_{II}$  и повышению прочности сцепления.



**Рис. 12** – SEM-снимки шлифов поперечного среза алюминиевых подложек с медным покрытием

По профилям микротвёрдости  $H(x)$ , показанным на рис.13, тех же алюминиевых образцов с медным покрытием (рис.10), видно, что в глубине подложки более 20 мкм,  $H$  во всех случаях практически соответствует стандартной величине для алюминиевого сплава АД-31  $H_{Al} = 0,8$  ГПа и начинает возрастать лишь в приграничной области за счёт внедрения медного материала. На границе раздела в точке  $a_1$ )  $H$  возрастает до 2,4 ГПа, однако далее продолжает резко возрастать до уровня ~8,4 ГПа в точке  $a_2$ ) на расстоянии ~40 мкм от границы. Высокий уровень  $H$  в системе  $Cu-Al$  можно объяснить исключительно образованием интерметаллидных фаз (рис.11). Согласно литературным данным,  $H$  интерметаллидов  $Al_4Cu_6$  и  $CuAl_6$  может достигать до 9,5 ГПа, что в полной мере соответствует измеренным величинам  $H$  в покрытие а). Низкий уровень  $H$  в случаях б) и в) объясняется относительно низ-

кой плотностью и пористостью медного покрытия, что обусловлено его послойным затвердеванием и разрыхлением в условиях ударно-волнового воздействия.

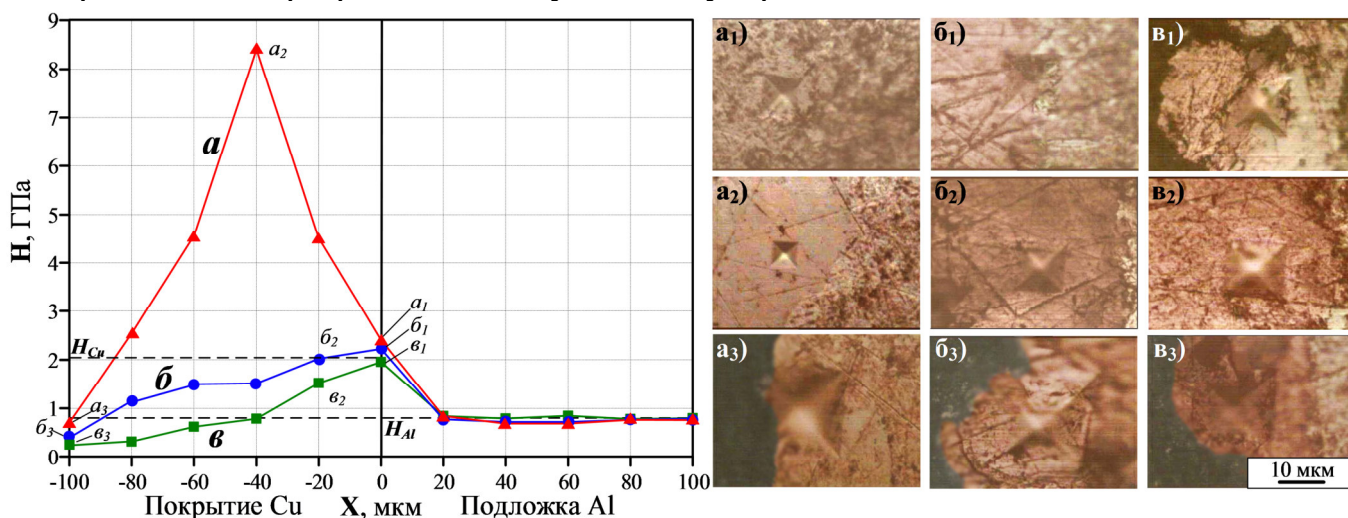


Рис. 13 – Эпюры  $H(X)$  и SEM-снимки отпечатка индентора

По представленным на рис.14 результатам скретч-тестирования (кривые нормальной силы нагружения индентора  $F_H$ , силы трения  $F_{тр}$ , акустической эмиссии  $Ae$ , а также SEM-снимки царапины и её фрагментов) удалось определить значения прочности сцепления покрытия с подложкой  $P_{сц}$  в точках появления всплесков  $Ae$  на расстояниях  $l_i$  по длине царапины (табл. 3). Прочность сцепления определялась по следующей формуле:

$$P_{сц} = \frac{F_H - F_{тр}}{D \cdot v_{и}} = \frac{F_{сц}}{D \cdot v_{и}}$$

где  $F_{сц}$  – сила сцепления;  $D$  - ширина царапины от индентора на поверхности образца;  $v_{и}$  – скорость перемещения индентора 1 мм/мин.

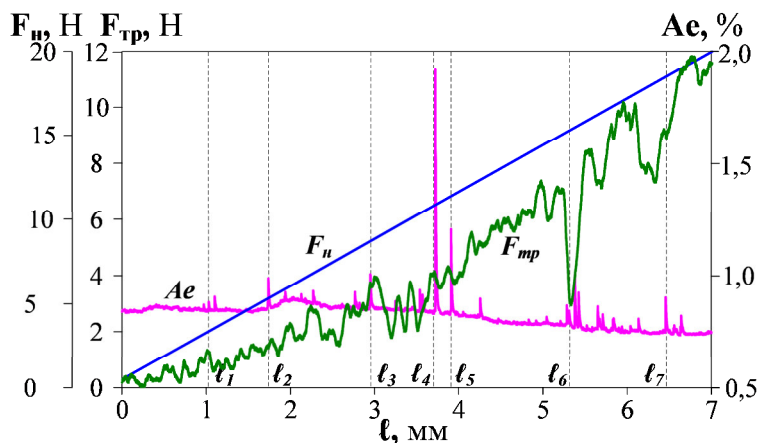


Табл. 3 – Данные скретч-теста

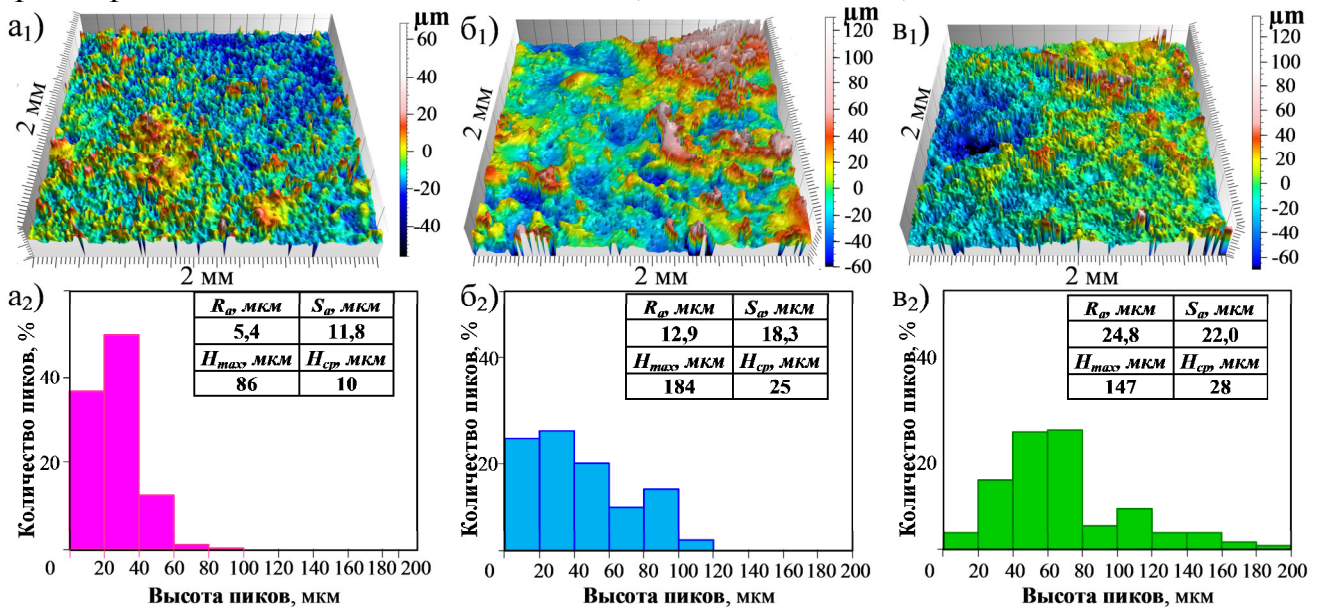
| Результаты скретч-теста |     |          |             |
|-------------------------|-----|----------|-------------|
| $l_i$                   | $D$ | $F_{сц}$ | $P_{сц}$    |
| мм                      | мкм | Н        | ГПа         |
| 1,1                     | 76  | 2,9      | 2,30        |
| 1,8                     | 98  | 4,1      | 2,44        |
| 3,0                     | 116 | 5,0      | 2,58        |
| 3,7                     | 146 | 7,1      | 2,92        |
| 3,9                     | 162 | 7,7      | 2,85        |
| 5,3                     | 185 | 12,2     | 3,95        |
| 6,4                     | 200 | 8,8      | 2,64        |
| Среднее                 |     |          | <b>2,81</b> |

Рис. 14 – Кривые  $F_{тр}$ ,  $F_{н}$  и  $Ae$  при царапании индентором поверхности образца, SEM-снимки царапины и её участков в окрестности точек  $l_i$

Средний уровень  $P_{сц,ср}$  составил 2810 МПа. Согласно литературным данным другие методы нанесения медных покрытий обеспечивают уровни  $P_{сц}$  до: 700 МПа для холодного газодинамического напыления; 130 МПа для сварки; 160 МПа дляковки;

18 МПа для магнетронного напыления. Сравнение с этими данными показывает, что плазмодинамический метод обеспечивает более чем трехкратное повышение  $P_{сц}$ .

Согласно профилометрическим исследованиям топология поверхности рассматриваемых образцов (*рис.10*) характеризуется чередованием естественных микровыступов и микропадин (*рис.15*). Расчётное значение средней шероховатости поверхности образца (а) составило  $R_a=5,4$  мкм, а средний шаг неровности поверхности покрытия  $S_a=7,4$  мкм. По 3D-моделям поверхностей образцов б) и в) видно сильное ухудшение однородности, выраженное присутствием большого количества выступов, высота которых примерно в 2 раза превышает максимальную высоту единичных пиков на поверхности образца а). Более того, заметное снижение интенсивности воздействия плазменной струи на алюминиевую подложку в этих случаях (б и в) сопровождается существенным повышением  $R_a$  и  $S_a$ . Иначе говоря, в контактной паре будет уменьшаться число контактных пятен, как за счёт увеличения шага неровностей и уменьшения числа выступов на единицу длины, так и за счёт большой разницы высот выступов  $H_{max}$  и  $H_{ср}$ . То есть при том же усилии сжатия не все выступы соединятся с поверхностью второго контактного элемента. Сравнение гистограмм распределения числа выступов по их высотам показывает последовательное увеличение ширины распределения, то есть появление всё более высоких выступов и увеличение их доли в общем числе на анализируемой площади. На поверхности образца (а<sub>2</sub>) более 80% выступов имеют высоту от 20 до 60 мкм. В случаях (б<sub>2</sub>) и (в<sub>2</sub>) повышенное число больших выступов препятствует полному контактированию основной массы выступов, что приводит к уменьшению числа контактных пятен, суммарной фактической площади контакта и, соответственно, к повышению  $R_k$ .



**Рис. 15** – 3D-модели поверхностей и гистограммы распределения пиков по высоте

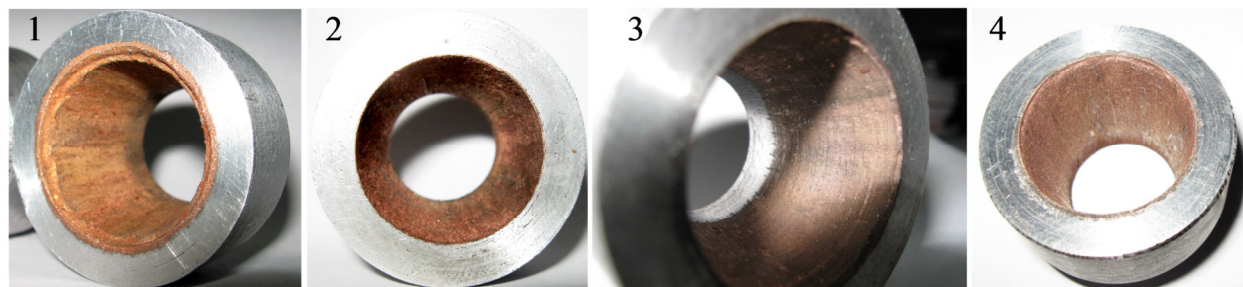
Анализ полученных данных по фазовому составу материала покрытия, его микроструктуре, топологии поверхности и физико-механическим характеристикам позволяет заключить, что наиболее низкие величины  $R_k$  достигаются в случае а) (*рис.10,13,15*) за счёт того, что при сжатии контактных элементов пластически деформируется, в основном, поверхностный рыхлый медный слой покрытия с естественной шероховатостью, опирающийся на высокотвёрдый внутренний интерметаллидный слой, прочно соединённый с алюминиевой подложкой. Это обеспечивает



максимально возможную площадь контакта металлического медного элемента с поверхностью медного покрытия.

Таким образом, определены оптимальные параметры плазмодинамической системы  $d_{УК}=12$  мм,  $l_{УК}\cong 160$  мм,  $P_{cp}\cong 95$  МВт,  $l_{см-м}=225\div 250$  мм,  $W/V_{УК}\cong 2,5$  кДж/см<sup>3</sup>, позволяющие наносить высококачественные медные покрытия на плоские поверхности алюминиевых контактных элементов и обеспечивающие минимальное переходное сопротивление  $R_k=1,8$  мкОм контактной пары **Cu-Al<sub>Cu</sub>**.

В пятой главе представлены результаты исследований по нанесению медных плазмодинамических покрытий на внутренние поверхности конических отверстий в алюминиевых образцах с использованием КМПУ с оригинальной двухслойной конструкцией ствола с медным УК и технологической схемы, показанной на **рис.2**. Экспериментально установлена возможность получения качественных покрытий (**рис.16**) при осесимметричном встречном размещении обрабатываемой поверхности относительно УК КМПУ,  $d_{УК}=9$  мм,  $l_{УК}\cong 150$  мм, расстояние от среза УК до начала конусной поверхности должно быть 38 мм. В таких условиях качество медного покрытия (**рис.16**), в основном зависит от средней мощности разряда  $P_{cp}$  и величины  $W$ , как это видно по экспериментальным данным, приведённым в **табл.4**.

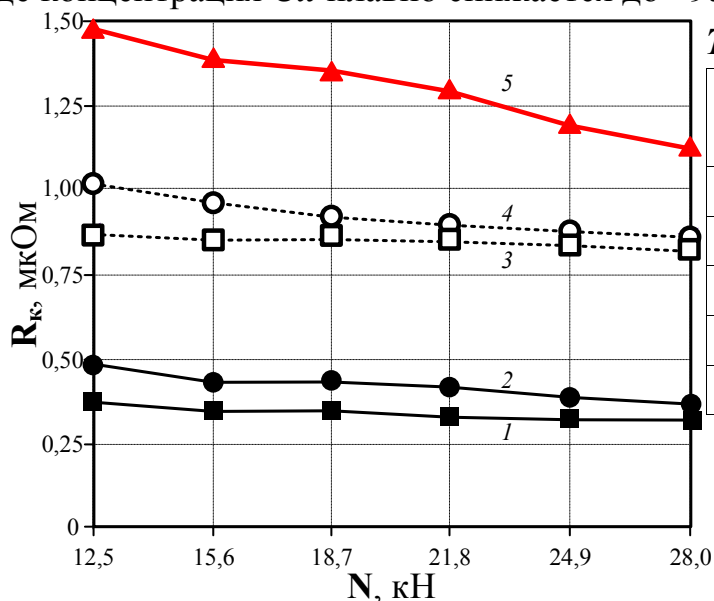


**Рис. 16** – Фотографии образцов с медным покрытием, нанесенным на внутренние поверхности алюминиевых отверстий. Номера образцов соответствуют экспериментам в **табл.4**

Основным критерием определения качества покрытия может служить величины  $R_k$  конусных контактных пар **Cu-Al<sub>Cu</sub>**, измеренные по вышеописанной методике с помощью специальной контактной сборки (**рис.3б**), как это видно из сопоставления зависимостей  $R_k(N)$  (**рис.17**). Величина площади контактной поверхности составляла  $S_k=2512$  мм<sup>2</sup>. Из **табл.4** и **рис.17** видно, что минимальное  $R_k$  достигается в рассматриваемых условиях при  $P_{cp}\cong 91,0$  МВт и  $W\cong 23,0$  кДж, и в 3÷4 раза меньше тестового контакта **Cu-Al** во всем диапазоне изменения усилия сжатия.

Данные SEM-анализа и EDAX (**рис.18**) шлифа образца 1 (**табл.4**) показали отсутствие абсолютно чёткой границы между медным покрытием и алюминиевой подложкой, обусловленное взаимным перемешиванием материалов. Структура медного покрытия по длине образующей  $l$  конусной поверхности непостоянна. На длине  $l\cong 12,0$  мм от начала (бóльшего диаметра) конусной поверхности (**рис.18г**) в граничном слое толщиной  $\Delta\delta_1\cong 10,0$  мкм наблюдается снижение концентрации **Al** при соответствующем увеличении **Cu**. Этот участок выделяется композиционной упорядоченной кристаллической структурой, в которой микрокристаллиты низкоплотного материала консолидированы в матрице из материала повышенной плотности. Далее на  $\Delta\delta_2\cong 40,0$  мкм сохраняется соотношение **Cu:Al**, как 80:20, где консолидированы удлинённые или бесформенные микрокристаллиты более плотного мате-

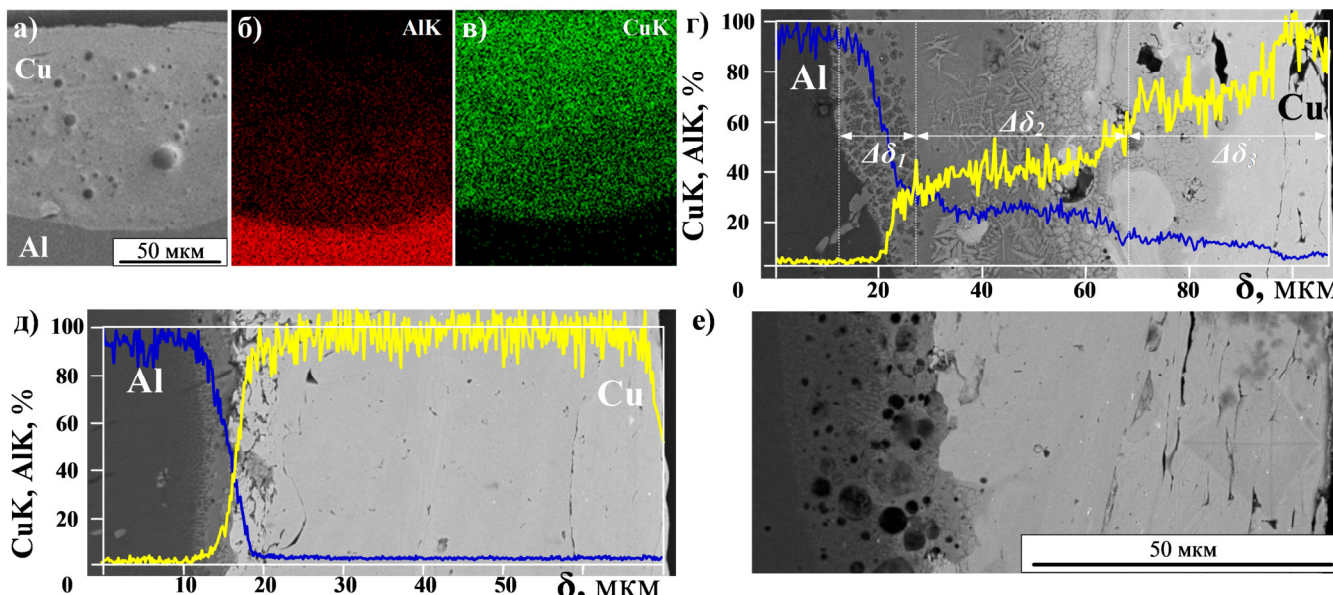
риала. Приповерхностный слой  $\Delta\delta_3 \cong 45,0$  мкм имеет наиболее светлый контраст и практически однородную структуру наслаивающегося высокоплотного материала, где концентрация **Cu** плавно снижается до  $\sim 95,0\%$ .



**Табл. 4 – Параметры экспериментов**

| Номера образцов            |      | 1    | 2    | 3    | 4    | 5     |
|----------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| $I_m$                      | кА   | 171  | 158  | 155  | 168  | Cu-Al |
| $U_m$                      | кВ   | 1,0  | 1,0  | 1,0  | 0,7  |       |
| $W$                        | кДж  | 23   | 20   | 17   | 17   |       |
| $P_{cp}$                   | МВт  | 91   | 76   | 61   | 61   |       |
| $R_{k(N=18,7 \text{ кН})}$ | мкОм | 0,35 | 0,44 | 0,86 | 0,92 | 1,36  |

**Рис. 17 – Зависимости  $R_k$  от  $N$ . Номера экспериментов соответствуют номерам в табл.4**



**Рис. 18 – а-з) SEM-снимок, данные EDAX и кривые распределения Al и Cu по толщине покрытия на расстоянии  $l \approx 12$  мм от начала конусной поверхности; д) SEM-снимок и кривые распределения Al и Cu по толщине покрытия начального участка  $l \approx 2$  мм; е) SEM-снимок конечного участка  $l \approx 20$  мм**

Микроструктура и распределение элементов **Cu** и **Al** по толщине покрытия на начальном участке поверхности конусного отверстия  $l \cong 2,0$  мм (рис.18д) показали образование приграничного слоя толщиной около 5 мкм в теле подложки по термоэмиссионному механизму, где соотношение **Al:Cu** меняется примерно на 50%. Последующий слой имеет практически однородную структуру и светлый контраст материала с доминированием меди. Похожую микроструктуру и практически такой же элементный состав по толщине имеет покрытие на конечном участке  $l \approx 20$  мм (рис.18е). Отличие от начального участка заключается в том, что приграничный слой содержит многочисленные круглые поры, образованные в медно-алюминиевом расплаве за счёт захвата ударно уплотнённого газа.

Толщина покрытия  $\delta$  по длине образующей  $\ell$  конусной поверхности неравномерна и меняется от  $\sim 40,0$  мкм до  $\sim 100$  мкм (рис.19а) с максимумом на  $\ell \cong 10 \div 15$  мм. Исследования микротвёрдости  $H$  шлифа поперечного среза позволили установить, что в приграничном слое происходит резкое повышение  $H$  (кривая 2 рис.19б) по сравнению с микротвёрдостью подложки (кривая 1 рис.19б). С отдалением от границы в направлении к поверхности (по толщине  $\delta$ ) микротвёрдость  $H$  в каждом сечении (по  $\ell$ ) уменьшается, но при этом возрастает по мере увеличения  $\ell$  от начала конусной поверхности. При  $\ell \cong 8,0$  мм  $H$  уже значительно превышает  $H_{Cu}$  на расстоянии от границы на толщине покрытия  $\delta < 80$  мкм, а в приповерхностных слоях становится сравнимой с  $H_{Cu}$ .

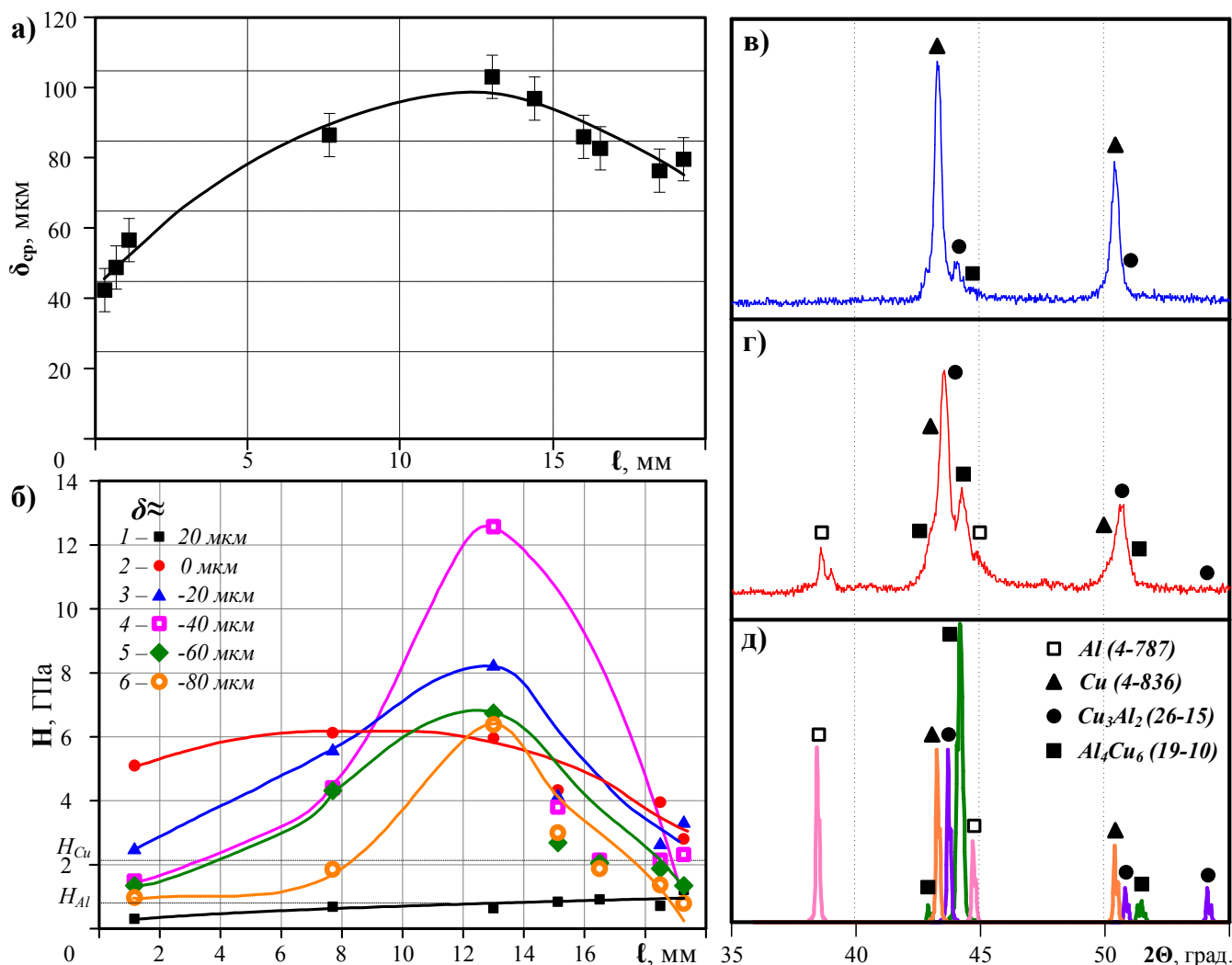


Рис. 19 – а) Кривая изменения средней толщины покрытия  $\delta_{cp}$  по длине образующей  $\ell$  конусной поверхности; б) Кривые изменения  $H$  по  $\ell$  для разных  $\delta$ ; в) XRD поверхности исходного покрытия; г) XRD поверхности сошлифованного покрытия; д) Структурные модели по PDF4

Однако на любых  $\delta$  на удалении от начала конусной поверхности до  $\ell \cong 13,0$  мм имеет место увеличение  $H$  до величин  $\sim 6,0$  ГПа  $\div$   $12,0$  ГПа с приближением к границе раздела покрытие-подложка. Такие высокие величины твёрдости обусловлены явлением возникновения стоячей ударно-волновой структурной области с повышенными давлением и температурой, как результат сложного взаимодействия системы ударных волн сверхзвукового течения в сужающейся части конусного отвер-

ствия в алюминиевом образце в составе технологической сборки. Итогом этого процесса является образование высокотвердых кристаллических интерметаллидных фаз системы *Al-Cu*. Прямым доказательством этого являются результаты XRD-исследований и структурно-фазового анализа (*рис.196-д*). Небольшие по интенсивности сильнейшие рефлексы интерметаллидных фаз *Cu<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>* и *Al<sub>4</sub>Cu<sub>6</sub>* на фоне сильных отражений кристаллической меди присутствуют на XRD-картине исходной поверхности покрытия (*рис.196*). Рентгенограмма сошлифованной поверхности покрытия до толщины  $\delta \cong 20,0 \div 40,0$  мкм (*рис.192*) показывает существенное увеличение массового содержания интерметаллидных фаз в глубине покрытия, что и обеспечивает повышение микротвёрдости до величин от  $\sim 6,0$  ГПа до  $\sim 12,0$  ГПа, соответствующих характеристикам интерметаллидных фаз системы *Cu-Al*.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ:

В соответствие с целью работы проведены экспериментальные исследования и разработаны научно-технические основы метода нанесения медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности различной конфигурации с помощью высоковольтного сильноточного коаксиального магнитоплазменного ускорителя эрозийного типа с медными электродами. Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан коаксиальный магнитоплазменный ускоритель с оригинальной конструкцией ствола с медным ускорительным каналом и способ инициирования в нём дугового разряда с помощью углеродной разрушаемой перемычки. Определена оптимальная величина начального сопротивления перемычки  $300 \div 600$  Ом, обеспечивающая минимальное время безтоковой паузы между подачей напряжения и началом дуговой стадии разряда.

2. Установлен характер влияния энергетических и конструктивных параметров КМПУ на динамические характеристики сверхзвуковой струи медной электроэрозийной плазмы в свободном пространстве в одноимпульсном и двухимпульсном режимах работы плазмодинамической системы.

3. Определены характер и основные закономерности влияния параметров КМПУ на процесс электроэрозийной наработки материала с поверхности ускорительного канала медного ствола для нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности.

4. Установлены закономерности влияния параметров плазмодинамической системы на величину площади и качественные характеристики медного покрытия.

5. Экспериментально показано, что плазмодинамическое медное покрытие на алюминиевых контактных поверхностях обеспечивает снижение переходного контактного сопротивления плоских и конусных контактных пар до величин порядка  $10^{-6} \div 10^{-7}$  Ом за счёт проявления специфических особенностей: образования граничного слоя взаимного перемешивания материалов покрытия (медь) и подложки (алюминий), обеспечивающего высокопрочное сцепление покрытия с подложкой; образования слоёв из высокотвёрдых синтезированных интерметаллидных фаз системы *Cu-Al*; естественной шероховатости поверхности медного покрытия.

6. Предложен и реализован двухимпульсный режим работы КМПУ по нанесению покрытий, обеспечивающий: снижение токов электропитания; снижение электроди-

намических и термических нагрузок на ускоритель; требуемую массу эродированного материала; нанесение качественного медного покрытия с исключением эрозии на поверхности мишени.

7. В экспериментальных условиях получены медные покрытия на контактных поверхностях стандартных алюминиевых шин и контактных наконечниках, прошедших промышленные испытания.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах, рекомендованные ВАК:**

1. Сивков, А.А. Исследование поверхности контактной пары медь – алюминий, полученной плазмодинамическим методом / А.А. Сивков, И.И. Шаненков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова (Шаненкова) // Известия вузов. Физика. - 2014 - Т. 57. - № 10/3. - С. 259-263.
2. Сивков, А.А. Влияние свойств медного покрытия на алюминиевой контактной поверхности на переходное сопротивление / А.А. Сивков, А.С. Сайгаш, Ю.Л. Колганова (Шаненкова) // Электротехника. – 2013. - № 8. - С. 11-14.
3. Сивков, А.А. Плазмодинамический синтез ультрадисперсных оксидов меди в атмосферных условиях / А.А. Сивков, А.С. Ивашутенко, О.Б. Назаренко, А.С. Сайгаш, А.Я. Пак, Ю.Л. Колганова (Шаненкова) // Физика и химия обработки материалов. - 2015. - № 4. - С. 25-34.

### **Патенты:**

4. Патент на изобретение № 137443 РФ. МПК H05H 11/00 (2006.01). Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель/ Сивков А.А., Сайгаш А.С., Колганова (Шаненкова) Ю.Л. Заявка № 2013143254/07, 24.09.2013 Опубликовано 10.02.2014 г. Бюл. № 4.

### **Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus:**

5. Sivkov, A.A. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity / A.A. Sivkov, Y.L. Shanenkova, A.S. Saygash, I.I. Shanenkov // Surface and Coatings Technology. - 2016. - Vol. 292. - p. 63-71.
6. Sivkov, A.A. Deposition of a TiC/Ti coating with a strong substrate adhesion using a high-speed plasma jet / A.A. Sivkov, I.I. Shanenkov, A.Y. Pak, D.Y. Gerasimov, Y.L. Shanenkova // Surface and Coatings Technology. – 2016. - Vol. 291. - p. 1-6.
7. Sivkov, A.A. The influence of the properties of a copper coating deposited on an aluminum contact surface on contact resistance / A.A. Sivkov, A.S. Saygash, Y.L. Kolganova (Shanenkova) // Russian electrical engineering. - 2013. - Vol. 84 - №8. - p. 418-421.
8. Sivkov, A.A. Plasma dynamic synthesis and obtaining ultradispersed zinc oxide with single-crystalline particle structure / A.A. Sivkov, A.S. Ivashutenko, Y.L. Shanenkova, I.I. Shanenkov // Advanced Powder Technology. - 2016. - Vol. 27 - № 4. - p. 1506-1513.
9. Sivkov, A.A. Phase analysis study of the copper-aluminum contact pair obtained by plasma dynamic method / A.A. Sivkov, A.S. Saygash, Y.L. Kolganova (Shanenkova), I.I. Shanenkov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014 - Vol. 66 - №. 1. - p. 1-5. - Article number 012048.

### Материалы конференций:

10. Половинкина, Ю.Н. Нанесение меди на алюминиевые поверхности плазмодинамическим методом / Ю.Н. Половинкина, Ю.Л. Шаненкова // Тинчуринские чтения: материалы докладов XII Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах, Казань, 26-28.04.2017. - Казань: КГЭУ, 2017 - Т. 1 - С. 165-166.
11. Половинкина, Ю.Н. Нанесение медного покрытия на алюминиевые поверхности с высокой прочностью сцепления / Ю.Н. Половинкина, Ю.Л. Шаненкова, А.С. Сайгаш // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник научных трудов XIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 26-29 Апреля 2016. - Томск: ТПУ, 2016 - Т. 1. Физика - С. 229-231.
12. Kolganova (Shanenkova), Y.L. Investigation of copper-aluminum contact pair surface obtained by plasmodynamic method / Y.L. Kolganova (Shanenkova), A.A. Sivkov, A.S. Saygash, I.I. Shanenkov // Energy Fluxes and Radiation Effects: Book of Abstracts of International Congress, Tomsk, 21-26.09.2014. - Tomsk, 2014 - p. 376.
13. Колганова (Шаненкова), Ю.Л. Влияние микрогеометрии поверхности на величину удельного переходного контактного сопротивления / Ю.Л. Колганова (Шаненкова), И.И. Шаненков, А.С. Сайгаш // Современные техника и технологии: сборник трудов XIX Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 т., Томск, 15-19 Апреля 2013. - Томск: ТПУ, 2013 - Т. 1 - С. 54-55.
14. Kolganova (Shanenkova), Y.L. Development of basis about deposition of copper coating on the aluminum surface by using a coaxial magnetoplasma accelerator / Y.L. Kolganova (Shanenkova), I.I. Shanenkov // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: труды XIV Международного студенческого научно-технического семинара в 2-х томах, Томск, 24-27 Апреля 2012. - Томск: Изд-во СПб Графикс, 2012 - Т. 2 - С. 286-290.
15. Sivkov, A.A. Research of Properties of Copper Coatings Obtained by the Plasmodynamic Method / A.A. Sivkov, A.S. Saygash, Y.L. Kolganova (Shanenkova), M.E. Nazarova // 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Abstracts, Tomsk, September 17-21, 2012. - Tomsk: TPU Press, 2012 - p. 458.