

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

На правах рукописи

Шаненкова Юлия Леонидовна

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

05.14.12 – Техника высоких напряжений

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

Доктор технических наук

Сивков Александр Анатольевич

Томск – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>4</b>
<b>ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ РЕШЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ СОВМЕЩЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ .....</b>	<b>9</b>
1.1 Электропроводящие смазки .....	10
1.2 Биметаллические прокладки .....	12
1.3 Нанесение покрытий на алюминиевые контактные поверхности .....	13
1.4 Прочие методы совмещения контактной пары медь-алюминий .....	22
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>24</b>
2.1 Экспериментальный стенд для проведения исследований по нанесению медных покрытий на алюминиевые поверхности плазмодинамическим методом .....	24
2.2 Принципиальная схема, устройство и работа коаксиального магнитоплазменного ускорителя с медными электродами .....	26
2.3 Регистрация энергетических параметров плазменного выстрела.....	30
2.4 Определение дифференциальных и интегральных характеристик электроэрозионного износа медного ствола ускорителя .....	30
2.5 Регистрация динамических характеристик сверхзвуковой импульсной струи медной электроэрозионной плазмы.....	31
2.6 Аналитические методы исследований .....	33
2.7 Методика определения переходного сопротивления контактных пар.....	34
<b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ.....</b>	<b>39</b>
3.1 Инициирование дугового разряда в ускорительном канале коаксиального магнитоплазменного ускорителя.....	40
3.2 Ускорение электроразрядной плазмы и исследование динамических характеристик плазменной структуры.....	45
3.3 Электроэрозионная наработка медного материала с поверхности ускорительного канала .....	58

3.4 Исследование влияния параметров плазгодинамической системы на величину площади медного покрытия.....	66
3.5 Нанесение медного покрытия при двухимпульсном режиме работы ускорителя.....	74
<b>ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ХАРАКТЕРИСТИК МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПЕРЕХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ.....</b>	<b>86</b>
4.1 Исследования переходного сопротивления контактных пар .....	86
4.2 Микроструктура и фазовый состав медного покрытия на алюминиевой подложке .....	95
4.3 Основные физико-механические свойства медного покрытия на алюминиевой подложке.....	104
4.4 Прочность сцепления медного покрытия с алюминиевой подложкой ..	109
4.5 Топология контактной поверхности медного покрытия .....	112
4.6 Расчёт переходного сопротивления контактной пары медь-алюминий с медным покрытием .....	118
<b>ГЛАВА 5. НАНЕСЕНИЕ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕННИЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ КОНТАКТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ .....</b>	<b>122</b>
5.1 Реализация плазгодинамического метода нанесения медного покрытия на внутреннюю поверхность конусных отверстий.....	123
5.2 Измерение и анализ переходного сопротивления контактной пары медь-алюминий с медным покрытием конусной посадки .....	127
5.3 Микроструктура медного покрытия на внутренней поверхности конусного отверстия, его элементный и фазовый состав, и механические свойства .....	128
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>138</b>
<b>СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ .....</b>	<b>140</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>143</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>157</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**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. Pébère, 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<sub>Cu</sub>*;

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, обеспечивающие 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 высокомошной 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 Radliation 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.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ РЕШЕНИЙ ПРОБЛЕМЫ СОВМЕЩЕНИЯ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ

Согласно статистическим данным потери электрической энергии на контактных соединениях достигают 1÷10% от всей потребляемой энергии (в зависимости от мощности потребления предприятия, качества и степени изношенности оборудования). В связи с этим необходимо максимально снизить потери энергии в местах контактных соединений силовых цепей. Основными материалами контактных токоведущих частей являются медь и алюминий ввиду их высокой удельной электропроводности [1-8]. Однако переход от медного проводника к алюминиевому требует решения задачи электрохимического совмещения этих материалов. Алюминий является более активным металлом по сравнению с медью, поэтому поверхность алюминиевого контакта легче поддается окислению. Процесс окисления возникает из-за химической реакции (даже при нормальных условиях и комнатной температуре), которая протекает при взаимодействии алюминия с атмосферным кислородом. В результате реакции окисления на поверхности образуется тонкая плёнка из непроводящего оксида алюминия, так называемый «оксидный барьер» толщиной от 5 Å до 100 Å. Поэтому даже в нормальных условиях эксплуатации образованная плёнка ухудшает электропроводные свойства контактного соединения. В условиях повышенной температуры скорость роста оксидной плёнки и её толщина возрастают. На медной контактной поверхности со временем также образуется оксидная плёнка. Однако этот процесс протекает во времени гораздо медленнее и в дальнейшем окись меди  $CuO$  переходит в закись меди  $Cu_2O$ , которая имеет относительно высокие значения электропроводности.

Следствием появления оксидов меди и алюминия в присутствии конденсированной влаги становится образование электролита в контактном

зазоре и возникновение электрохимического процесса, интенсифицируемого наличием внешнего электрического поля и токами нагрузки. Это приводит к разрушению контактных перемычек, уменьшению числа контактных точек и росту переходного контактного сопротивления с соответствующими потерями энергии. Интенсивность этого процесса возрастает вследствие ослабления контактного (болтового) соединения или при многократном соединении-разъединении контактная без соответствующей ревизии и подготовке контактных поверхностей.

Исходя из сказанного смысл выражения «совмещение контактной пары» можно интерпретировать как создание условий, обеспечивающих герметичность собственно контакта *Cu-Al* и предельное увеличение фактической контактной поверхности.

Разработка нового эффективного метода решения проблемы совмещения меди и алюминия является актуальной задачей. На практике известно несколько способов решения этой проблемы, заключающихся в использовании биметаллических пластин, токопроводящих смазок, а также в нанесении различными способами медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности. Однако эти методы решения проблемы не отвечают в полной мере существующим требованиям, предъявляемым к качеству контактных соединений [9-12].

### **1.1 Электропроводящие смазки**

Токопроводящая смазка – это паста, обеспечивающая снижение переходного контактного сопротивления в переходных элементах сети. Электропроводящая смазка обычно представляет собой органическую матрицу с высокоэлектропроводящими порошковыми наполнителями, в частности графита и меди. Матрица обеспечивает герметичность контактного соединения, а дисперсные проводящие частицы создают электрический контакт практически по всей контактной поверхности.

Основное требование к существующим смазкам – это обеспечение надёжной и устойчивой работы системы путём химического разрушения оксидной плёнки, образующейся на поверхности алюминиевых и медных контактов, а также обеспечение при длительном режиме работы низкой вероятности её возникновения вновь.

Положительный эффект токопроводящих смазок достигается за счёт того, что их применение позволяет увеличить эффективную площадь контактирования и токопередачи. Это обеспечивается за счёт того, что наносимая смазка заполняет все неровности и пустоты между контактными поверхностями (рисунок 1.1). Достаточная текучесть используемой композиции обеспечивает её выдавливание в зоне контактирования, а введение частиц металлического микродисперсного порошка приводит к заполнению микровпадин соприкасающихся контактов и созданию сплошной токопроводящей прокладки.

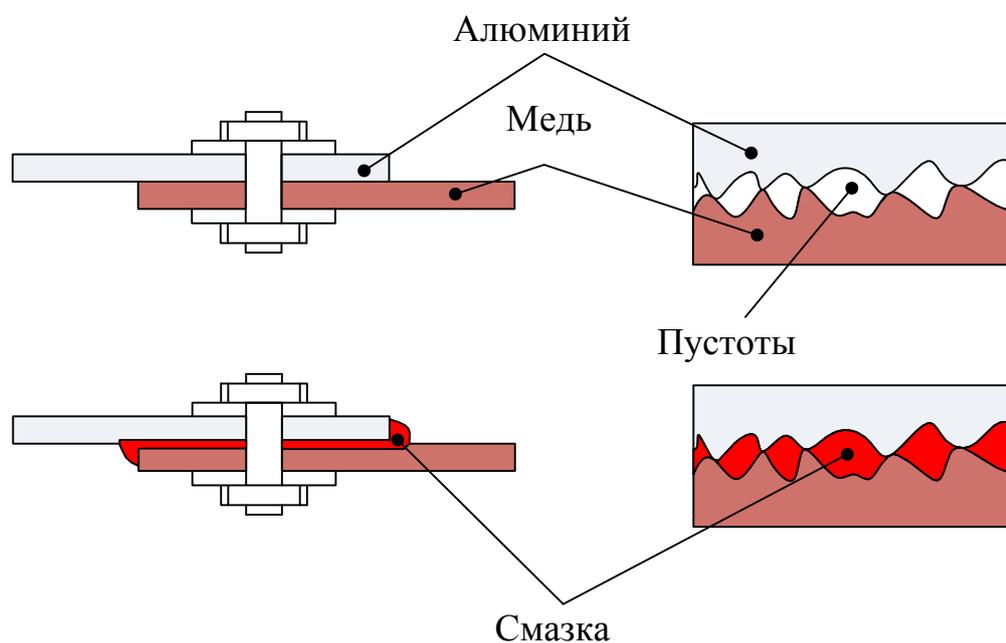


Рисунок 1.1 – Принцип действия токопроводящих смазок

Применение электропроводящей смазки позволяет полностью использовать площадь перекрытия контактных поверхностей, снизить и стабилизировать контактное сопротивление, уменьшить потери энергии и увеличить срок службы болтовых контактных соединений [13].

Однако данный метод соединения меди и алюминия имеет существенный недостаток, который заключается в том, что при длительной эксплуатации качество контакта ухудшается за счёт затвердевания матрицы и растрескивания токопроводящего слоя. При ревизии контактного соединения появляется необходимость в отчистке контактных поверхностей и нанесения нового слоя электропроводящей смазки [13,14].

## **1.2 Биметаллические прокладки**

Профессиональный монтаж контактных элементов с помощью биметаллических прокладок позволит решить проблему совмещения контактной пары медь-алюминий. Существует несколько разновидностей таких прокладок, изготавливаемых методами: лазерной сварки, сварки трением, холодной сварки, сварки под давлением, сварки взрывом.

В работе [15, 16] рассматривается влияние условий лазерной пайки-сварки меди и алюминия на величину переходного контактного сопротивления. Данная технология обеспечивает высокопрочное соединение меди и алюминия с минимальным переходным сопротивлением за счёт образования слоя взаимного перемешивания материалов толщиной около 3 мкм. Однако данный метод требует специального оборудования и оснастки, является достаточно сложным и дорогостоящим для реализации в промышленных условиях.

В работе [17] предлагается другой способ соединения меди и алюминия сваркой трением. Данный метод позволяет решить проблему совмещения меди и алюминия, но не обеспечивает требуемого качества контактного соединения ввиду образования микротрещин и, как следствие, увеличение переходного контактного сопротивления.

Ввиду того, что при использовании методов холодной сварки и сварки под давлением, качество и надежность получаемых контактных биметаллических пластин падает, всё более широкое применение получила

технология сварки взрывом. Сварка взрывом — это процесс высокопрочного неразъемного соединения пластин разных металлов за счёт их высокоскоростного соударения под действием взрыва заряда взрывчатого вещества. Большим преимуществом данной технологии является высокоэффективное очищение поверхностей пластин от окисных плёнок и других загрязнений. Основными преимуществами сварки взрывом является прочная связь между свариваемыми материалами и сохранение их физико-механических свойств [18-20].

В целом биметаллическая пластина представляет композиционный материал, состоящий из двух металлов или их сплавов с разными коэффициентами теплового расширения. За счёт этого реализуются уникальные свойства – основной слой металла обеспечивает прочность и другие механические свойства, второй плакирующий слой металла обеспечивает требуемую коррозионную стойкость. Вторым слоем обычно состоит из нержавеющей стали, титана, меди, алюминия и прочее.

Большим недостатком применения биметаллических медноалюминиевых прокладок является увеличение числа контактных переходов, вследствие чего растёт величина переходного контактного сопротивления, и возрастают потери электроэнергии.

### **1.3 Нанесение покрытий на алюминиевые контактные поверхности**

Из анализа литературных данных следует, что наиболее используемым методом решения проблемы совмещения меди и алюминия является нанесение покрытий. Данный метод решает проблему исключения коррозии и повышает стабильность соединений медь-алюминий [21-38]. Самыми распространёнными являются покрытия из серебра, никеля, олова, кадмия, хрома, цинка и меди [39-51].

Кадмий является ковким металлом, в основном применяется для создания легкоплавких припоев и для нанесения защитных покрытий

(кадмирование). Никель при температуре окружающей среды не окисляется кислородом и используется для защитных покрытий (никелирование) [39, 40]. Нанесение покрытия на основе олова служит для защиты от окисления и называется лужением. Аналогичные функции выполняются хромированием [41-43], оцинкованием [44] и серебрением [45].

Как показала многолетняя практика, при эксплуатации покрытий из олова не решается проблема гальванической коррозии, а также уменьшается стабильность электрических контактов. Покрытия на основе олова восприимчивы к фреттингу, что приводит к деградации поверхности контакта и увеличению переходного контактного сопротивления. При комнатных температурах олово вступает в реакцию с медью, образуя интерметаллические соединения, которые характеризуются хрупкостью, относительно низкой электропроводностью и большей чувствительностью к воздействию окружающей среды [46-48].

Никилирование является еще одним эффективным способом решения проблемы совмещения меди и алюминия. Высокая стойкость к окислению и коррозии, относительно низкие сопротивление и коэффициент теплового расширения обусловили его применение в качестве покрытия меди и алюминия.

Серебряные покрытия нашли широкое применение для защиты от коррозии медных контактов ответственных соединений, эксплуатирующихся при высоких температурах окружающей среды [45]. Существует ряд требований, предъявляемых к покрытиям на основе серебра, таких как – однородность покрытия, толщина покрытий от 5 мкм до 15 мкм (для коммутационных аппаратов и шин) и больше (для контактов с многократными коммутациями или при более высоких требованиях). Однако покрытия на основе серебра имеют недостатки, заключающиеся в электроотрицательности к алюминию, что вызывает его коррозию, и склонностью к пористости, что делает контакт более чувствительным к повышенной влажности.

Применение покрытий на основе дорогостоящих благородных металлов (серебро, золото, палладий, индий и другие) позволяет повысить надежность контактных соединений в особо ответственных случаях [50, 51].

В настоящее время существует большое количество способов нанесения металлических электроконтактных покрытий для различных функциональных назначений. Подробное описание методов и их классификация рассмотрены в литературе. Их можно разделить на химические, физические, методы капельного напыления, газовое нанесение покрытий и другие [9, 10]. Нанесение покрытий реализуется в несколько стадий и в зависимости от способа толщина варьируется от нанометров до микрометров. Обычно выделяют три стадии формирования покрытий. К первой относится синтез материала требуемого фазового состава. Далее происходит перенос подготовленного материала от источника к подложке. На третьем этапе происходит нанесение покрытия с последующим ростом толщины.

#### *Погружение в раствор*

Самым простым химическим способом нанесения покрытий (плёнок) является погружение подложек в раствор с содержанием необходимого материала для его осаждения. В работе [52] предлагают нанесение медного покрытия на алюминиевые электроды путём химического осаждения. Предварительно подготовленные алюминиевые подложки (отполированные и очищенные в ультразвуковой ванне) погружают в раствор 1%  $CuSO_4$  и 3,5%  $NaCl$  на 30 минут. Далее полученные электроды  $Al_{Cu}$  погружали в этанольный раствор лауриламида на 1÷3 часа для пассивации поверхности покрытия. Таким образом, формируется медная плёнка, препятствующая коррозии алюминиевого электрода. Основным недостатком данного метода является длительное время процесса нанесения покрытий и сохранение загрязнений на его поверхности.

### *Магнетронное распыление*

Магнетронное распыление материала – это технология нанесения тонких плёнок на металлическую подложку путём ионной бомбардировки поверхности подложки. Благодаря данному методу возможно получение покрытия практически из любого материала вне зависимости от его свойств с сохранением стехиометрии [22]. Главным преимуществом данной технологии является то, что при изменении состава рабочей газовой среды (процентного содержания кислорода, диоксида углерода, азота, сернистого газообразного соединения) возможно получение плёнок оксидов, карбидов, нитридов, сульфидов различных металлов. Главной особенностью установок магнетронного распыления являются высокие требования к источникам питания ввиду того, что скорость осаждения материала покрытия сильно зависит от величины разрядного тока (мощности) и давления рабочего газа. На рисунке 1.2 представлена схема установки магнетронного распыления с мишенью прямоугольной формы [53]. Обрабатываемые подложки обычно располагаются над катодом-мишенью (1) и вращаются во время процесса нанесения покрытия. Данная технология требует обеспечения высокой чистоты и требуемого состава смеси инертного и реакционного газов, а также чистоты распыляемого материала в условиях высокого вакуума[22].

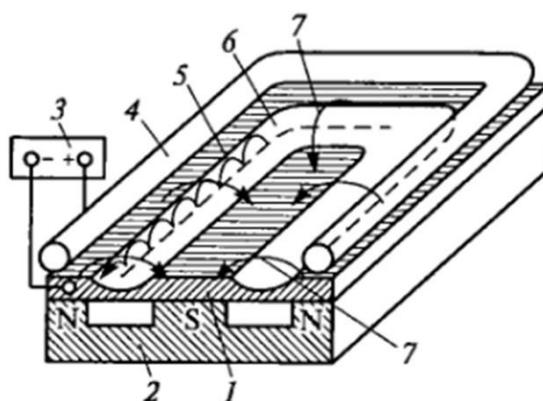


Рисунок 1.2 – Схема магнетронного распыления: 1 – катод-мишень, 2 – постоянный магнит, 3 – источник питания, 4 – анод, 5 – траектории движения электронов, 6 – зона распыления, 7 – силовые линии напряженности магнитного поля

Основными достоинствами данного способа нанесения покрытий является широкий выбор используемых материалов (проводниковые, полупроводниковые, углеродосодержащие и керамические) и равноскоростное распыление различных материалов из одной мишени. К преимуществам данного способа можно отнести хорошие показатели по прочности сцепления покрытий с подложкой и низкую себестоимость процесса [30, 31, 54]. Основными недостатками метода являются низкие скорости формирования покрытий ( $0,1 \div 100$  мкм/час) и сложность системы распыления материала.

#### *Гальваническое нанесение покрытий*

Гальванический метод является одним из способов решения проблемы защиты металлов от коррозии и основан на выделении и осаждении металлов из водных растворов соли или кислоты под действием электрического тока. Гальванические покрытия условно можно разделить на три типа: защитно-декоративные, защитно-электрические и покрытия специального назначения (для задания определенных свойств подложке). Процесс меднения осуществляют в смеси кислот для создания покрытия с высоким уровнем адгезии и низким переходным контактным сопротивлением [23-27]. Данный способ позволяет наносить покрытия практически всех металлов при достаточно высокой технологичности с толщиной порядка 10 мкм [11]. Но, к сожалению, несмотря на большое количество достоинств метода, гальваническое нанесение покрытий является самым длительным, многооперационным и низкопроизводительным по сравнению со всеми существующими методами. К минусам данного способа можно отнести дороговизну и сильную зависимость качества от состояния поверхности подложки (микрogeометрии, загрязненности и пористости).

#### *Газотермическое напыление*

Основным базовым элементом при газотермическом напылении выступает пульверизатор, с помощью которого частицы расплавленного металла наносятся на обрабатываемую поверхность. В данном методе

используют газопламенный, электродуговой, высокочастотный, газоплазменный способы распыления материалов.

Формирование покрытий происходит в две стадии: создание двухфазного газового потока и непосредственное нанесение покрытия [55]. Процесс взаимодействия газового потока и частиц сопровождается их нагревом и ускорением. Далее происходит формирование покрытия при осаждении расплавленных частиц на поверхность подложки. Обычно частицы наносимого покрытия нагревают до температуры на  $50\div 100$  °С выше температуры плавления материала, что даёт хорошее сцепление с подложкой. Частицы плотно фиксируются по подложке и растекаются, заполняя все имеющиеся неровности. Благодаря предварительной подготовке наносимого материала обеспечивается высокая скорость обработки поверхности и малое время высокотемпературного состояния частиц. Данный способ нанесения обеспечивает высокую прочность сцепления, твёрдость и износостойкость покрытия.

Катодное напыление является одним из видов газоплазменного нанесения покрытий или плёнок. Данный способ реализуется в специальной установке, которая состоит из вакуумной камеры с системой электродов анод и катод [28]. Рабочий объём камеры откачивают до давления  $10^{-4}$  Па, а затем наполняют инертным газом аргоном с давлением  $1\div 10$  Па. На электроды подается напряжение порядка  $1\div 10$  кВ для создания тлеющего разряда. Плазма тлеющего разряда является источником положительно заряженных ионов инертного газа, которые ускоряются в электрическом поле, воздействуют на катод, вызывая его распыление. Распылённые атомы материала катода осаждаются на обрабатываемой поверхности в виде тонкой плёнки. Основными преимуществами катодного распыления являются: низкие температуры процесса нанесения покрытий, отсутствие фазовых переходов напыляемых материалов, безынерционность, возможность создания плёнок тугоплавких металлов и их сплавов, равномерность

толщины покрытий. Основным недостатком метода является малая скорость осаждения покрытия ( $\sim 0,3 \div 1$  нм/с).

В работе [56] предлагается новый уникальный метод нанесения покрытий с помощью системы напыления катодного дугового плазменного разряда в вакууме, разработанной в Таиландском университете. Благодаря данной установке возможно получение модифицированных нанопокровтий и напыление тонких наноплёнок. Получаемые покрытия применяются в электротехнике и микроэлектронике.

В работе [4] представлены результаты по нанесению покрытия  $Cu/Al_2O_3$  на стальные подложки с помощью системы термического плазменного напыления. Технология обладает большим преимуществом ввиду того, что покрытие получается равномерное по составу и структуре за счёт нанесения материала в жидком виде на подложку в условиях высоких температур ( $5000 \div 12000$  °С) и скоростей плазменной струи ( $200 \div 700$  м/с) [57, 58]. Однако использование высоких температур способствует фазовому переходу и протеканию плазмохимических реакций с образованием других материалов и нарушению требуемого фазового состава.

#### *Метод холодного газодинамического напыления*

Метод холодного газодинамического напыления (ХГН) разработан в институте теоретической и прикладной механики СО РАН и на сегодняшний день является наиболее распространённым на промышленном уровне [32-37, 59-62]. Основным его преимуществом является возможность проведения процесса при температурах, значительно меньших температуры плавления материала, используемого для нанесения покрытий. Его суть заключается в том, что на обрабатываемую поверхность воздействуют воздушным потоком, нагретым до температуры  $250 \div 500$  °С со скоростями  $500 \div 1000$  м/с. Метод даёт возможность нанесения покрытий как из органических и полимерных материалов, так и из металлов, интерметаллидов и керамики, размер частиц которых составляет до 50 мкм. На рисунке 1.3 представлены устройство и схема работы аппарата ХГН, который позволяет наносить медные, никелевые

и цинковые покрытия толщиной от 50 мкм до 200 мкм на алюминиевые контактные поверхности. Процесс ХГН можно разделить на три этапа: разгон и нагрев частиц наносимого материала; взаимодействие наносимого материала с рабочей поверхностью подложки; наращивание толщины покрытия и закрепление частиц на поверхности подложки.

В работе [63] предложено решение проблемы совмещения контактной пары медь-алюминий со снижением переходного сопротивления и повышением надёжности контактного соединения за счёт нанесения методом ХГН композиционного серебросодержащего покрытия  $AgSnO_2$  на поверхность алюминиевой подложки. При этом обеспечивается получение достаточно равномерного слоя покрытия толщиной до 3 мм.

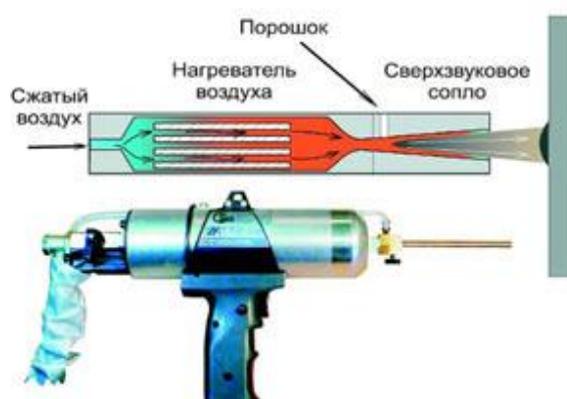


Рисунок 1.3 – Схема и устройство для напыления покрытий методом ХГН

Исследования адгезии и структуры медного покрытия, нанесенного на алюминиевые подложки с помощью ХГН, представлены в работах [64, 65]. Прочность сцепления покрытия с подложкой достигает 700 МПа, что значительно превышает результаты, достигнутые ранее рассмотренными методами. Толщина покрытия составляет от 170 мкм до 450 мкм. Однако на представленных оптических микроснимках видно, что полученное медное покрытие неплотно прилегает к поверхности алюминиевой подложки, имеет трещины и поры, отличается зернистой структурой и обладает естественной шероховатостью поверхности (6÷8 мкм).

Основные достоинства ХГН – простота метода, высокая производительность процесса до 5÷7 м<sup>2</sup>/ч, а также возможность нанесения

покрытий из различных материалов. К недостаткам метода можно отнести низкую устойчивость к внешним динамическим воздействиям из-за относительно малой прочности сцепления с подложкой.

#### *Метод горячего погружения в расплав*

Суть наиболее дешёвого и простого метода состоит в погружении в ванну с расплавленным металлом обрабатываемой детали, на поверхности которой образуется твёрдый слой покрытия заданного состава. Основным механизмом формирования прочного и устойчивого покрытия заданной толщины является диффузия, обеспечивающая образование переходного граничного слоя. Основным его недостатком является ограничение по температуре плавления металлов, которые можно использовать в качестве покрытия из-за ограничений рабочих температур ванны.

#### *Плакирование*

Плакирование – это термомеханическое нанесение на поверхность подложки металлического слоя путём горячей прокатки или волочения. При плакировании могут быть улучшены такие свойства материалов подложки и покрытия, как: пластичность, прочность, износостойкость и коррозионная стойкость [66]. Получение высококачественного покрытия зависит от наличия оксидных плёнок и топографии поверхности контакта. Важной характеристикой в процессе плакирования является температура. При её повышении возрастают поверхностная энергия металлов, что приводит к ускорению протекания диффузии и формированию граничного слоя взаимного перемежения материалов с более высокой прочностью сцепления. К преимуществам данного способа относится высокая производительность и неограниченная толщина соединяемых материалов. Использование данного метода имеет ограничение по форме образца. Он в основном используется для соединения плоских поверхностей.

#### *Наплавка*

Наплавкой называется процесс нанесения слоя металла (сплава) на подложку путём сварки за счёт плавления и осаждения материала электрода

на подплавленную подложку. При охлаждении изделия до температуры окружающей среды на подложке образуется слой покрытия с прочным сцеплением с материалом подложки. С помощью метода наплавки возможно создание покрытия любой толщины за счёт многократного наслоения наплавляемого материала (от 0,25 мм до 5,00 мм). Метод характеризуется высокой производительностью до 15÷25 кг/ч, простотой и мобильностью оборудования и отсутствием ограничений по размерам изделий. Недостатки процесса наплавки в основном связаны с высоким энергопотреблением. Кроме того может происходить деформация подложки из-за возникновения градиента температур. Существуют ограничения по выбору сочетаний основного и наплавляемого металлов из-за возможности образования хрупкой интерметаллидной прослойки на границе покрытие-подложка.

#### **1.4 Прочие методы совмещения контактной пары медь-алюминий**

В работе [67] представлены результаты по возможности соединения меди и алюминия с помощью индукционной диффузионной пайки. Авторы используют прослойку из фольги для совмещения разнородных материалов при температуре 600 °С под давлением 9 МПа. В результате проведенных экспериментов доказана возможность совмещения меди и алюминия с образованием переходных слоев в виде интерметаллидов с толщиной покрытия до 10 мкм.

В работе [68] рассмотрен метод соединения медных шин с многожильными алюминиевыми проводами с помощью ультразвуковой сварки прибором DS-20-II. В работе изучены процессы коррозии данного вида соединения в хлоридсодержащем растворе сульфата. Показано повышение коррозионной устойчивости после совмещения разнородных металлов *Cu* и *Al*.

Проанализировав литературные данные, можно сделать вывод, что существует множество возможных решений проблемы совмещения разнородных материалов, таких как медь и алюминий. Однако каждый метод обладает некоторыми преимуществами и содержит ряд недостатков.

Наиболее предпочтительным для практического использования способом совмещения контактной пары медь-алюминий является нанесение медного покрытия на алюминиевую поверхность методом холодного газодинамического напыления. Однако наряду с многочисленными достоинствами этот метод имеет серьёзный недостаток, заключающийся в относительно низкой прочности сцепления покрытия с подложкой, что при длительных циклических термических и механических нагрузках приводит к отслоению покрытия, повышению величины переходного сопротивления, и как следствие, повышению потерь электрической энергии.

В связи с этим разработка новых способов совмещения разнородных материалов, таких как медь и алюминий, с минимальным значением переходного контактного сопротивления и с обеспечением высокой прочности сцепления покрытия с подложкой является актуальной задачей. Данная задача может быть решена путём воздействия на алюминиевую подложку сверхзвуковой импульсной струёй медной электроэрозионной плазмы, которая генерируется высоковольтным сильноточным коаксиальным магнитоплазменным ускорителем (КМПУ) [69-72]. В отличие от существующих способов предлагаемый метод отличается экологичностью, не требует предварительной подготовки основного расходного материала и его дозированной подачи, реализуется при атмосферном давлении и комнатной температуре.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Экспериментальный стенд для проведения исследований по нанесению медных покрытий на алюминиевые поверхности плазмодинамическим методом

Экспериментальные исследования по нанесению медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности проведены на стенде, состоящем из трёх основных блоков:

1. Секционированного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ), выполненного на базе импульсных высоковольтных конденсаторов ИС-5-200, с суммарной ёмкостью  $C=28,8$  мФ, с зарядным устройством, системой управления, контроля и регистрации энергетических параметров быстропротекающих процессов (импульсных токов и напряжений) и динамических параметров сверхзвуковых плазменных струй;

2. Импульсного сильноточного высоковольтного коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ) эрозионного типа с медными электродами и ускорительным каналом (УК);

3. Герметичной камеры-реактора (КР) с вакуумной системой, системой заполнения инертных газов и прозрачным окном для проведения высокоскоростной видеосъёмки и регистрации динамических характеристик сверхзвуковых струй медной электроэрозионной плазмы.

Принципиальная электрическая схема экспериментального стенда, его устройство, состав и функционирование подробно описаны в работах [73, 74], а фотография внешнего вида с указанием основных элементов представлена на рисунке 2.1.

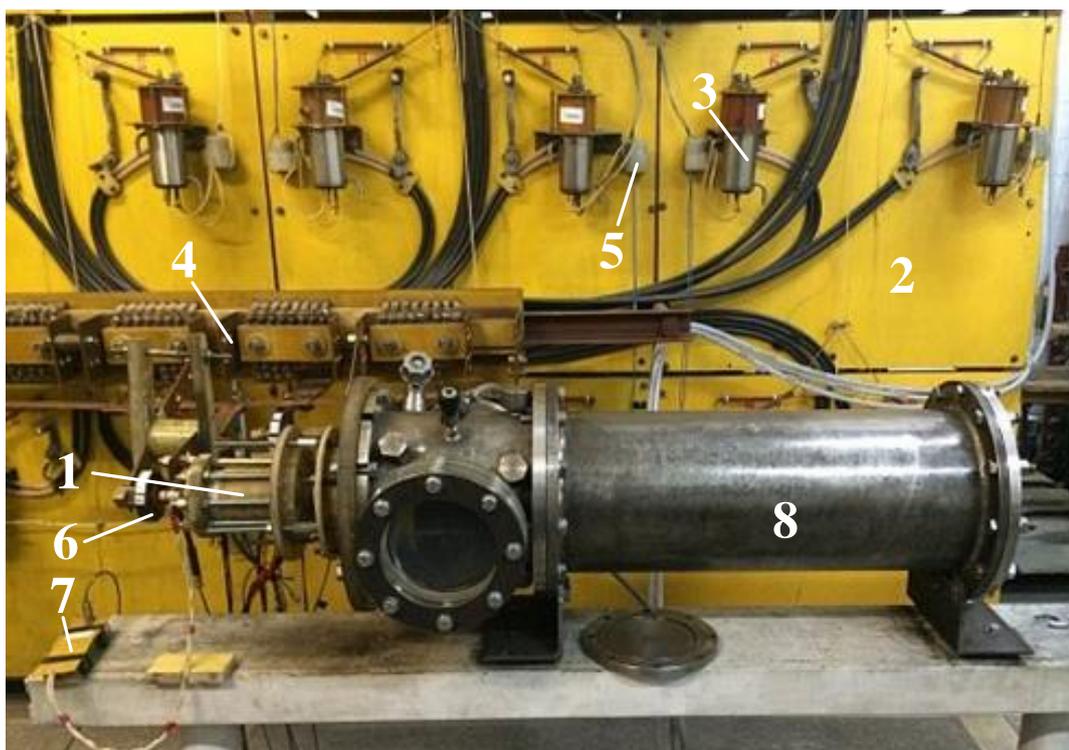


Рисунок 2.1 – Конструкция экспериментальной установки для нанесения покрытий: 1 – КМПУ, 2 – ЕНЭ, 3 – управляемые разрядники ИРТ-6, 4 – шины сборного коллектора, 5 – импульсный трансформатор, 6 – трансформатор Роговского, 7 – делитель напряжения, 8 – камера-реактор

ЕНЭ выполняет функцию импульсного источника электропитания КМПУ с максимальной запасаемой энергией  $W_c=360$  кДж при зарядном напряжении  $U_{зар}=5$  кВ. Его секционированное исполнение позволяет в широком диапазоне изменять энергетические параметры электропитания КМПУ, реализовать режимы многоимпульсного или частотного электропитания (до 4 импульсов) с регулируемыми задержками и частотой следования импульсов. ЕНЭ состоит из четырёх конденсаторных блоков ёмкостью 7,2 мФ, запуск которых осуществляется от четырёх индивидуальных блоков управления по сигналам многоканального генератора задержанных импульсов ГИ-1. Каждый блок состоит из шести конденсаторных секций ёмкостью 1,2 мФ, которые заряжаются через индивидуальные зарядные сопротивления, могут при необходимости исключаться из работы и коммутируются на нагрузку (КМПУ) индивидуальными управляемыми разрядниками ИРТ-6 по сигналу

соответствующего блока управления. Разрядный контур каждой конденсаторной секции выполнен коаксиальными кабелями РК-50-13-17, присоединенными к соответствующим секциям сборного секционированного токового коллектора. Секции токового коллектора могут соединяться, обеспечивая параллельное соединение конденсаторных блоков и их работу на общую нагрузку. Разделение секций токового коллектора позволяет осуществлять многоимпульсное или частотное электропитание общей нагрузки, или раздельное электропитание нескольких нагрузок.

## **2.2 Принципиальная схема, устройство и работа коаксиального магнитоплазменного ускорителя с медными электродами**

Основным элементом плазмодинамической системы является коаксиальный магнитоплазменный ускоритель *1*, который подключается к токовому коллектору *4*, как видно на рисунке 2.1, и получает электропитание от ЕНЭ *2*. Его устройство и упрощенная схема электропитания показаны на рисунке 2.2. Основой КМПУ является классический Z-пинч-ускоритель, размещенный и закрепленный по оси мощного индуктора внешней индукционной системы, который последовательно с ускорителем включён в разрядный контур ЕНЭ (*С*), коммутируемый управляемыми разрядниками (ключ *К*). Подробное описание конструкции КМПУ представлено в работах [69, 73-76].

Основной особенностью конструкции КМПУ в данной работе является то, что его электроды – центральный электрод (ЦЭ) *1* и электрод-ствол *2* – выполнены из меди. Кроме того, в работе рассмотрена возможность выполнения разрушаемой токопроводящей перемычки путём графитизации поверхности изолятора в канале формирования плазменной структуры (КФПС) *4* (рисунок 2.2). В исходном состоянии эта электроразрушаемая токопроводящая перемычка электрически соединяет вершину медного ЦЭ *1* и металлическую поверхность УК в начале медного ствола-электрода *2*.

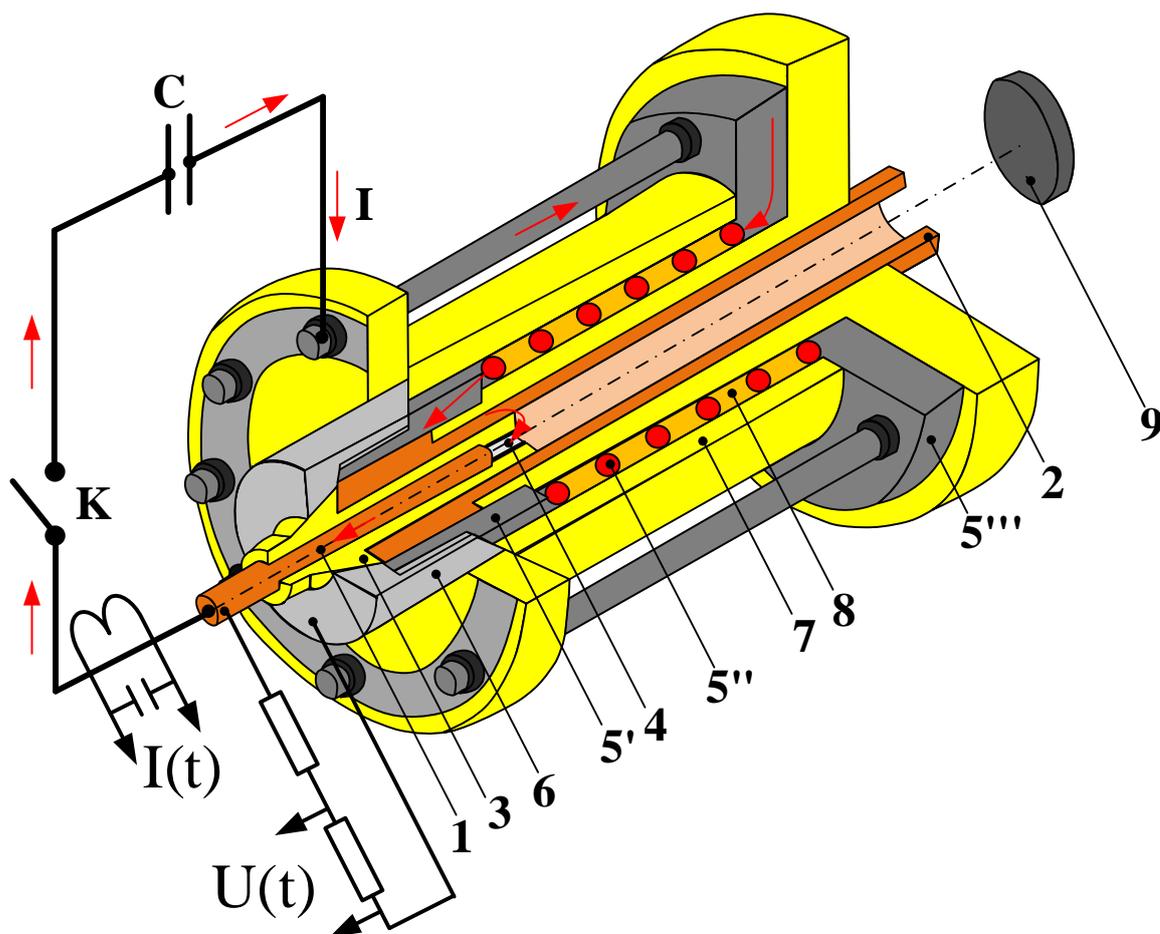


Рисунок 2.2 – Устройство коаксиального магнитоплазменного ускорителя: 1 – ЦЭ, 2 – электрод-ствол, 3 – изолятор ЦЭ, 4 – КФПС, 5 – индуктор, 5' - контактный цилиндр индуктора, 5'' – соленоид, 5''' – контактный фланец, 6 – заглушка, 7 – корпус, 8 – межвитковая изоляция, 9 – алюминиевая мишень

При запуске управляемых разрядников (замыкании ключа  $K$ ) по обозначенному стрелками контуру начинает протекать синусоидально нарастающий ток разряда ЕНЭ. При некоторой величине тока происходит электровзрывное разрушение перемычки в КФПС 4 и формируется дуговой разряд с плазменной структурой типа Z-пинч и круговой плазменной перемычкой между ЦЭ 1 и цилиндрической поверхностью медного УК 2. Заданное конфигурацией КФПС устойчивое состояние плазменной структуры в дальнейшем обеспечивается сжимающим магнитным давлением поля собственного тока, а также магнитным давлением аксиального поля индуктора внешней индукционной системы 5. По мере ускоренного

прохождения плазменной структуры сильноточного дугового разряда по УК происходит электроэрозионная наработка медного материала с его поверхности. Медный материал захватывается плазменной структурой, переходит в плазменное состояние и выносится из УК в КР в виде сверхзвуковой струи, которая воздействует на поверхность алюминиевой мишени-подложки  $\mathcal{Q}$ , расположенной на некотором расстоянии  $\ell_{ст-м}$  от среза ствола КМПУ. При этом происходит осаждение материала струи на обрабатываемой поверхности и формирование медного покрытия. Процесс нанесения медного покрытия реализуется в воздушной среде или в инертном газе при нормальном давлении и комнатной температуре.

Конструкция экспериментальной сборки для плазодинамического нанесения медных покрытий на плоские металлические поверхности, состоящая из КМПУ и КР с обрабатываемой мишенью-подложкой, показана на рисунке 2.3. Фрагмент конструкции экспериментальной сборки для нанесения медного покрытия на внутренние конические поверхности алюминиевых образцов показан на рисунке 2.4.

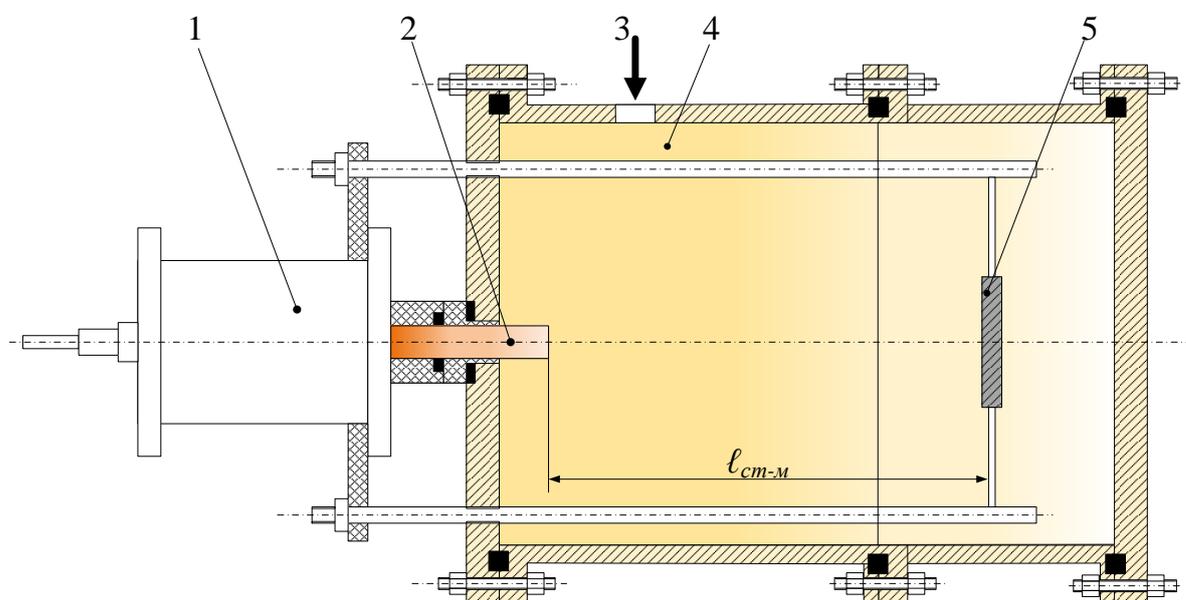


Рисунок 2.3 – Конструкция экспериментальной сборки для нанесения покрытий на плоские поверхности алюминиевых изделий: 1 – КМПУ, 2 – медный ствол-электрод, 3 – ввод газовой (вакуумной) системы, 4 – КР из нержавеющей стали, 5 – алюминиевая подложка

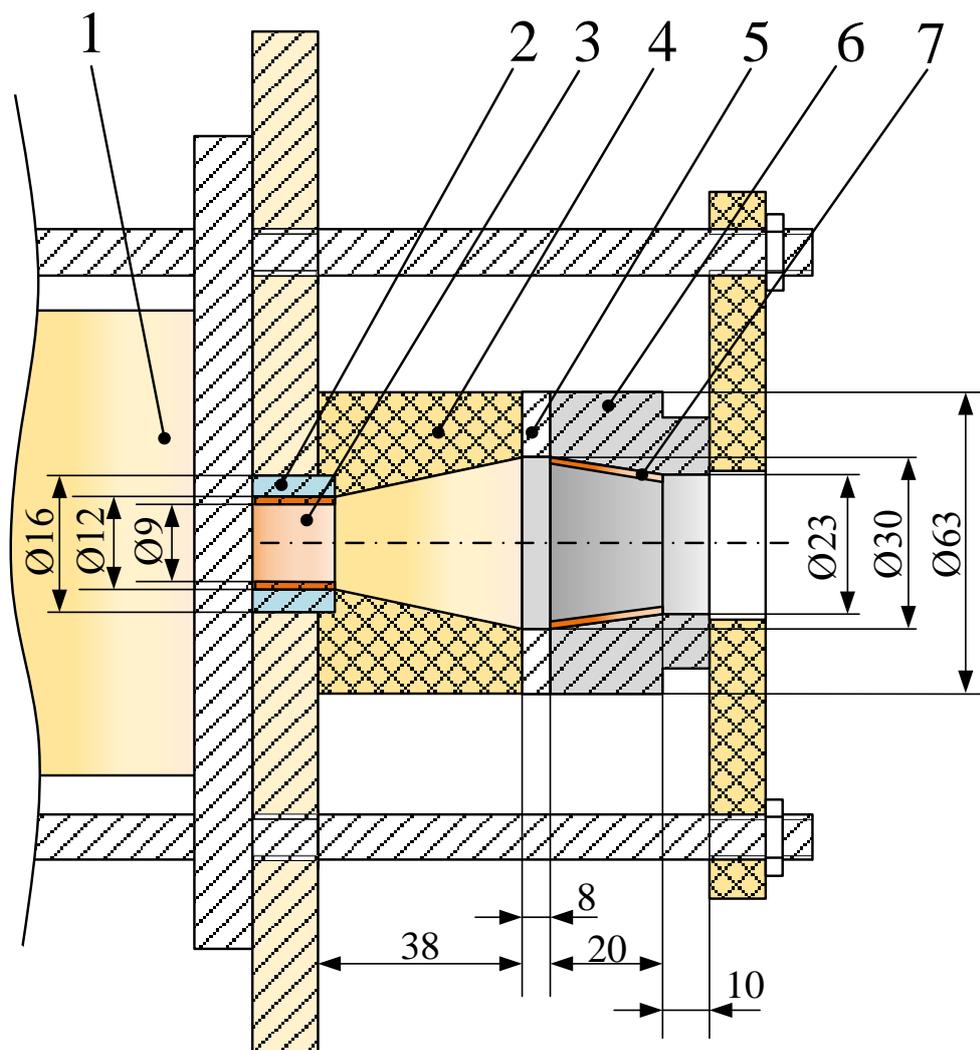


Рисунок 2.4 – Конструкция экспериментальной сборки для нанесения покрытий на внутренние конусные алюминиевые поверхности: 1 – КМПУ, 2 – труба из нержавеющей стали, 3 – медный электрод-ствол, 4 – промежуточная вставка, 5 – стальная защитная шайба, 6 – алюминиевый образец, 7 – медное покрытие

Для предотвращения выброса электроразрядной плазмы и образующихся наноматериалов в окружающую среду, а также исключения мощных электромагнитных, световых и акустических излучений, плазменные выстрелы производятся в герметичный объём КР 8 (рисунок 2.1). КР снабжена системой вакуумирования и газовой системой для заполнения её объёма инертным или другим требуемым газом при регистрируемом давлении до ~5 атм.

### 2.3 Регистрация энергетических параметров плазменного выстрела

Регистрация напряжения на электродах КМПУ  $U(t)$  и импульсного тока электропитания  $I(t)$  осуществлялись с помощью омического делителя напряжения и трансформатора Роговского с пассивным интегрированием, соответственно, сигналы с которых записывались цифровыми осциллографами Tektronix TDS2012. На рисунке 2.5 приведены типичные осциллограммы  $U(t)$  и  $I(t)$ , полученные при проведении плазменного выстрела КМПУ с медными электродами при  $C=14,4$  мФ,  $U_{зар}=3,5$  кВ. По осциллограммам рассчитывались и строились кривые мощности разряда  $P(t)=U(t) \cdot I(t)$  и потребления энергии  $W(t)=\int U(t) \cdot I(t) dt$ , приведенные на том же рисунке. Начало развертки  $t=0$  соответствует моменту замыкания цепи электропитания КМПУ и началу его работы.

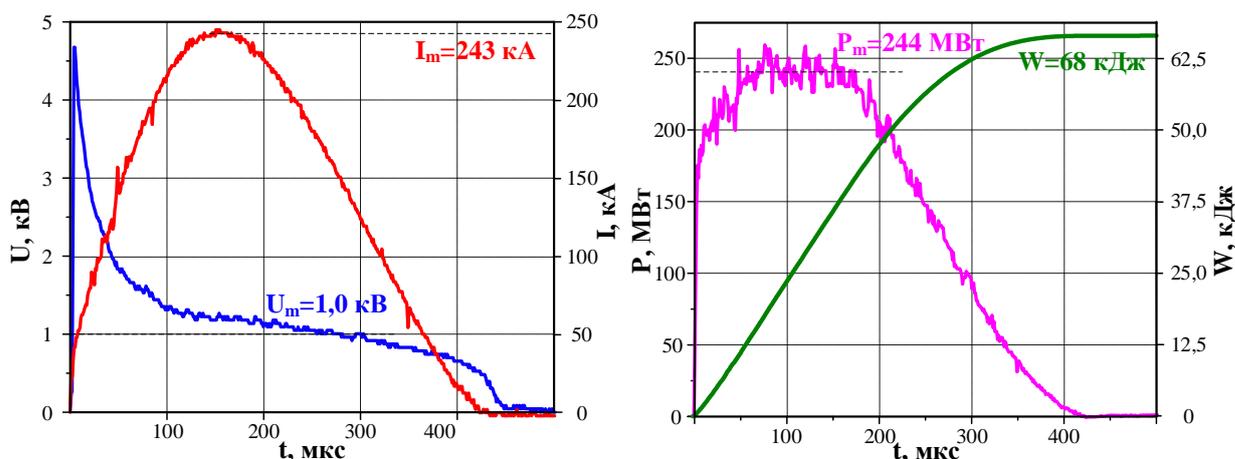


Рисунок 2.5 – Типичные осциллограммы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$ , кривые мощности разряда  $P(t)$  и подведённой энергии  $W(t)$

### 2.4 Определение дифференциальных и интегральных характеристик электроэрозионного износа медного ствола ускорителя

Наработка основного расходного материала (меди) осуществляется за счёт электроэрозионного износа поверхности УК. Износ поверхности происходит за счёт высоких температур плазменной структуры, проходящей

по стволу. Расплав металла медного ствола поступает в токовую оболочку разряда, переходит в плазменное состояние, ускоряется в виде струи электроэрозионной плазмы до скоростей в несколько км/с и выносится из УК в КР. Определение дифференциальных характеристик электроэрозионного износа ствола производилось по методике, описанной в работе [75]. Введенный параметр дифференциального электроэрозионного износа  $\Delta m$  [г/мм<sup>2</sup>] определяет массу эродированного материала с единичной поверхности УК на разных расстояниях по его длине. С использованием этого параметра строились эпюры удельного дифференциального электроэрозионного износа по длине медного УК  $\ell_{УК}$ . Интегральная величина электроэрозионного износа медного УК КМПУ определялась путём интегрирования эпюр  $\Delta m(\ell_{УК})$ , а также путём определения разницы масс ствола до и после процесса нанесения покрытия [75, 76]. Полученные данные использовались для определения закономерности влияния удельной подведённой энергии на единицу объёма УК  $W/V_{УК}$  [кДж/см<sup>3</sup>] на величину удельной эродированной массы материала  $m/W$  [г/кДж].

## **2.5 Регистрация динамических характеристик сверхзвуковой импульсной струи медной электроэрозионной плазмы**

Истечение гиперзвуковой струи медной электроэрозионной плазмы происходит в герметичный объём КР. Регистрация динамических характеристик плазменного потока в свободном пространстве КР (рисунок 2.6) производилось с помощью высокоскоростной фоторегистрации процесса. При проведении опытов использовались два вида установок: ВФУ-1 [77, 78] и Photron FastCAM SA1.1. На установке ВФУ-1 частота съёмки задавалась скоростью вращения зеркала системы оптической развертки 15000 об/мин. При использовании двухрядной линзовой вставки для кадрированного режима съёмки время экспозиции одного кадра и время между кадрами составляло  $\sim 2,7$  мкс, а скорость съёмки  $\sim 370000$  кадров в

секунду. При этом фоторегистрация осуществлялась на фотоплёнку, что требовало соответствующей фотообработки. Современная фотоустановка Photron FastCAM SA1.1 обеспечивает цифровую регистрацию процесса вылета плазмы из УК со скоростью 180000 кадров в секунду при времени между кадрами  $\sim 5,5$  мкс. Основные преимущества цифровой фоторегистрации заключаются в простоте синхронизации и быстром получении результатов в виде цифровых фото и видео файлов. Для получения более качественных фотокадров использовались светофильтры ND32 и ND64. Система фоторегистрации даёт возможность наблюдения за процессом формирования и развития ударно-волновой структуры сверхзвуковой плазменной струи в пространстве между срезом УК и обрабатываемой поверхностью мишени. Скорость плазменной струи определялась по дискретным кадрам с использованием известного линейного масштаба и интервала времени между последовательными кадрами.

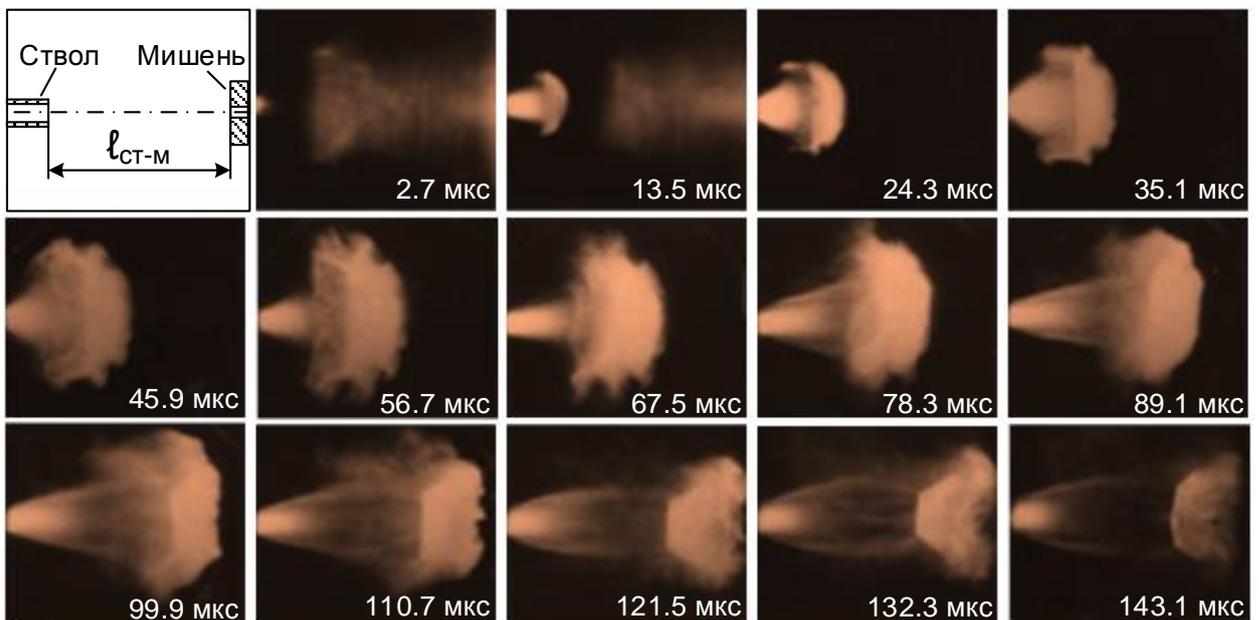


Рисунок 2.6 – Фотограмма формирования и развития ударно-волновой структуры сверхзвуковой плазменной струи, истекающей из УК, полученная с помощью ВФУ-1

## 2.6 Аналитические методы исследований

Фазовый состав полученных медных покрытий на алюминиевых подложках исследовался методом рентгеновской дифрактометрии (XRD) с использованием рентгеновского дифрактометра Shimadzu XRD7000S с медным катодом ( $\text{CuK}\alpha_1$ -излучение,  $\lambda_1=1,540598 \text{ \AA}$ ). Рентгеновский структурно-фазовый анализ проводился с использованием программ PowderCell 2.4, Crystallographica Search-Match и базы структурных данных PDF4+.

Для исследования микроструктуры покрытий изготавливались поперечные шлифы образцов, поверхность которых анализировалась с помощью оптического металлографического микроскопа Olympus GX-71 и сканирующих электронных микроскопов Hitachi TM3000 и Quanta 200 3D с возможностью проведения энергодисперсионного анализа элементного состава материала образцов.

Для исследования микрогеометрии поверхности покрытий, определения параметров шероховатости полученные образцы анализировались с помощью трехмерного бесконтактного лазерного профилометра Micro Measure 3D Station с шагом сканирования 8 мкм. По полученным профилограммам определялись характеристики микрогеометрии и строились 3D-модели поверхности медного покрытия с использованием программы “MountainsMap Премиум 7.2”. Твёрдость материала покрытий определялась с помощью нанотвёрдомера NANO Hardness Tester NHT-S-AX-000X и микротвёрдомера Galileo Durometer Isoscan HV2 OD (по Виккерсу).

Оценка адгезионной прочности проведена методом скретч-тестирования с использованием установки Micro Scratch Tester Revetest. На поверхности покрытия наносилась царапина индентором Rockwall при постоянной скорости перемещения 1 мм/мин и линейно увеличивающейся до 20 Н нормальной нагрузке.

## 2.7 Методика определения переходного сопротивления контактных пар

Величина переходного сопротивления контактной пары определялась расчётным и экспериментальным вольтамперным способом. В статье [79] предложен способ расчёта переходного сопротивления контактного соединения  $R_k$ , с помощью которого можно теоретически оценить величину сопротивления, учитывая характеристики исследуемых поверхностей. Однако данный способ расчёта позволяет лишь оценить уровень величины сопротивления, но не определить значение точно, так как метод имеет некоторые допущения, например, идеализация шероховатости между покрытием и подложкой. Поэтому в работе разработан экспериментальный стенд для определения величины переходного сопротивления контакта за счёт регистрации тока и напряжения с контактной пары (закон Ома) при подаче импульса тока до 54 кА. Такой способ определения переходного контактного сопротивления позволяет не только с высокой точностью определить величину, но и создает условия, близкие к реальным. Для экспериментального метода в качестве автономного источника питания разработан генератор импульсов токов (ГИТМ-360) на основе молекулярных импульсных конденсаторов МИГ-100 (ёмкость  $C=2$  Ф, накопленная энергия  $W_c=10$  кДж в одном конденсаторе, зарядное напряжение до  $U_{зар} = 100$  В). Высокое внутреннее сопротивление конденсатора  $r_c = 0,05$  Ом при разряде в режиме короткого замыкания обеспечивают получение апериодического однополярного импульса тока амплитудой до 1500 А и длительностью до 1,0 секунды [80].

Основными элементами ГИТМ-360 являются: емкостной накопитель энергии, блок зарядки, пульт управления и регистрирующая аппаратура. Принципиальная электрическая схема ГИТМ-360 представлена на рисунке 2.7а). Емкостной накопитель суммарной ёмкостью 72 Ф и накапливаемой энергией до 360 кДж при напряжении заряда до 100 В с током импульса до 54 кА разделен на девять секций по четыре конденсатора в каждой (С1-С36).

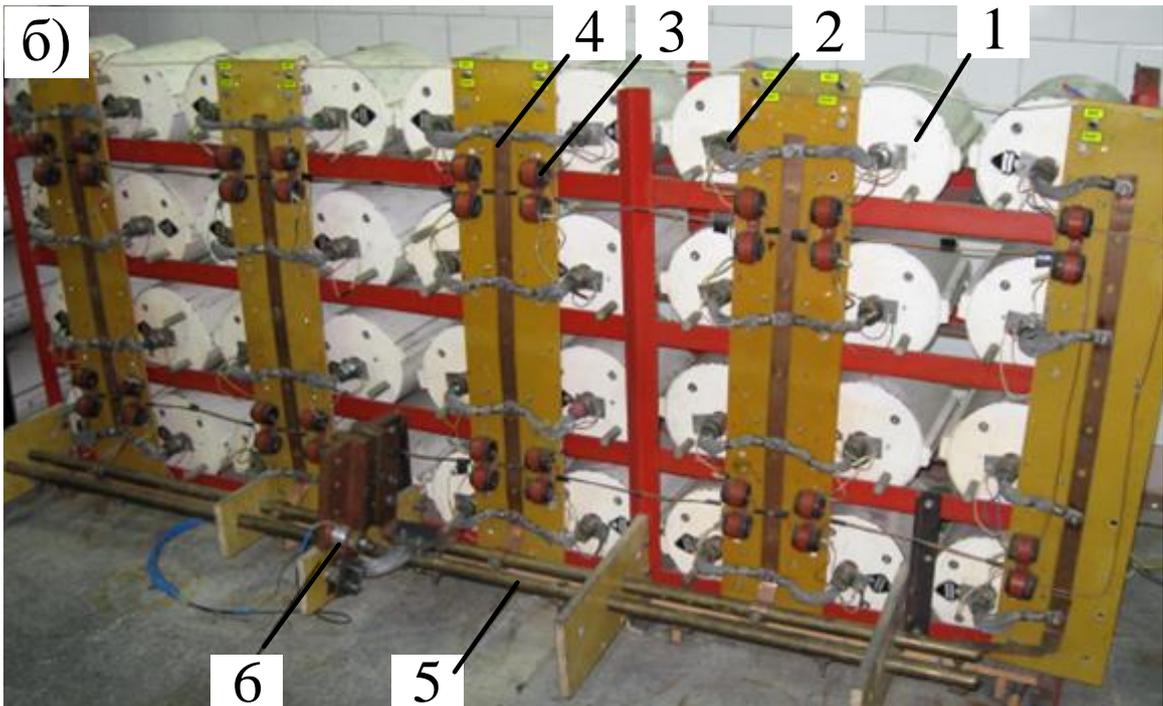
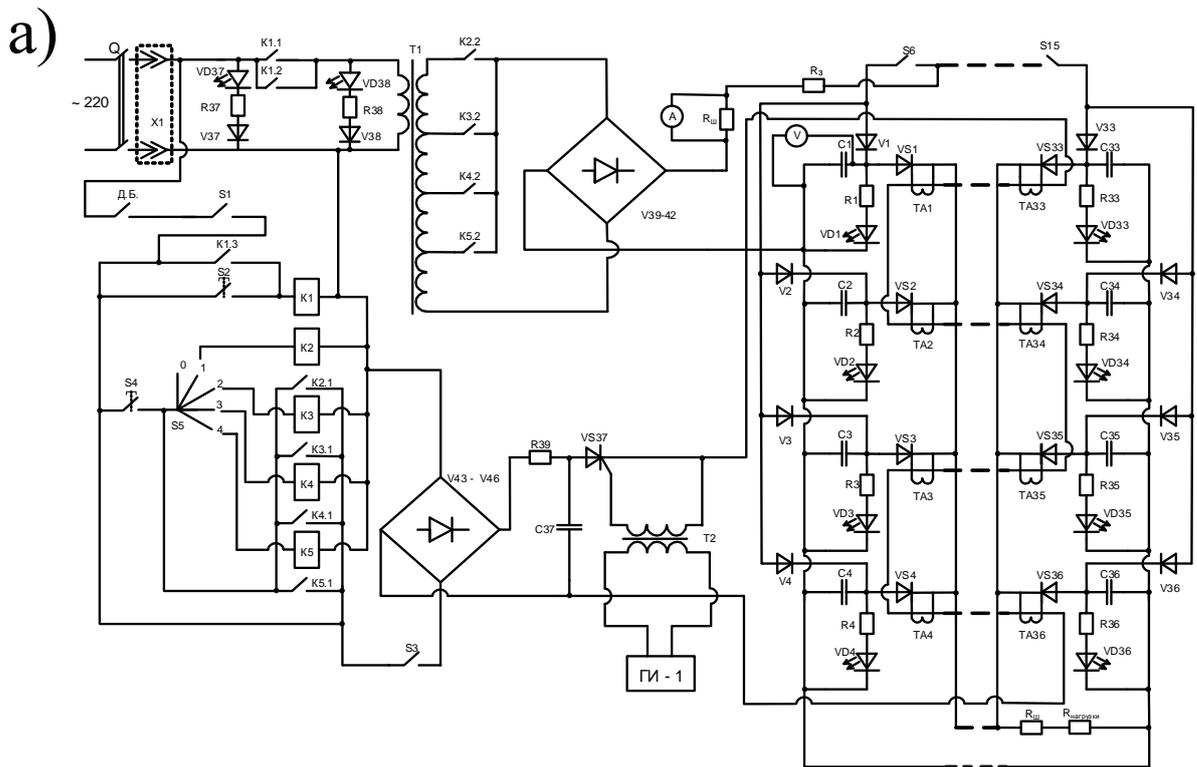


Рисунок 2.7 – а) Электрическая схема ГИТМ-360; б) фотография внешнего вида ГИТМ-360: 1 – конденсатор МИГ-100, 2 – тиристор, 3 – импульсный трансформатор, 4 – секционная шина, 5 – сборный коллектор, 6 – шунт

Каждая секция включается отдельными тумблерами ( $S6-S15$ ) с номинальным током до 15 А. Светодиоды ( $VD1-VD36$ ) служат для указания наличия напряжения на конденсаторах. Конденсаторы коммутируются

индивидуальными тиристорами (*VS1-VS36*), которые включаются на общую нагрузку индивидуальными импульсными трансформаторами (*TA1-TA36*), обеспечивающими гальваническую развязку в цепи управления. Первичная одновитковая обмотка импульсных трансформаторов представляет общую цепь, что даёт возможность одновременного включения всех тиристоров. Запускающий импульс на общую обмотку выдает генератор импульсов, собранный на базе конденсатора (*C37*), который срабатывает от внешнего генератора ГИ-1.

Блок зарядки представлен в виде источника постоянного тока с регулируемым напряжением до 0,22 кВ на первичной обмотке однофазного трансформатора (*T1*) мощностью 5 кВА. На низкой стороне имеются четыре отпайки 0,06; 0,08; 0,1; 0,12 кВ, соответственно. Первичная обмотка трансформатора коммутируется магнитными пускателями (*K1-K5*), которые подключены к общей шине зарядной цепи. Напряжение от общей шины подается на мостовой выпрямитель (*V39-V42*). Сопротивление шунта  $R_{\text{ш}}$  служит для ограничения и контроля зарядного тока. Каждый конденсатор заряжается через индивидуальные диоды (*V1-V36*). Зарядный ток контролируется амперметром (*A*), напряжение на генераторе – вольтметром (*V*). Фотография внешнего вида ГИТМ-360 представлена на рисунке 2.7б). Разрядный контур для каждой секции выполнен медными шинами **4**, присоединенными к сборному коллектору **5**. Благодаря разработанной установке ГИТМ-360 возможно определение переходного сопротивления контактных пар вольтамперным способом с величиной порядка  $\sim 10^{-7}$  Ом. Разрядный ток  $I_k(t)$ , протекающий по исследуемому контактному соединению, и падение напряжения на нём  $U_k(t)$  регистрировались с помощью цифрового осциллографа (рисунок 2.8). По закону Ома определялось переходное контактное сопротивление  $R_k(t)$ :

$$R_k(t) = \frac{U_k(t)}{I_k(t)} = \frac{U_k(t) \cdot R_{\text{ш}}}{U_{\text{ш}}(t)}, \quad (2.1)$$

$U_{\text{ш}}(t)$  – падение напряжение на измерительном шунте.

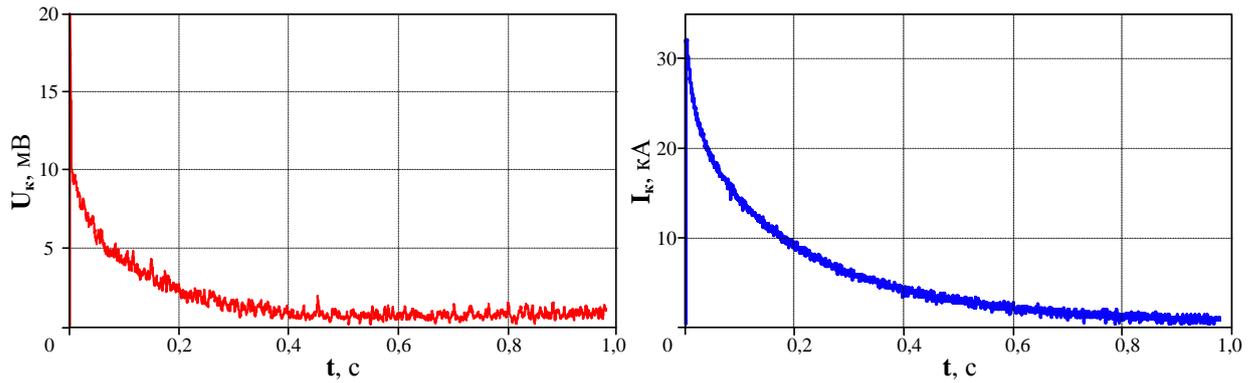


Рисунок 2.8 – Осциллограммы напряжения  $U_K(t)$  и тока  $I_K(t)$

Для проведения исследований по определению величины сопротивлений разработано две конструкции сборки контактных элементов, представленные на рисунке 2.9. Сопротивления контактных пар медь-алюминий с медным покрытием  $Cu-Al_{Cu}$  на плоских алюминиевых подложках измерялись с помощью конструкции, представленной на рисунке 2.9а).

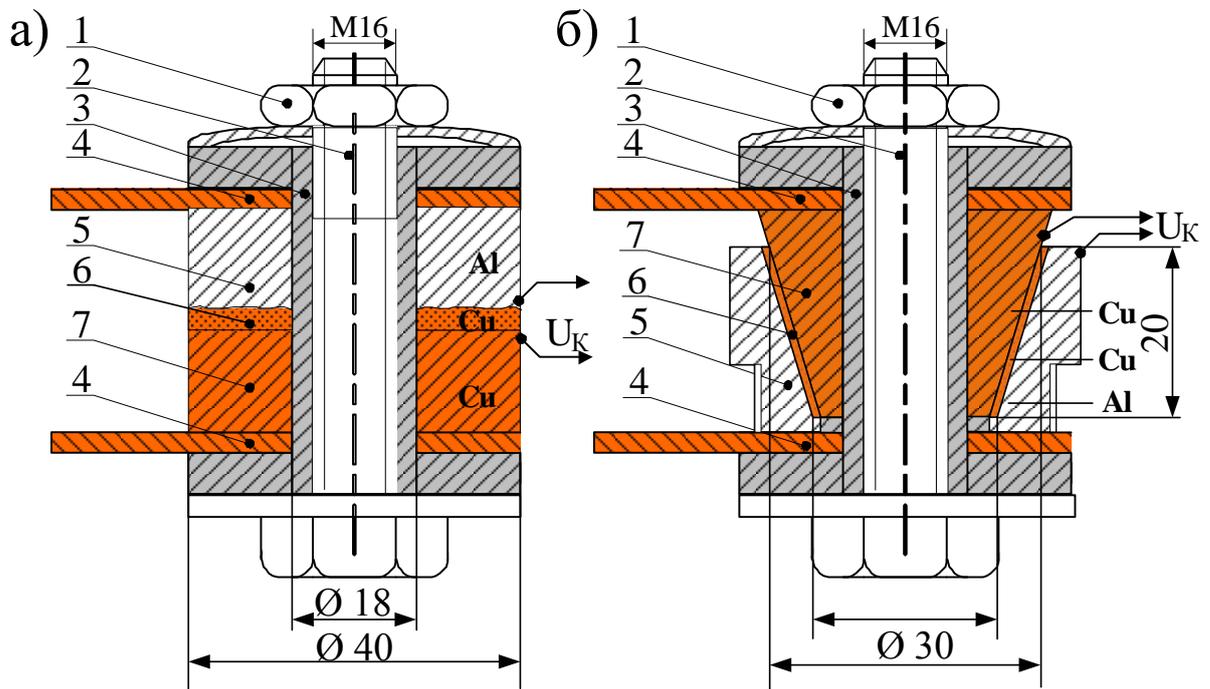


Рисунок 2.9 – Экспериментальные сборки для измерения переходных сопротивлений: а) плоский контактный переход; б) внутренний конический контактный переход: 1 – гайка, 2 – стяжной болт, 3 – изолятор, 4 – токоподводящие шины, 5 – алюминиевый контактный элемент, 6 – медное покрытие, 7 – медный ответный контактный элемент

Из алюминиевых подложек с нанесенным медным покрытием изготовлены образцы тороидальной формы с контактными кольцевыми поверхностями, а также тестовые контактные элементы из меди и алюминия. Образцы контактных элементов стягивались изолированным болтом М16 с помощью динамометрического ключа с контролируемым моментом затяжки ( $M=10\div 100$  Н·м) и усилием сжатия ( $N=12,5\div 31,1$  кН) [79]. Таким образом, обеспечивались равные усилия сжатия всех контактных элементов и одинаковые условия работы всех сравниваемых контактных переходов: тестовые контактные пары медь-медь  $Cu-Cu$ , медь-алюминий  $Cu-Al$ , алюминий-алюминий  $Al-Al$ , контактная пара медь-алюминий с медным покрытием  $Cu-Al_{Cu}$ , контактная пара алюминий-медь с алюминиевым покрытием  $Cu_{Al}-Al$ , контактная пара медь-алюминий с медным покрытием с медной смазкой  $Al_{Cu}-Cu_{смазка}-Cu$ , контактная пара алюминий-алюминий с медными покрытиями  $Al_{Cu}-Al_{Cu}$ , контактная пара медь-алюминий с медной смазкой  $Cu-Cu_{смазка}-Al$ , контактная пара медь-алюминий с биметаллической прокладкой при обратной и прямой её установки  $Cu-Al/Cu-Al$  и  $Cu-Cu/Al-Al$ , соответственно. Напряжение на контактных переходах снималось при подключении проводников измерительных цепей в предельно допустимой близости к контактным поверхностям. Температура переходов контролировалась термопарами. Исследования проведены в условиях нагружения образцов импульсным током и длительным циклическим переменным током. Для измерения переходных сопротивлений конусных контактных пар использовалась конструкция, представленная на рисунке 2.9б).

### **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАНЕСЕНИЯ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Плазмодинамическое нанесение медного покрытия на алюминиевые электроконтактные поверхности реализуется в едином быстропротекающем (до  $10^{-3}$  с), многостадийном и многофакторном процессе. Можно выделить несколько основных стадий плазмодинамического процесса:

1. Инициирование дугового разряда в начале УК между его цилиндрической поверхностью и вершиной ЦЭ и формирование плазменной структуры типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой в КФПС (рисунок 2.2);
2. Ускорение плазменной структуры сильноточного разряда в УК КМПУ под действием газовой динамики (электротермический механизм) и пандеромоторных сил кондукционной и индукционной электродинамики с одновременной электроэрозионной наработкой меди с поверхности УК, её поступление в плазменную структуру сильноточного разряда и ускорение до сверхзвуковых скоростей;
3. Формирование и развитие ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи эрозионной электроразрядной медной плазмы в пространстве между срезом УК и обрабатываемой поверхностью алюминиевой мишени;
4. Воздействие плазменной струи на обрабатываемую поверхность алюминиевой мишени.

Все выделенные основные стадии процесса происходят последовательно с частичным совмещением во времени и пространстве.

### 3.1 Инициирование дугового разряда в ускорительном канале коаксиального магнитоплазменного ускорителя

В работе рассмотрено несколько способов инициирования дугового разряда в УК КМПУ. Суть всех способов заключается в использовании разрушаемой электропроводящей перемычки между вершиной ЦЭ, выполненного в виде медной шпильки диаметром  $10\div 12$  мм, и медной поверхностью в начале УК медного ствола, проходящей через КФПС в стеклопластиковом изоляторе. Геометрия КФПС играет важную роль в работе КМПУ, задавая уровень напряжения дуговой стадии разряда  $U_m$ , степень ограничения тока импульса электропитания  $I_m$  и мощности дугового разряда  $P_m$ . При величине зарядного напряжения  $U_{зар}$  около 3,0 кВ из опыта ранее проведенных исследований [75] определена примерная геометрия КФПС: диаметр  $d_{КФПС} \approx 7$  мм, длина  $l_{КФПС} \approx 9\div 10$  мм. При этом максимальное напряжение дуговой стадии разряда составляет  $U_m \approx 1,0\div 1,5$  кВ, что исключает переход в коммутационный режим и недостаточно полный разряд ёмкости накопителя, а также обеспечивает достаточно высокий КПД, около 80%, передачи энергии накопителя в нагрузку [76].

Основное внимание уделено двум способам инициирования дугового разряда, эскизно показанных на рисунке 3.1. Первый способ реализуется запатентованным устройством [70], схема которого представлена на рисунке 3.1а), согласно которому инициирование разряда в КФПС осуществляется с помощью нескольких электровзрывающихся медных проволочек ( $\varnothing=0,1$  мм), фонтанообразно проходящих через КФПС и электрически соединяющих в исходном состоянии вершину ЦЭ с цилиндрической поверхностью УК медного ствола в его начале. Второй способ (рисунок 3.1б) отличается тем, что разрушаемая перемычка выполнена в виде углеродного слоя, нанесенного на изоляционную поверхность КФПС с помощью графитового аэрозоля (марка CRAMOLIN).

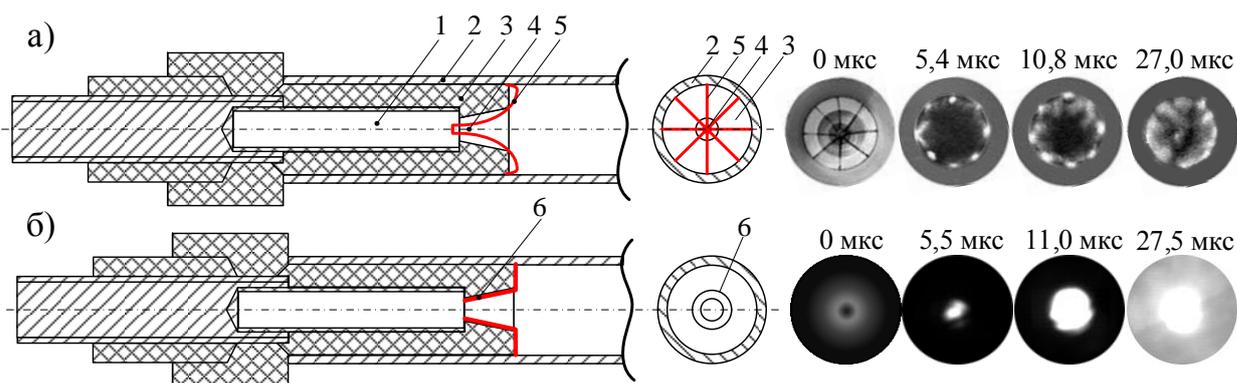


Рисунок 3.1 – Узел центрального электрода КМПУ и фотограммы процесса инициирования дугового разряда: а) медными проволочками; б) графитизацией поверхности КФПС: 1 – медный наконечник ЦЭ, 2 – медный ствол, 3 – стеклопластиковый изолятор, 4 – КФПС, 5 – медные проволочки, 6 - слой графита

На рисунке 3.2 представлены типичные осциллограммы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  при рассматриваемых способах инициирования дугового разряда и прочих одинаковых условиях ( $U_{зар}=2,0$  кВ,  $C=28,8$  мФ,  $l_{ук}=240$  мм,  $d_{ук}=20$  мм). Начало развертки соответствует срабатыванию управляемых разрядников накопителя и приложению напряжения источника электропитания к электродам ускорителя.

В первом случае (рисунки 3.1а и 3.2а) при сопротивлении медных проволочек порядка  $10^{-3}$  Ом практически сразу по цепи начинает протекать быстронарастающий ток разряда емкостного накопителя, определяемый его зарядным напряжением и начальными параметрами контура. При достижении током некоторого уровня происходит электрический взрыв медных проводников, как это видно на кадрах высокоскоростной фотосъемки (рисунок 3.1а), после чего начинает формироваться плазменная структура дугового разряда типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой. Напряжение электровзрывного импульса в течение  $\sim 18$  мкс плавно снижается до уровня дуговой стадии разряда в момент времени  $t_1$ , который следует считать началом работы ускорителя. Включение сопротивления дуги в разрядный контур приводит к некоторому снижению  $di/dt$ . За счёт

протекания по плазме разряда нарастающего тока происходит ускорение плазменной структуры в коаксиальной системе, что сопровождается плавным ростом напряжения  $U(t)$  и мощности разряда  $P(t)$ .

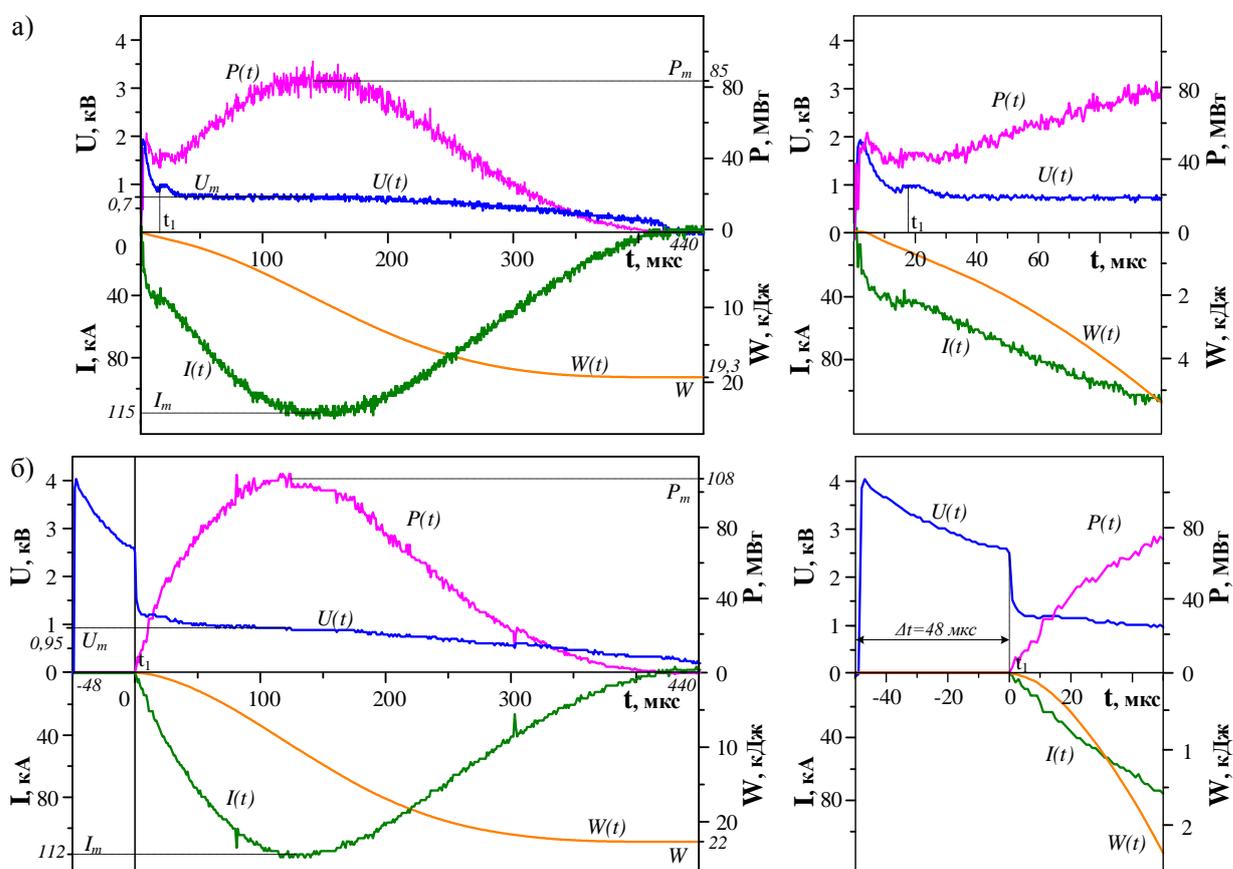


Рисунок 3.2 – Типичные осциллограммы тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$ , кривые мощности  $P(t)$  и подведённой энергии  $W(t)$ : а) иницирование разряда проволочками; б) иницирование путём графитизации поверхности КФПС

В случае иницирования разряда путём графитизации поверхности КФПС (рисунки 3.1б и 3.2б) наблюдается некоторое изменение характера начальной стадии процесса работы КМПУ. При подаче напряжения на электроды ускорителя по углеродной перемычке начинает протекать аperiodический ток, обусловленный величиной напряжения и сопротивления контура, включающего начальное сопротивление углеродной перемычки. Величина сопротивления составляет порядка 1000 Ом, а протекающий по перемычке ток порядка нескольких ампер. Под действием этого тока перемычка нагревается и электрически разрушается через некоторое время  $\Delta t$ . Возникает дуговой разряд по всей поверхности КФПС, как это видно на

кадрах высокоскоростной съёмки (рисунок 3.1б). Сопротивление формирующегося дугового разряда быстро уменьшается, что сопровождается снижением напряжения на электродах до уровня дуговой стадии разряда. Быстрому снижению напряжения соответствует начало протекания быстронарастающего тока в момент времени  $t_I$  (рисунок 3.2б), который, в этом случае, следует считать началом работы КМПУ.

При реализации данного способа длительность безтоковой паузы  $\Delta t$  определяется величиной напряжения на электродах КМПУ и активным сопротивлением углеродной перемычки  $R_0$  при прочих одинаковых условиях и геометрии КФПС. На рисунке 3.3 представлены экспериментальные данные, показывающие влияние величины сопротивления  $R_0$  на длительность безтоковой паузы  $\Delta t$ . Полученная зависимость имеет минимум с близким к нулю значением  $\Delta t$ . Этот провал на кривой смещается влево с увеличением начального напряжения и тока, протекающего по перемычке. Повышается интенсивность нагрева её материала и сокращается время перехода в плазменное состояние.

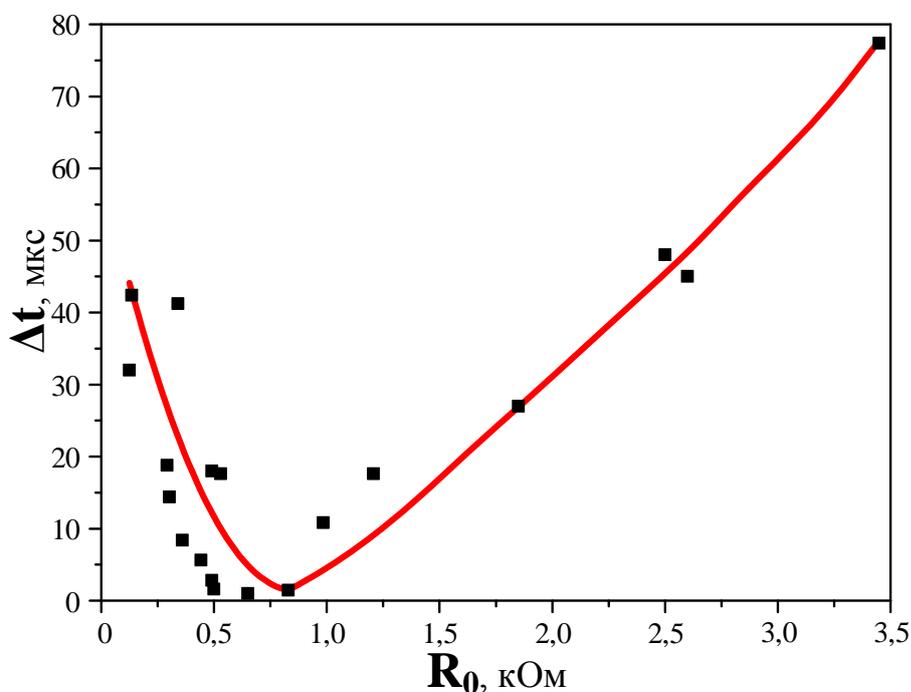


Рисунок 3.3 – Зависимость безтоковой паузы  $\Delta t$  от сопротивления  $R_0$

При зарядном напряжении накопителя 2,0÷3,0 кВ минимальное  $\Delta t$  достигается при  $R_0=400\div600$  Ом. Увеличение длительности безтоковой паузы  $\Delta t$  с уменьшением сопротивления  $R_0$  ниже оптимального (300÷600 Ом) обусловлено тем, что снижение  $R_0$  достигается увеличением толщины углеродного слоя и массы углеродного материала. Это, в свою очередь, требует большей энергии для нагрева и перевода в плазменное состояние. Получение углеродной перемычки с оптимальной величиной  $R_0$  достигается трёх- или четырёхкратным нанесением на цилиндрическую поверхность КФПС и торец изолятора ЦЭ токопроводящего графитового спрея с сушкой после каждого нанесения (рисунок 3.1б). Разброс экспериментальных точек на рисунке 3.3 вызван неоднородностью поверхности стеклопластикового изолятора и нанесенного углеродного слоя, а также неидеальностью электрического контакта перемычки с электродами ускорителя.

Нестабильность  $\Delta t$  в пределах до ~30 мкс (или  $R_0$  до ~1500 Ом) фактически не оказывает влияния на работу ускорителя, потери энергии и изменение рабочего тока. Однако она усложняет синхронизацию при регистрации быстропротекающих процессов (осциллографирование, видеосъёмка). В большей степени эта нестабильность отрицательно сказывается при включении дополнительных систем: отсечки тока, включении внешних электромагнитных устройств, а также при циклическом режиме работы КМПУ с задаваемыми паузами между последовательными плазменными выстрелами. В этой связи можно высказать основное требование к углеродной перемычке – её сопротивление должно составлять ~300÷600 Ом при напряжении источника от 2 до 3 кВ.

Сравнительный анализ энергетических характеристик работы КМПУ при использовании двух рассматриваемых способов инициирования дугового разряда показал их практическую идентичность по эффективности работы ускорителя. Основными недостатками первого способа с медными проволочками (рисунок 3.1а и 3.2а) являются низкая технологичность сборки узла ЦЭ и снижение ресурса его работы из-за необходимости осевого

отверстия в наконечнике ЦЭ для присоединения и закрепления в нём металлических проволочек. Наиболее целесообразным представляется использование второго способа – углеродной перемычки (графитизации), которая наносится на поверхность изолятора в КФПС с помощью углеродного спрея. Этот способ автоматически реализуется при повторных выстрелах в частотном режиме работы КМПУ. Инициирование последующих разрядов обеспечивается в режиме автопробоя промежутка между электродами по поверхности изолятора в КФПС, обладающей достаточной проводимостью в результате «загрязнения» от предыдущих плазменных выстрелов. Этот способ более прост, удобен и технологичен, а также позволяет повысить ресурс наконечника ЦЭ. Более того, при использовании графитового наконечника ЦЭ он является единственно возможным способом.

### **3.2 Ускорение электроразрядной плазмы и исследование динамических характеристик плазменной структуры**

После инициирования дугового разряда и формирования в КФПС плазменной структуры типа Z-пинч с круговой плазменной перемычкой начинается её ускорение в коаксиальной системе. Высокая эффективность этого процесса обеспечивается одновременным использованием трёх основных механизмов преобразования электромагнитной энергии в кинетическую: электротермического, кондукционного электродинамического и индукционного электродинамического [81-83]. Начальная фонтанообразная конфигурация плазменной структуры задаётся геометрией КФПС. По плазменному жгуту в КФПС протекает быстронарастающий ток электропитания, магнитное поле которого сжимает плазменный проводник, обеспечивая устойчивое состояние при его удлинении до тех пор, пока магнитное внешнее давление не снизится ниже внутреннего газокинетического давления в плазме. На начальном этапе разгон круговой

токонесущей плазменной перемычки обеспечивается по электротермическому механизму за счёт расширения газа, нагреваемого плазмой. Одновременно на плазменную перемычку в образовавшейся системе типа коаксиального рельсотрона [84] действует сила Ампера-Лоренца  $F_L$ :

$$F_L = \frac{L' \cdot I^2}{2}, \quad (3.1)$$

где  $L'$  - погонная индуктивность коаксиальной системы,  $I$  – рабочий ток.

Сила Ампера-Лоренца пропорциональна квадрату тока, протекающего по плазменному жгуту (Z-пинчу). Разгон плазменной структуры в УК происходит по продольной оси области, частично охваченной индуктором-соленоидом внешней индукционной системой (рисунок 2.2), аксиальное магнитное поле которого направлено согласно направлению ускорения, обеспечивает дополнительное ускорение плазмы. Однако в большей степени оно стабилизирует устойчивое состояние плазменного жгута и способствует повышению эффективности работы силы кондукционной электродинамики.

На рисунке 3.4 на общем временном интервале работы КМПУ приведены типичные осциллограммы напряжения  $U(t)$  и тока  $I(t)$ , расчётные кривые мощности  $P(t)$  и энергии  $W(t)$ , а также характерные кадры высокоскоростной съёмки процесса истечения сверхзвуковой плазменной струи из УК КМПУ в направлении мишени-подложки и графики изменения скорости в УК и затухания скорости фронта головной ударной волны на трассе от среза медного ствола до мишени. Перед прозрачным окном КР в поле зрения высокоскоростной фотокамеры устанавливался искровой разрядник цепи разряда импульсного вспомогательного источника, запускаемого системой синхронизации в заданный момент времени  $t_1$ . Импульс тока разряда осциллографировался, а вспышка на искровом промежутке фиксировалась на кадрах фотосъёмки. Это позволило сопоставить во времени энергетические характеристики работы КМПУ, ускорение плазмы в УК и процесс истечения плазменной струи.

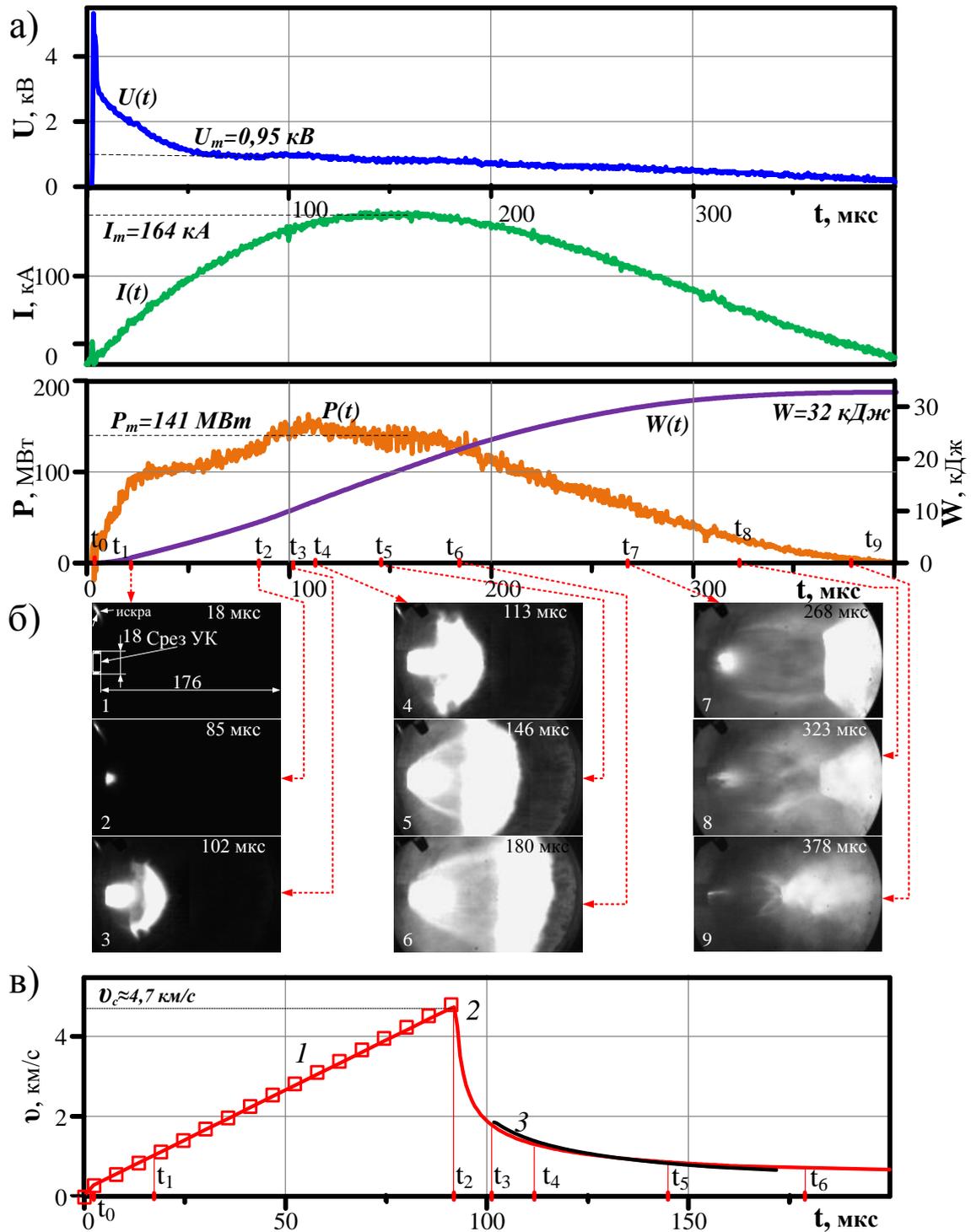


Рисунок 3.4 – Совмещенные во времени типичные данные регистрации: а) осциллограммы  $U(t)$  и  $I(t)$ , кривые  $P(t)$  и  $W(t)$ ; б) последовательные выборочные кадры высокоскоростной съёмки истечения сверхзвуковой плазменной струи из УК; в) графики изменения во времени скорости фронта головной ударной волны плазменной струи: 1 – в УК, 2 – затухания скорости фронта струи в свободном пространстве, 3 – затухания скорости расширения головной части плазменной струи в свободном пространстве

Представленные на рисунке 3.4 данные типичны для экспериментов при следующих начальных условиях:  $C=14,4$  мФ,  $U_{зар}=2,5$  кВ,  $d_{УК}=14$  мм,  $l_{УК}=213$  мм, внешняя среда – аргон  $P_0=1,0$  атм. На осциллограммах начало развертки  $t=0$  соответствует снижению напряжения электровзрывного импульса, разрушению переключки, образованию дугового разряда и началу работы ускорителя. Срабатывание вспомогательного разрядника в момент времени  $t_1$  отмечено короткими импульсами на кривых  $U(t)$  и  $I(t)$  (осциллограмма тока вспомогательного разрядника не приводится) и зафиксировано вспышкой на кадре 1 фотограммы, на которой показаны (для определения масштаба) реальные размеры внешнего диаметра медного ствола (18 мм) и видимого участка трассы (176 мм) в направлении к алюминиевой мишени. Указанное на кадре 1 время 18 мкс отсчитывается от начала развертки на осциллограммах.

На кадре 2 через 85,0 мкс от начала работы КМПУ наблюдается выход светящейся плазмы из УК. По времени это происходит вблизи максимума развиваемой мощности. Приведенные выборочно характерные кадры высокоскоростной фотосъёмки демонстрируют процесс формирования и развития в пространстве и времени ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи электроразрядной эрозионной плазмы, истекающей из УК КМПУ. Характерной особенностью этого процесса является очень быстрое увеличение площади фронтальной поверхности головной ударной волны, испытывающей газодинамическое сопротивление покоящейся газообразной среды. На этапе формирования первой «бочки» ударно-волновой структуры форма фронта головной ударной волны близка к сферической. С её свободной поверхности, как это видно, происходит «смывание» и распыление в газообразной среде материала струи, накапливаемого в скачке уплотнения.

Распылённый в жидкой фазе материал кристаллизуется с образованием высокодисперсных частиц, размеры которых обусловлены скоростью распыления и параметрами состояния газообразной среды в КР. В

соответствии с классическими закономерностями газовой динамики сверхзвуковых течений в свободном пространстве скорость фронта головной ударной волны быстро затухает за счёт сопротивления покоящейся среды в условиях очень быстрого увеличения площади фронта головной ударной волны. По самым общим представлениям [84-85] замедление  $A$  прямо пропорционально квадрату скорости  $v$  и параметру замедления  $k$ :

$$A = k \cdot v^2 \quad (3.2)$$

Это выражение качественно показывает, что замедление сильно возрастает с увеличением начальной скорости.

Параметр замедления  $k$  оценочно можно представить в виде:

$$k = \frac{\rho \cdot S \cdot C_x}{2 \cdot m}, \quad (3.3)$$

где  $\rho$  – плотность газообразной среды,  $C_x$  – коэффициент лобового сопротивления движущегося тела,  $S$  – площадь максимального фронтального сечения движущегося тела,  $m$  – масса движущегося тела.

Из этого выражения следует вывод о доминирующем влиянии на параметр замедления площади фронтального сечения, что в большей степени определяет замедление ударного фронта.

Видеосъёмка процесса истечения плазменной струи производилась во всех экспериментах с различными энергетическими и конструктивными параметрами КМПУ и при разных режимах его работы. По кадрам полученных фотограмм, аналогичным приведенным на рисунке 3.4, строились кривые закона движения ударного фронта – зависимости удлинения струи в осевом направлении от времени  $l(t)$ . Эти зависимости аппроксимировались аналитической функцией, дифференцирование которой давало функцию затухания скорости во времени  $v(t)$  или от расстояния от среза УК  $v(l)$ . Её экстраполяция к срезу УК на интервале времени менее 5,0 мкс даёт оценочное значение скорости ударного фронта на срезе УК  $v_c$ . Такая зависимость для рассматриваемого примера приведена на рисунке 3.4. Оценочное значение скорости  $v_c$  составляет  $\sim 4,7$  км/с, что хорошо

согласуется с величиной скорости на срезе УК, определенной исходя из предположения о разгоне плазмы в УК с постоянным ускорением:

$$v_c = \frac{2 \cdot \ell_{\text{УК}}}{\Delta t_{0-2}} = \frac{2 \cdot 210}{85} = 4,94 \text{ км/с}, \quad (3.4)$$

где  $\Delta t_{0-2}$  – интервал от момента  $t_0$  до момента  $t_2$  по рисунку 3.4.

Соответствующая предполагаемому закону ускорения линейная зависимость на интервале  $\Delta t_{0-2}$  (кривая 1) также показана на рисунке 3.4. Здесь же приведена и экспериментальная зависимость скорости увеличения площади максимального сечения плазменной струи во времени (кривая 3). Видно, что эта зависимость практически повторяет форму кривой затухания скорости ударного фронта (кривая 2), что свидетельствует о доминировании этого фактора замедления.

Фотограмма демонстрирует формирование «бочкообразной» ударно-волновой структуры, границей первой «бочки» которой является диск Маха – скачок уплотнения в виде яркосветящегося диска в плоскости, перпендикулярной продольной оси течения. По мере нарастания мощности разряда  $P(t)$  и скорости течения он смещается вправо. Его положение в пространстве стабилизируется после прекращения роста мощности разряда (кадр 7), в рассматриваемом случае на расстоянии 130 мм от среза УК. Такое положение практически сохраняется в течение некоторого промежутка времени  $\Delta t = 100$  мкс до начала заметного снижения мощности разряда в УК. Визуально наблюдаемый интервал стабильного положения скачка уплотнения Маха является этапом квазистационарного течения и несколько смещен по времени относительно условно принятого интервала слабоменяющейся мощности разряда. Это отставание во времени обусловлено инерционностью и конечной скоростью массопереноса в УК и в границах ударно-волновой структуры. В этом скачке уплотнения накапливается материал струи, скорость массопереноса снижается до дозвуковой, возрастают давление и температура, о чём свидетельствует яркое свечение этой области. За диском Маха формируется вторая «бочка» за счёт

возобновления сверхзвукового течения материала, накопленного в области уплотнения. Далее по мере снижения мощности разряда и скорости течения в УК бочкообразная структура постепенно схлапывается, диск Маха смещается в обратном направлении, и течение переходит в дозвуковой режим. В дозвуковом режиме из УК выносятся расплавленный металл, что является основным недостатком плазмодинамического метода. При низкоскоростном воздействии металлического расплава на обрабатываемую поверхность нарушается однородность и сплошность нанесенного покрытия, а также происходит эрозия поверхности непрочного и легкоплавкого материала – алюминиевого сплава. Кроме того, это снижает эффективность использования, как электромагнитной энергии, так и расходного материала ствола коаксиального ускорителя.

В большом числе экспериментов наряду с регистрацией энергетических характеристик  $U(t)$  и  $I(t)$  производилась высокоскоростная фото и видеосъемка процесса формирования и развития во времени ударно-волновой структуры сверхзвуковой плазменной струи, истекающей из УК КМПУ. Очевидно, что динамика сверхзвукового течения определяется рядом основных параметров ускорительной системы: током разряда, его мощностью и энергией,  $d_{УК}$ ,  $l_{УК}$  и качеством поверхности, а также давлением (плотностью) покоящейся газообразной атмосферы в пространстве КР.

В работе проведены экспериментальные исследования влияния  $d_{УК}$  и  $l_{УК}$  на динамические параметры плазменной струи после выхода из УК. На рисунке 3.5 приведены типичные фотограммы выхода плазмы из УК диаметрами 12 мм, 14 мм, 16 мм, полученные в экспериментах с близкими энергетическими параметрами и другими условиями ( $C=14,4$  мФ,  $U_{зар}=2,5$  кВ,  $l_{УК}=213$  мм, внешняя среда – аргон  $P_0=1,0$  атм). Фотокадры наглядно демонстрируют процессы формирования ударно-волновой структуры импульсных плазменных струй, истекающих из УК по направлению к обрабатываемой поверхности алюминиевой плоской мишени, расположенной на расстоянии  $l_{см-м}=175\div 420$  мм от среза УК.

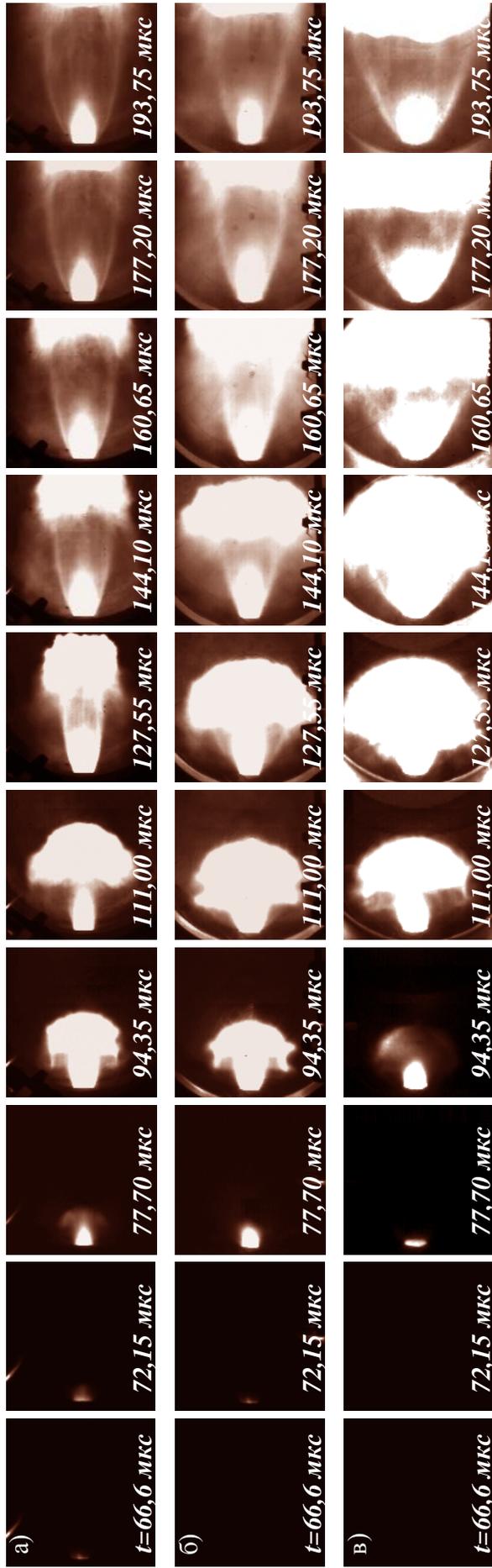


Рисунок 3.5 – Фотограммы выхода плазмы из УК и развития ударно-волновой структуры сверхзвуковых струй медной электроэрозийной плазмы при разных  $d_{УК}$ : а) 12 мм; б) 14 мм; в) 16 мм

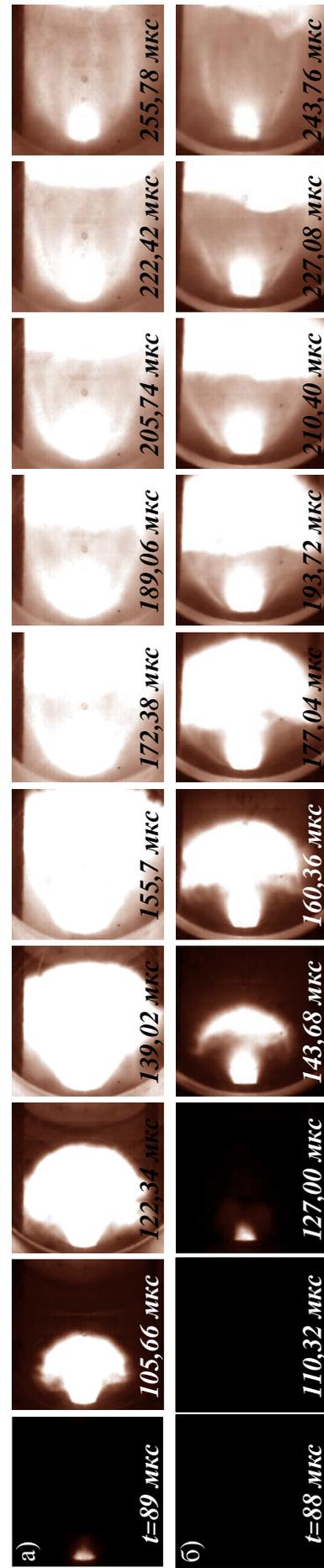


Рисунок 3.6 – Фотограммы выхода плазмы из УК и развития ударно-волновой структуры сверхзвуковых струй медной электроэрозийной плазмы при  $d_{УК}=16$  мм и разных  $l_{УК}$ : а) 200 мм; б) 300 мм

Из сравнения фотограмм, совмещенных по времени от начала работы КМПУ, видно, что с уменьшением  $d_{УК}$  возрастает ускорение плазменной структуры в УК, её фронт раньше выходит из УК с большей начальной скоростью на срезе  $v_c$ , чем в случаях с бóльшим  $d_{УК}$ . При этом, на всём временном периоде наблюдения струя, истекающая из УК меньшего калибра, отличается меньшим поперечным размером. Это, естественно, приводит к уменьшению площади медного покрытия на поверхности мишени при одинаковых  $l_{ст-м}$ .

По представленным на рисунке 3.5 фотограммам построены кривые затухания скорости головной ударной волны после её выхода из УК от расстояния в направлении мишени (рисунок 3.7). Начальное значение скорости при  $l=0$  является скоростью на срезе УК  $v_c$ . Для классического рельсового ускорителя согласно [84, 86-87] развиваемая в нём скорость плазменного поршня может быть оценена по выражению:

$$v = \sqrt{\frac{I \cdot B}{\rho_0 \cdot d_{сеч}}}, \quad (3.5)$$

где  $I$  – величина силы тока,  $B$  – индукция магнитного поля,  $\rho_0$  – плотность среды,  $d_{сеч}$  – диаметр плазменного поршня по Миделеву сечению.

Согласно этому выражению при одинаковых энергетических параметрах в атмосферных условиях скорость фронта плазменного проводника будет зависеть в основном от величины диаметра сечения Миделя, который применительно к КМПУ можно считать равным  $d_{УК}$ . Полученные величины  $v_c$  для разных  $d_{УК}$  (12 мм, 14 мм, 16 мм) достаточно близки к величинам скоростей, рассчитанным исходя из предположения о равноускоренном разгоне плазменной структуры в УК КМПУ и рассчитанным по приведённому выше выражению (3.5) из [84]. Оценочные значения скорости  $v_c$  для рассматриваемых условий при  $d_{УК}$ : 12 мм, 14 мм, 16 мм соответственно равны ~5,10 км/с, 4,50 км/с, 3,65 км/с.

На рисунке 3.6 приведены в сравнении типичные фотограммы выхода из УК и развития ударно-волновой структуры сверхзвуковых плазменных

струй при разных  $\ell_{УК}$  200 мм (а) и 300 мм (б). Естественно, что при одинаковых  $d_{УК}=16$  мм и энергетических параметрах плазменных выстрелов ( $U_{зар}=3,5$  кВ,  $C=14,4$  мФ) выход плазмы из более короткого ствола с  $\ell_{УК}=200$  мм происходит примерно на  $\sim 40$  мкс раньше, чем при  $\ell_{УК}=300$  мм. Анализ фотограмм показал, что при  $\ell_{УК}=200$  мм скорость головной ударной волны на срезе УК составляет примерно  $v_c \approx 4,0$  км/с, а при  $\ell_{УК}=300$  мм она возрастает  $v_c \approx 4,5$  км/с. Такое вполне закономерное увеличение скорости для указанных величин  $\ell_{УК}$  обусловлено повышением эффективности использования электромагнитной энергии при увеличении времени нахождения плазмы в УК большей длины, обеспечивающей практически равноускоренный разгон плазменной структуры при близкой к постоянной максимальной мощности разряда и величины тока на временном интервале работы КМПУ до  $\sim 200$  мкс (рисунок 3.4).

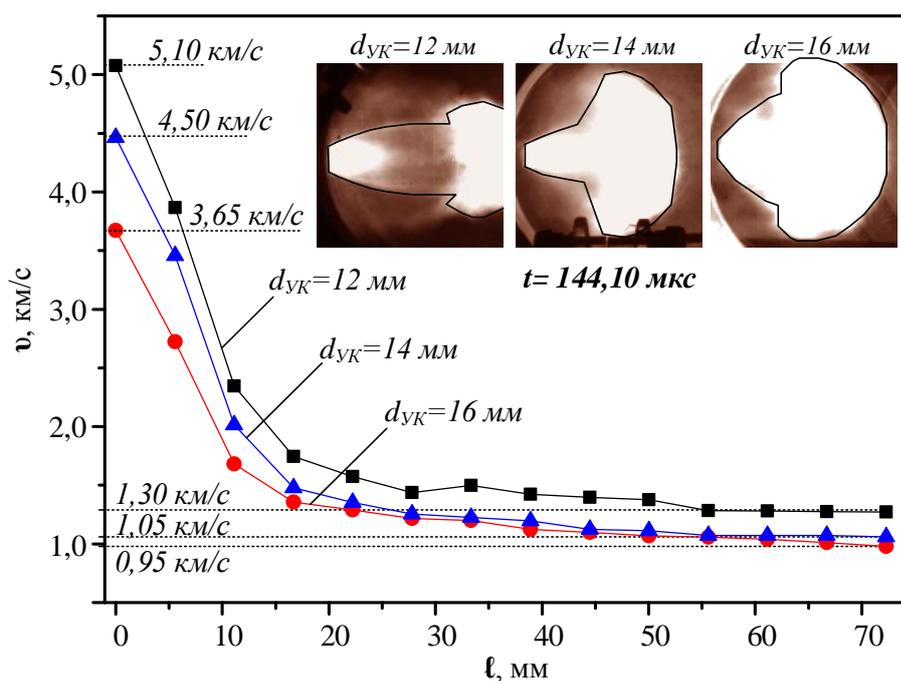


Рисунок 3.7 – Кривые затухания скорости фронта головной ударной волны в пространстве после выхода из УК

Во всех случаях после выхода головной ударной волны из УК с некоторой начальной скоростью  $v_c$  начинается её экспоненциальное затухание во времени и по мере удаления от среза УК, как это видно по кривым  $v(\ell)$  на рисунке 3.7. Их сравнение показывает заметное повышение

интенсивности затухания с ростом величины начальной скорости  $v_c$  на срезе УК в соответствии с формулой (3.5). На расстоянии от среза УК около 70 мм затухание сильно ослабевает, а скорость фронта головной ударной волны практически стабилизируется на уровне  $\sim 1,3$  км/с при  $d_{УК}=12$  мм и  $\sim 1,0$  км/с при  $d_{УК}$  равном 14 мм и 16 мм. На рисунке 3.7 приведены характерные фотокадры, показывающие геометрию ударно-волновой структуры плазменных струй при разных  $d_{УК}$ , соответствующие одному моменту времени  $\sim 144,0$  мкс с начала процесса. Из их сравнения следует, что увеличение  $d_{УК}$  позволяет генерировать плазменную струю с бóльшим сечением. Это, возможно, обеспечит повышение площади медного покрытия.

Специально подобранные и приведённые на рисунках 3.5-3.7 данные наглядно демонстрируют влияние конструктивных параметров ускорителя, а именно диаметра ускорительного канала  $d_{УК}$  и его длины  $l_{УК}$ , на величину скорости головной ударной волны сверхзвукового течения на срезе УК  $v_c$ , которая в дальнейшем экспоненциально затухает по мере движения в покоящейся атмосфере в направлении мишени. Однако более сильное влияние на скорость плазмы в УК оказывают энергетические параметры импульса электропитания, такие как амплитуда тока импульса  $I_m$ , мощность разряда  $P_m$  и потребляемая ускорителем энергия  $W$ . Степень их влияния, естественно, меняется с изменением геометрии УК. Совместное изменение и оптимизация энергетики электропитания и геометрии УК даёт возможность опытным путём подобрать совокупность параметров плазодинамической системы, обеспечивающих требуемую динамику плазменной струи и качество получаемого покрытия на металлической поверхности.

На рисунке 3.8 представлены результаты экспериментов при близких к оптимальным соотношениям  $d_{УК}$  и  $l_{УК}$  медных стволов (кривые 1:  $d_{УК}=16$  мм,  $l_{УК}=200$  мм; кривые 2:  $d_{УК}=12$  мм,  $l_{УК}=160$  мм) в виде корреляционных зависимостей  $v_c$  от  $I_m$ ,  $P_m$ ,  $W$ , средней мощности разряда  $P_{cp}$  и средней мощности разряда на интервале 100 мкс  $P_{cp100}$ . Во всех вариантах

представления имеет место закономерное увеличение  $v_c$  с ростом энергетических параметров.

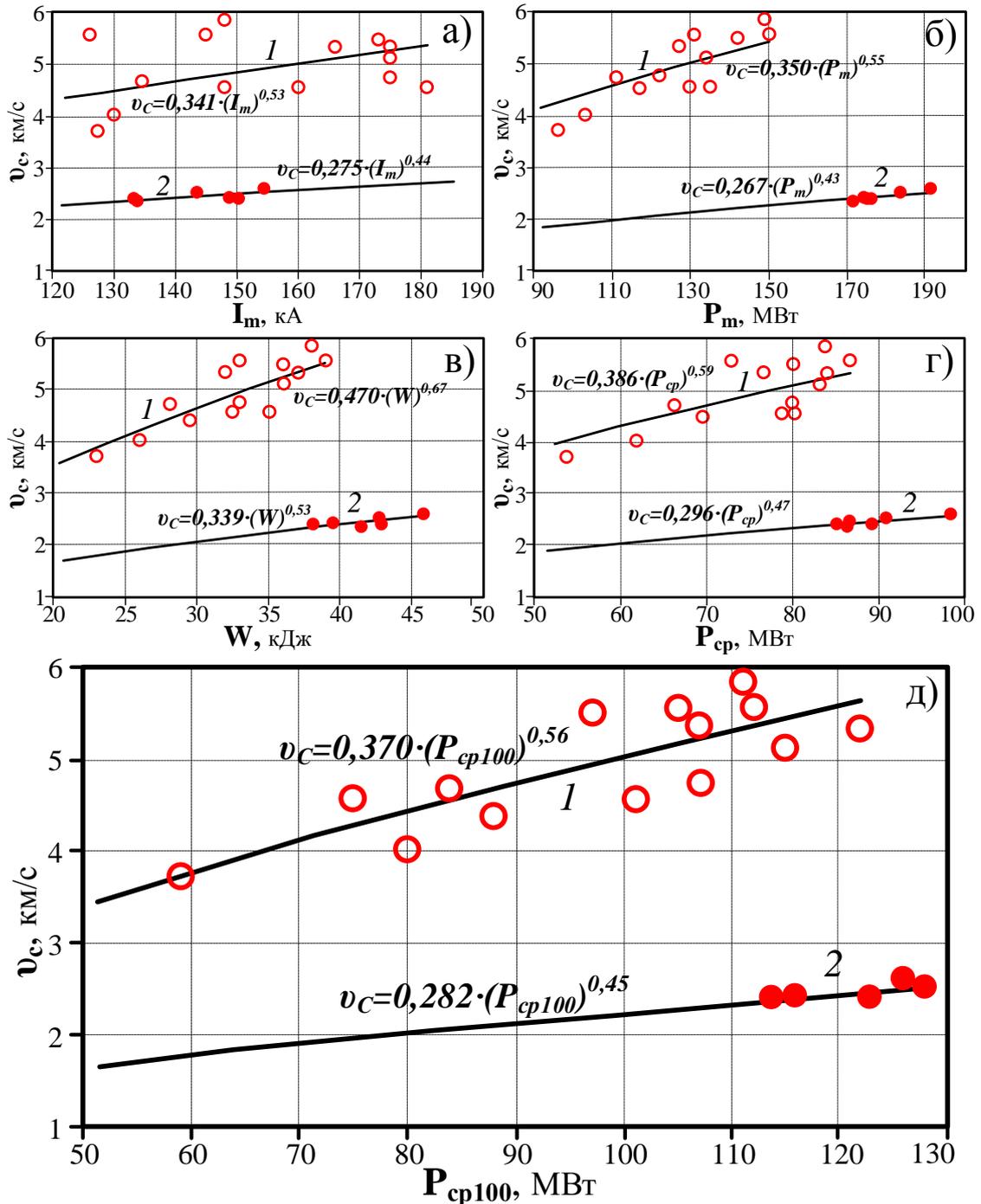


Рисунок 3.8 – Экспериментальные корреляционные зависимости скорости головной ударной волны сверхзвуковой плазменной струи на срезе УК от энергетических параметров импульса электропитания: а) максимального тока  $I_m$ ; б) максимальной мощности  $P_m$ ; в) подведённой энергии  $W$ ; г) средней мощности  $P_{cp}$ ; д) средней мощности на интервале 100 мкс  $P_{cp100}$ : 1 -  $d_{УК}=16$  мм,  $\ell_{УК}=200$  мм; 2 -  $d_{УК}=12$  мм,  $\ell_{УК}=160$  мм

Это связано с увеличением энерговклада в нагрузку, то есть с увеличением энергии, диссипированной в УК и частично преобразованной в кинетическую посредством трёх механизмов преобразования энергии. В отличие от рельсового ускорителя, классического и коаксиального, в Z-пинч-ускорителе по его продольной оси всё время существует ускоренно удлиняющийся плазменный жгут Z-пинч, излучающий часть вкладываемой энергии в объём УК, которая частично преобразуется в кинетическую энергию движущейся плазмы по электротермическому механизму, а также расходуется на нагрев и эрозию стенки УК. Поэтому из предложенных на рисунке 3.8 представлений наиболее адекватной следует считать зависимость  $v_c(P_{cp100})$  средней мощности разряда на временном интервале работы КМПУ до выхода плазмы из УК в свободное пространство. Анализ имеющихся экспериментальных результатов показал, что средняя мощность (за время первого прохождения плазмы по УК) незначительно отличается от средней мощности  $P_{cp}$  полного импульса, которая принята в качестве аргумента в работе [75]. Для точного определения средней мощности на интервале первого прохождения по УК необходимо знать для каждого плазменного выстрела длительность этого интервала. В экспериментах с синхронной видеосъёмкой погрешность его определения составляет около  $\pm 10$  мкс. В случае, описанном выше (рисунок 3.4), этот интервал времени от начала процесса в КМПУ составляет около 85 мкс при длине УК  $l_{УК}=213$  мм. Это даёт основание для принятия допущения в виде некоторого среднего времени прохождения плазмы по УК, а именно 100 мкс.

Как видно из зависимостей на рисунке 3.8, значения  $v_c$ , полученные при  $d_{УК}=16$  мм и  $l_{УК}=200$  мм, значительно выше скоростей, полученных при  $d_{УК}=12$  мм и  $l_{УК}=160$  мм. Это обусловлено различием  $l_{УК}$ . Увеличенная  $l_{УК}$  до 200 мм в рассматриваемых условиях обеспечивает повышение  $v_c$  при увеличенном  $d_{УК}$ . На рисунке 3.8д) приведена зависимость  $v_c(P_{cp100})$ , построенная исходя из сделанного допущения, когда средняя мощность на начальном интервале работы КМПУ 100 мкс определялась как отношение

величины подведённой энергии на этом интервале  $W_{100}$  к его длительности. Эта зависимость должна достаточно адекватно отвечать закономерности изменения  $v_c$  при изменении энергетики системы с указанной геометрией УК при используемых начальных параметрах источника электропитания. Учитывая реальные физические особенности КМПУ эрозионного типа наиболее правильно представленные зависимости (рисунок 3.8), в том числе  $v_c(P_{cp100})$ , аппроксимировать степенной функцией вида  $v_c = A \cdot x^B$ . С ростом энергетических параметров импульса электропитания должна увеличиваться ускоряемая масса за счёт электроэрозионной наработки меди с поверхности УК, масса которой пропорциональна квадрату подведённой энергии [88]. Это приводит, естественно, к замедлению роста скорости с увеличением энергетических параметров в рельсотронном ускорителе с плазменным поршнем – с ростом тока [84], в пинч-ускорителе – с ростом подведённой энергии или мощности разряда [75, 88]. Полученные эмпирические выражения, приведённые на рисунке 3.8, могут быть использованы для определения расчётным путём энергетических параметров на основе КМПУ с медными электродами для получения требуемых динамических характеристик сверхзвуковых струй медной эрозионной плазмы.

### **3.3 Электроэрозионная наработка медного материала с поверхности ускорительного канала**

Процесс электроэрозионной наработки медного материала с поверхности УК практически полностью совмещён по времени с ускорением плазменной структуры разряда в УК. В работах [75, 76, 88] показано, что интенсивность наработки металлов определяется подведённой и потреблённой КМПУ энергией  $W$ , а более точно, удельной подведённой энергией на единицу объёма ускорительного канала  $W/V_{ук}$ . Этот параметр введён в работе [75] и позволяет получить обобщённую закономерность изменения удельной интегральной электроэрозионной наработки

металлического материала с поверхности УК независимо от  $d_{УК}$  в диапазоне его изменения от 9 мм до 18 мм при близкой к оптимальной  $l_{УК}$ . За оптимальную  $l_{УК}$  принимается величина длины, на которой происходит износ поверхности и наработка материала при конкретных энергетических параметрах. Так для титанового ствола [88] с  $d_{УК}=21$  мм при подведённой энергии около 100 кДж, оптимальная длина составила около 200 мм.

На рисунке 3.9 приведены фотографии развёрнутых медных стволов разных калибров с эродированной поверхностью УК после плазменных выстрелов с различной энергией  $W$ . Как и в случаях других металлов, например титана [75, 88], электроэрозионный след на медной поверхности представляет собой совокупность большого числа параллельных треков из затвердевшего расплава меди. Этот факт, а также наблюдаемое с помощью высокоскоростной видеосъёмки (рисунок 3.4-3.6) свечение дискретных каналов при выходе из УК плазменной струи, показывают, что ускоряемые круговые плазменные перемычки не являются сплошными дисками, а состоят из нескольких дискретных токоведущих каналов, отходящих от Z-пинча и симметрично замыкающихся на цилиндрическую поверхность медного УК. Точки контакта этих каналов ускоренно перемещаются по поверхности УК по спиралевидной траектории. В них происходит плавление металла за счёт джоулева тепловыделения от протекающего тока высокой плотности. Образующийся расплав меди захватывается ускоряемой плазменной структурой разряда, переходит в плазменное состояние и выносятся из УК. В зависимости от  $d_{УК}$  меняется скорость плазменной струи, как это показано выше.

Фотографии развёрнутых поверхностей УК (рисунок 3.9) показывают, что и в случае использования медных стволов с толщиной стенки менее 2,5 мм эрозионные треки имеют спиралевидную траекторию с увеличивающимся шагом в направлении ускорения. Об этом свидетельствует увеличивающийся наклон треков к продольной оси развёрнутого УК. Причём увеличение наклона возрастает с ростом ускорения плазмы и конечной

скорости на срезе УК при увеличении энергетики процесса и уменьшении  $d_{\text{УК}}$ . Как уже отмечалось выше, спиралевидная траектория эрозионных треков обусловлена вращением плазменной перемычки вследствие взаимодействия магнитных полей токов, протекающих по дискретным каналам перемычки, с аксиальным магнитным полем внешнего индуктора, которое проникает в объём УК, несмотря на экранирование медной (с высокой проводимостью) стенкой ствола толщиной от 1 мм до 2,5 мм.

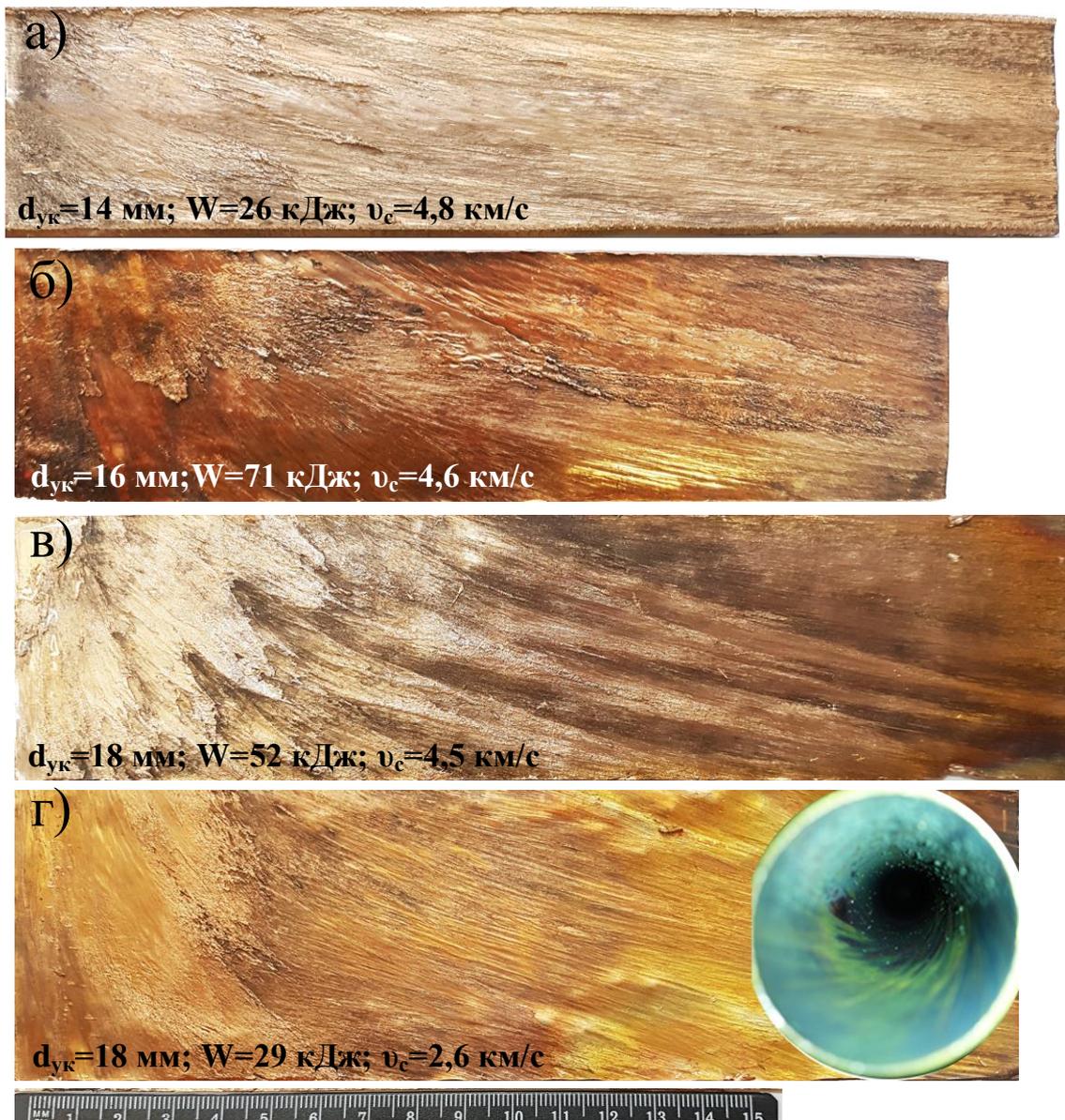


Рисунок 3.9 – Фотографии развёрнутых медных стволов с эродированной поверхностью УК после плазменных выстрелов: а)  $d_{\text{УК}} = 14 \text{ мм}$ ,  $W = 26 \text{ кДж}$ ,  $v_c = 4,8 \text{ км/с}$ ; б)  $d_{\text{УК}} = 16 \text{ мм}$ ,  $W = 71 \text{ кДж}$ ,  $v_c = 4,6 \text{ км/с}$ ; в)  $d_{\text{УК}} = 18 \text{ мм}$ ,  $W = 52 \text{ кДж}$ ,  $v_c = 4,5 \text{ км/с}$ ; г)  $d_{\text{УК}} = 18 \text{ мм}$ ,  $W = 29 \text{ кДж}$ ,  $v_c = 2,6 \text{ км/с}$

Следует отметить, что наличие внешнего индуктора способствует не только повышению динамики ускорения, но и увеличению электроэрозионной наработки меди. Аксиальное поле, сжимающее ствол, способствует радиальному перемещению массы расплавленного металла к оси УК и более полному её захвату и вовлечению в движение плазменной структуры разряда с последующим выносом из УК. Поэтому выносимая из ствола масса металла значительно больше, чем в случае использования классического Z-пинч-ускорителя (без внешнего индуктора) [75].

Величина эродированной и вынесенной из УК массы определяется уровнем и временем протекания тока через точки контакта, температурой плавления и теплопроводностью металла ствола, а также энергией, излучаемой токоведущим плазменным жгутом, существующим в осевой области УК в течение всего времени работы. Именно наличие этого фактора является причиной того, что электроэрозионная наработка определяется не величиной перенесённого заряда, что характерно для рельсового магнитоплазменного ускорителя [89] и искровых разрядников [90], а является функцией величины подведённой и выделившейся в УК энергии [91].

В связи с вышесказанным и особенностями медного материала ствола, заключающимися в относительно низкой температуре плавления, очень высокой теплопроводности и электропроводности и низкой механической прочности, в работе проведён анализ влияния энергетических параметров плазменных выстрелов и геометрии УК на характеристики электроэрозионной наработки меди. Для оценки влияния этих факторов выполнено выборочное препарирование однократно использованных медных стволов и определены величины удельного дифференциального износа  $\Delta m$  [г/мм<sup>2</sup>] на единицу поверхности УК по его длине в соответствии с ранее предложенной методикой для анализа износа титановых стволов [92-98]. По полученным данным строились эпюры  $\Delta m$  по длине УК  $\ell_{УК}$ . Некоторые характерные и типичные эпюры для медных стволов разной геометрии после плазменных выстрелов с отличающейся  $W$  приведены на рисунке 3.10.

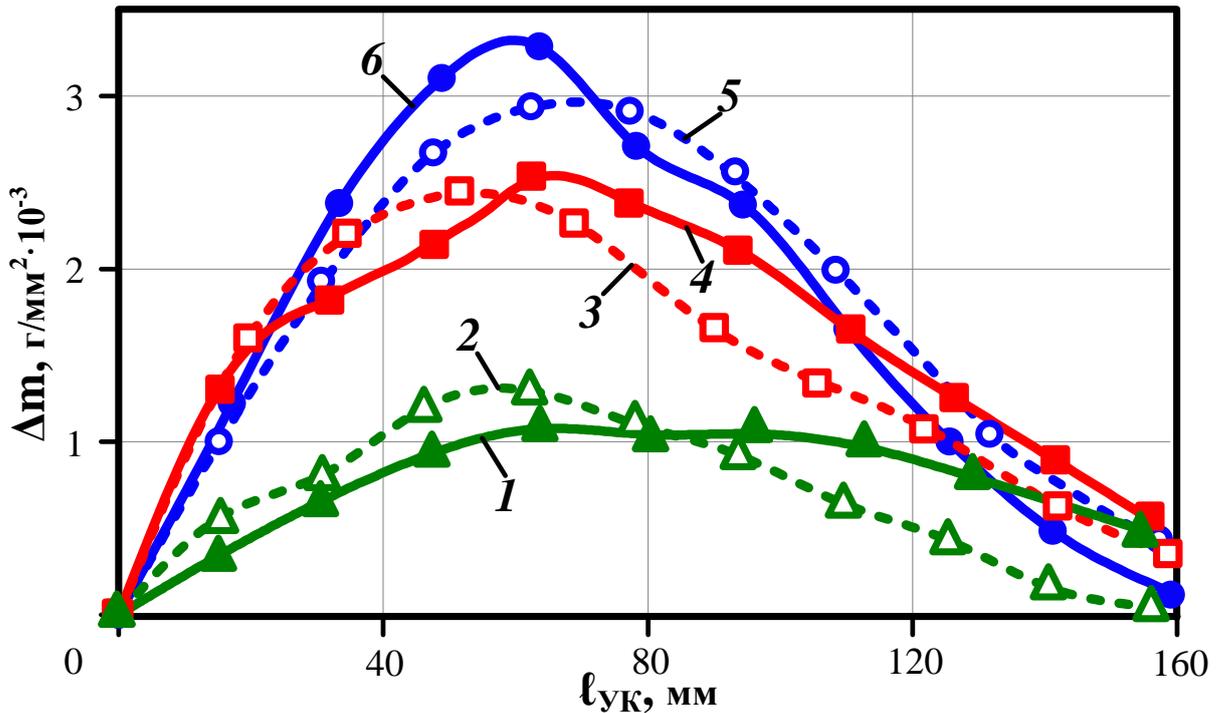


Рисунок 3.10 – Типичные эпюры удельного дифференциального износа поверхности УК медного ствола по его длине  $\Delta m(\ell_{УК})$ . Номера кривых соответствуют таблице 3.1

Интегрирование эпюр  $\Delta m(\ell_{УК})$  по длине УК даёт интегральную величину массы медного материала  $m$ , эродированной с поверхности УК и вынесенной из него плазменной струёй. Кроме того, во всех экспериментах эта масса  $m$  определялась как разница масс ствола до и после плазменного выстрела, определённых взвешиванием на аналитических весах с точностью не менее 0,01 г. Соответствующие эпюрам на рисунке 3.10 данные экспериментов приведены в таблице 3.1. В целом эпюры  $\Delta m$  имеют одинаковый характер с повышением эрозии до некоторого максимума на длине 50÷60 мм от начала с последующим более плавным снижением. Некоторые смещения максимумов эпюр относительно друг друга могут быть обусловлены различием скоростей плазменных сверхзвуковых течений в УК и соответствующим смещением стационарного скачка уплотнения в квазистационарном режиме [75]. Приведенные на рисунке 3.10 эпюры заметно разделяются на три группы, соответствующие разным калибрам УК 10 мм, 12 мм, 15 мм.

Таблица 3.1 – Основные данные и результаты экспериментов, соответствующие эюграм на рисунке 3.10

№		1	2	3	4	5	6
$d_{ук}$	мм	15	15	12	12	10	10
$\ell_{ук}$	мм	155	156	159	156	158	160
$C$	мФ	12	12	12	12	12	12
$U_{зар}$	кВ	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,0
$W_c$	кДж	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	54,0
$W$	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

Уменьшение  $d_{ук}$ , естественно, приводит к уменьшению объёма ускорительного канала  $V_{ук}$  и повышению удельной энергии  $W/V_{ук}$ . Это вызывает рост температуры, увеличение скорости плавления материала и его массы, уносимой из УК с увеличивающейся скоростью. Кроме того по кривым  $\Delta m$  для одинаковых  $d_{ук}$  видно и заметное повышение  $m = \int \Delta m d\ell_{ук}$  при увеличении  $W$  плазменного выстрела. В рассматриваемом диапазоне конструктивных и энергетических параметров оптимальная длина УК составляет 160÷180 мм (рисунок 3.10), при которой эрозии подвержена поверхность по всей длине УК. При большей  $\ell_{ук}$  имеет место наложение ранее эродированного материала на чистую медную поверхность. Это приводит к уменьшению массы, выносимой из УК в направлении мишени, как это показано в [88] для титановых стволов. При длине УК  $\ell_{ук}$  меньше оптимальной для конкретных параметров фонтанообразная токонесущая плазменная структура выходит из УК и какая-то часть подведённой энергии рассеивается в свободном пространстве за срезом УК и не участвует в электроэрозионной наработки меди. В некоторой

степени, такому режиму соответствует сочетание параметров, при которых имеют место эпюры *1, 3, 4, 5* (рисунок 3.10) с наличием эрозии в конце УК длиной 160 мм.

На рисунке 3.11 представлены экспериментальные значения массы *m* интегральной наработки медного материала при соответствующих значениях *W*. Видно, что они заполняют обширную область в системе координат *m-W* и не дают общей закономерности. Однако их анализ показывает, что все точки с некоторыми отклонениями ложатся на квадратичные зависимости *m(W)* для конкретных величин *d<sub>УК</sub>*. Отмеченные отклонения некоторых точек от корреляционных зависимостей обусловлены, как правило, различием величин *l<sub>УК</sub>* и описанным выше влиянием этого геометрического параметра. Таким образом, полученные данные показывают, что и для медных стволов справедливо утверждение, что масса наработанного медного материала в УК КМПУ определяется, как величиной подведённой энергии *W*, так и геометрией УК. В этой связи, по аналогии с ранее предложенным представлением для стволов из других металлов [75, 88], все экспериментальные данные представлены на рисунке 3.12 в виде обобщённой зависимости, показывающей закономерность связи между удельной электроэрозионной наработкой медного материала *m/W* [г/кДж] и величиной удельной подведённой энергии на единицу объёма УК *W/V<sub>УК</sub>* [кДж/см<sup>3</sup>]. Закономерность имеет линейный характер и аппроксимируется выражением:

$$\frac{m}{W} = 0,095 \cdot \left( \frac{W}{V_{УК}} - 0,233 \right); \quad (3.6)$$

Из выражения следует, что существует критическая величина *W/V<sub>УК</sub>=0,233 кДж/см<sup>3</sup>*, при которой электроэрозионная наработка меди практически отсутствует. Видно, что точки, соответствующие конкретным величинам *d<sub>УК</sub>*, в основном, группируются в локальных областях с заметным разбросом значений.

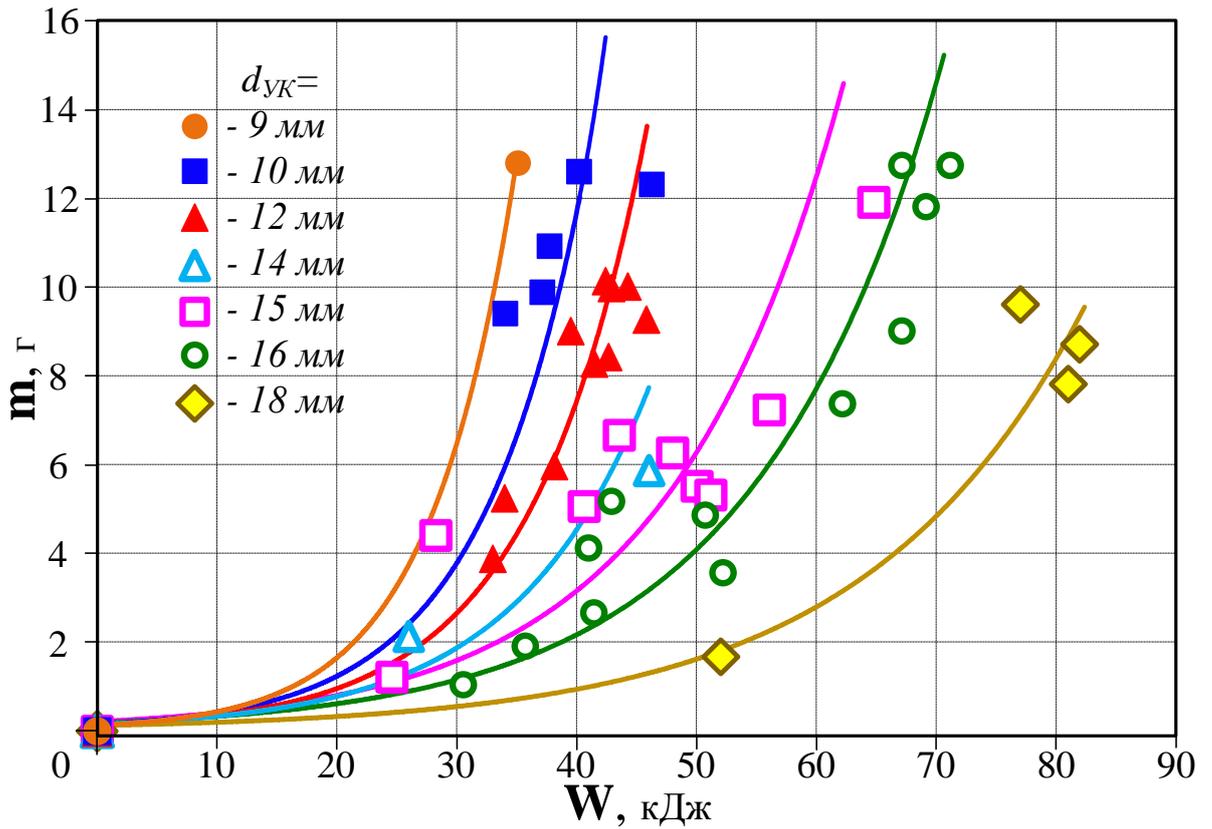


Рисунок 3.11 – Зависимость массы интегральной наработки медного материала  $m$  от подведённой энергии  $W$

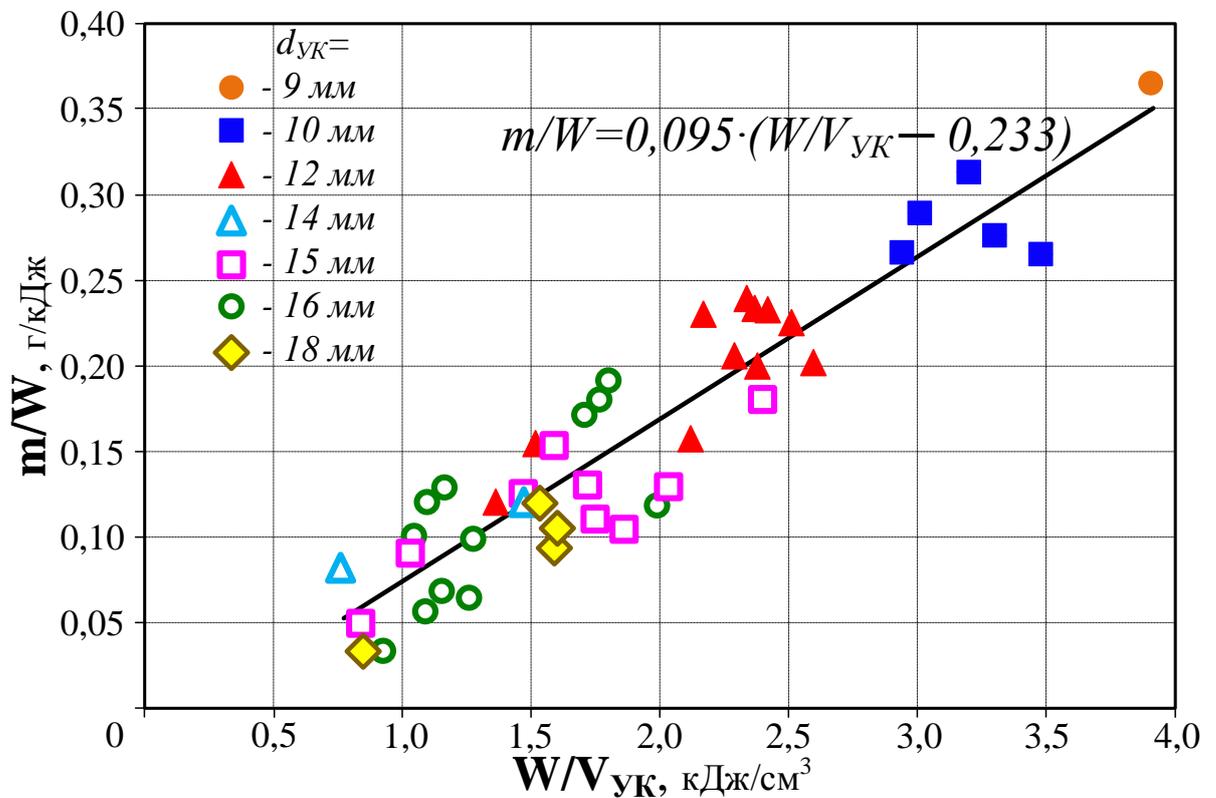


Рисунок 3.12 – Зависимость удельной величины электроэрозионного износа  $m/W$  от удельной подведённой энергии  $W/V_{yc}$

Анализ данных показывает, что, в основном, разброс обусловлен отличием  $l_{УК}$  от оптимальных величин для конкретных энергетических параметров плазменного выстрела, что сказывается на корректности определения  $W/V_{УК}$ , и, следовательно, на положении экспериментальных точек на зависимости. Кроме того, разброс точек обусловлен погрешностями при определении величин  $W$  и субъективными погрешностями при определении масс стволов. В большей степени, это касается определения массы ствола после плазменного выстрела, так как при разборке КМПУ возможно случайное удаление из УК наслоённых «языков» затвердевшего расплава металла, что соответствует увеличению эродированной массы.

Полученная зависимость позволяет расчётным путём по требуемой массе медного материала, необходимой для нанесения качественного покрытия, подбирать энергетические и конструктивные параметры плазмодинамической системы на основе КМПУ.

### **3.4 Исследование влияния параметров плазмодинамической системы на величину площади медного покрытия**

Очевидно, что для решения разных задач по нанесению устойчивого медного покрытия на плоские металлические поверхности требуется обеспечить возможность регулирования величины площади  $S$  обрабатываемой поверхности. Это позволит наиболее эффективно использовать электроэнергию и основной расходный материал – медный ствол. Не менее очевидно и то, что эта характеристика  $S$  должна определяться энергетическими и конструктивными параметрами КМПУ, а также расстоянием от среза УК до мишени (обрабатываемой поверхности)  $l_{ст-м}$  и условиями состояния газообразной атмосферы. С точки зрения создания простой технологии нанесения медного покрытия целесообразно реализовать процесс в атмосферных условиях, то есть в воздушной среде при нормальном давлении и комнатной температуре. Предварительные

эксперименты показали, что при нанесении покрытия медь ведёт себя, практически, как «инертный» металл без сохранения в слое покрытия оксидов и нитридов. На основании этого основной объём исследований проведён в атмосферных условиях.

Энергетические параметры плазменных выстрелов изменялись за счёт изменения  $U_{зар} = 2 \div 4$  кВ, при изменении  $C = 12,0 \div 28,8$  мФ. При этом величина  $W_c$  варьировалась от 24 кДж до 108 кДж. Кроме того, в экспериментах изменялась геометрия УК:  $d_{УК} = 10 \div 18$  мм,  $l_{УК} = 120 \div 300$  мм, а также расстояние от среза УК до мишени  $l_{ст-м} = 175 \div 400$  мм. В качестве мишеней использовались диски диаметром 180 мм и толщиной 22 мм из алюминиевого сплава АД-31, используемого в электротехнике для изготовления токоведущих жил проводов, кабелей и алюминиевых шин комплектных шинопроводов различного назначения. После проведения процесса нанесения покрытия КР вскрывалась, поверхность мишени фотографировалась и производилась визуальная оценка качества нанесённого медного покрытия. На рисунке 3.13 приведены фотографии поверхностей алюминиевых мишеней с характерными особенностями покрытий, нанесённых при разных  $l_{ст-м}$ , геометрических параметрах УК и величинах  $W$ . Из сравнения снимков а<sub>1</sub>-а<sub>3</sub>) видно, что при  $l_{УК} = 118 \div 155$  мм,  $d_{УК} = 10 \div 15$  мм и  $l_{ст-м} = 175 \div 215$  мм в широком диапазоне изменения  $W$  от 28,3 ÷ 46,4 кДж наблюдается сильная эрозия центральной области алюминиевых мишеней на фоне увеличения  $S$ . Однако при  $W = 42,4$  кДж и  $l_{ст-м} = 225$  мм обеспечивается наилучшее качество покрытия с достаточно равномерной плотностью на максимальной площади (б<sub>1</sub>). Такое высокое качество и равномерность покрытия сохраняются при некотором уменьшении площади  $S$  с увеличением  $l_{ст-м}$  до 300 мм (б<sub>1</sub>-б<sub>3</sub>). В этих условиях, указанных на снимках, полностью отсутствует эрозия поверхности мишеней из алюминиевого сплава. Дальнейшее увеличение  $l_{ст-м}$  до 310, 330, 400 мм (в<sub>1</sub>-в<sub>3</sub>) сопровождается прогрессирующей неравномерностью покрытия без эрозии алюминиевой поверхности.

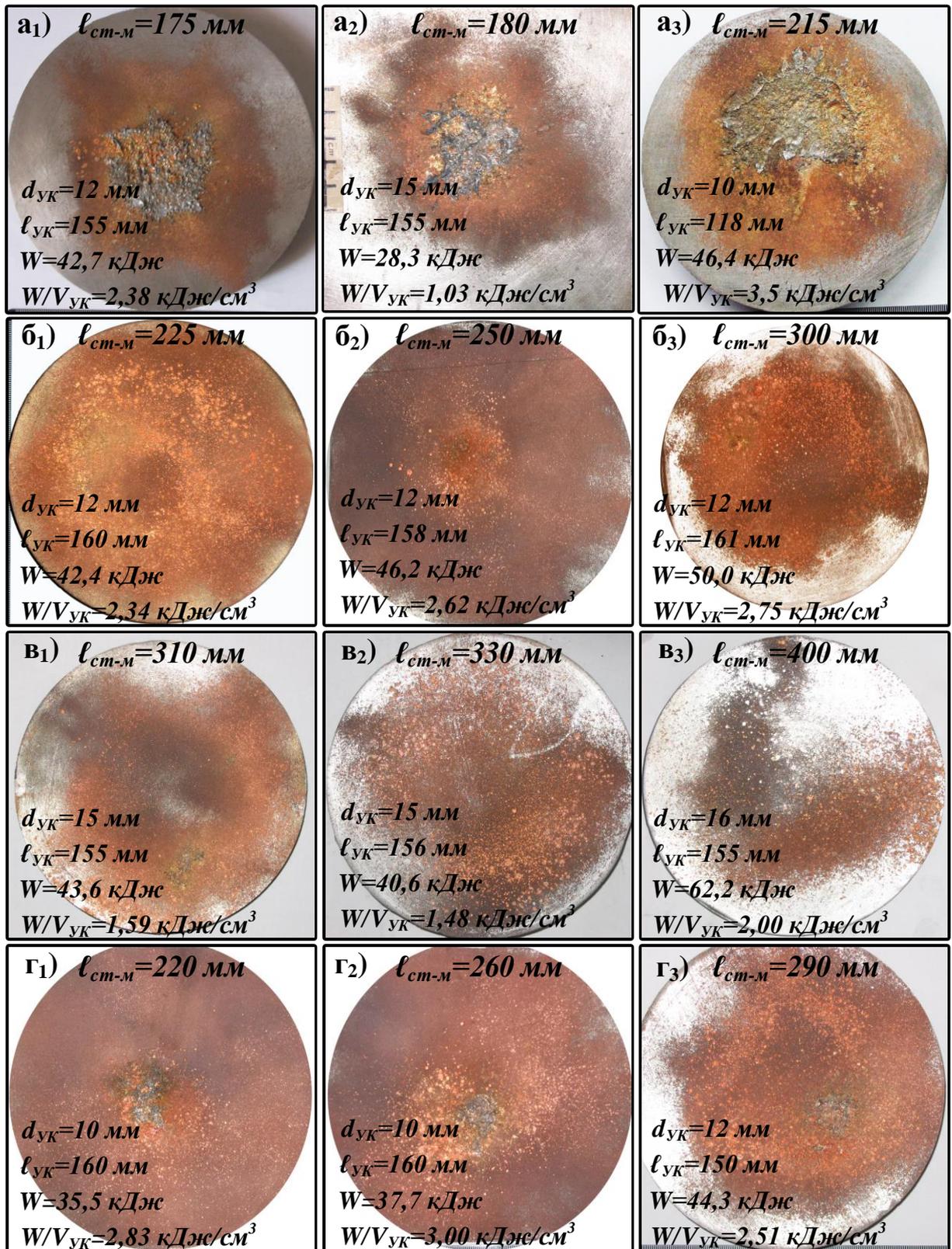


Рисунок 3.13 – Фотографии поверхностей алюминиевых мишеней с медными покрытиями, разделенные на четыре характерные группы: а<sub>1</sub>-а<sub>3</sub>) покрытия с эрозией; б<sub>1</sub>-б<sub>3</sub>) качественные покрытия; в<sub>1</sub>-в<sub>3</sub>) неравномерные покрытия; г<sub>1</sub>-г<sub>3</sub>) покрытия с частичной эрозией

Следует отметить достаточно хорошие результаты по нанесению более равномерного и плотного медного покрытия в случаях использования медных стволов с  $d_{УК}=10\div 12$  мм при относительно низких величинах  $W$  и меньших расстояниях  $l_{ст-м}$ , как показано на рисунке 3.13 г<sub>1-г<sub>3</sub></sub>). Однако при этом наблюдается небольшая локальная эрозия центральной области мишеней. Такие условия могут быть использованы при обработке кольцевых поверхностей.

Анализ первичных внешних характеристик покрытий, полученных в большом числе экспериментов при различных сочетаниях энергетических и конструктивных параметров плазмодинамической системы, позволил обобщить полученные результаты в виде зависимости величины площади медного покрытия на алюминиевой поверхности  $S$  [см<sup>2</sup>] от величины удельной подведённой энергии  $W/V_{УК}$  [кДж/см<sup>3</sup>] на единицу объёма УК. Площадь  $S$  определялась как площадь круга с наиболее равномерным и плотным покрытием при некоторой субъективной погрешности. Эта зависимость представлена на рисунке 3.14 и показывает закономерность увеличения  $S$  с ростом  $W/V_{УК}$  для рассматриваемых диапазонов изменения энергетических и конструктивных параметров плазмодинамической системы. Она может быть аппроксимирована квадратичной полиномиальной функцией. Разные символы обозначения экспериментальных точек соответствуют разным величинам расстояния  $l_{ст-м}$ . Полностью закрашенные точки ▲, ●, ■ соответствуют условиям получения качественного покрытия разной площади (рисунок 3.13 б<sub>1-3</sub>). Незакрашенные символы △, ○, □, ◇ соответствуют условиям получения покрытий с частичной эрозией поверхности мишени (рисунок 3.13 г<sub>1-3</sub>). Из анализа полученной зависимости  $S(W/V_{УК})$  следует, что качественные, равномерные и плотные медные покрытия на алюминиевой поверхности могут быть получены практически во всём диапазоне изменения  $W/V_{УК}$  при разных соотношениях  $d_{УК}$  и  $l_{УК}$  в пределах  $10\div 18$  мм и  $155\div 160$  мм, соответственно. Однако неизменным

условием положительного результата является то, что расстояние от среза УК до мишени  $l_{ст-м}$  не должно быть менее 180 мм. Максимальная площадь покрытия обеспечивается при величине энерговклада  $W=31,0\div 46,2$  кДж и удельной подведённой энергии  $W/V_{УК}=2,3\div 2,7$  кДж/см<sup>3</sup> при установке мишени на расстоянии от среза УК  $l_{ст-м}=225\div 250$  мм.

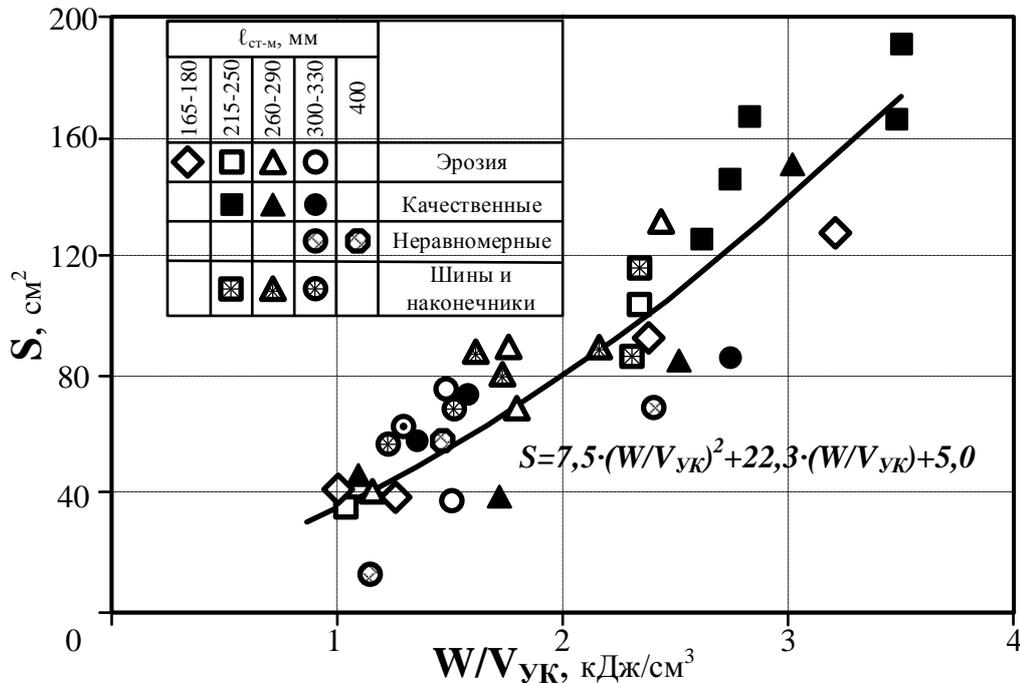


Рисунок 3.14 – Зависимость площади медного покрытия на алюминиевой поверхности  $S$  от удельной подведённой энергии  $W/V_{УК}$

Последовательность кадров высокоскоростной видеосъёмки истечения сверхзвуковой плазменной струи из УК (рисунки 3.4-3.6) демонстрирует процесс формирования и развития классической «бочкообразной» ударно-волновой структуры в пространстве от среза УК в направлении мишени, которую на кадрах не видно. Анализ многочисленных аналогичных фотограмм показал, что прямой скачок уплотнения, так называемый диск Маха, являющийся границей первой «бочки», стабилизируется в пространстве на этапе квазистационарного течения на расстоянии 110÷120 мм от среза УК (при рассматриваемых параметрах плазменных выстрелов) (рисунок 3.15). Это значит, что сильная эрозия поверхности мишени происходит при её расположении в пространстве формирования второй «бочки» ударно-волновой структуры. Смещение положения мишени в направлении течения к

вероятному положению второго диска Маха (к концу второй «бочки») сопровождается снижением эрозии, как это видно на рисунке 3.13 б<sub>1</sub>-б<sub>3</sub>). Это обусловлено относительно высокой кинетической энергией плазменной массы, воздействующей на поверхность мишени, которая существенно снижается при подходе к диску Маха второй «бочки». В объёме второго прямого скачка уплотнения скорость течения также становится дозвуковой, происходит накопление массы с увеличением давления и температуры. Видимо, поэтому в условиях снижения интенсивности массопереноса в структуре импульсной струи расположение мишени в области границы второй «бочки» на расстоянии  $\ell_{ст-м} \approx 250$  мм обеспечивает получение качественного медного покрытия с максимальной площадью. Некоторое увеличение этого расстояния, в частности до 275 мм, также позволяет получать качественное покрытие вследствие возможного слияния прямого и индуцированного у поверхности мишени скачков уплотнения, препятствующего формированию третьей «бочки» и повышению скорости массопереноса до сверхзвуковой. Ещё большее увеличение расстояния  $\ell_{ст-м} > 320$  мм приводит к снижению качества покрытия из-за уменьшения мощности разряда в КМПУ и к снижению скорости и плотности материала струи. Покрытие становится сильно неравномерным, хоть и распространяется по всей площади мишени.

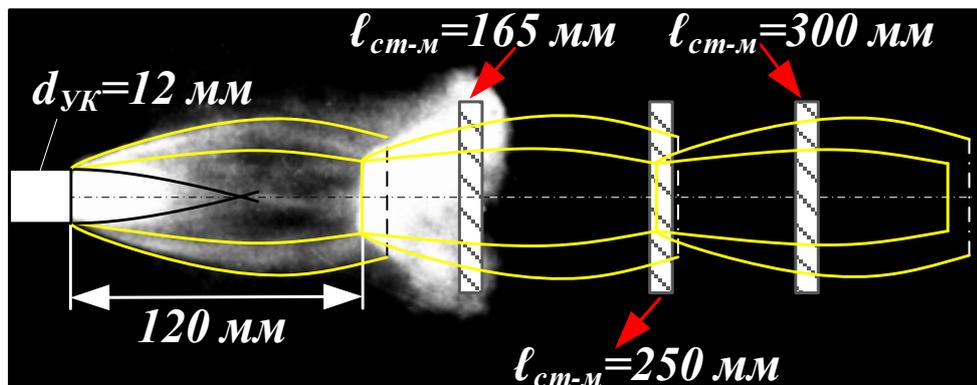


Рисунок 3.15 – Положение мишени относительно прямых скачков уплотнения бочкообразной ударно-волновой структуры сверхзвуковой импульсной плазменной струи, истекающей из УК в свободное пространство

Таким образом, при использовании плазмодинамической системы с указанными параметрами, необходимыми для наработки электроэрозионным путём требуемого количества медного материала, обрабатываемая алюминиевая поверхность должна располагаться на расстоянии от среза УК, равном примерно  $225 \div 250$  мм. При этом обеспечивается нанесение качественного медного покрытия круговой поверхности  $S=160 \div 200$  см<sup>2</sup>.

Сопоставление результатов экспериментов по нанесению медного покрытия и результатов анализа развития ударно-волновой структуры сверхзвуковой плазменной струи даёт основания предполагать, что наиболее качественное покрытие обеспечивается при расположении мишени (обрабатываемой поверхности) в области стабилизации положения (в квазистационарном режиме течения) второго прямого скачка уплотнения (диска Маха второй «бочки»).

Наиболее вероятной причиной появления небольших эрозионных дефектов на обрабатываемой поверхности, показанных на рисунке 3.13 Г<sub>1</sub>-Г<sub>3</sub>) является воздействие низкоскоростной струи медного расплава, выносимого из УК на заключительном этапе течения. Эти дефекты в экспериментах появляются случайно, что, по-видимому, обусловлено неточностью установки мишени относительно положения диска Маха второй «бочки» структуры течения и из-за случайных отклонений энергетических параметров. Наиболее простой мерой устранения этого недостатка является некоторое увеличение расстояния  $l_{ст-м}$ . Это приводит к незначительному уменьшению площади покрытия, что следует учитывать при реализации процесса в конкретных условиях нанесения медного покрытия на поверхности конкретных элементов.

В полном соответствии с полученными закономерностями и с учётом указанных выше особенностей плазмодинамического метода в лабораторных условиях проведены опыты по нанесению медного покрытия на контактные поверхности алюминиевых стандартных шин и наконечников. Они закреплялись на специальных приспособлениях, как показано на рисунке

3.16. Под образцами устанавливались алюминиевые пластины-свидетели для контроля площади обработки. С целью подтверждения полученной закономерности (рисунок 3.14) опытные процессы проведены при разных энергетических и конструктивных параметрах системы с варьированием  $U_{зар}$ ,  $C$ ,  $I_m$ ,  $P$ ,  $W$ ,  $d_{ук}$ ,  $l_{ук}$ ,  $l_{ст-м}$ . Основные опытные данные процессов приведены в таблице 3.2. По фотографиям, представленным на рисунке 3.16, видно, что с целью повышения производительности и эффективности возможной технологии в одном процессе можно наносить покрытие на несколько элементов разных типов: на контактные поверхности нескольких шин и наконечников (а), на несколько наконечников и кольцевую поверхность (б) (рисунок 3.16). Возможны и любые другие варианты, например, с размещением на свободных местах более мелких наконечников.

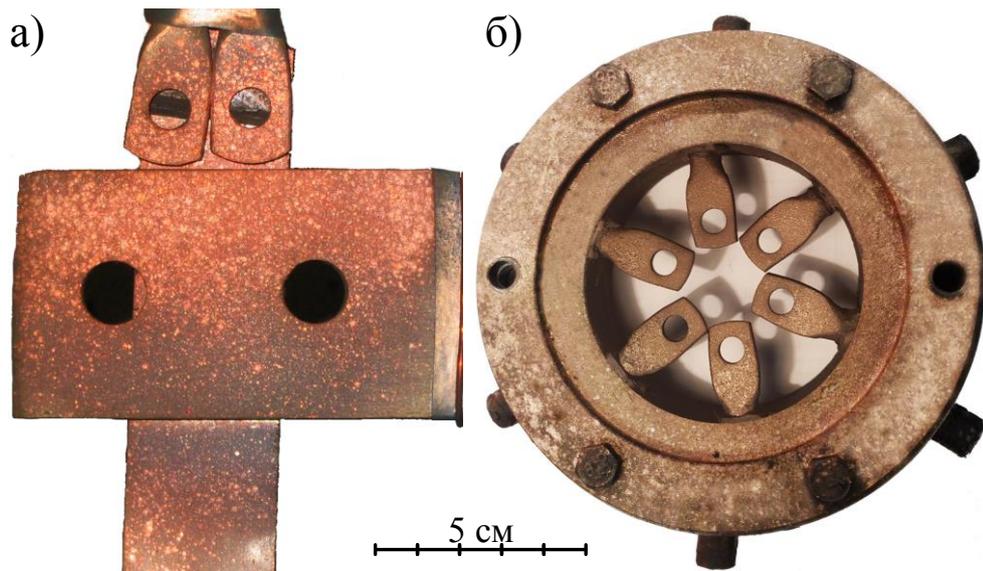


Рисунок 3.16 – Фотографии образцов алюминиевых шин и наконечников с медным покрытием при разных параметрах экспериментов (таблица 3.2)

Опытные процессы показали реальную возможность нанесения качественных устойчивых медных покрытий на контактные алюминиевые поверхности. Полученные данные нанесены на график зависимости  $S(W/V_{ук})$  (рисунок 3.14) в виде точек, обозначенных символами  $\boxtimes$ ,  $\blacktriangle$ ,  $\odot$ . Их положения на графике практически полностью соответствуют экспериментально установленной закономерности. Кроме того, их учёт при

аппроксимации не привел к существенным изменениям коэффициентов аппроксимирующих функций. Таким образом, можно утверждать, что полученная закономерность может составить научную основу разработки промышленной технологии нанесения медных покрытий на алюминиевые контактные поверхности плазмодинамическим методом.

Таблица 3.2 – Основные данные экспериментов по нанесению покрытий на электротехнические изделия, фотографии которых показаны на рисунке 3.16

$N_{\text{д}}$	$d_{\text{УК}}$	$\ell_{\text{УК}}$	$\ell_{\text{ст-м}}$	$U_{\text{зар}}$	$C$	$I_{\text{м}}$	$P_{\text{м}}$	$W$	$W/V_{\text{УК}}$
	мм	мм	мм	кВ	мФ	кА	МВт	кДж	кДж/см <sup>3</sup>
а)	15	160	300	3,0	18,0	181	203	48,8	1,73
б)	18	200	300	2,5	28,8	244	330	77,0	1,51

### 3.5 Нанесение медного покрытия при двухимпульсном режиме работы ускорителя

Из приведённых выше результатов исследований следует, что одним из основных недостатков плазмодинамического метода является использование импульса тока электропитания с амплитудой, достигающей ~200 кА и более. Такие токи необходимы, в основном, для обеспечения требуемой наработки массы материала. Однако в работах [84,99] показано, что  $m$ , в частности титана, может быть сохранена и даже увеличена за счёт использования частотного или многоимпульсного режима работы КМПУ при той же суммарной энергетике. При этом автоматически устраняется указанный недостаток, так как  $I_m$  каждого импульса может быть существенно снижена, за счёт уменьшения ёмкости секции ЕНЭ в соответствии с выражением:

$$I_m \cong U_{\text{зар}} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}. \quad (3.7)$$

Следовательно, снизятся электродинамические и термические нагрузки на элементы конструкции при сохранении полной энергетике системы. Кроме

того, возникают теоретические предпосылки возможности исключения эрозии поверхности мишени за счёт разрушения низкоскоростного песта из расплава в «хвостовой» части первого импульса высокоскоростной догоняющей струи второго импульса. Она будет выносить из УК уже расплавленный металл сквозь сформированную в первом импульсе полость структуры струи с пониженным давлением. Это может способствовать снижению плотности плазменной массы, выносимой вторичной струёй в направлении мишени, и уменьшению эрозии её поверхности.

Экспериментальные исследования в этом направлении проведены с использованием разделённого на две одинаковые секции ЕНЭ суммарной ёмкостью  $C=C_1+C_2=28,8$  мФ ( $C_1=C_2=14,4$  мФ). При зарядном напряжении  $U_{зар}=2,5$  кВ суммарная накапливаемая энергия составила  $W_c=W_{c_1}+W_{c_2}=90$  кДж ( $W_{c_1}=W_{c_2}=45$  кДж). При работе КМПУ на общую нагрузку секции накопителя коммутировались импульсами разных блоков управления по сигналам от генератора задержанных импульсов ГИ-1 (раздел 2.1). Реализовывались двухимпульсные режимы с временами задержки подачи второго импульса относительно подачи первого импульса  $t_z$ , от 400 мкс до 1000 мкс. Для определения эффективности двухимпульсного режима проведены сравнительные эксперименты с одноимпульсным режимом электропитания КМПУ при той же суммарной энергетике. Типичные энергетические характеристики  $I(t)$ ,  $U(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W(t)$ , фотограмма развития ударно-волновой структуры и фотография поверхности алюминиевой мишени с медным покрытием, которая располагалась на  $\ell_{cm-m}=300$  мм, показаны на рисунке 3.17. Видно, что в мощном одноимпульсном режиме параметры достигают  $I_m=226$  кА,  $P_m=245$  МВт и  $W=68$  кДж. Это обеспечило скорость головной ударной волны  $v_c=3,5$  км/с при  $d_{ук}=18$  мм и  $\ell_{ук}=200$  мм. По фотограмме видно, что положение прямого скачка уплотнения, диска Маха первой «бочки» стабилизировалось на расстоянии  $\ell_{max}=120$  мм. Поэтому на мишени, расположенной на расстоянии  $\sim 300$  мм от

среза УК, близком к  $\sim 2 \cdot l_{max}$ , получено равномерное покрытие площадью  $S \cong 100 \text{ см}^2$ . Этот результат адекватен полученной закономерности, о чём свидетельствует положение соответствующей точки  $\odot$  на графике  $S(W/V_{УК})$  (рисунок 3.14). Эффективность передачи энергии из накопителя в нагрузку составила:

$$\eta = \frac{W}{W_c} \cong 75,5 \% \quad (3.8)$$

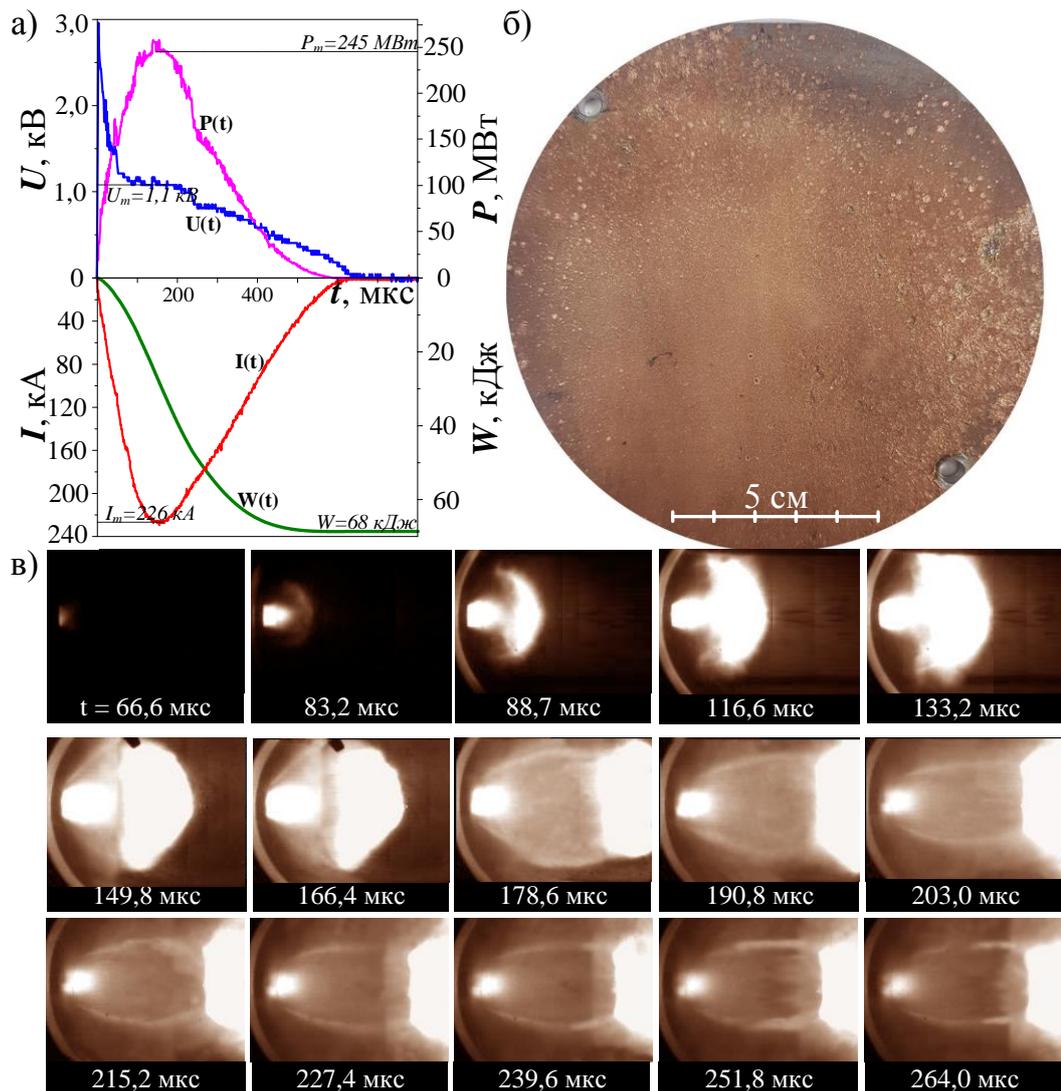


Рисунок 3.17 – Данные одноимпульсного режима работы КМПУ: а) осциллограммы  $I(t)$ ,  $U(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W(t)$ ; б) фотография мишени с медным покрытием; в) фотограмма ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи

На рисунках 3.18-3.20 и в таблице 3.3 представлены такие же данные и результаты экспериментов с двухимпульсным режимом работы КМПУ при

разных временах задержки  $t_3$ , подачи второго импульса электропитания, соответственно 400, 700 и 1000 мкс. О хорошей повторяемости экспериментов свидетельствует практическое равенство амплитудных значений тока первого импульса  $I_{m_1} \cong 175 \pm 3$  кА, снизившихся не менее, чем в 1,3 раза по сравнению с  $I_m$  одноимпульсного режима работы КМПУ. Это является важнейшим преимуществом двухимпульсного режима, которое может быть усилено с переходом к многоимпульсным режимам с прежней полной энергетикой. При этом в пределах погрешностей в экспериментальных условиях сохраняется постоянство развиваемой мощности  $P_{m_1} \cong 130 \pm 10$  МВт и потребляемой энергии  $W_1 \cong 34 \pm 2$  кДж.

Таблица 3.3 – Параметры экспериментов в частотном режиме работы

№		1	2	3
$d_{УК}$	мм	16	16	16
$\ell_{УК}$	мм	195	195	195
$\ell_{см-м}$	мм	310	310	290
$t_3$	мкс	400	700	100
$t_{имп_1}$	мкс	400	400	400
$t_{имп_2}$	мкс	600	400	400
$t_n$	мкс	0	300	700
$W_1$	кДж	36	32	32
$W_2$	кДж	19	34	32
$W_{\Sigma}$	кДж	54	66	64
$I_{m_1}$	кА	175	172	178
$I_{m_2}$	кА	92	158	180
$P_{m_1}$	МВт	140	118	127
$P_{m_2}$	МВт	66	130	150
$P_{cp}$	МВт	55	44	46
$\Delta m_{см}$	г	6,7	13,3	13,0
$m/W$	г/кДж	0,12	0,20	0,20
$W/V_{УК}$	кДж/см <sup>3</sup>	1,40	1,68	1,65
$S$	см <sup>2</sup>	90	95	90

Минимальное время задержки  $t_3=400$  мкс выбрано примерно равным длительности одного первого импульса с целью исключения перетоков

энергии между полностью заряженной до  $U_{зар}$  второй секцией и разрядившейся первой секцией через игнитронные разрядники, не восстановившие электрическую прочность промежутков.

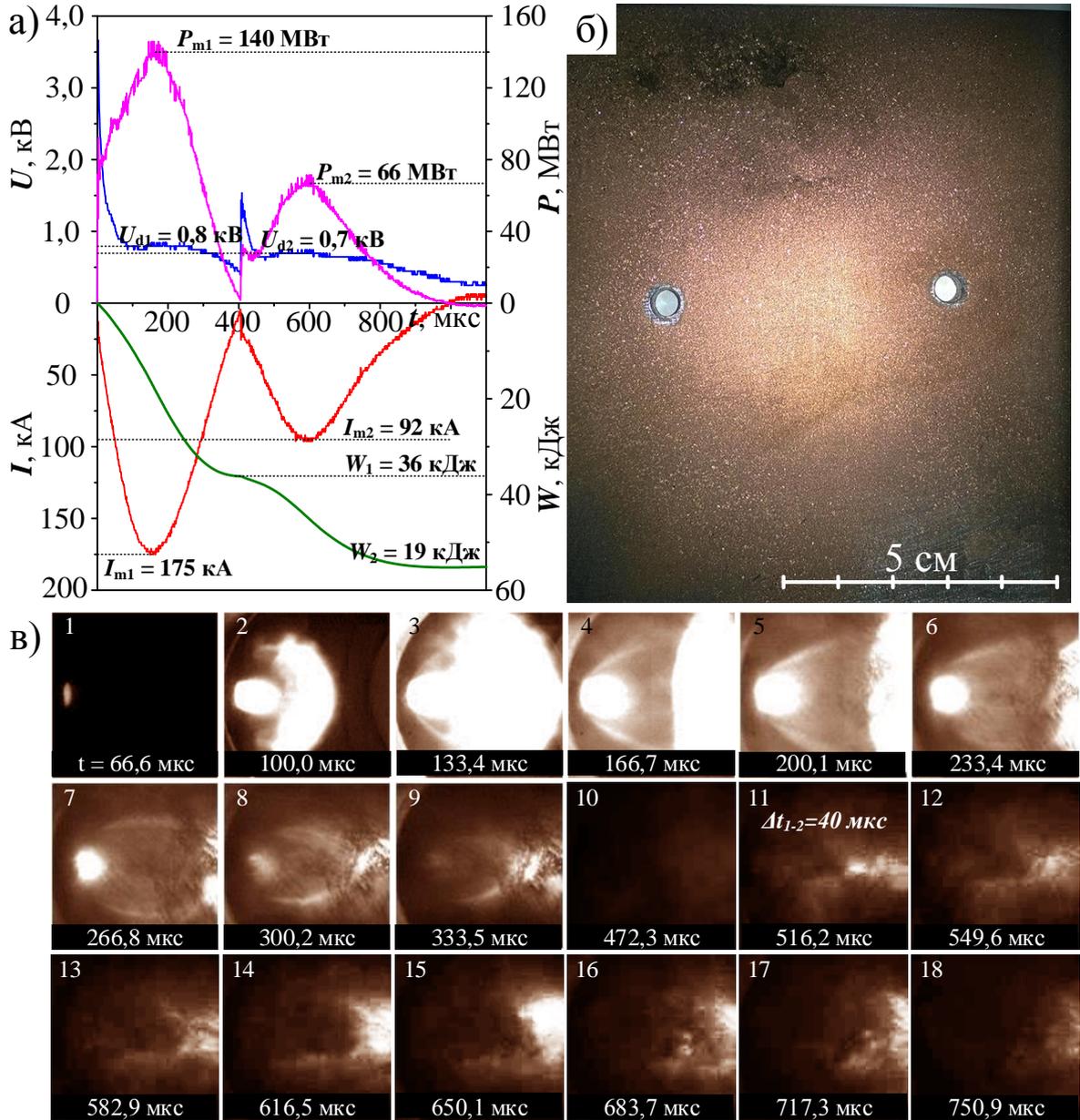


Рисунок 3.18 – Данные двухимпульсного режима работы КМПУ с  $t_3=400$  мкс: а) осциллограммы  $I(t)$ ,  $U(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W(t)$ ; б) фотография мишени с медным покрытием; в) фотограмма ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи

Однако как видно из осциллограмм на рисунке 3.18, при  $t_3=400$  мкс и практически нулевой безтоковой паузе между импульсами  $t_n$  не удаётся исключить перетоков энергии. Об этом свидетельствует практически двукратное снижение амплитуды тока второго импульса  $I_{m2}$ , существенное

увеличение длительности этапа его снижения до нуля, а также снижение эффективности передачи энергии в нагрузку до  $\sim 61,0\%$ . Единственным способом исключения этого «паразитного» колебательного процесса в рассматриваемой схеме является увеличение длительности безтоковой паузы между импульсами за счёт увеличения  $t_z$  до величины, обеспечивающей восстановление электрической прочности промежутков в разрядниках. Тем не менее, такой режим позволяет наносить равномерное покрытие без эрозионных дефектов площадью  $S \cong 90,0 \text{ см}^2$  при  $l_{\text{ст-м}} = 310 \text{ мм}$  (рисунок 3.18).

С учётом этих результатов проведены эксперименты с увеличенными временами  $t_z$  до 700 мкс и  $t_n$  до 300 мкс. Как видно из осциллограмм на рисунке 3.19, увеличение безтоковой паузы  $t_n$  позволило за счёт частичной деионизации промежутков в разрядниках и повышения их сопротивления достаточно сильно подавить колебательный процесс перетоков энергии между секциями накопителей. Об этом свидетельствует повышение  $I_{m_2}$  до  $\sim 158 \text{ кА}$  и выравнивание длительностей импульсов  $t_{\text{имп}_1} = t_{\text{имп}_2} = 400 \text{ мкс}$ . Небольшое повышение напряжения на разряде второго импульса, обусловленное его инициированием в режиме автопробоя промежутка, привело к некоторому повышению  $P_{m_2}$  и  $W_2$ . Эффективность передачи энергии повысилась до  $\sim 73\%$ , приближаясь к показателю одноимпульсного режима. Приведённый на рисунке 3.19 фотоснимок демонстрирует высокое качество нанесенного покрытия площадью  $S \sim 95,0 \text{ см}^2$  при  $l_{\text{ст-м}} = 310 \text{ мм}$ .

Паразитные перетоки энергии между секциями ЕНЭ полностью исключаются при увеличении  $t_z$  до 1000 мкс и  $t_n$  до 600 мкс. Это следует из осциллограмм на рисунке 3.20. Амплитуда  $I_{m_2}$  даже несколько превышает амплитуду тока первого импульса  $I_{m_1}$ . Это можно связать с уменьшением потерь энергии второго импульса, так как дуговой разряд в УК замыкается и перемещается по поверхности расплава меди в ионизированной среде. В этих условиях получено качественное покрытие площадью  $S \cong 90,0 \text{ см}^2$  при  $l_{\text{ст-м}} = 290 \text{ мм}$  и  $\eta \cong 73,0\%$ .

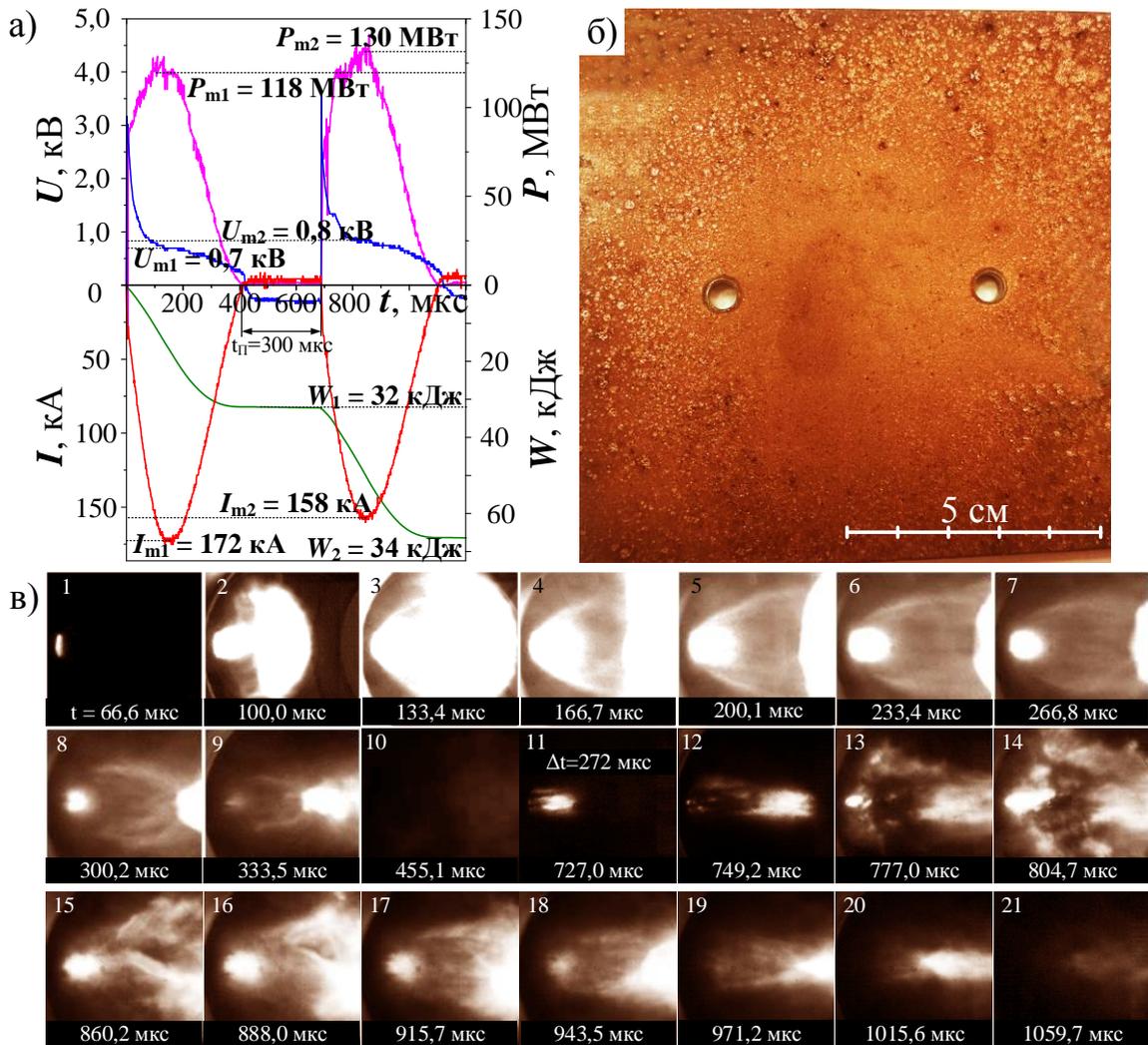


Рисунок 3.19 – Данные двухимпульсного режима работы КМПУ с  $t_3=700$  мкс: а) осциллограммы  $I(t)$ ,  $U(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W(t)$ ; б) фотография мишени с медным покрытием; в) фотограмма ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи

Анализ измерений электроэрозионной наработки меди  $m$  с поверхности УК в двухимпульсном режиме показал результаты, сопоставимые с одноимпульсным режимом. На рисунке 3.21 приведена ранее показанная зависимость  $m/W(W/V_{УК})$  (рисунок 3.12) для одноимпульсного режима с нанесёнными на неё точками ● двухимпульсного режима. Видно, что «новые» точки соответствуют установленной закономерности роста  $m/W$ . Повышенная крутизна тренда в диапазоне  $W/V_{УК}=1,5\div 2,0$  кДж/см<sup>3</sup> связана с увеличением длительности  $t_n$ . Получается, что рост  $I_{m2}$  и  $W_2$  в условиях уже покрытой расплавом меди поверхности УК, естественно, обеспечивает увеличение выносимой из УК массы. При близкой к нулю  $t_n$  условия

оказываются сопоставимы с условиями одноимпульсного режима по величине  $W$  за счёт увеличения длительности суммарного импульса, поэтому «новые» точки лишь дополняют имеющуюся закономерность. Аналогичная картина наблюдается при сопоставлении результатов двух рассматриваемых режимов по влиянию  $W/V_{УК}$  на величину  $S$ . Как видно на рисунке 3.22, выделенные точки двухимпульсного режима располагаются в верхней области графика. Это говорит о том, что повышение  $m$  при увеличении  $t_n$  обеспечивает повышение плотности материала струи и, соответственно, площади качественного покрытия.

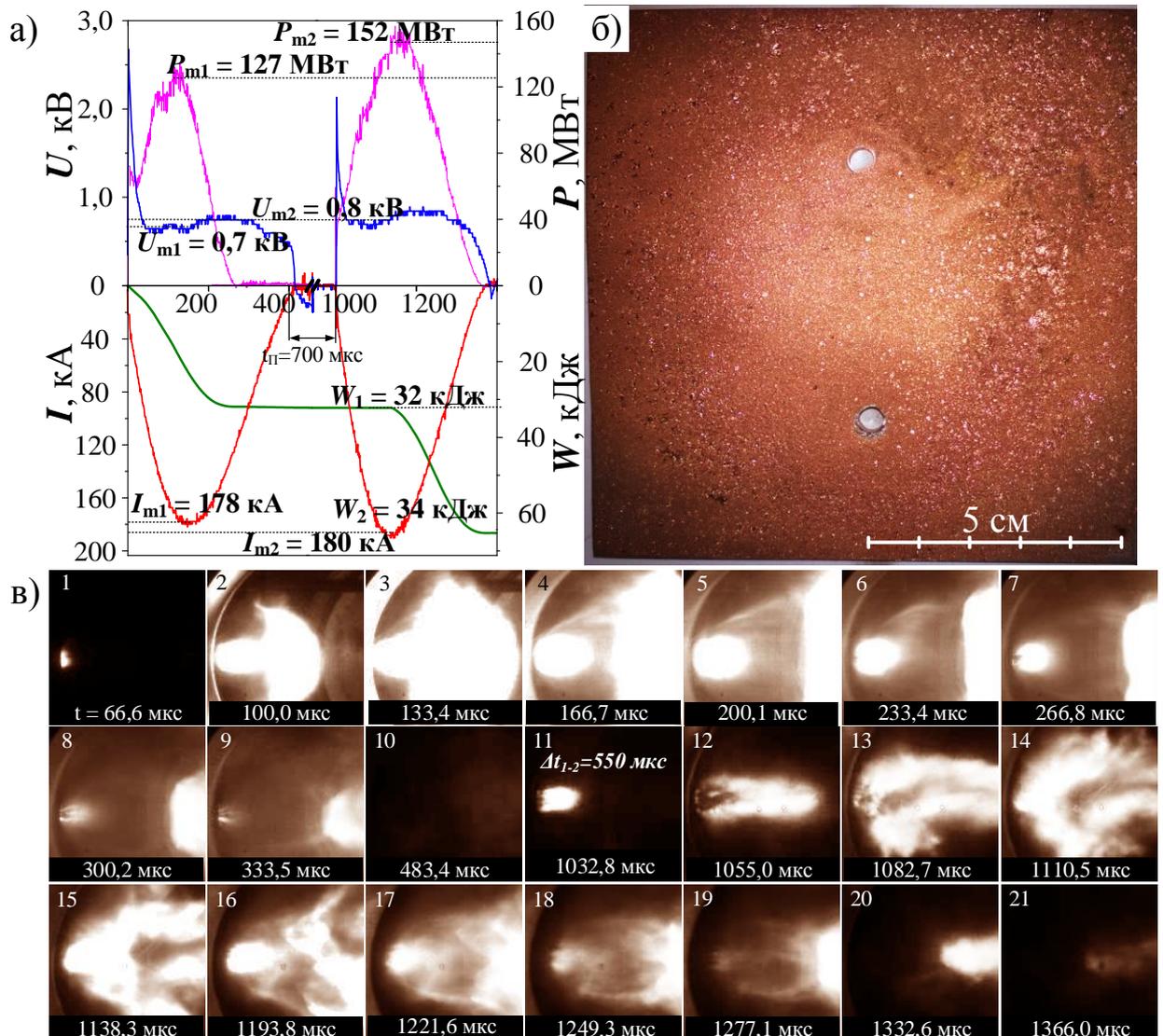


Рисунок 3.20 – Данные двухимпульсного режима работы с  $t_3=1000$  мкс: а) осциллограммы  $I(t)$ ,  $U(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W(t)$ ; б) фотография мишени с медным покрытием; в) фотограмма ударно-волновой структуры сверхзвуковой струи

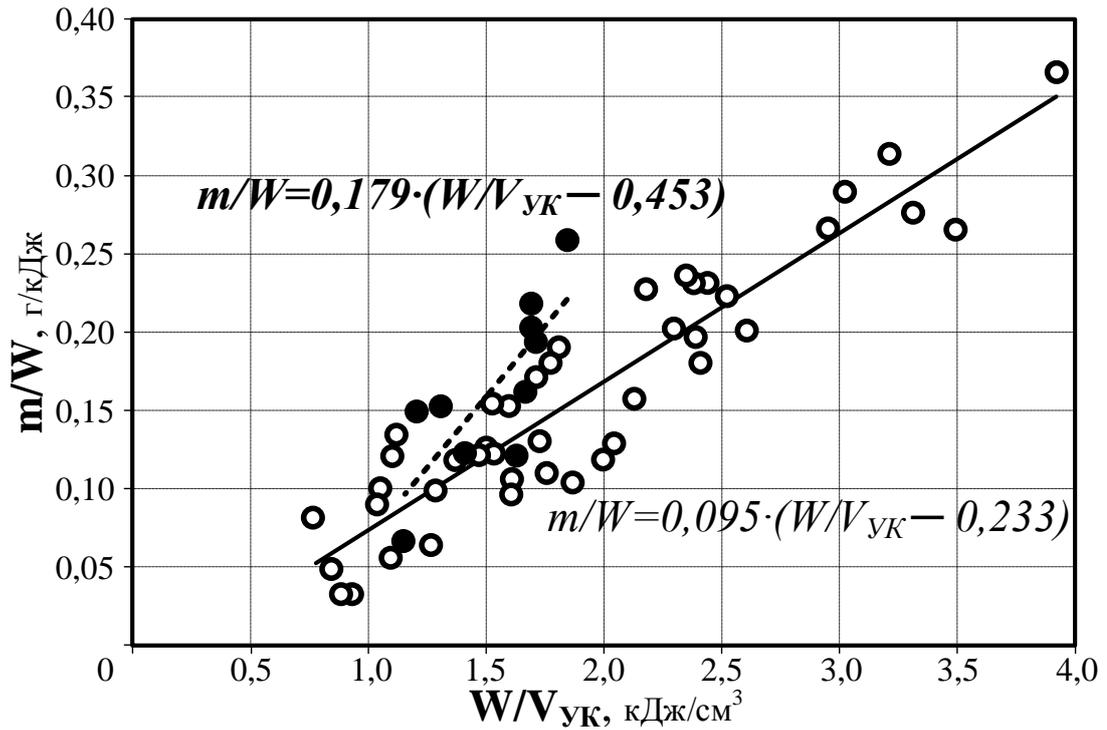


Рисунок 3.21 – Зависимость  $m/W$  от  $W/V_{ук}$  с выделенными точками двухимпульсного режима работы КМПУ

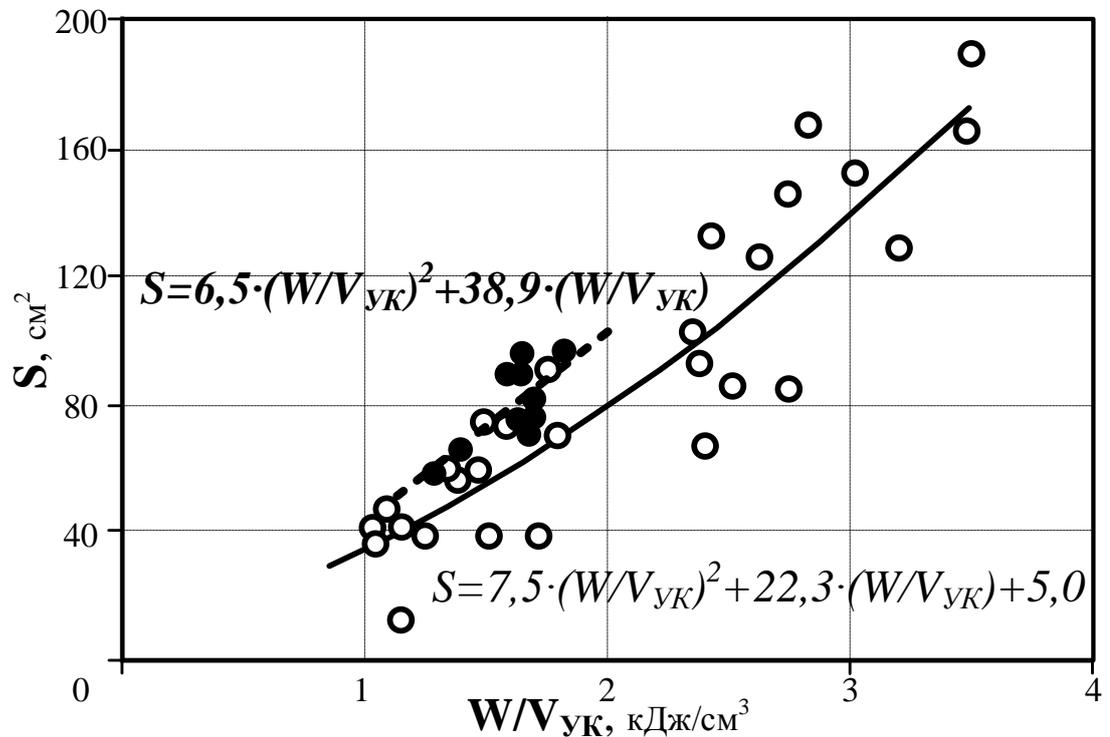


Рисунок 3.22 – Зависимость  $S$  от  $W/V_{ук}$  с выделенными точками двухимпульсного режима работы КМПУ

На всех фотограммах на рисунках 3.18-3.20в) этапы первого импульса отражаются практически идентично. На кадрах **б** показано состояние ударно-

волновой структуры со стабилизированным положением прямого скачка уплотнения (диска Маха) на расстоянии  $\sim 120$  мм от среза УК. Далее на этапе спада мощности разряда в УК наблюдается схлопывание первой «бочки» ударно-волновой структуры и, естественно, второй «бочки», которая не попадает в область наблюдения. В случае  $t_3=400$  мкс и  $t_n=0$  мкс (рисунок 3.18в) о начавшемся этапе второго импульса свидетельствует усиление свечения области съёмки (кадр *11*). Это излучение, исходящее из глубины УК, показывает смутные очертания тёмного песта из расплава меди, сечением сопоставимым с  $d_{УК}$ , который движется в направлении мишени с дозвуковой скоростью. В условиях одноимпульсного режима он попадает в центр мишени и приводит к сильной эрозии поверхности (рисунок 3.17). В двухимпульсном режиме при  $t_n=0$  вторичная сверхзвуковая струя догоняет пест расплава, что приводит к его разрушению, как это видно на последующих кадрах. Естественно считать, что на «хвосте» струи второго импульса тоже должен существовать такой же пест расплава меди. Однако на мишени отсутствует эрозия от его воздействия. Этот положительный результат обусловлен, по-видимому, низкой энергетикой и «мощностью» воздействия вторичной струи. Кроме того, она распространяется в области разряда после первой струи, что приводит к расширению песта под действием внутреннего давления, снижению плотности материала и удельной кинетической энергии, действующей на поверхность мишени.

Аналогичные процессы протекают при больших временах  $t_3$  и  $t_n$ , как это видно по фотограммам на рисунках 3.19 и 3.20. Повышенная энергетика вторичных струй и яркость свечения разряда в УК позволяет чётко наблюдать пест расплава на кадрах с *11* по *12* ( $\Delta t=23$  мкс) и его разрушение в дальнейшем. В отличие от случая с  $t_n=0$  отчётливо наблюдается «бочкообразная» структура второй струи, её развитие и деградация во времени. При этом, как уже отмечено, эрозия мишени практически отсутствует или незначительно проявляется лишь на периферийных участках обрабатываемой поверхности.

Таким образом, экспериментально показана перспективность использования двухимпульсного режима работы КМПУ в плазмодинамической системе нанесения медного покрытия на алюминиевые поверхности. При практическом сохранении общих закономерностей влияния параметров системы на величины электроэрозионной наработки материала и площади покрытия двухимпульсный режим обеспечивает значительное снижение уровня тока электропитания и позволяет исключить или существенно снизить эрозию обрабатываемой поверхности.

На основании выше приведенных результатов исследований можно сделать следующие выводы:

1. Разработаны научно-технические основы плазмодинамического метода нанесения медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью КМПУ с медными электродами, работающего в одноимпульсном и двухимпульсном режимах.

2. Предложен способ инициирования дугового разряда в УК КМПУ с помощью углеродной токопроводящей перемычки, наносимой на поверхность КФПС и торец стеклопластикового изолятора ЦЭ. Экспериментально определена оптимальная величина сопротивления перемычки 300÷600 Ом, обеспечивающая минимальную длительность безтоковой паузы менее 10 мкс между моментами замыкания цепи электропитания и началом дуговой стадии разряда.

3. Исследование динамики плазменной струи показало, что момент выхода плазмы из УК практически совпадает с моментом достижения максимума мощности разряда. Оптимизация энергетики электропитания КМПУ и геометрии УК обеспечивает регулирование скорости струи на срезе УК в пределах до 5,0 км/с.

4. Установлен характер электроэрозионного износа по длине медного УК. Определена основная закономерность влияния параметров КМПУ на величину нарабатываемого и выносимого из УК медного материала с учётом режима работы ускорителя. Доказано, что при

накапливаемой энергии  $W_c=35\div 55$  кДж оптимальная длина УК не превышает 180 мм.

5. Установлена корреляционная связь между основными параметрами плазмодинамической системы и площадью медного покрытия на алюминиевой мишени. Качественное покрытие площадью  $160\div 200$  см<sup>2</sup> обеспечивается при расстоянии от среза УК до мишени  $225\div 250$  мм.

6. Установлено, что двухимпульсный режим работы КМПУ позволяет наносить качественные медные покрытия при значительном снижении уровня тока электропитания ускорителя с длительностью безтоковой паузы между импульсами около 700 мкс.

## ГЛАВА 4. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ И ХАРАКТЕРИСТИК МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ПЕРЕХОДНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ КОНТАКТНОЙ ПАРЫ МЕДЬ-АЛЮМИНИЙ

Настоящая глава посвящена изучению и анализу качественных и количественных характеристик медных плазмодинамических покрытий на алюминиевых контактных поверхностях и их влиянию на переходное электрическое сопротивление силовых контактных пар медь-алюминий. Для проведения исследований отобраны наиболее качественные по внешним признакам алюминиевые мишени с медным покрытием. Из них вырезаны и подготовлены образцы для: проведения измерений переходного сопротивления; рентгеновского структурно-фазового анализа; исследований микроструктуры покрытия, подложки и переходных границ; профилометрических исследований поверхности покрытия; исследований физико-механических характеристик.

### 4.1 Исследования переходного сопротивления электроконтактных пар

Измерения переходных сопротивлений контактных пар проведены вольтамперным способом по методике, описанной в разделе 2.8 [79, 100]. Из алюминиевых мишеней с медным покрытием вырезаны образцы контактных элементов в виде дисков диаметром 40 мм с осевым отверстием диаметром 18 мм, толщиной 15 мм и площадью кольцевой контактной поверхности  $S_k=1001,7 \text{ мм}^2$ . Кроме того, изготовлены такие же контактные элементы из меди и алюминия, используемые в качестве ответных элементов в контактной паре и для измерения сопротивлений тестовых контактных пар медь-алюминий *Cu-Al*, медь-медь *Cu-Cu*, алюминий-алюминий *Al-Al*. Также

для тестовых измерений изготовлены элементы-прокладки из биметаллических пластин  $Cu/Al$ , выпускаемых промышленностью. Все измерения переходных сопротивлений  $R_k$  проведены в достаточно широком диапазоне изменения усилия сжатия  $N$  от 12,50 кН до 31,25 кН. Средняя величина этого диапазона 18,7 кН, соответствующая моменту силы затяжки стального болта М16 60 Н·м, регламентирована ГОСТ 10434-82 [101], а максимальная 31 кН (~100 Н·м) рекомендована при болтовом соединении элементов из меди и твёрдых алюминиевых сплавов. Сравнительный анализ результатов измерений  $R_k$  для большого числа контактных пар медь-алюминий с медным покрытием ( $Cu-Al_{Cu}$ ) позволил выделить несколько наиболее типичных случаев, представленных в таблице 4.1, в сравнении с тестовыми контактными парами  $Cu-Cu$ ,  $Cu-Al$ ,  $Al-Al$  (с указанием  $R_k$  при  $N=18,7$  кН). Кроме того, в таблице приведены величины  $R_k$  некоторых специфических вариантов совмещения контактной пары  $Cu-Al$  и  $Al-Al$ : алюминий – медь с алюминиевым покрытием ( $Cu_{Al}-Al$ ); алюминий с медным покрытием – алюминий с медным покрытием ( $Al_{Cu}-Al_{Cu}$ ); алюминий – медь с биметаллической прокладкой при правильной ( $Al-Al/Cu-Cu$ ) и неправильной ( $Cu-Al/Cu-Al$ ) их установке; алюминий – медь с медной смазкой ( $Cu-Cu_{смазка}-Al$ ) и медь – алюминий с покрытием и с медной смазкой ( $Al_{Cu}-Cu_{смазка}-Cu$ ). Кривые изменения  $R_k$  в зависимости от усилия сжатия  $N$  для всех случаев представлены на рисунке 4.1 и 4.2. На этих графиках выделены кривые  $R_k(N)$ , соответствующие тестовым контактным переходам  $Cu-Cu$ ,  $Al-Al$  и  $Cu-Al$ , диапазон  $R_k$  между которыми следует считать наиболее предпочтительным в плане решения поставленных задач – совмещения контактной пары  $Cu-Al$  и снижение её  $R_k$ . Однако как видно на рисунках 4.1 и 4.2, это выполняется не во всех рассматриваемых случаях даже при использовании контактных элементов, вырезанных из мишеней с «качественным» по внешним признакам покрытием. В общем, кривые  $R_k(N)$  имеют близкий к экспоненциальному характер снижения  $R_k$  с увеличением сжимающего усилия.



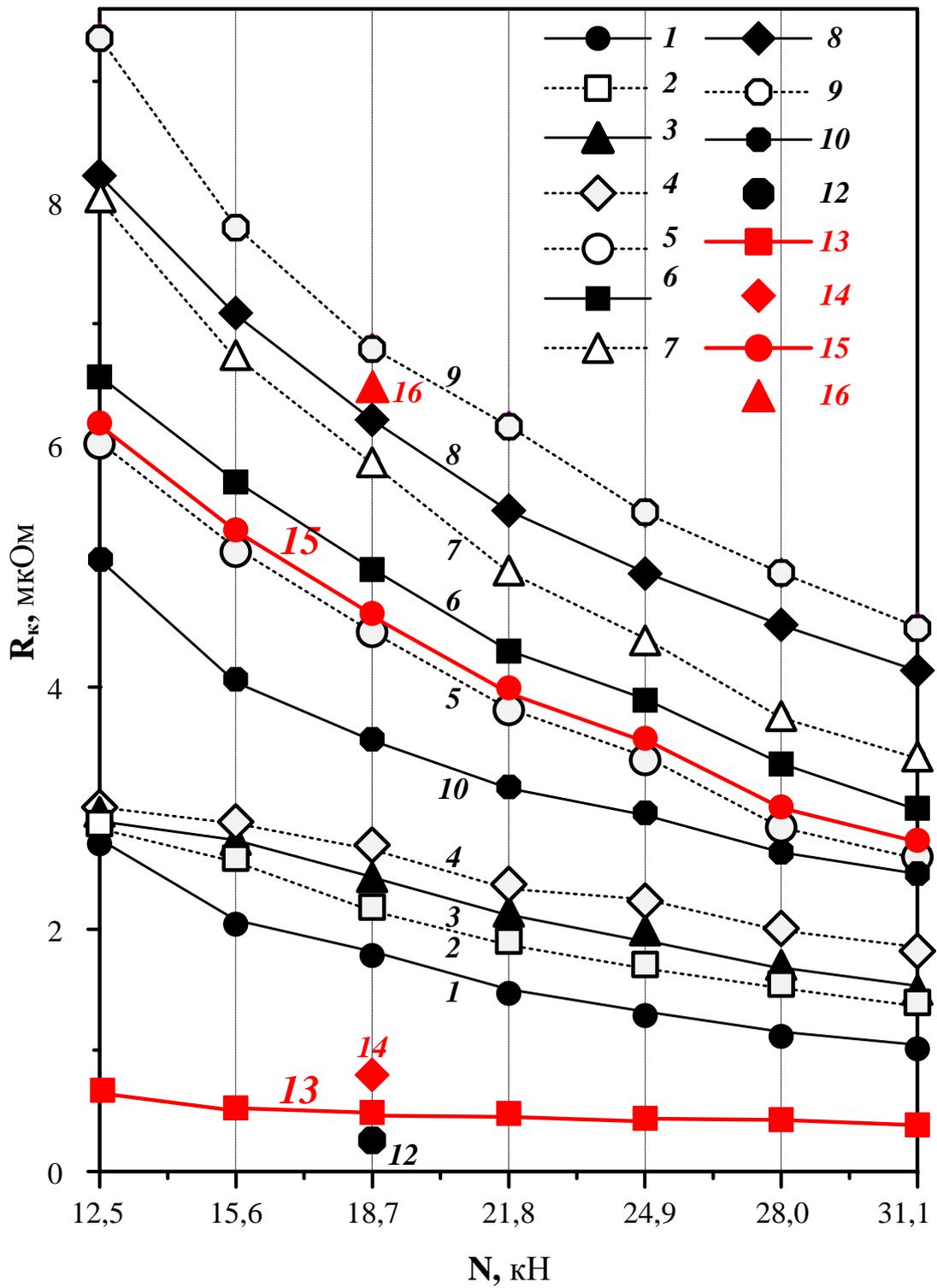


Рисунок 4.1 – Зависимость  $R_k$  от  $N$  контактных пар различного вида. Номера кривых соответствуют позициям в таблице 4.1

В некоторых случаях наблюдается отклонение экспериментальных значений  $R_k$  от монотонных трендовых линий из-за возможной неточности затяжки болтового соединения динамометрическим ключом (субъективная ошибка), либо из-за наличия неоднородностей или локальных дефектов

покрытия, которые невозможно оценить по внешним признакам. Взаимное расположение кривых  $R_k(N)$  исследуемых и тестовых контактных пар, естественно, должно определяться параметрами плазодинамической системы, при которых наносились покрытия.

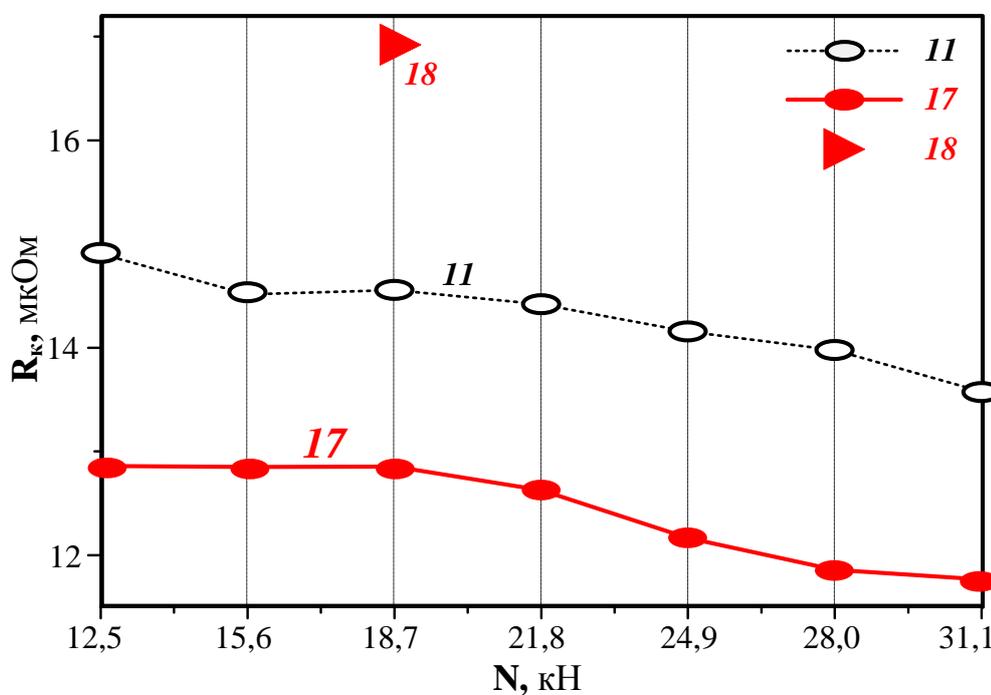


Рисунок 4.2 – Зависимость  $R_k$  от  $N$  контактных пар различного вида. Номера кривых соответствуют позициям в таблице 4.1

Для наглядности и упрощения анализа данные таблицы 4.1 представлены на рисунке 4.3 в виде корреляционных зависимостей  $R_k$  (при нагрузке 18,7 кН) от основных параметров системы. Рядом с каждой точкой цифрами указаны  $d_{yк}$  (чёрным цветом) и  $l_{ст-м}$  (красным цветом), которые также приведены в таблице 4.1. Горизонтальными линиями выделена область между величинами  $R_k$  тестовых контактных пар **Cu-Cu** (0,48 мкОм) и **Cu-Al** (4,6 мкОм). В эту область попадают  $R_k$  контактных пар, соответствующих нанесению покрытий при  $d_{yк}=10\div 12$  мм. Все значения  $R_k$ , соответствующие  $d_{yк}=15$  мм располагаются выше уровня 4,6 мкОм тестовой пары **Cu-Al**. Это следует считать одним из основных результатов, показывающим, что в рассматриваемом диапазоне энергетических параметров наиболее качественное медное покрытие на алюминиевой контактной поверхности,

обеспечивающее минимальный уровень переходного сопротивления, достигается при  $d_{УК}$  10÷12 мм.

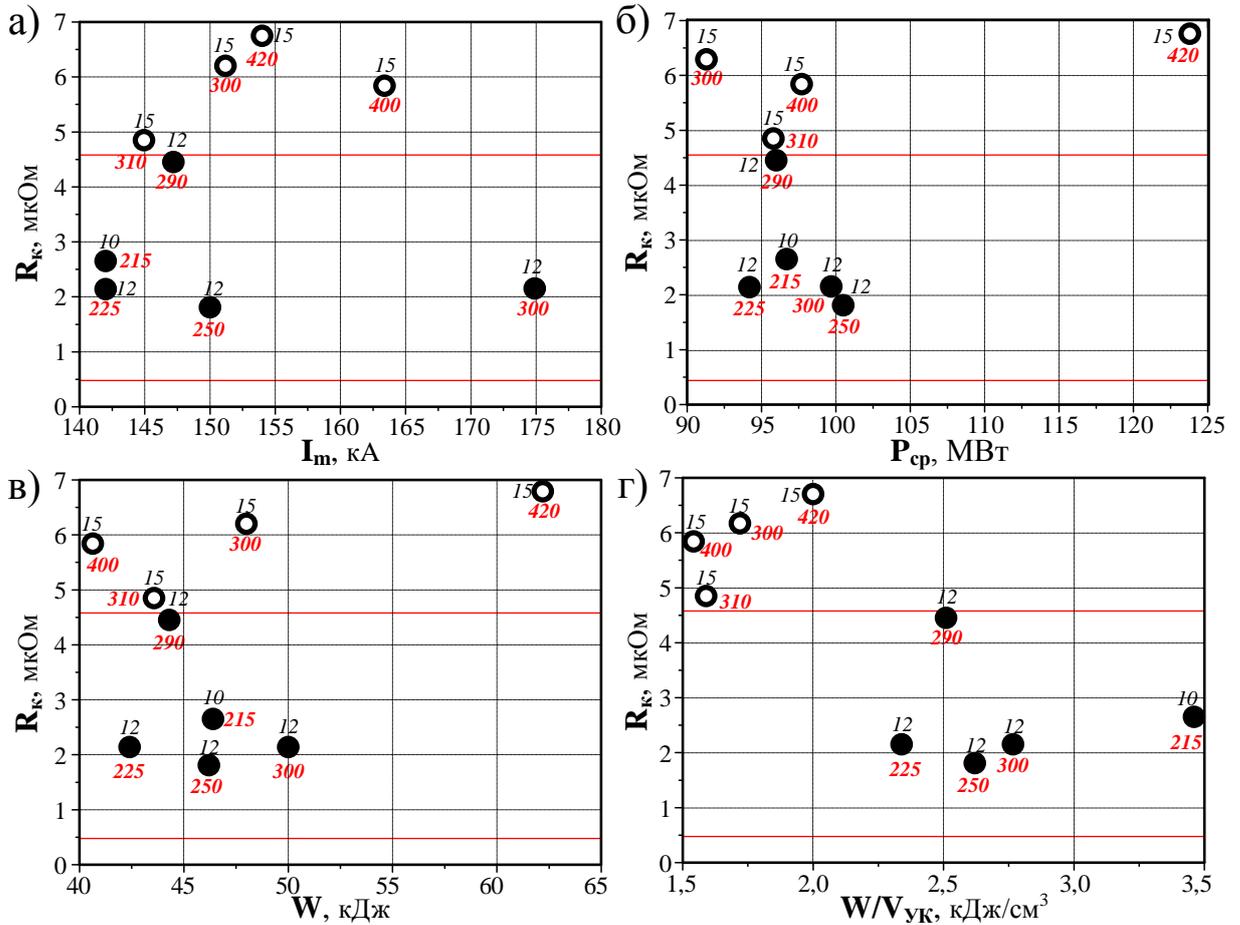


Рисунок 4.3 – Экспериментальные корреляционные зависимости  $R_k$  от: а) максимального тока  $I_m$ ; б) средней мощности  $P_{cp}$ ; в) подведённой энергии  $W$ ; г) удельной подведённой энергии  $W/V_{УК}$

Во всех вариантах представления на рисунке 4.3 наблюдается тенденция роста  $R_k$  с увеличением параметров, что наиболее выражено в случаях  $d_{УК}=15$  мм. Это связано, по-видимому, с повышением неравномерности покрытия. Наиболее информативным и адекватным является представление результатов измерения  $R_k$  в зависимости от обобщённого параметра удельной подведённой энергии  $R_k(W/V_{УК})$ . Наиболее явная корреляция согласуется с увеличением удельной наработки материала с поверхности УК  $m/W$  (рисунок 3.12) и ростом площади покрытия  $S$  (рисунок 3.14) с повышением  $W/V_{УК}$ . Увеличение  $m/W$  соответствует повышению кинетической энергии массы, действующей на поверхность

мишени, что приводит к усилению дефектности. Повышение  $S$  может быть причиной увеличения неоднородности покрытия. Оба эти фактора могут привести к некоторому ухудшению переходного контакта.

При оптимальном  $d_{УК}=12$  мм минимальный уровень  $R_k$  достигается при нанесении покрытия с удалением мишени от среза УК на расстояние  $l_{см-м}=250$  мм, соответствующее примерному положению диска Маха второй «бочки» ударно-волновой структуры (разделы 3.2 и 3.5). Отклонение  $l_{см-м}$  от этой величины в большую или меньшую сторону влечёт некоторое ухудшение качества поверхности покрытия и незначительный рост  $R_k$ . Очевидно, что на практике описанное изменение  $R_k$  в пределах  $1\div 4$  мкОм не имеет принципиального значения, поэтому можно утверждать, что близкими к оптимальным являются следующие условия нанесения медного покрытия площадью от  $80\text{ см}^2$  до  $150\text{ см}^2$ :  $l_{см-м}\cong 250$  мм;  $d_{УК}=12$  мм;  $l_{УК}=150\div 160$  мм;  $W/V_{УК}\cong 1,4\div 3,5$  кДж/см<sup>3</sup>.

Анализ данных, приведённых в таблице 4.1 и на рисунке 4.1, позволяет оценить величины переходных сопротивлений между медным покрытием и алюминиевой подложкой  $R_{П}$ . Для этого принято допущение, что контактное сопротивление между поверхностью тестового медного элемента и медной поверхностью покрытия на алюминиевом испытуемом элементе близко к переходному сопротивлению тестовой контактной пары  $Cu-Cu$ . Тогда сопротивление  $R_{П}$  будет равно разнице измеренных величин  $R_k$  контактных пар  $Cu-Al_{Cu}$  и  $Cu-Cu$  (тестовая). Для случая минимального  $R_k$  (таблица 4.1 позиция 1 и рисунок 4.1 кривая 1) при максимальной силе сжатия  $N=31,1$  кН эта разница составит  $\Delta R\cong R_{П}\cong 0,67$  мкОм. Однако для тестового контактного соединения  $Cu-Al$  при той же сжимающей нагрузке  $N$  измеренное сопротивление составило  $2,72$  мкОм. Таким образом, установлено, что переходное контактное сопротивление между медным покрытием и алюминиевой подложкой в  $\sim 4,0$  раза меньше сопротивления тестовой контактной пары  $Cu-Al$ . Это может быть объяснено несколькими

причинами: значительным увеличением фактической контактной площади и более полным контактированием за счёт волнообразования при мощном воздействии сверхзвуковой плазменной струи; особенностями микроструктуры, фазового состава и механическими свойствами граничного переходного слоя.

Задача совмещения контактной пары ***Cu-Al*** может быть решена путём нанесения алюминиевого покрытия на медную поверхность. Такой вариант реализован с помощью КМПУ с алюминиевыми электродами при следующих параметрах системы:  $C=24$  мФ,  $U_{zap}=3,2$  кВ,  $d_{yк}=16$  мм,  $l_{yк}=260$  мм,  $l_{cm-m}=220$  мм. При этом наработка материала составила  $m=26,0$  г и получено качественное покрытие площадью  $S=180$  см<sup>2</sup>. Однако переходное сопротивление контактной пары ***Cu<sub>Al</sub>-Al***, как видно на рисунке 4.2 (кривая 11), находится в диапазоне  $13,6 \div 14,9$  мкОм и существенно превышает  $R_k(N)$  тестовой пары ***Al-Al*** (кривая 17). Здесь уместно привести данные по  $R_k$  тестовой пары ***Cu-Al*** с использованием прокладки из стандартной биметаллической пластины ***Cu/Al***, широко используемой на практике для совмещения контактной пары. На рисунке 4.2 (точка 18) приведено измеренное значение  $R_k$  при стандартной нагрузке  $N=18,7$  кН, которое ещё более превышает уровень тестовых контактных пар ***Cu-Al*** (кривая 15 рисунок 4.1), ***Al-Al*** (кривая 17 рисунок 4.2), и рассмотренной пары ***Cu<sub>Al</sub>-Al*** (кривая 11 рисунок 4.2). То есть при «правильном» использовании биметаллической прокладки на практике решается только задача совмещения, но переходное сопротивление контакта при этом увеличивается в 2-3 раза по сравнению с обычным соединением ***Cu-Al*** из-за включения дополнительного контактного перехода ***Al-Al***. Из рисунка 4.2 (кривая 17)  $R_k$  контактной пары ***Al-Al*** в рассматриваемом диапазоне  $N$  очень велико  $11,5 \div 13,0$  мкОм. Это, естественно, приводит к существенным потерям электроэнергии и чрезмерному нагреву места соединения. Такое соединение повсеместно присутствует в электрических сетях, выполненных проводами и кабелями с алюминиевыми жилами и комплектными алюминиевыми

шинопроводами. В этой связи в работе проведены измерения переходных сопротивлений контактных пар из алюминиевых элементов с контактирующими медными покрытиями  $Al_{Cu}-Al_{Cu}$ . Используются образцы  $Al_{Cu}$ , обеспечивающие лучшие результаты в контактных парах  $Cu-Al_{Cu}$  (кривые 1 и 2 рисунок 4.1). Результаты измерения  $R_k$  для этого случая представлены на рисунке 4.1 кривой 10. Как видно  $R_k$  этой пары ниже сопротивления тестового соединения  $Cu-Al$  и в 2-3 раза меньше сопротивления тестовой пары  $Al-Al$ . Этот результат является одним из наиболее важных, так как позволяет значительно снизить переходные сопротивления промежуточных контактных соединений алюминиевых проводников.

В настоящее время на практике используются специальные смазки на основе медных порошков, например ЭПС-98. Это обеспечивает беспрецедентное снижение  $R_k$  пары  $Cu-Al$  при однократном использовании. Как показали наши измерения,  $R_k$  пары  $Cu-Cu_{смазка}-Al$  снижается до величины, сопоставимой с минимальным  $R_k$  тестовой пары  $Cu-Cu$  (точка 14 на рисунке 4.1). Однако дополнительное использование медной смазки в контактной паре  $Cu-Al_{Cu}$  обеспечивает ещё большее снижение  $R_k$ , до уровня, показанного точкой 12 на рисунке 4.1, более низкого, чем  $R_k$  пары  $Cu-Cu$ . Этот результат практически сопоставим с оценочными данными о величине сопротивления собственно границы перехода медное покрытие – алюминиевая подложка. В общем положительный эффект от использования медной смазки заключается в заполнении пространства между микровыступами на контактных поверхностях приводящее к значительному увеличению площади реальной контактной поверхности. Однако это происходит только при первом соединении с жидкообразной смазкой и в процессе эксплуатации смазка затвердевает. Поэтому при ревизии соединения необходимо удалять затвердевшую смазку, наносить снова и производить соединение. Кроме того, при циклических электрических и термических нагрузках происходит физическая и химическая деградация

связующего материала смазки, приводящая к заметному увеличению переходного сопротивления и ухудшению условий электрохимического согласования пары *Cu-Al*.

Ранее проведённые исследования [102] показали, что в температурном диапазоне от +20 °С до +110 °С, переходное сопротивление контактной пары *Cu-Al<sub>Cu</sub>* изменяется не более, чем в 4 раза, и не превышает 5,0 мкОм. Приведённые в этой работе экспериментальные результаты показали сохранение контактными соединениями *Cu-Al<sub>Cu</sub>* своих характеристик при длительных циклических нагрузках переменным током с номинальной плотностью.

Таким образом, прямыми измерениями переходных сопротивлений контактных пар *Cu-Al<sub>Cu</sub>* установлено, что нанесение медного покрытия на алюминиевую контактную поверхность при оптимальных параметрах плазгодинамической системы обеспечивает более чем двукратное снижение переходного сопротивления контактной пары *Cu-Al* и трёхкратное снижение сопротивления контактной пары *Al-Al*. Оценка величины переходного сопротивления между медным покрытием и алюминиевой подложкой  $R_{\text{П}}$  (контактным элементом) показала значения, сопоставимые с переходным сопротивлением контактной пары *Cu-Cu*, и примерно в 4,0 раза меньше, чем сопротивление контактной пары *Cu-Al*.

## **4.2 Микроструктура и фазовый состав медного покрытия на алюминиевой подложке**

В предыдущем разделе 4.1 проведена оценка сопротивления граничного перехода  $R_{\text{П}}$  между медным покрытием и алюминиевой подложкой, которая показала, что  $R_{\text{П}}$  составляет порядка  $10^{-7}$  Ом. Это на порядок меньше, чем величина  $R_{\text{к}}$  тестовой контактной пары *Cu-Al*. Для объяснения такой разницы проведены исследования микроструктуры покрытия методами оптической микроскопии и сканирующей электронной

микроскопии (SEM). Для этого выбраны образцы, показавшие в соединении с тестовыми медными контактными элементами, отличающиеся величины  $R_k$ . Основные параметры плазменных выстрелов по получению этих образцов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры экспериментов, при которых получены выбранные образцы

Параметры		<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
$U_{зар}$	кВ	3,5	3,0	3,0	3,5
$C$	мФ	12	18	18	12
$W_c$	кДж	73,5	81,0	81,0	73,5
$I_m$	кА	142	147	151	148
$P_m$	МВт	186,0	188,6	188,1	192,7
$W$	кДж	42,4	44,3	48,0	43,0
$P_{cp}$	МВт	94,2	96,0	91,3	98,4
$W/V_{yк}$	кДж/см <sup>3</sup>	2,34	2,51	1,72	2,43
$l_{yк}$	мм	160	156	158	156
$d_{yк}$	мм	12	12	15	12
$l_{cm-m}$	мм	225	290	300	270
$R_{k(N=18,7 \text{ кН})}$	мкОм	2,14	4,45	6,20	8,90

На рисунке 4.4 представлены типичные оптические микроснимки поверхности шлифов поперченного среза образцов с хорошо выделяющимся слоем медного покрытия, границей раздела и телом алюминиевой подложки, соответствующие разным условиям нанесения покрытий и разным величинам  $R_k$  (таблица 4.2). Во всех случаях поверхность покрытия характеризуется сильной шероховатостью не менее: а) 5,4 мкм, б) 13,1 мкм и в) 24,8 мкм. С учётом функционального назначения, как электроконтактной поверхности, наличие шероховатости является положительным фактором, возникающим непосредственно при нанесении покрытия. Шероховатость обеспечивает большое число контактных точек с ответной плоскостью медного контактного элемента. По типичным снимкам видно последовательное уменьшение толщины покрытия, соответствующее увеличению  $R_k$  от 2,14 мкОм в случае а); до 6,2 мкОм в случае в).

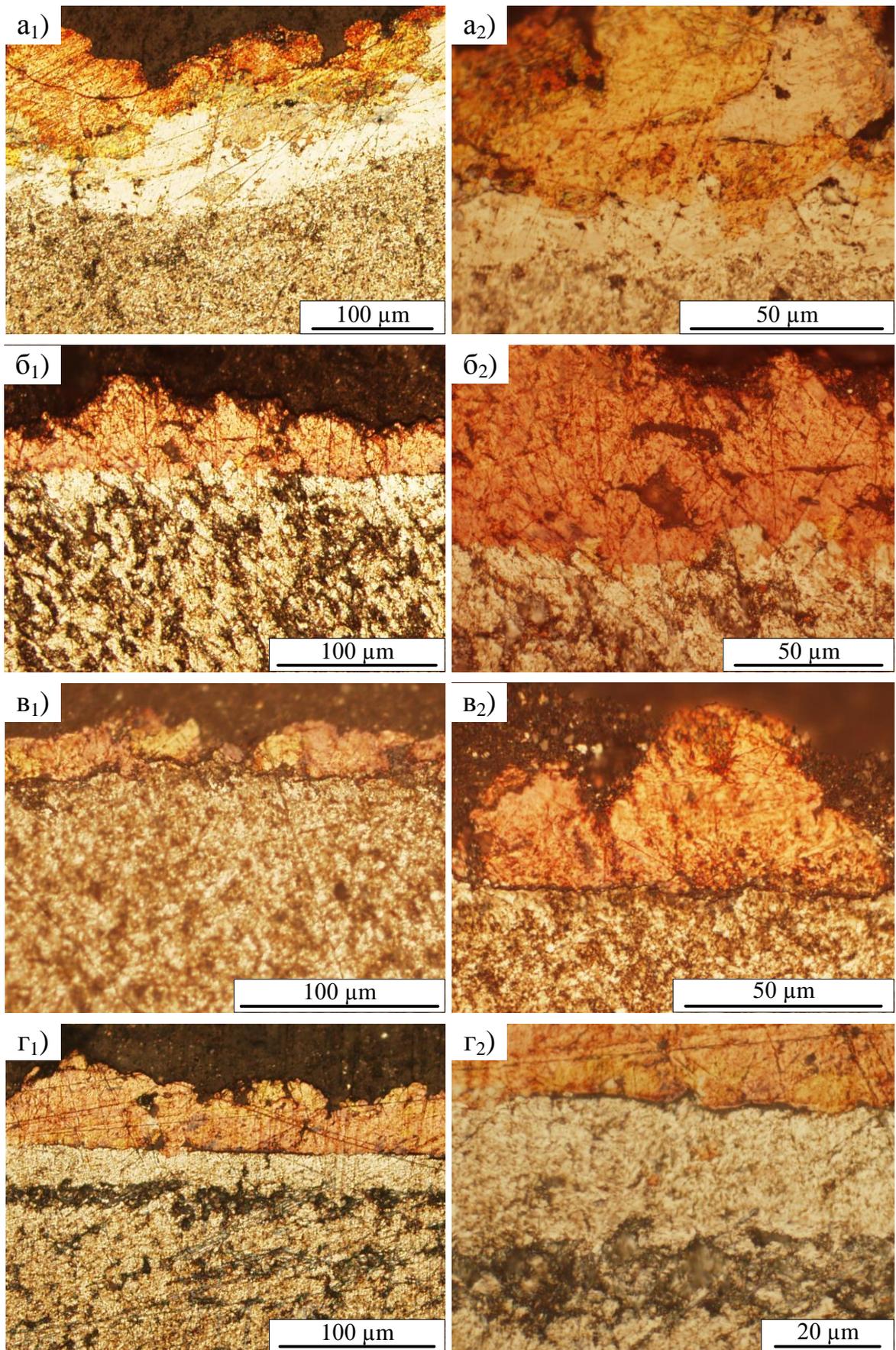


Рисунок 4.4 – Оптические микроснимки шлифов поперечного среза алюминиевых образцов с медным покрытием

Обращает на себя внимание, что в случаях а) и б) покрытия абсолютно плотно прилегают к поверхности подложки, повторяя все её микронеровности, как имеющиеся на исходной поверхности алюминиевой подложки, так и возникшие при высокоскоростном воздействии плазменной струи (рисунок 4.4). По нескольким микроснимкам для каждого образца определены средние длины кривых волнообразных линий контакта на одинаковых единичных интервалах. Принимая допущение о равенстве длин линий контакта по двум координатам, проведено оценочное сравнение площадей неровной граничной поверхности контакта  $S_{\Pi}$  с геометрической площадью единичного плоского квадрата контактной поверхности  $S_2$ , ограничивающего  $S_{\Pi}$ . В случае а)  $S_{\Pi}/S_2=4,8$ , а в случае б)  $S_{\Pi}/S_2=3,4$ . То есть реальная контактная площадь между покрытием и подложкой за счёт своей неровности значительно превышает площадь плоского квадрата. Это отношение ещё более возрастает, так как реальные и тестовые элементы в реальных условиях контактируют не по всей поверхности, а по имеющимся микровыступам, что соответствует её уменьшению по сравнению с  $S_2$ . Это сравнение однозначно показывает одну из основных причин того, что сопротивление перехода медное покрытие-алюминиевая подложка  $R_{\Pi}$  в несколько раз меньше  $R_k$  тестового контакта *Cu-Al*.

Вторым фактором, обеспечивающим низкое переходное сопротивление  $R_{\Pi}$  порядка  $10^{-7}$  Ом, является образование граничного слоя взаимного перемешивания материалов покрытия (*Cu*) и подложки (*Al*). Согласно данным энергодисперсионного анализа (EDAX), его толщина в отдельных местах достигает ~50,0 мкм и более. В пределах слоя соотношение материалов достаточно плавно изменяется, а на предлагаемой границе составляет примерно *Al:Cu* – 50%:50%. На микроснимках рисунок 4.4а<sub>1</sub>-а<sub>2</sub>) этот слой выделяется светлым тоном. Такой же слой, но меньшей толщины, различим и на других микроснимках (рисунок 4.4 б<sub>1</sub>-б<sub>2</sub>). Данные о фазовом составе медного покрытия и граничного слоя получены методом рентгеновской дифрактометрии (XRD) (рисунок 4.5 и таблица 4.3).

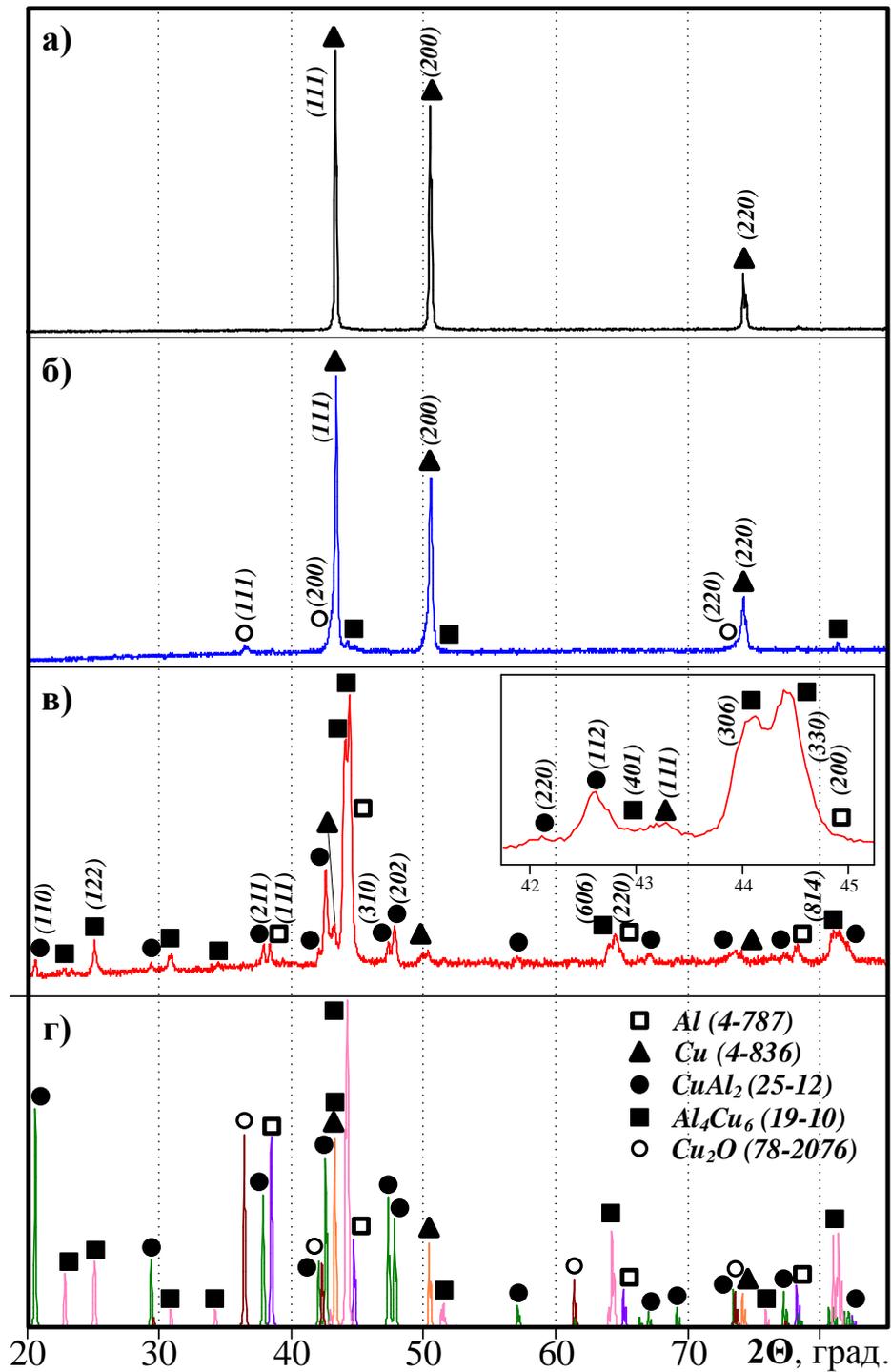


Рисунок 4.5 – XRD-картины: а) покрытие, нанесённое в аргоне; б) покрытие, нанесённое в воздухе; в) поверхность сошлифованного покрытия; г) структурные модели

На рисунке 4.5 приведены типичные дифрактограммы (XRD-картины) в сопоставлении со структурными моделями из базы данных PDF-2: а) поверхности медного покрытия, нанесённого в инертной атмосфере аргона; б) и в) поверхности покрытия, нанесённого в воздухе и

сошлифованного покрытия на глубину около 100 мкм образца, соответственно, показавшего минимальное сопротивление  $R_k$  (таблица 4.2 позиция а), рисунок 4.4 а<sub>1</sub>-а<sub>2</sub>). XRD-картина, представленная на рисунке 4.5а), содержит исключительно рефлексы кристаллической меди и показывает, что в поверхности покрытий, нанесённых в инертной атмосфере, отсутствуют другие кристаллические материалы. Близкое к «стандартному» соотношение интенсивностей рефлексов кубической структуры *Cu* свидетельствует об отсутствии текстуры материала покрытия, а характер фоновой линии показывает отсутствие в материале рентгеноаморфной компоненты. Методом рентгеноструктурного анализа установлено (таблица 4.3), что средний размер областей когерентного рассеяния (ОКР) кристаллитов *Cu* составляет около 30 нм, а показатель внутренних микроискажений –  $\Delta d/d \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$ . Причиной возникновения наноструктуры и достаточно напряжённого состояния является высокая динамика охлаждения и кристаллизации меди при её высокоскоростном осаждении на подложке из высокотеплопроводящего металла при комнатной температуре. Это может быть причиной повышения микротвёрдости покрытия.

Таблица 4.3 – Результаты рентгеноструктурного анализа XRD-картин, представленных на рисунке 4.5

	Фаза	Процентное содержание, %	ОКР, нм	$\Delta d/d \cdot 10^{-3}$	Параметры решетки, Å
а	<i>Cu</i>	100,00	31,90	1,067	a=3,6120
б	<i>Cu</i>	97,10	60,79	1,287	a=3,6117
	<i>Cu<sub>2</sub>O</i>	1,43	59,77	1,244	a=4,2577
	<i>Cu<sub>6</sub>Al<sub>4</sub></i>	1,46	88,30	0,798	a=12,2803; c=15,1465
в	<i>Cu</i>	11,25	15,24	0,471	a=3,6345
	<i>Al</i>	6,93	45,76	0,973	a=4,0577
	<i>CuAl<sub>2</sub></i>	13,38	47,96	0,658	a=6,0736; c=4,8788
	<i>Cu<sub>6</sub>Al<sub>4</sub></i>	68,44	45,08	1,059	a=12,2245; c=15,1688

В настоящей работе, в соответствии с поставленной задачей, исследования по нанесению медного покрытия проведены в воздушной атмосфере при нормальных условиях. Присутствие кислорода, естественно, должно приводить к окислению меди. Это происходит при плазменном выстреле в свободное воздушное пространство в процессе проведения плазмодинамического синтеза оксидов меди, как показано в работе [103]. Оксиды меди синтезируются и при распылении меди после воздействия на преграду-мишень. Однако, как показывают XRD-картина поверхности медного покрытия (рисунок 4.5б) и рентгеноструктурный анализ (таблица 4.3 позиция б), на поверхности покрытия доминирует кристаллическая фаза меди. Наблюдается лишь очень слабые по интенсивности рефлексы оксида меди  $Cu_2O$ , содержание которого не превышает ~2%. Кроме того, присутствуют ещё более слабые отражения, возможно, отвечающие интерметаллическим фазам  $Al_4Cu_6$  или  $CuAl_2$ . Это предположение однозначно подтверждается XRD-картиной (рисунок 4.5в) отшлифованной на глубину около 100 мкм поверхности медного покрытия образца, показавшего минимальное  $R_K$  контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$ . Рентгеноструктурный анализ (таблица 4.3) показал, что в приграничной области покрытие-подложка суммарное содержание интерметаллидных фаз может достигать более 80%. Эти данные говорят о том, что наблюдаемый в структуре покрытия приграничный слой состоит, в основном, из интерметаллидных фаз системы  $Cu-Al$ , и наиболее выражен по толщине и плотности в случае, представленном на рисунке 4.4а) (таблица 4.2 позиция а). В случае, представленном на рисунке 4.4б) (таблица 4.2 позиция б), покрытие имеет меньшую толщину и более выраженную неоднородность, как собственно медного покрытия, так и приграничного слоя, состоящего частично из интерметаллидных фаз. Наиболее значимым различием между этими случаями, как видно из таблицы 4.2 (позиции а и б), является повышенное расстояние  $l_{ст-м}$  до 290 мм во втором случае. При сопоставимых величинах других параметров системы нанесения покрытия, указанное

увеличение  $\ell_{ст-м}$  приводит к заметному ухудшению качества покрытия из-за снижения динамических параметров фронта плазменной струи, плотности энергии взаимодействия с поверхностью подложки и рассеивания медного материала.

Ещё большее снижение интенсивности воздействия струи на подложку (таблица 4.2 позиция в) из-за увеличения  $\ell_{ст-м}$  до 300 мм и  $d_{УК}$  до 15 мм, обусловленное снижением  $W/V_{УК}$  до 1,72 кДж/см<sup>3</sup> и скорости взаимодействия, приводит к более существенной деградации качества покрытия, как это видно на рисунке 4.20в). Медное покрытие становится очень тонким и неравномерным. В его структуре не образуется приграничный слой. Однако наиболее негативным проявлением влияния указанного изменения условий следует считать образование на отдельных граничных участках явно выраженных зазоров между покрытием и подложкой с поперечным размером порядка 1,0 мкм. Наиболее вероятно, что именно частичное отслоение медного покрытия от алюминиевой подложки является основной причиной увеличения  $R_k$  контактной пары с этим образцом до величины более 6 мкОм.

Наиболее худший, противоречивый результат с измеренным  $R_k \cong 9$  мкОм ( $N=18,7$  кН) показала контактная пара на основе элемента, изготовленного из алюминиевой мишени с достаточно качественным медным покрытием (по внешним признакам), нанесенным в условиях, указанных в таблице 4.2 позиция г). Как видно, условия отличаются от случая а) повышенными мощностью разряда в УК, удельной подведённой энергии и, следовательно, скоростью медной струи. Поэтому даже при увеличенной  $\ell_{ст-м}=270$  мм возникли внутренние дефекты граничной области, как видно на типичных микроснимках на рисунке 4.4г). Получено достаточно равномерное по толщине медное покрытие, имеющее приграничный слой повышенной плотности. Но между этим слоем и телом подложки образовался неоднородный зазор шириной около 10 мкм. Кроме того, произошло разрыхление приграничного слоя подложки на глубину порядка

100 мкм. Можно отметить и образование локальных микронных зазоров между медным поверхностным и приграничным слоями.

Образование такой негативной особенности микроструктуры граничной области может быть объяснено только ударно-волновым эффектом откола, возникающим при распространении отраженной волны разряжения на некотором расстоянии от свободной границы твёрдого тела, когда растягивающее усилие превышает предел прочности материала на разрыв. Естественным следствием такого дефекта является увеличение  $R_{II}$  и  $R_k$  контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$ .

Ещё одним фактором, обеспечивающим снижение  $R_{II}$  между медным покрытием и алюминиевой подложкой, является эффект сверхглубокого проникания (СГП) материала покрытия в подложку [104, 105]. В работах [106-108] убедительно показано, что в рассматриваемых условиях воздействия сверхзвуковой струи высокоплотного материала на плоскую поверхность алюминиевой мишени СГП происходит по микрокумулятивному механизму на глубину порядка 100 мкм, а поперечный размер микрокумулятивных струй составляет порядка 1,0 мкм. То есть в низкоплотный материал подложки проникают не отдельные частицы, а микрокумулятивные струи. Причём траектория их проникания не является прямолинейной, особенно на конечных участках, а проходит по менее плотным межзёренным границам. Поэтому в плоскостях шлифов могут вскрываться лишь участки траектории из затвердевшей кумулятивной струи, которые принимаются за отдельные частицы. Наличие внедрившихся кумулятивных струй из меди, соединяющих медное покрытие с подложкой, способствует снижению величины  $R_{II}$  и повышению прочности сцепления покрытия с подложкой. Проявление микрокумулятивных процессов СГП в рассматриваемых условиях подтверждаются микроснимками на рисунке 4.6. На SEM-снимке а) показан типичный трек сверхглубокого проникания, вскрывшийся в плоскости шлифа с поперечным размером 1-3 мкм и длиной более 30 мкм, в котором выделяются фрагменты медной кумулятивной

струи. Кроме того, при анализе шлифов образцов, показавших минимальное значение  $R_k$ , впервые обнаружены граничные слои (SEM-снимок б), 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.

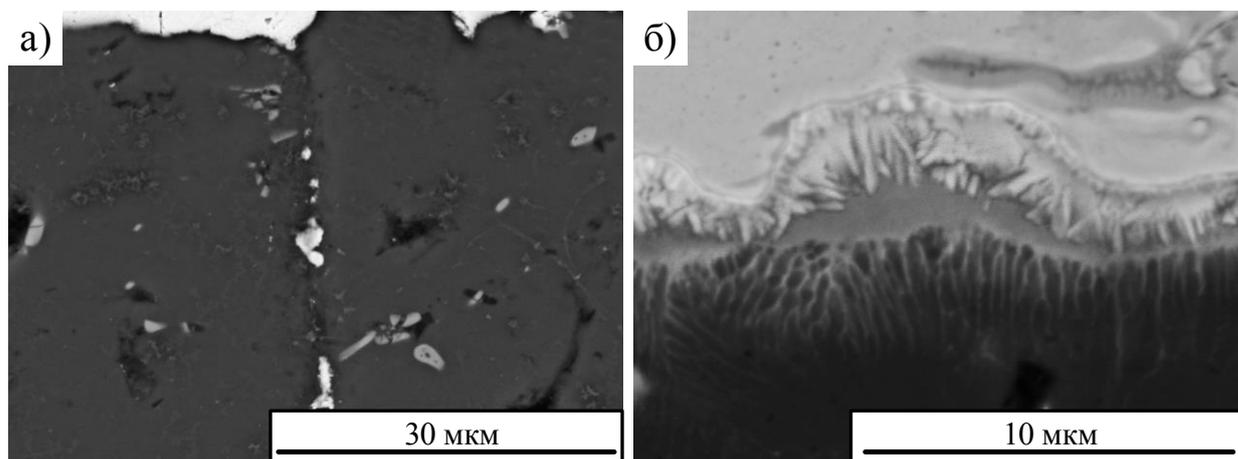


Рисунок 4.6 – SEM-снимки шлифов поперечного среза алюминиевых подложек с медным покрытием

Таким образом, анализ микроструктуры медных покрытий и граничных слоёв с алюминиевой подложкой показал, что минимальные величины  $R_k$  контактных соединений  $Cu-Al_{Cu}$  достигаются за счёт плотного прилегания покрытия к подложке, образования приграничного интерметаллидного слоя и его прочного сцепления с подложкой по механизму взаимного гидродинамического перемешивания материалов, в том числе сверхглубокого проникания материала покрытия в материал подложки. Наиболее благоприятные условия для этого обеспечиваются при параметрах плазодинамической системы указанных в таблице 4.1 пункты 1-2.

### 4.3 Основные физико-механические свойства медного покрытия на алюминиевой подложке

Из анализа теории контактного переходного сопротивления [79] следует, что физико-механические свойства материалов контактирующих

элементов во многом определяют величину  $R_k$ . Согласно существующим представлениям, при пластическом контакте величина переходного контактного сопротивления прямо пропорциональна микротвёрдости материала. Поэтому, согласно теории, с ростом твёрдости материала микровыступов покрытия должно увеличиваться переходное контактное сопротивление пары  $Cu-Al_{Cu}$ .

В связи с этим, в работе проведены исследования физико-механических свойств материала покрытия, приграничных слоёв покрытия и подложки. Измерения проведены на автоматизированном приборе, отмеченном в разделе 2.6. Величина нормальной максимальной нагрузки на алмазный индентор Виккерса 300 мН определена экспериментально, исходя из условия, чтобы размер отпечатка был много меньше характерных размеров областей исследуемого образца с толщиной покрытия и приграничной области подложки около 100 мкм.  $P_{max}$  линейно увеличивалась от 0 до 300 мН в течение 1 минуты и без выдержки линейно снижалась до нуля за такое же время. Порядок индентирования по линейной траектории, нормальной к границе раздела покрытие-подложка, задавался в программном обеспечении. Обработка данных индентирования производилась с помощью программного обеспечения с выдачей результатов по микротвёрдости в виккерсах ( $H_v$ ) и в ГПа ( $H$ ). По тем же данным рассчитывалась величина модуля упругости  $E$  в ГПа. Измерения  $H$  и  $E$  проведены на шлифах поперечного среза образцов алюминиевых контактных элементов с медным покрытием, показавших наиболее низкие величины  $R_k$ . Полученные результаты для образцов, отмеченных в таблице 4.2 и показанных на рисунках 4.4а-в), приведены на рисунке 4.7 и 4.8, соответственно, в виде профилей  $H(x)$  и  $E(x)$  по толщине медного покрытия и алюминиевой подложки  $X$ . На графиках пунктирными горизонтальными линиями показаны величины  $H_{Cu}$ ,  $H_{Al}$  и  $E_{Cu}$ ,  $E_{Al}$  для металлических меди и алюминия (АД-31) [109].

По профилям  $H(x)$  (рисунок 4.7) видно, что в глубине подложки более 20 мкм микротвёрдость во всех случаях практически соответствует

стандартной величине для сплава АД-31  $H_{Al}=0,8$  ГПа и начинает возрастать лишь в приграничной области за счёт внедрения медного материала.

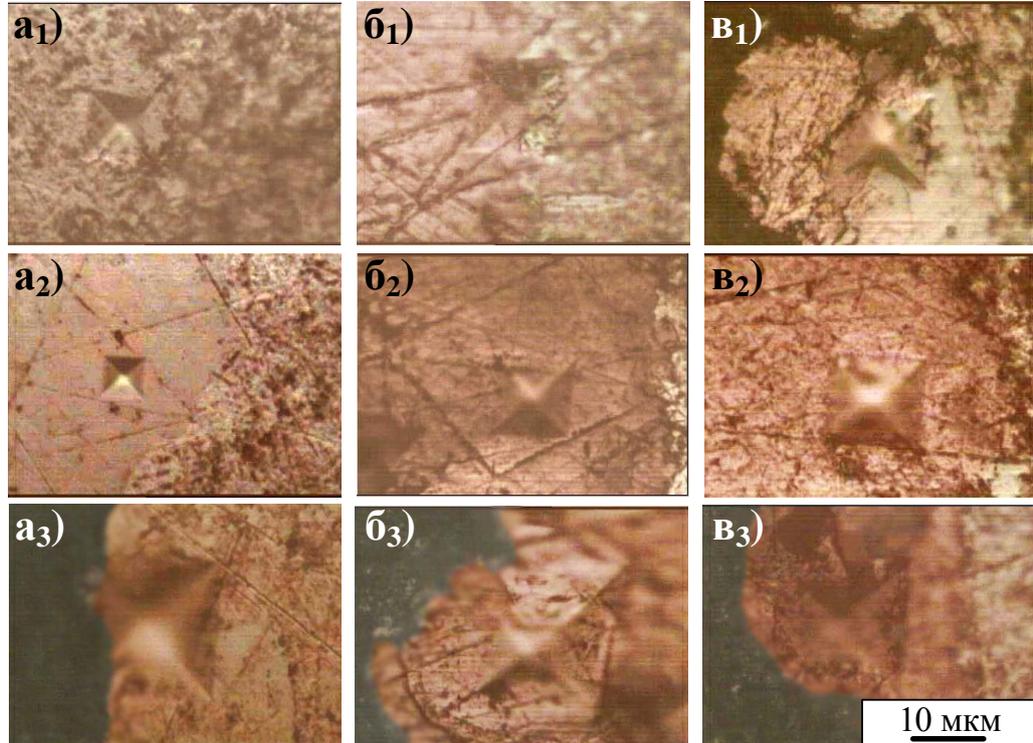
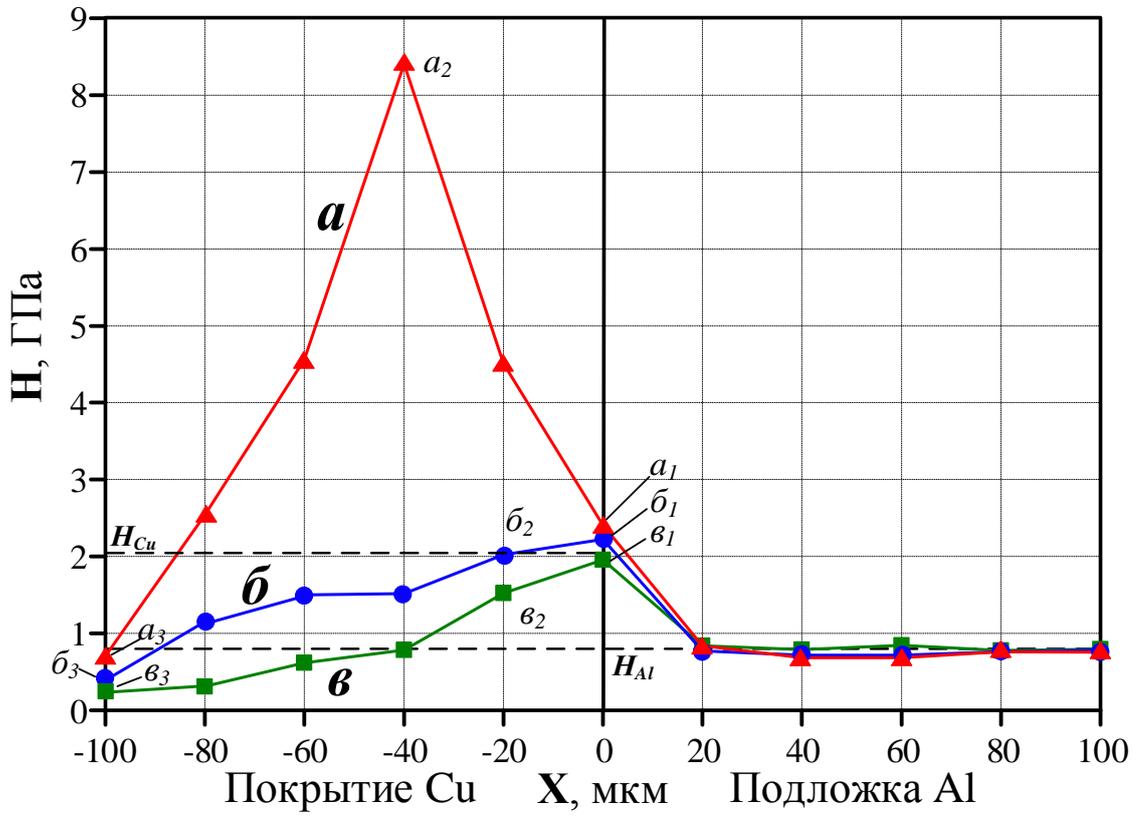


Рисунок 4.7 – Эпюры нанотвёрдости  $H(x)$  по толщине покрытие-подложка и оптические микроснимки отпечатков индентора в указанных на эпюрах точках. Данные опытов представлены в таблице 4.2

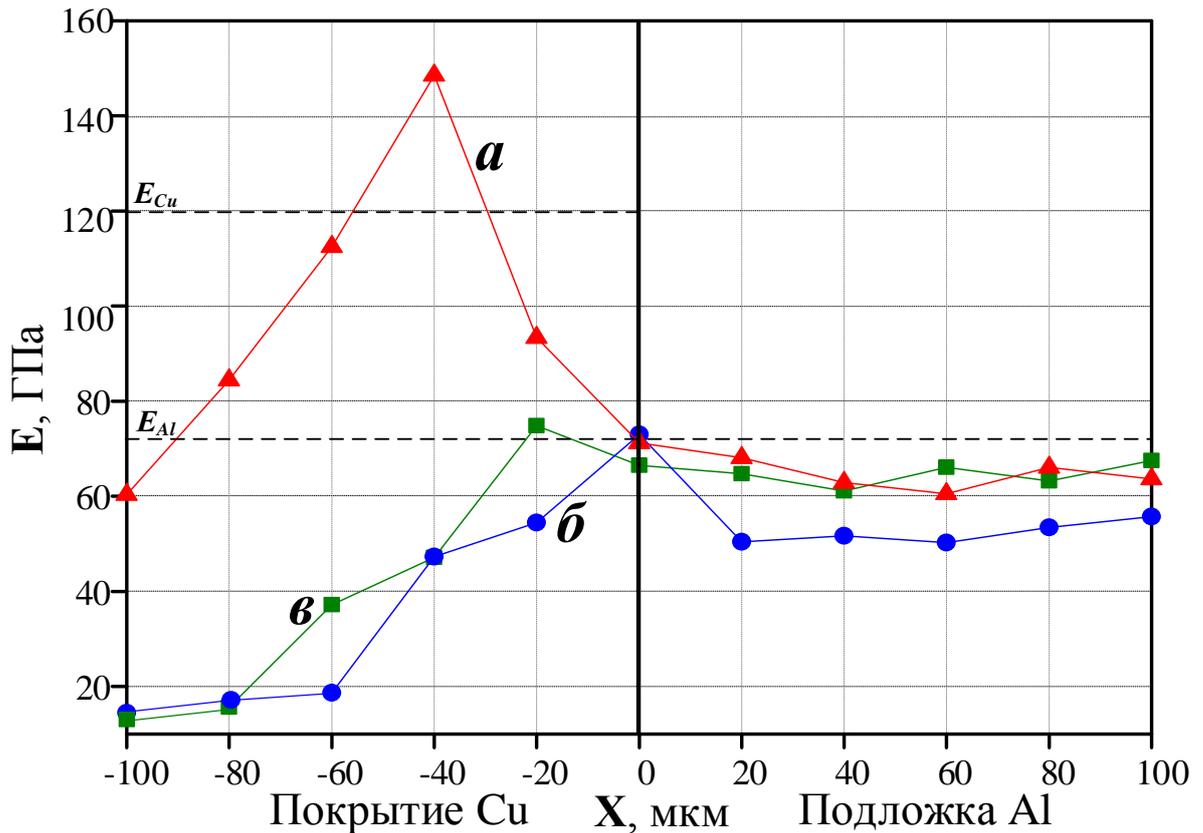


Рисунок 4.8 – Эпюры модуля упругости  $E(x)$  по толщине покрытие-подложка. Номера кривых соответствуют номерам опытов в таблице 4.2

Непосредственно на границе раздела в случае в) при минимальной интенсивности воздействия плазменной струи (для рассматриваемых условий),  $H$  становится практически равной величине для металлической меди, но в дальнейшем по толщине покрытия плавно снижается до  $\sim 0,4$  ГПа в приповерхностном слое. Об этом свидетельствует заметное увеличение размеров отпечатков индентора Виккерса на приведённых микроснимках в точках  $v_1$ - $v_3$ ) (рисунок 4.7). В случае б) при более высокой интенсивности воздействия струи на подложку (таблица 4.2 и рисунок 4.4б), микротвёрдость на границе повышается до  $\sim 2,3$  ГПа, превышая уровень  $H_{Cu}$ , что можно связать с отсутствием отслоения и началом образования приграничного интерметаллидного слоя, уже заметного на микроснимках рисунка 4.4б<sub>1</sub>-б<sub>2</sub>). Однако далее  $H$  также плавно снижается, но на более высоком уровне в сравнении со случаем в) и становится равной  $\sim 0,5$  ГПа в приповерхностном слое покрытия. Низкий уровень  $H$  покрытий в случаях в) и б) (рисунок 4.7)

объясняется относительно низкой плотностью и пористостью медного покрытия, что обусловлено его послойным затвердеванием и разрыхлением в условиях ударно-волнового воздействия. Однако эта особенность носит позитивный характер, обеспечивая формирование повышенной площади контактного соединения за счёт пластической деформации рыхлого слоя покрытия при сжатии контактных элементов. При отсутствии отслоения покрытия в случае б) обеспечивается переходное сопротивление  $R_k$  контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$  более низкое, чем  $R_k$  тестовой контактной пары  $Cu-Al$  (рисунок 4.1).

Характер профиля  $H(x)$  медного покрытия радикально меняется в случае а) при близкой к оптимальной интенсивности воздействия плазменной струи на подложку при параметрах плазмодинамической системы, указанных в таблице 4.2 позиция а). На границе раздела в точке  $a_1$ ) величина  $H$  незначительно возрастает до 2,4 ГПа. Однако далее микротвёрдость продолжает резко возрастать до высокого уровня  $\sim 8,4$  ГПа в точке  $a_2$ ) на расстоянии около  $\sim 40$  мкм от границы. Столь высокий уровень микротвёрдости в системе  $Cu-Al$  можно объяснить исключительно образованием интерметаллидных фаз, что и было показано выше методом XRD (рисунок 4.5, таблица 4.3). Это подтверждается микроснимком на рисунке 4.7 $a_2$ ) с отпечатком индентора в области высокоплотного материала в толще покрытия. Согласно литературным данным [110], микротвёрдость интерметаллидов  $CuAl_2$ ,  $Cu_6Al_4$  и других может достигать величин  $4,4 \div 9,5$  ГПа, что в полной мере соответствует измеренным величинам  $H$  в покрытие в случае а). В дальнейшем, приближаясь к поверхности,  $H$  симметрично снижается до уровня микротвёрдости меди на расстоянии 20 мкм от поверхности и в медном приповерхностном слое составляет  $\sim 0,7$  ГПа.

Совокупный анализ полученных данных по фазовому составу материала покрытия, его микроструктуре и физико-механическим свойствам с учётом теоретических представлений позволяет заключить, что наиболее

низкие величины  $R_k$  достигаются в случае а) (рисунок 4.4а, таблица 4.2 позиция а) за счёт того, что при сжатии контактных элементов пластически деформируется, в основном, поверхностный рыхлый медный слой покрытия, опирающийся на высокотвёрдый внутренний интерметаллидный слой, прочно соединённый с алюминиевой подложкой. Это обеспечивает максимально возможную площадь контакта металлического медного элемента с поверхностью медного покрытия.

Такое заключение подтверждает и анализ профилей модуля упругости  $E(x)$ , приведённых на рисунке 4.8. В случаях б) и в)  $E$  только на границе раздела сопоставим со «стандартной» величиной  $E_{Al}=71$  ГПа для алюминиевого сплава АД-31 [111]. В толще медного покрытия  $E$  плавно снижается и на поверхности становится менее 20,0 ГПа, то есть на порядок ниже  $E_{Cu}$ . При сжатии в составе контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$  слой покрытия пластично деформируется по всей толщине, не испытывая упругого сопротивления высокопластичной алюминиевой подложки. В случае а) фактическое давление между поверхностями контактных элементов значительно повышается из-за возникновения упругих напряжений в приповерхностном слое покрытия вследствие наличия промежуточного интерметаллидного слоя с высоким  $E$ , превышающим  $E_{Cu}$ .

#### 4.4 Прочность сцепления медного покрытия с алюминиевой подложкой

Одной из основных характеристик, определяющих качество покрытия, является прочность его сцепления с подложкой, которая сильно зависит от скорости осаждения материала [112]. Этот термин используется потому, что механизм сцепления не является в полном смысле адгезионным. Устойчивость плазмодинамического покрытия, как показали исследования микроструктуры, во многом обусловлена гидродинамическими процессами, протекающими на поверхности подложки при сверхзвуковом воздействии высокоплотной струи медной плазмы. Результатом такого воздействия

является образование граничного слоя взаимного перемешивания материалов и сверхглубокого проникания меди в алюминиевую подложку. Одновременно эти процессы обеспечивают и минимизацию переходного электрического сопротивления между покрытием и подложкой.

В настоящей работе для численной оценки прочности сцепления медного покрытия и сравнения с аналогичными характеристиками медных покрытий, полученных другими способами, выбран образец, показавший близкое к минимальному  $R_k=2,15$  мкОм в составе контактных пар  $Cu-Al_{Cu}$ , полученный при параметрах плазодинамической системы, указанных в таблице 4.1 позиция 2. Как отмечено выше, исследования проведены методом скретч-тестирования с автоматической регистрацией нормальной силы нагружения индентора Роквелла  $F_H$  (Н), силы трения  $F_{тр}$  (Н), глубины погружения индентора  $P_d$  (мкм) и акустической эмиссии  $Ae$  (%). Типичные кривые изменения указанных характеристик по длине царапины  $l$ , а также SEM-снимки царапины и её фрагментов представлены на рисунке 4.9. Величины силы сцепления  $F_{сц}$  и прочности сцепления  $P_{сц}$  медного покрытия с поверхностью алюминиевой подложки рассчитывались по формулам 4.1-4.2 в соответствии с методикой, описанной в работах [113-115]:

$$F_{сц} = F_H - F_{тр}; \quad (4.1)$$

$$P_{сц} = \frac{F_{сц}}{D \cdot v_{и}}; \quad (4.2)$$

где  $D$  – ширина царапины от индентора на поверхности образца с покрытием,  $v_{и}$  – скорость перемещения индентора 1 мм/мин.

Необходимые для расчёта  $F_{сц}$  конкретные величины нормальной силы  $F_H$  и силы трения  $F_{тр}$  определялись по соответствующим кривым изменения характеристик в точках  $l_i$ , в которых при прохождении индентора появляются заметные всплески  $Ae$ , вызванные отделением материала покрытия от поверхности подложки. Кривые  $Ae$  для плазодинамического покрытия имеют несколько всплесков, что обусловлено специфическими особенностями механизма сцепления. Отрыв происходит в локальных

областях поверхности с наиболее слабым сцеплением. Ширина царапины  $D$  определялась в тех же точках  $l_i$  по соответствующим SEM-снимкам фрагментов царапины, приведённым на рисунке 4.9.

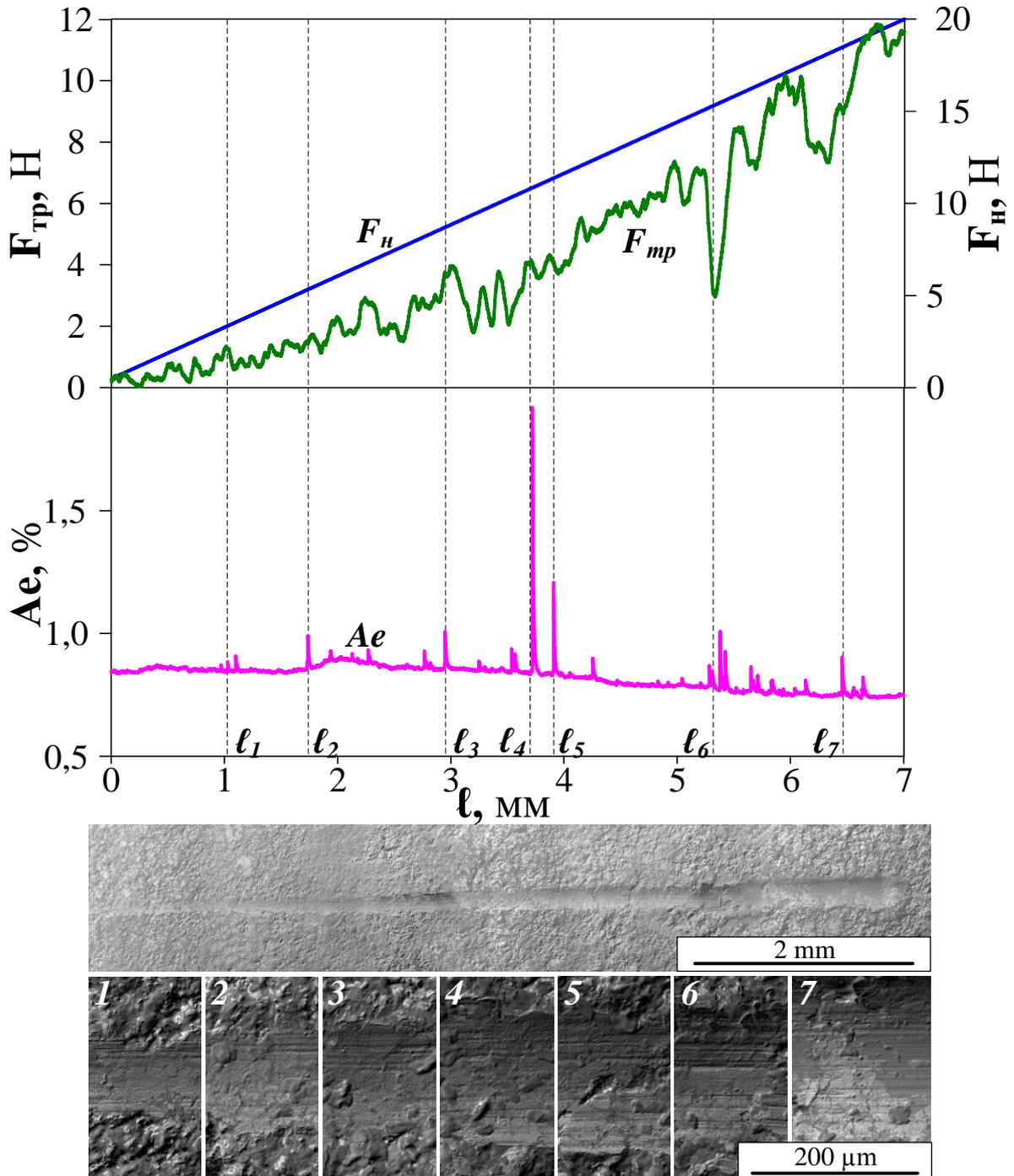


Рисунок 4.9 – Изменения  $F_{mp}$  и  $Ae$  с увеличением  $F_u$  по длине царапины  $l$  и SEM-снимки царапины с характерными участками измерения  $D$

Известно, что при использовании метода стретч-тестирования наиболее достоверные результаты по определению  $P_{сц}$  дают расчёты по

данным, полученным при первом всплеске акустической эмиссии, то есть при первом отрыве покрытия. В рассматриваемом случае такое значение в точке  $\ell_1$  (рисунок 4.9 SEM-снимок 1) равно  $P_{cu}=2,3$  ГПа. Однако значения  $P_{cu}$  по данным в других точках  $\ell_i$ , приведённые в таблице 4.4, достаточно близки между собой. Средний уровень  $P_{cu}$  медного покрытия с алюминиевой подложкой равен  $P_{cu,ср}=2,81$  ГПа.

Таблица 4.4 – Результаты скретч-теста испытываемого образца

$\ell_i$	$D$	$F_{cu}$	$P_{cu}$
<i>мм</i>	<i>мкм</i>	<i>Н</i>	<i>ГПа</i>
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
<i>Среднее</i>			<b>2,81</b>

Согласно литературным данным, другие методы нанесения медных электроконтактных покрытий обеспечивают следующие уровни  $P_{cu}$ : ХГН – до 700 МПа [64, 116]; сварка – 130 МПа [15]; ковка – 160 МПа [117]; магнетронное напыление – 18 МПа [54]. Сравнение с этими данными показывает, что плазмодинамический метод обеспечивает более чем трехкратное повышение прочности сцепления медного электроконтактного покрытия с поверхностью алюминиевого контактного элемента.

#### 4.5 Топология контактной поверхности медного покрытия

Выше отмечалось, что контактная поверхность плазмодинамического медного покрытия обладает естественной шероховатостью и не требует какой-либо предварительной подготовки для использования по своему функциональному назначению. В реальных условиях при контактном соединении двух относительно плоских элементов невозможно получить

контакт по всей площади поверхностей из-за наличия волнистости и шероховатости [118]. Возникает лишь некоторое количество  $n$  контактных пятен по выступам и неровностям, которые деформируются при сжатии, обеспечивая увеличение суммарной фактической площади контактной поверхности и снижение  $R_k$ . Таким образом, топология поверхности медного покрытия играет большую роль в формировании переходного контакта и во многом определяет величину  $R_k$ . Для проведения анализа влияния топологии поверхностей медных покрытий на  $R_k$  отобраны три образца алюминиевых подложек, из которых изготавливались контактные элементы, показавшие сильно отличающиеся  $R_k$  в составе контактных пар  $Cu-Al_{Cu}$  при усилии сжатия  $N=18,7$  кН: образец а) –  $R_k=2,14$  мкОм; образец б) –  $R_k=4,45$  мкОм; образец в) –  $R_k=6,20$  мкОм (таблица 4.2 позиции а-в).

Исследования топологии проведены с помощью трёхмерного бесконтактного профилометра. Типичные 3D-модели поверхности покрытий каждого образца, построенные на основании сканирования, приведены на рисунке 4.10. Параметры шероховатостей профиля поверхности покрытий: средняя шероховатость  $R_a$ , средний шаг неровностей профиля  $S_a$ , максимальная высота пиков  $h_{max}$  и средняя высота пиков  $h_{cp}$ , рассчитанные по профилограммам в пределах стандартизированной базовой длины в соответствии с [119, 120], сведены в таблицу 4.5. По 3D-моделям (а<sub>1</sub>-в<sub>1</sub>) видно, что профили поверхностей медных покрытий формируются чередованием впадин и выступов. Образец а) выделяется относительно высокой однородностью профиля поверхности, на которой заметны лишь единичные выступы высотой не более ~42,0 мкм. Они не могут сильно повлиять на уровень шероховатости и, тем более, на величину  $R_k$ . Расчёты для образца а) показали, что  $h_{cp}$  составляет 10,0 мкм, а отклонения от неё не превышают 5,0 мкм без учёта отдельных максимальных выступов. При этом расчётное значение средней шероховатости  $R_a$  составило 5,4 мкм, а средний шаг неровности поверхности  $S_a$  покрытия равен 7,4 мкм.

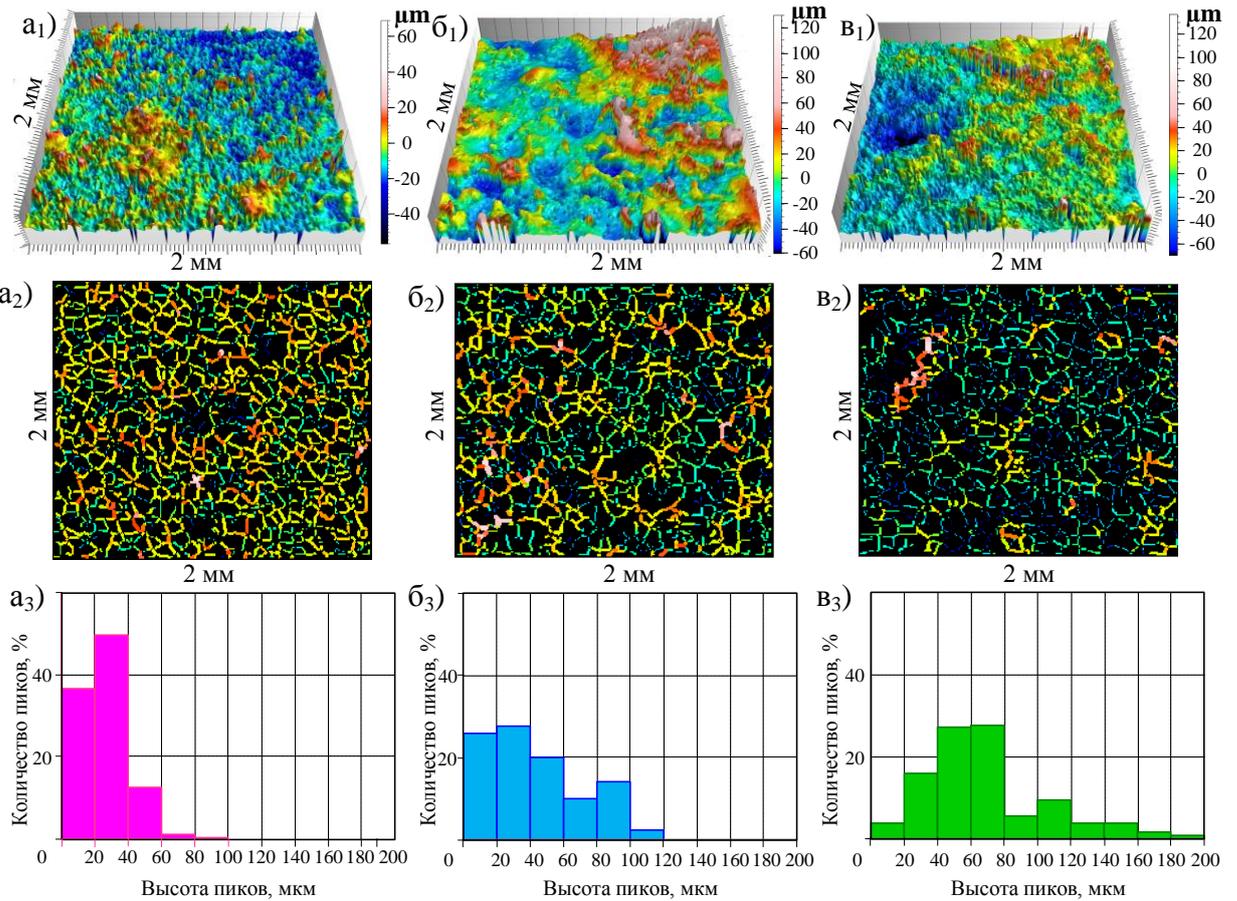


Рисунок 4.10 – Данные профилометрических исследований поверхностей покрытия медных образцов: а<sub>1</sub>-в<sub>1</sub>) 3D-модели; а<sub>2</sub>-в<sub>2</sub>) профили поверхностей (вид сверху) с указанием впадин; а<sub>3</sub>-в<sub>3</sub>) гистограммы распределения пиков по высоте

Таблица 4.5 – Параметры шероховатости профиля поверхности покрытий

Параметры		<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>
$R_k$	мкОм	2,14	4,45	6,20
$R_a$	мкм	5,4	13,1	24,8
$S_a$	мкм	7,4	22,0	22,1
$h_{max}$	мкм	86	184	147
$h_{cp}$	мкм	10	25	28

По 3D-моделям поверхностей образцов б) и в) видно сильное ухудшение однородности поверхностей, выраженное присутствием на них большого числа выступов, высота которых примерно в 2 раза превышает  $h_{max}$

единичных выступов на поверхности образца а) (таблица 4.5). 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  $h_{cp}$ . То есть при том же усилии сжатия не все выступы соединятся с поверхностью второго контактного элемента.

На рисунках 4.10а<sub>2</sub>-в<sub>2</sub>) показаны 2D-изображения типичных участков поверхности покрытий (вид сверху), на которых тёмные пятна соответствуют большим по высоте и площади выступам. С изменением условий и снижением интенсивности воздействия струи при нанесении покрытий заметно увеличивается число таких больших по площади выступов, высота которых  $h_{max}$  всё более превышает средний уровень  $h_{cp}$ . Повышающаяся неоднородность поверхности приводит к уменьшению числа и площади контактных пятен, что коррелирует с ростом переходного контактного сопротивления  $R_k$  контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$ .

На рисунках 4.10а<sub>3</sub>-в<sub>3</sub>) представлены данные статистического анализа типичных участков поверхности покрытий в виде гистограмм распределения числа выступов по их высотам. Их сравнение показывает последовательное увеличение ширины распределения, то есть появление всё более высоких выступов и увеличения их доли в общем числе на анализируемой площади. На поверхности образца а) более 80% выступов имеют высоту от 20 до 60 мкм, что обеспечивает минимальные  $R_a=5,4$  мкм и  $S_a=7,4$  мкм. При сжатии такого образца с медным контактным элементом единичные большие выступы деформируются, не мешая образованию множества контактных пятен при последующей деформации большого числа мелких выступов. В случаях образцов б) и в) повышенное число больших выступов препятствует, при том же усилии сжатия, полному контактированию основной массы

выступов высотой до  $\sim 60$  мкм, что приводит к уменьшению числа контактных пятен, суммарной площади контакта и, соответственно, к повышению сопротивления  $R_k$ . Эти наблюдения в целом соответствуют известным представлениям [118] о том, что снижение  $R_k$  в основном достигается уменьшением до некоторого предела  $R_a$  и  $S_a$  контактирующих поверхностей. Очевидная корреляция величин  $R_k$  с этими характеристиками наблюдается и в таблице 4.5.

Увеличение суммарной площади контактных пятен по поверхности медного покрытия с повышением усилия сжатия контактных элементов демонстрируют 3D-модели и SEM-снимки (в режиме TOPO) поверхности покрытия образца а) (таблица 4.5) в сравнении с исходным состоянием, представленные на рисунке 4.11. Исходная поверхность образца имеет наибольшее количество микровыступов высотой около 69 мкм (а). При сжатии контактных элементов эти выступы первыми вступают в контакт и деформируются, обеспечивая контактирование большого числа выступов высотой менее  $\sim 60$  мкм. После сжатия с минимальным усилием 12,5 кН (б) образуются контактные пятна с суммарной площадью  $\sim 0,18$  мм<sup>2</sup>, что оценочно составляет  $\sim 35\%$  от геометрической площади тестовой поверхности (или поверхности контактного элемента). Они выступают над базовой плоскостью примерно на  $\sim 54$  мкм и обеспечивают  $R_k \cong 2,74$  мкОм. Повышение усилия сжатия до  $N=21,87$  кН (в) приводит к ещё большей деформации выступающих площадок (контактных пятен), контактированию выступов меньшей высоты, снижению высоты контактных пятен до  $\sim 40,0$  мкм, увеличению их суммарной площади до  $\sim 0,23$  мм<sup>2</sup> ( $\sim 43\%$ ). Вследствие этого,  $R_k$  уменьшается до  $\sim 1,50$  мкОм. Как видно из рисунка г), предельное для контактной пары *Cu-Al* усилие сжатия  $N=31,25$  кН обеспечивает снижение высоты выступов до  $\sim 32$  мкм, увеличение суммарной контактной площади до  $0,51$  мм<sup>2</sup> (97%) и уменьшение  $R_k$  до  $1,04$  мкОм. Дальнейшее повышение  $N$  недопустимо, так как приводит к деформации металлов контактных элементов из меди и алюминия.

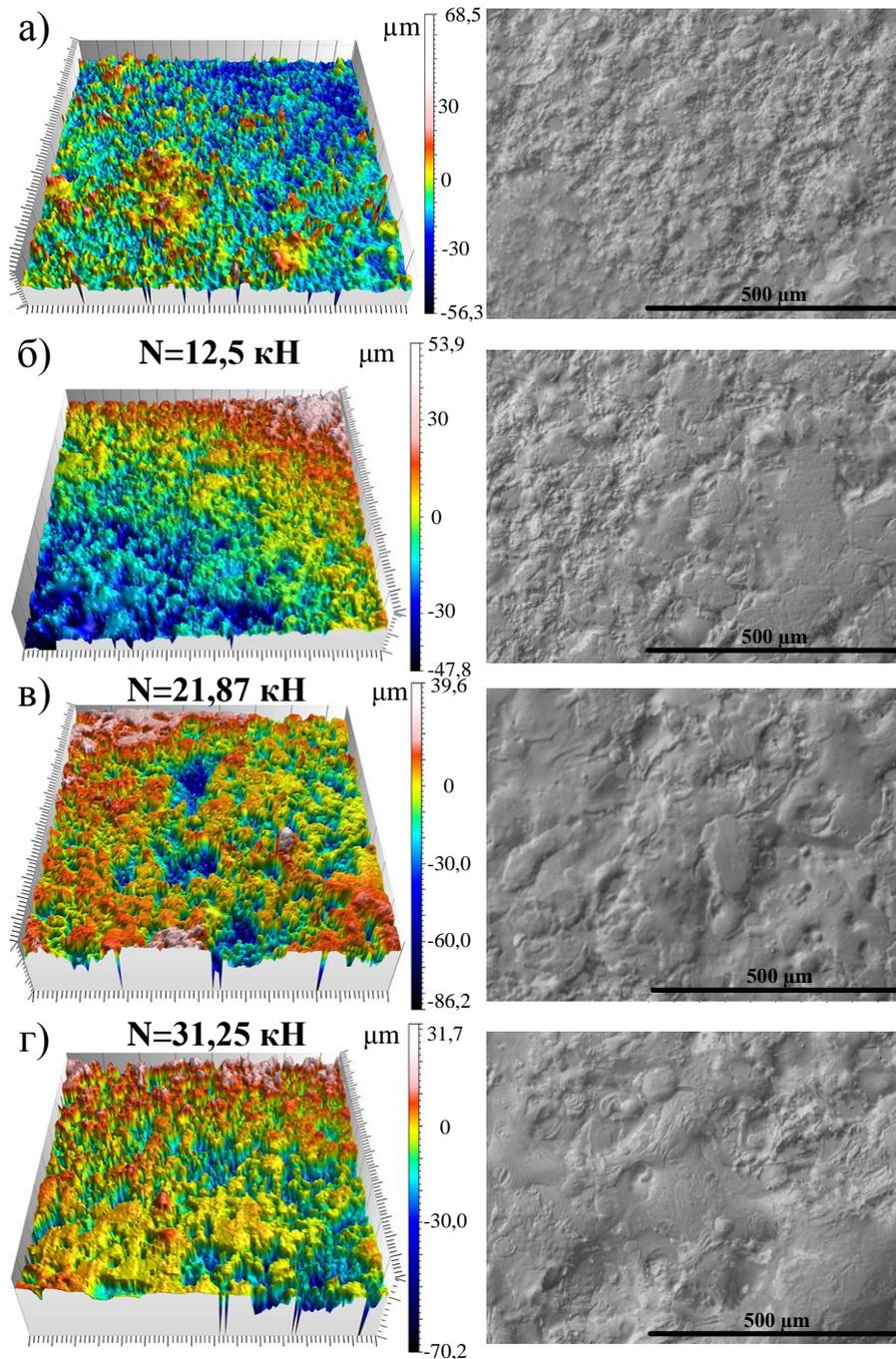


Рисунок 4.11 – 3D-модели и SEM-снимки: а) исходный образец; после стягивания с усилием сжатия: б) 12,5 кН, в) 21,87 кН, г) 31,25 кН

Приведённые результаты анализа топологии поверхности медного покрытия при последовательном увеличении  $N$  однозначно подтверждают известные представления о формировании контактного перехода, которым в полной мере соответствует исходная топология поверхности медного плазмодинамического покрытия, не требующая дополнительной подготовки. Более того, низкая величина твёрдости и эластичность материала покрытия

может компенсировать неровности поверхности алюминиевой основы и, тем самым, способствовать повышению суммарной контактной поверхности и снижению  $R_k$ .

#### 4.6 Расчёт переходного сопротивления контактной пары медь-алюминий с медным покрытием

В работе проанализированы теоретические труды, методические указания и ГОСТ по расчётам переходного контактного сопротивления. Корректность и точность существующей расчётной методики не вызывает сомнения, поэтому она использована для расчёта  $R_k$  контактных соединений  $Cu-Al_{Cu}$ . В работе [79] рассматривается нахлесточное соединение, схема которого показана на рисунке 4.12 с указанием точек, между которыми измеряется сопротивление. Поэтому исходная расчётная формула имеет вид:

$$R_k = R_{ш} + R_{пер} \quad (4.3)$$

где  $R_{ш}$  – сопротивление контактных деталей,  $R_{пер}$  – сопротивление собственного контактного перехода.

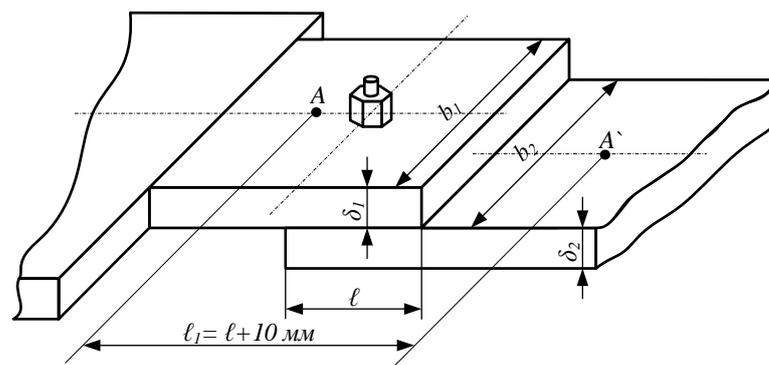


Рисунок 4.12 – Расчётная модель контактного соединения

В настоящей работе использована другая по конструкции контактная сборка, показанная на рисунке 2.9, а измерение падения напряжения производилось непосредственно на контактном переходе, как указано на рисунке. Поэтому слагаемое  $R_{ш}$  не рассматривалось, а расчёт переходного контактного соединения производился по выражению:

$$R_{\text{пер}} = \frac{\rho \cdot \pi \cdot S_a \cdot P_r}{8 \cdot \beta \cdot N}, \quad (4.4)$$

где  $\rho$  – величина удельного сопротивления материалов контактирующих элементов, в данном случае медного элемента и медного покрытия,  $S_a$  – средний шаг неровностей профиля,  $P_r$  – фактическое давление,  $\beta$  – доля контактной поверхности свободной от окисных плёнок:

$$\beta = 0,1 - \frac{1}{6} \cdot \left( \frac{\pi}{4} - \frac{4 \cdot R_a}{S_a \cdot t_m} \right)^2, \quad (4.5)$$

где  $R_a$  – среднее арифметическое отклонение профиля,  $t_m$  – параметр шероховатости (длина профиля),  $N$  – усилие сжатия контактного соединения:

$$N = \frac{M}{0,2 \cdot d}, \quad (4.6)$$

где  $M$  – момент затяжки болта диаметром  $d$  (в рассматриваемом случае М16),

Величина  $P_r$  определяется усилием сжатия  $N$  и фактической площадью контакта или суммарной площадью контактных пятен  $S_n$ . На практике её определить весьма трудно, поэтому в литературе предложены формулы для определения  $P_r$  в зависимости от критерия вида контакта  $\Pi$ . Для упругого (4.7) и для пластического (4.8) контакта:

$$P_r = \frac{2 \cdot E \cdot R_a}{S_a \cdot t_m}. \quad (4.7)$$

$$P_r = 0,8 \cdot H, \quad (4.8)$$

Критерий вида контакта  $\Pi$  определяется по выражению:

$$\Pi = \frac{E}{H} \cdot \frac{R_a}{S_a}. \quad (4.9)$$

Если  $\Pi > 0,25$ , то контакт считается пластическим, а в противном случае – упругим. Для рассматриваемых контактных пар величина  $\Pi$  находится в диапазоне 16,0÷40,0, что говорит о пластическом характере контакта.

С использованием данной методики и имеющихся данных профилометрии и твердометрии проведены расчёты величин  $R_k$  для испытываемых контактных пар **Cu-AlCu**. Результаты расчёта, приведённые в

таблице 4.6, показали более низкие величины переходного сопротивления по сравнению с измеренными. Причиной некоторого несоответствия очевидна и заключается в том, что расчёт не учитывает переходного сопротивления между медным покрытием и алюминиевой подложкой  $R_{П}$ , которое по нашим оценкам составляет около 0,67 мкОм (раздел 4.1).

Таблица 4.6 – Исходные и расчётные данные для определения  $R_k$

<i>Геометрическая площадь контактной поверхности <math>S</math></i>	<i>мм<sup>2</sup></i>	1001		
<i>Крутящий момент затяжки болта <math>M</math></i>	<i>Н·м</i>	60		
<i>Усилие сжатия <math>N</math></i>	<i>кН</i>	18,7		
<i>Удельное электрическое сопротивление меди <math>\rho_{Cu}</math></i>	<i>Ом·м</i>	1,72·10 <sup>-8</sup>		
<i>Модуль упругости медного покрытия <math>E</math></i>	<i>ГПа</i>	60,4	18,7	15,6
<i>Микротвёрдость материала медного покрытия <math>H</math></i>	<i>МПа</i>	700	430	458
<i>Средний шаг неровностей профиля поверхности медного покрытия <math>S_a</math></i>	<i>мкм</i>	11,8	18,3	22,0
<i>Среднее отклонение профиля поверхности медного покрытия <math>R_a</math></i>	<i>мкм</i>	5,4	12,9	24,8
<i>Фактическое контактное давление <math>P_r</math></i>	<i>МПа</i>	560	344	366
<i>Расчётное переходное сопротивление <math>R_{пер}=R_k</math></i>	<i>мкОм</i>	1,45	3,5	4,3
<i>Измеренное переходное сопротивление <math>R_k</math></i>	<i>мкОм</i>	2,15	4,45	6,20

Приведенные результаты расчётов показали, что оценка величины  $R_k$  контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$  может быть произведена расчётным путём с использованием данных по топологии поверхности медного покрытия и физико-механических свойств.

По результатам исследований сопротивления и физико-механических характеристик электроконтактных пар  $Cu-Al_{Cu}$  можно сделать выводы:

1. Благодаря нанесению медного покрытия на алюминиевую контактную поверхность при оптимальных условиях плазгодинамической системы, достигается уменьшение переходного сопротивления контактной пары  $Cu-Al$  более чем в два раза и в три раза для контактной пары  $Al-Al$ ;

2. Величина переходного сопротивления между медным покрытием и алюминиевой подложкой составляет  $R_{\Pi} \cong 0,67$  мкОм, что в четыре раза меньше сопротивления тестовой контактной пары *Cu-Al*. Такое различие обусловлено увеличением контактной площади, особенностями микроструктуры и фазовым составом граничного переходного слоя;

3. Микроструктура медного покрытия характеризуется необходимой шероховатостью поверхности, образованием граничного слоя взаимного перемешивания материалов покрытия и подложки, а также эффектом сверхглубокого проникания медных частиц в структуру алюминиевой подложки. Такие особенности структуры обеспечивают минимальные величины переходного контактного сопротивления;

4. Анализ микротвёрдости по толщине покрытие-подложка показал, что в алюминиевой подложке величина твёрдости практически неизменна. Увеличение микротвёрдости начинается в граничном слое и достигает максимума в толще покрытия  $\sim 8,4$  ГПа за счёт образования интерметаллидных фаз системы *Cu-Al*, таких как *CuAl<sub>2</sub>*, *Cu<sub>6</sub>Al<sub>4</sub>*;

5. Уровень прочности сцепления медного покрытия с алюминиевой подложкой, в среднем, составляет 2,8 ГПа, что в несколько раз превышает этот показатель для медных покрытий, нанесенных другими известными способами;

6. Сравнение экспериментальных данных с расчётными по известной методике показали возможность теоретической оценки величин переходного сопротивления контактных пар медь-алюминий с медным покрытием.

## ГЛАВА 5. НАНЕСЕНИЕ МЕДНОГО ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕННИЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ КОНТАКТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

Для электрического подключения к сети силовых высоковольтных коммутационных аппаратов часто используются втычные конусные контактные соединения. В частности, вакуумные выключатели ВВ/TEL серии Shell оснащены контактными терминалами, изготовленными из прочного алюминиевого сплава АД-31. Как показано на рисунке 5.1 верхний контактный терминал имеет плоские контактные поверхности *А* для присоединения токоподводящих шин, а также конусные отверстия *Б* для обеспечения втычного контакта посредством конусной посадки с медным контактным конусным вводом вакуумной дугогасительной камеры.

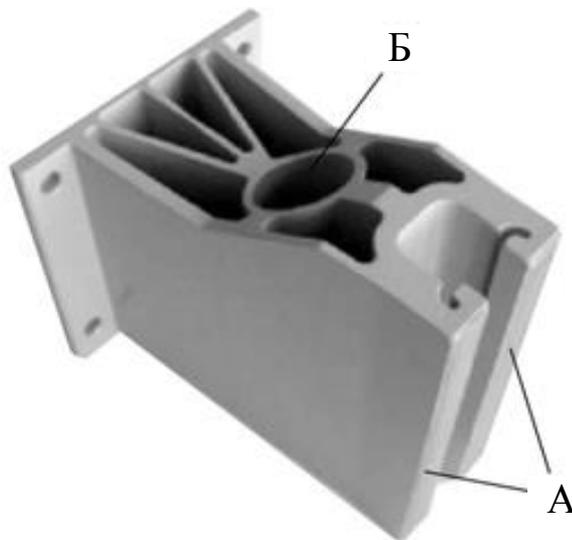


Рисунок 5.1 – Верхний контактный терминал вакуумного выключателя  
А – поверхность для присоединения токоподводящих шин силовой цепи; Б – конусное отверстие для обеспечения втычного контакта с медным конусным вводом неподвижного контакта

Алюминиевые терминалы обеспечивают механическую прочность и жёсткость конструкции, надёжную и удобную ошиновку выключателя, эффективный теплоотвод и имеют соответствующее сечение для длительного

пропускания тока нагрузки. Однако с целью повышения надежности втычного контактного соединения за счёт совмещения контактной пары и снижения тепловых потерь, благодаря уменьшению контактного сопротивления, необходимо нанесение медного покрытия на внутреннюю поверхность конусного отверстия **Б** (рисунок 5.1). Представленные в данной работе результаты экспериментальных исследований дают основания считать, что все требования по надёжности и качеству медного покрытия могут быть обеспечены при использовании плазмодинамического метода нанесения покрытий.

### **5.1 Реализация плазмодинамического метода нанесения медного покрытия на внутреннюю поверхность конусных отверстий**

Для реализации плазмодинамического метода нанесения медного электроконтактного покрытия на внутреннюю поверхность конусного отверстия в алюминиевом контактном терминале использован КМПУ с медными электродами, показанный на рисунке 2.2. Предложена и реализована схема воздействия медной плазменной струи на внутреннюю конусную поверхность, представленная на рисунке 2.4. Схема основана на использовании газодинамического эффекта расширения головной ударной волны и границы сверхзвуковой струи при внезапном расширении канала течения, то есть при выходе из УК [121]. При этом возникает тангенциальная составляющая скорости массопереноса за счёт расширения области сжатия с переносимым материалом между висячим скачком уплотнения и границей струи. Величина этой скорости оценена по фотограммам высокоскоростной видеосъёмки, аналогичным приведённой на рисунке 3.4 и составляет не менее  $\sim 1,5$  км/с на расстоянии  $40 \div 50$  мм от среза УК. Такая скорость массопереноса и взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, сопоставимая со скоростью схлопывания пластин при сварке взрывом [121], вполне достаточна для обеспечения гидродинамического перемешивания

медного материала струи и алюминиевой подложки (поверхности конусного отверстия). Конусная поверхность располагалась осесимметрично направлению истечения медной плазмы под некоторым углом  $\alpha$ , обусловленным геометрией конусного отверстия.

Для проведения экспериментальных исследований изготовлены цилиндрические образцы из алюминиевого сплава АД-31 с геометрией конусного отверстия, идентичной геометрии контактного отверстия в термине вакуумного выключателя (рисунок 5.1). В целом, конфигурация канала прохождения плазменного потока при нанесении покрытия в экспериментальной сборке (рисунок 2.4) с установленным образцом и промежуточной полиэтиленовой вставкой с расширяющимся конусным отверстием обусловлена приведёнными выше данными по конфигурации ударно-волновой структуры струи и геометрией конусного отверстия в образце.

В такой схеме на начальном этапе взаимодействия должно происходить гидродинамическое перемешивание меди и алюминия и образование гетерофазного граничного слоя за счёт интенсивного теплоотвода и охлаждения. В дальнейшем будет осуществляться наращивание толщины медного слоя и образование покрытия за счёт прстенного торможения медного материала, его охлаждения с послойным осаждением.

Очевидно, что в таких условиях эффективность использования энергии и наработанного медного материала будет невысока в силу его пролёта сквозь отверстие в сборке. На основании предварительных экспериментов с прежними энергетическими и конструктивными параметрами КМПУ обоснована необходимость снижения первичной энергии источника электропитания до  $W_c=32,4$  кДж за счёт уменьшения ёмкости накопителя до  $C=7,2$  мФ. На рисунке 5.2 приведены типичные осциллограммы и кривые изменения энергетических характеристик работы КМПУ при зарядном напряжении  $U_{зар}=3,0$  кВ. Как видно, наблюдается

значительное уменьшение длительности основного этапа разряда до 260 мкс, мощность составила  $P_m=154$  МВт, а подведённая энергия снизилась до  $W=24,6$  кДж. Примерное сохранение удельной электроэрозионной наработки материала на уровне  $\sim 0,14$  г/кДж обеспечено за счёт уменьшения  $d_{УК}$  до 9 мм и снижении экранирующего действия стенки медного ствола. Это достигнуто использованием двухслойного ствола с толщиной стенки внутреннего медного цилиндра 1,0 мм. При этом механическая прочность двухслойной конструкции обеспечена внешним цилиндром из нержавеющей стали с толщиной стенки 2,0 мм.

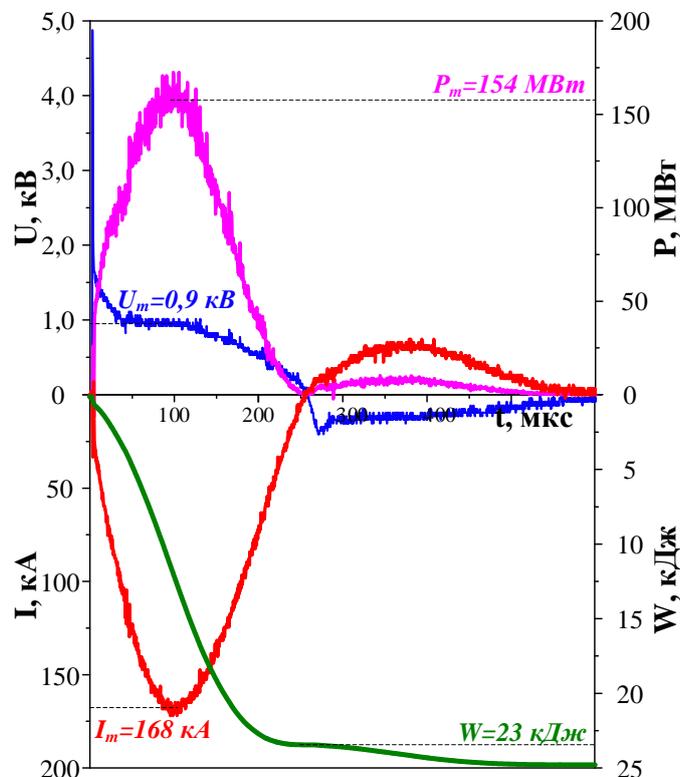


Рисунок 5.2 – Осциллограммы  $U(t)$ ,  $I(t)$  и кривые  $P(t)$  и  $W(t)$  работы КМПУ при нанесении внутреннего конусного медного покрытия

Процесс нанесения медного покрытия проводился в разряженной воздушной атмосфере при давлении  $P_o \cong 0,1$  атм. На рисунке 5.3 приведены фотографии образцов из алюминиевого сплава с медным покрытием на внутренних поверхностях конусных отверстий, нанесённым в близких к оптимальным условиям при несколько отличающихся средних мощностях разряда в УК и, соответственно, разных величинах  $W$ , указанных в таблице

5.1. Видно, что во всех случаях плазодинамический метод обеспечивает формирование сплошного и равномерного по всей поверхности покрытия с естественной шероховатостью ( $\sim 5 \div 25$  мкм). Масса осажденной меди составляет около  $0,1 \div 0,2$  г, не более  $\sim 10\%$  от массы эродированного в УК материала.

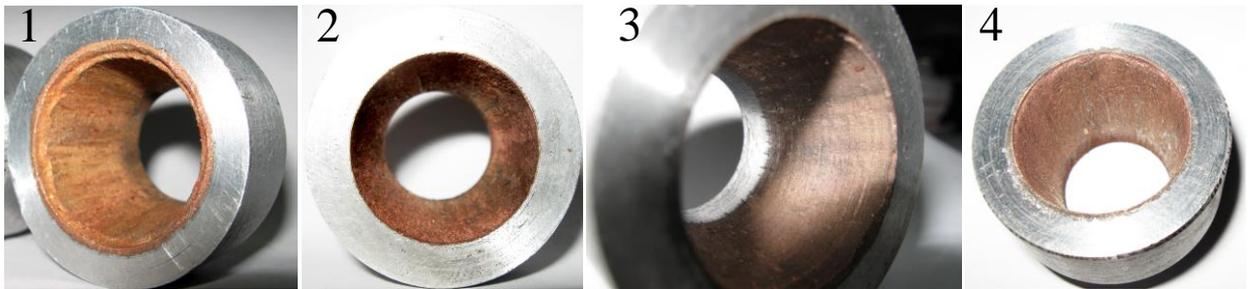


Рисунок 5.3 – Образцы с нанесенным медным покрытием на внутренние поверхности алюминиевых изделий

Таблица 5.1 – Параметры экспериментов, представленных на рисунке 5.3

Номер опыта		1	2	3	4	5 <i>Cu-Al</i>
$I_m$	кА	171	158	155	168	
$U_m$	кВ	1,0	1,0	1,0	0,7	
$W$	кДж	23	20	17	17	
$P_{cp}$	МВт	91	76	61	61	
$R_k$	мкОм	0,35	0,44	0,86	0,92	1,36

В процессе проведения экспериментов обнаружен недостаток конструкции сборки (рисунок 2.4), выразившейся в образовании кольцевой выработки на начальном участке конусной поверхности образца, особенно при максимальной мощности разряда, как это видно на рисунке 5.3 образец 1. Это происходит из-за осевого смещения образца при воздействии плазменной струи и образовании зазора между дополнительным элементом 5 (рисунок 2.4). Этот недостаток устранён за счёт установки в указанном месте стальной шайбы, исключаящей эрозию обрабатываемой поверхности.

## 5.2 Измерение и анализ переходного сопротивления контактной пары медь-алюминий с медным покрытием конусной посадки

Измерения переходных сопротивлений контактных пар  $Cu-Al_{Cu}$  конусной посадки проведено по прежней методике вольт-амперным способом (раздел 2.7) с использованием измерительной сборки, показанной на рисунке 2.9б). Геометрическая площадь конусной контактной поверхности равнялась  $S_k=2512 \text{ мм}^2$ . Усилие сжатия  $N$  контактной пары менялось за счёт изменения момента затягивания болтового соединения М16 и контролировалось с помощью динамометрического ключа. Для качественной сравнительной оценки было измерено переходное сопротивление тестовой контактной пары  $Cu-Al$  (без покрытия) в тех же условиях и такой же геометрии.

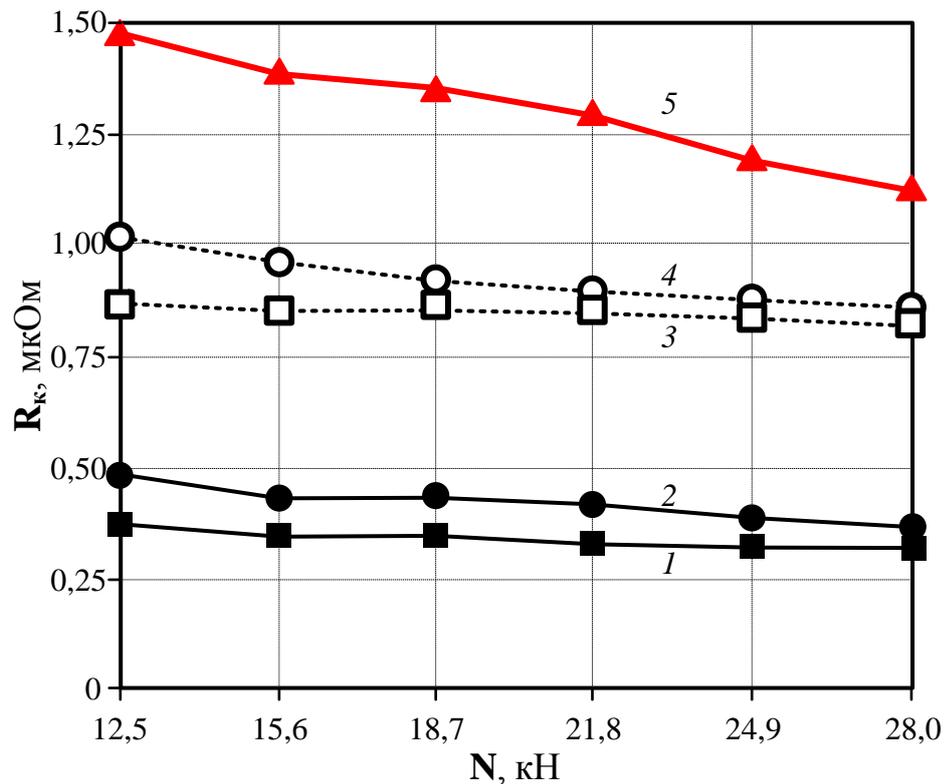


Рисунок 5.4 – Зависимость  $R_k$  от  $N$  для конусных контактных пар  $Cu-Al_{Cu}$

В таблице 5.1 приведены основные условия нанесения медных покрытий при отличающихся средних мощностях разряда в УК КМПУ и величинах  $W$ . Номера опытов соответствуют номерам фотографий на

рисунке 5.3 и номерам кривых зависимостей переходного сопротивления  $R_k$  от усилия сжатия конусного контакта  $N$ , приведённых на рисунке 5.4. Приведённые результаты измерений  $R_k$  показывают, что минимальное переходное сопротивление обеспечивается медным покрытием, нанесённым при максимальной средней мощности разряда  $P_{cp} \cong 91,0$  МВт и наибольшей величине подведённой энергии  $W \cong 23,0$  кДж. Эксперименты показали, что дальнейшее повышение энергетических параметров плазменного выстрела нецелесообразно, так как приводит к заметной эрозии обрабатываемой контактной поверхности и недопустимому изменению её геометрии. Как видно из зависимостей  $R_k(N)$ , в отличие от аналогичных данных для плоских контактов (рисунок 4.1) переходное сопротивление конусных контактов очень слабо меняется во всём диапазоне  $N$ . Величина  $R_k$  при «гостированном» усилии сжатия  $N=18,75$  кН с учётом разницы площадей геометрических контактных поверхностей в случае конусного соединения оказывается сопоставимой с величиной  $R_k$  плоского контакта *Cu-Cu*. А именно, при плоском контакте площадью  $S_k=1002$  мм<sup>2</sup>  $R_k \cong 0,48$  мкОм, а при конусном контакте площадью  $S_k=25412$  мм<sup>2</sup>  $R_k \cong 0,35$  мкОм. Следует отметить, что в оптимизированных условиях нанесения (позиция 1 таблица 5.1) медное покрытие обеспечивает снижение  $R_k$  в ~4,0 раза по сравнению с  $R_k$  тестового контакта *Cu-Al* (позиция 5 таблица 5.1).

### **5.3 Микроструктура медного покрытия на внутренней поверхности конусного отверстия, его элементный и фазовый состав, и механические свойства**

Основными факторами, обеспечивающими получение очень малого, порядка  $10^{-7}$  Ом, переходного сопротивления конусного контакта является не только наличие естественной шероховатости на контактной поверхности медного покрытия, но и сдвиговая деформация микровыступов. Это хорошо

видно на SEM-снимках участка конусной поверхности с медным покрытием, приведённых на рисунке 5.5. Очевидно, что это приводит к увеличению площади возникающих при деформации контактных пятен. Однако, как и в случае плазмодинамического нанесения покрытия на плоскую поверхность, в рассматриваемой системе должны проявиться факторы гидродинамической и химической природы, способствующие как обеспечению устойчивости и высокой прочности сцепления с подложкой, так и снижению переходного сопротивления контактной пары  $Cu-Al_{Cu}$  с конусной посадкой.

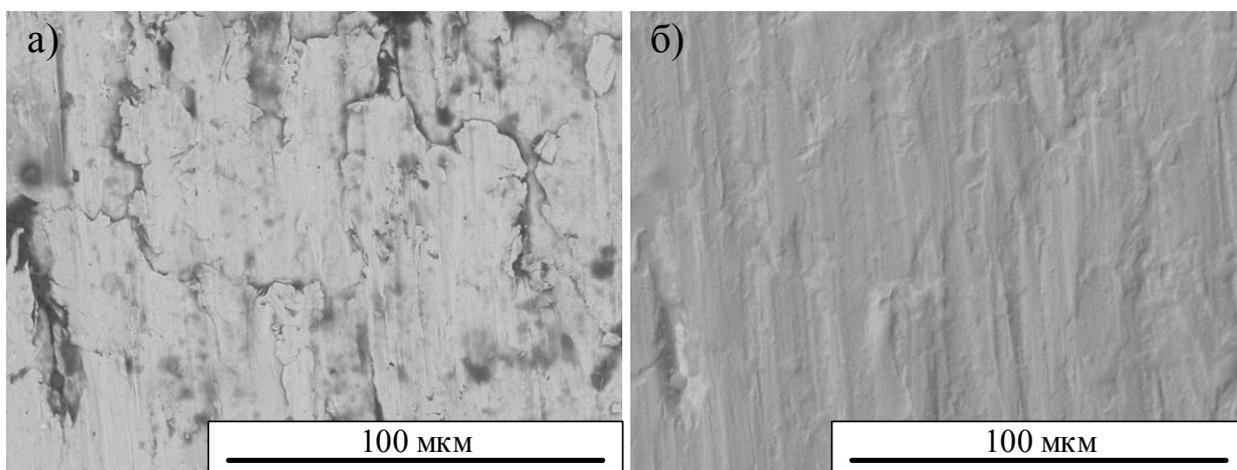


Рисунок 5.5 – SEM-снимки участка конусной поверхности с медным покрытием с удлинёнными контактными пятнами: а) режим съёмки COMPO; б) режим съёмки TOPO

Приведённые на рисунке 5.6 оптические микроснимки шлифа поперечного среза алюминиевого образца с медным покрытием в средней области образующей конусной поверхности  $\ell$  показывают абсолютно плотное сопряжение и сцепление материала покрытия с подложкой. Нанесённое в оптимальных условиях покрытие (позиция 1 таблица 5.1.) отличается низкой пористостью материала, а его толщина  $\delta$  составляет более 40,0 мкм по всей площади конусной поверхности. На микроснимках отчётливо просматривается трёхслойная структура покрытия. Как и предполагалось выше, приграничный слой толщиной в среднем 20÷25 мкм, судя по изображению, представляет собой гидродинамически образовавшуюся смесь материалов меди и алюминия. Внутренний слой

толщиной около 30 мкм выделяется светло-жёлтым цветом. Внешний поверхностный слой толщиной 10÷15 мкм имеет характерный медный цвет.

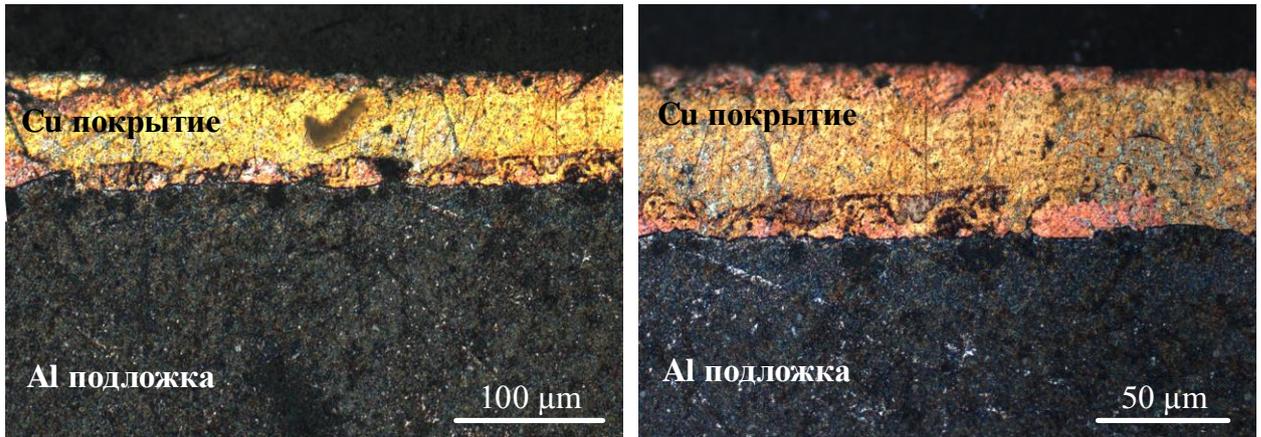


Рисунок 5.6 – Оптические микроснимки шлифа поперечного среза алюминиевого образца с медным покрытием, нанесенного на внутреннюю конусную поверхность

Толщина покрытия  $\delta$  определялась по микроснимкам шлифов поперечного среза образцов. Как видно из графика на рисунке 5.7, толщина медного покрытия непостоянна по длине образующей конусной поверхности  $l$  (где «0» - больший, 20» - меньший диаметры конуса), изменяется от ~40,0 мкм до ~100 мкм и максимальна на удалении 10,0÷15,0 мм от начала конусной поверхности (бóльший диаметр).

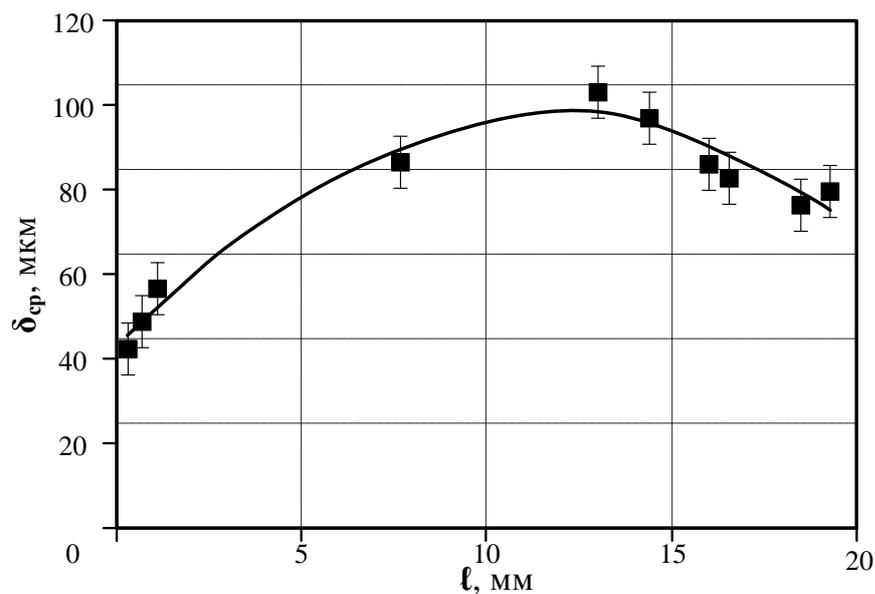


Рисунок 5.7 – Кривая изменения средней толщины покрытия  $\delta_{ср}$  по длине образующей  $l$  конусной поверхности

На рисунке 5.8 представлены данные EDAX области шлифа с максимальной толщиной покрытия  $\delta$ . По картированным изображениям (красный – алюминий, зелёный – медь) (б,в) видно отсутствие абсолютно чёткой границы между покрытием и подложкой, обусловленное взаимным перемешиванием материалов, и присутствие *Al* в материале покрытия с убывающей концентрацией от границы к поверхности покрытия. Массовое процентное соотношение элементов по  $\delta$  может быть оценено по кривым интенсивности рассеивания энергии электронов при сканировании вдоль горизонтальной оси (рисунок 5.8 г). Видно, что собственно граничный слой имеет  $\Delta\delta_1 \cong 10,0$  мкм, в котором концентрация *Al* снижается до ~30% при соответствующем увеличении концентрации *Cu*. На последующем участке  $\Delta\delta_2 \cong 40,0$  мкм наблюдается, в среднем, сохранение концентраций *Al* (~20,0%) и *Cu* (~80,0%). Далее в приповерхностном слое толщиной  $\Delta\delta_3 \cong 40 \div 45$  мкм концентрация *Cu* плавно повышается до ~95,0%.

Сопоставление кривых EDAX с SEM-изображением анализируемой области показывает качественную корреляцию с особенностями микроструктуры покрытия. Так слой  $\Delta\delta_1$  выделяется композиционной упорядоченной кристаллической структурой, в которой микрокристаллиты низкоплотного материала консолидированы в матрице из материала повышенной плотности, судя по контрастам на SEM-изображении. Слой  $\Delta\delta_2$  в основном состоит из материала матрицы, контраст которого светлее алюминия (подложка) и темнее меди (поверхностный слой покрытия). В нём с повышающейся плотностью (в направлении поверхности) консолидированы удлинённые или бесформенные микрокристаллиты более плотного материала. Слой  $\Delta\delta_3$  имеет наиболее светлый контраст и практически однородную структуру наслаивающегося высокоплотного материала (меди).

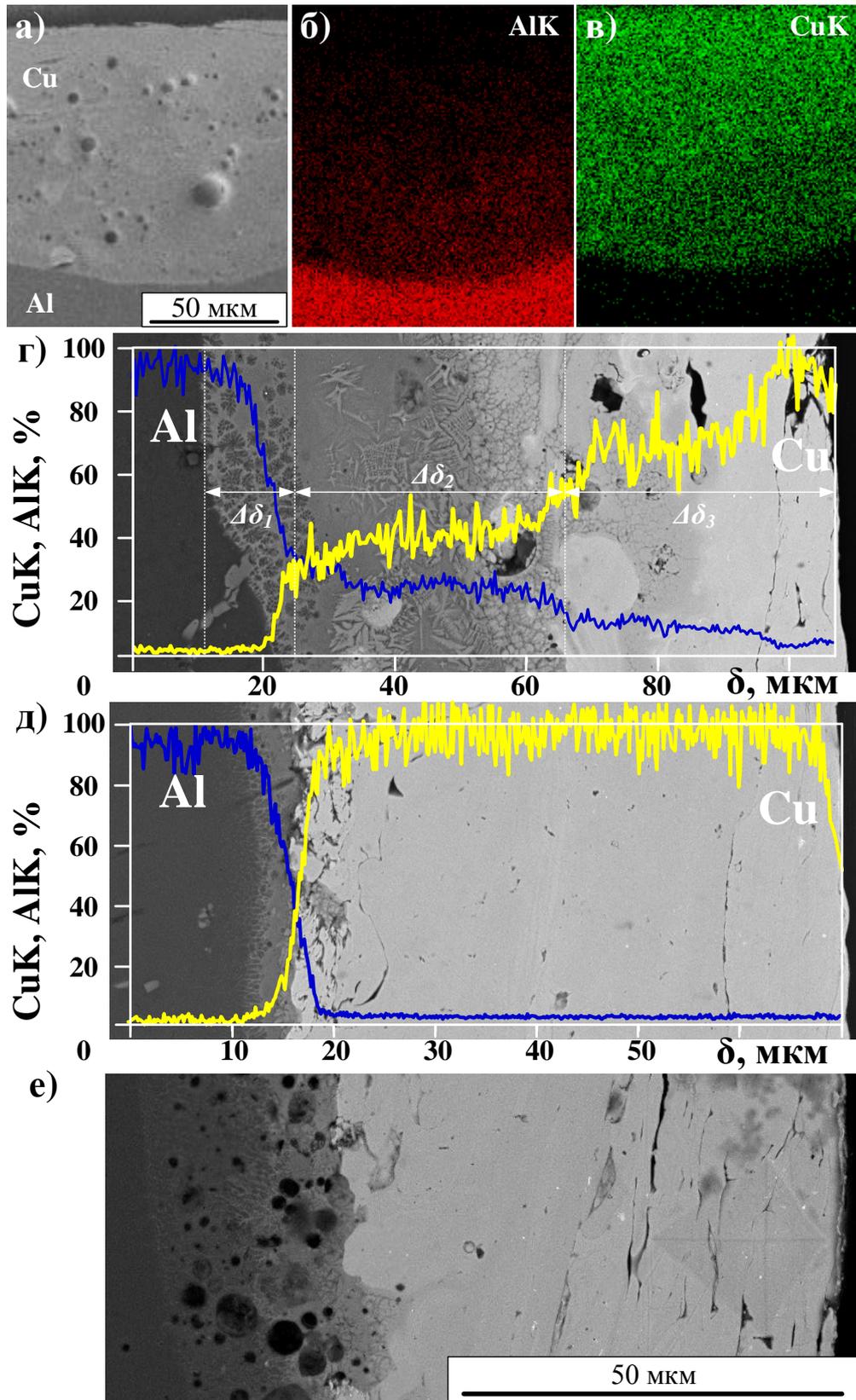


Рисунок 5.8 – а-г) SEM-снимок, данные EDAX и кривые распределения *Al* и *Cu* по толщине на расстоянии  $l \approx 10$  мм от начала конусной поверхности; д) SEM-снимок и кривые распределения *Al* и *Cu* по толщине начального участка  $l \approx 2$  мм; е) SEM-снимок конечного участка  $l \approx 20$  мм

Микроструктура и распределение элементов *Al* и *Cu* по толщине покрытия на начальном участке поверхности конусного отверстия  $l \approx 2$  мм показаны на рисунке 5.8д). Отличительной особенностью является образование приграничного слоя толщиной около 5 мкм в теле подложки по термоэмиссионному механизму. Согласно кривым элементного состава, в этом слое соотношение *Al:Cu* меняется примерно на 50%. Дальнейшее повышение содержания меди до  $\sim 95,0\%$  наблюдается в последующем слое гидродинамического перемешивания толщиной до  $\sim 10,0$  мкм с преимущественно светлым контрастом. 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 конусной поверхности (рисунок 5.8е). Отличие от начального участка заключается в том, что приграничный тонкий слой состоит из пористого материала. Многочисленные круглые поры образовались, по-видимому, в медно-алюминиевом расплаве за счёт захвата ударно уплотнённого газа в технологическом отверстии.

Важные для понимания причины получения очень низкого  $R_k$  конусной контактной пары *Cu-Al<sub>Cu</sub>* дали результаты измерения микротвёрдости *H* на шлифе поперечного среза по толщине покрытия и приграничного слоя подложки и по длине образующей  $l$  конусной поверхности, приведённые на рисунке 5.9-5.10. Из графиков видно, что *H* алюминиевой подложки на глубине  $\delta \cong 20,0$  мкм (от видимой границы) практически соответствует исходному материалу (АД-31) по всей длине  $l$  конусной поверхности (кривая 1 рисунок 5.10). Кривая 2 (рисунок 5.10) показывает резкое повышение *H* непосредственно в приграничном слое покрытия ( $0 \div 10$  мкм). С отдалением от границы в направлении к поверхности по толщине  $\delta$  микротвёрдость *H* в каждом сечении (по  $l$ ) уменьшается, но при этом возрастает по мере увеличения  $l$  от начала конусной поверхности. При  $l \cong 8,0$  мм *H* уже

значительно превышает  $H_{Cu}$  на расстоянии от границы  $\delta < 80$  мкм. В приповерхностных слоях становится сравнимой с  $H_{Cu}$ .

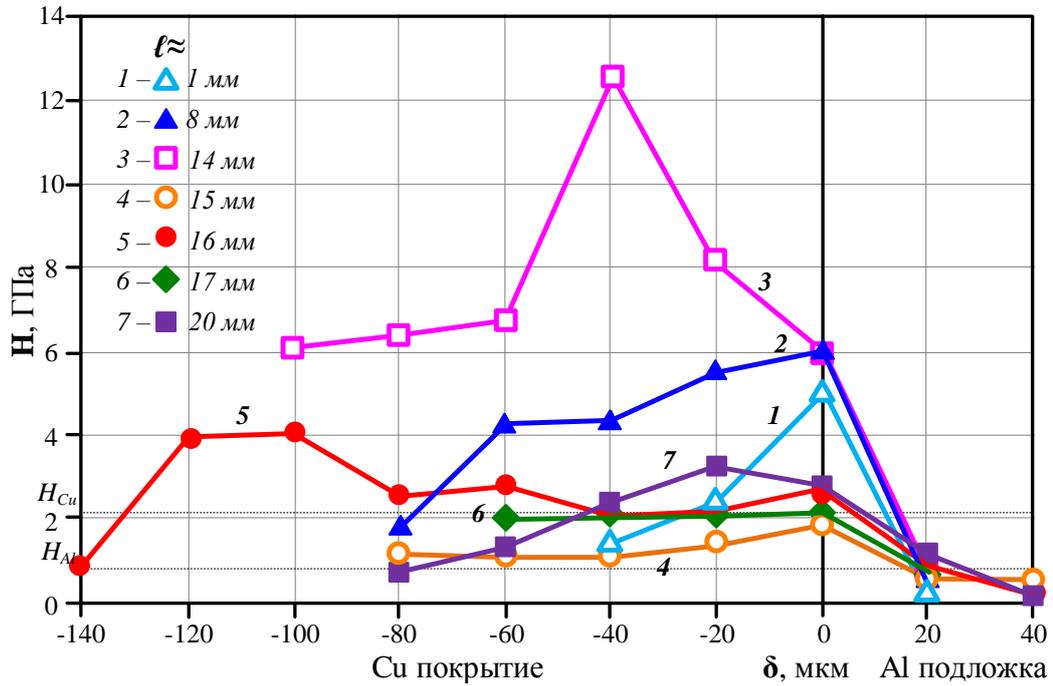


Рисунок 5.9 - Эпюры микротвёрдости  $H(\delta)$  по толщине покрытие-подложка, полученные на разных участках конусной поверхности

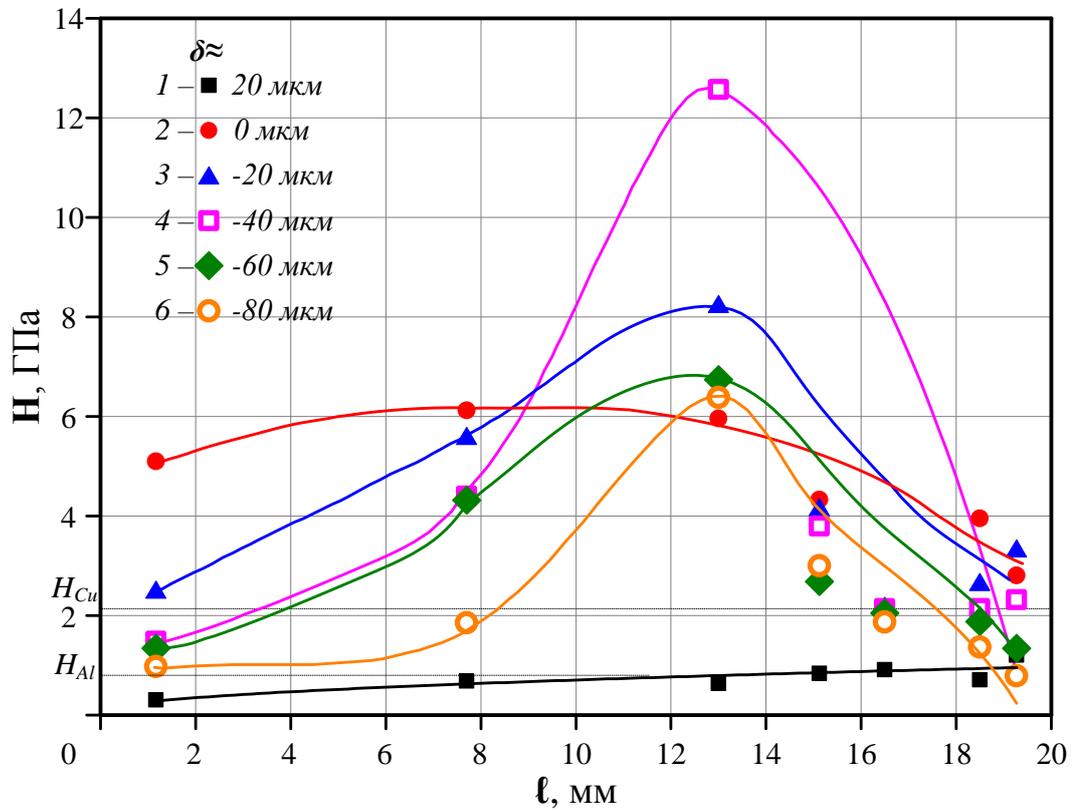


Рисунок 5.10 – Кривые изменения микротвёрдости  $H$  по длине образующей  $l$  конусной поверхности для разных  $\delta$

Однако на любых  $\delta$  на удалении от начала конусной поверхности до  $\sim 13,0$  мм имеет место увеличение  $H$  до величин  $\sim 6,0$  ГПа  $\div$   $12,0$  ГПа с приближением к границе раздела покрытие-подложка. После этого при  $\ell > 14,0$  мм наблюдается резкое падение  $H$  до величин, сравнимых с  $H_{Cu}$  и менее. Уровень  $H < H_{Cu}$  на конце конусной поверхности обусловлен рыхлением и слоистой микроструктурой преимущественно медного материала. Наиболее вероятно, что эффект возникновения максимума  $H$  при  $\ell \cong 13,0$  мм обусловлен 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 отверстия в алюминиевом образце в составе технологической сборки.

Характер изменения  $H$  по длине  $\ell$  достаточно очевидно коррелирует с особенностями микроструктуры покрытия на разных удалениях от начала конусной поверхности. Единственной причиной возникновения столь высоких уровней микротвёрдости, как и в выше рассмотренных случаях нанесения покрытий на плоские поверхности, может быть синтез в различающихся по микроструктуре областях с переменным содержанием  $Al$  и  $Cu$ , высокотвёрдых кристаллических интерметаллидных фаз системы  $Al-Cu$  и, особенно, в приграничном слое. Прямым доказательством этого являются результаты XRD-исследований и структурно-фазового анализа. Из рисунка 5.11 видно, что небольшие по интенсивности сильнейшие рефлексы интерметаллидных фаз  $Cu_3Al_2$  и  $Al_4Cu_6$  на фоне сильных отражений кристаллической меди присутствуют на XRD-картине исходной поверхности покрытия. Это вполне соответствует данным энергодисперсионного анализа материала поверхностного слоя покрытия. Появление небольшого количества алюминия (в составе интерметаллидных фаз) на поверхности покрытия обусловлено процессами гидродинамического перемешивания материалов. Рентгенограмма сошлифованной поверхности покрытия до толщины  $\delta \cong 20,0 \div 40,0$  мкм, представленная на рисунке 5.11б), 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*. Образование высокотвёрдого слоя в материале медного покрытия на конусной алюминиевой поверхности является немаловажным фактором снижения переходного сопротивления втычной контактной пары с конусной посадкой, так как обеспечивает повышение фактического давления на границе сопряжения контактных поверхностей.

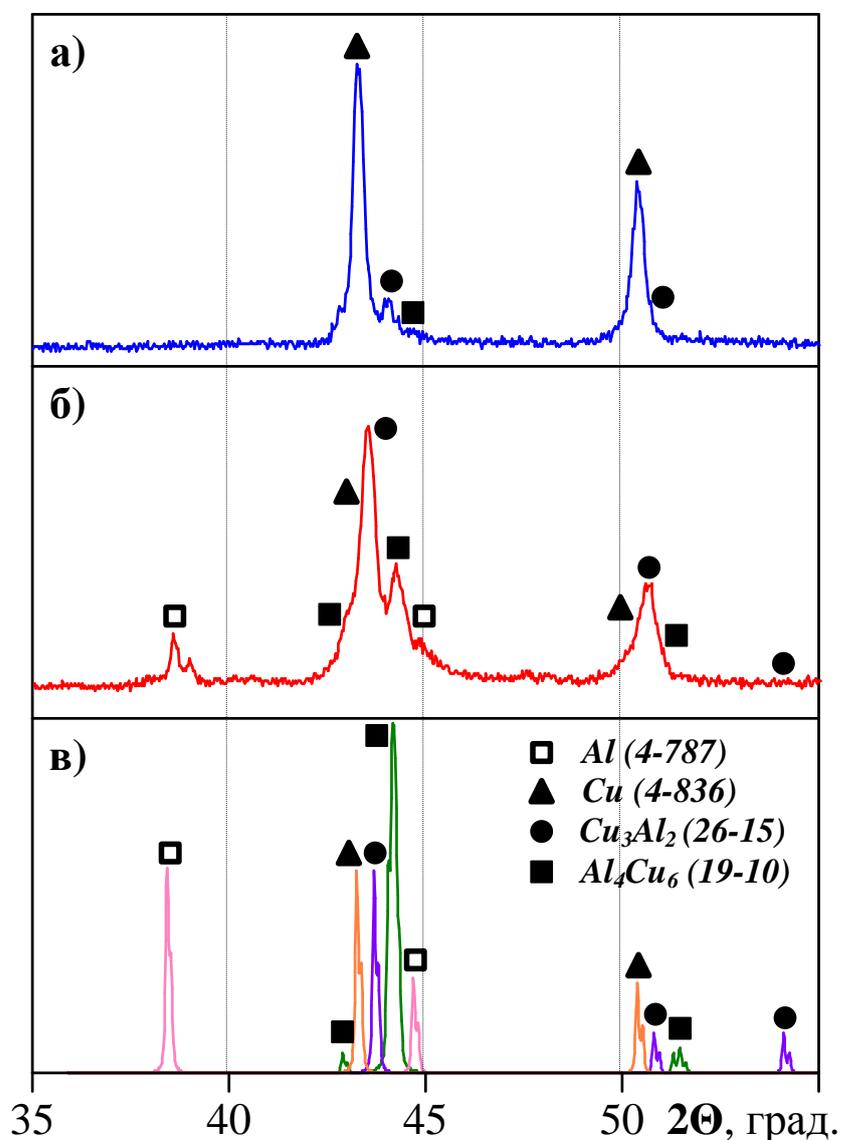


Рисунок 5.11 – XRD-картины: а) поверхность исходного покрытия; б) поверхность сошлифованного покрытия; в) структурные модели

На основании изложенного можно заключить:

1. Разработан способ плазмодинамического нанесения медного покрытия на внутреннюю поверхность конусного отверстия в детали из алюминиевого сплава АД-31;
2. Определены основные энергетические и конструктивные параметры КМПУ с медными электродами и оригинальной конструкцией ствола;
3. Определена геометрия технологического канала истечения медной плазменной струи через встречно направленное осесимметричное конусное отверстие с обрабатываемой поверхностью, идентичное с отверстием в контактном терминале вакуумного выключателя;
4. Низкое переходное сопротивление контактного соединения с конусной посадкой, порядка  $10^{-7}$  Ом, обеспечивается за счёт:
  - получения устойчивого и прочного сцепления медного покрытия с алюминиевой подложкой с образованием слоя взаимного гидродинамического перемешивания материалов;
  - естественной шероховатости поверхности покрытия и сдвиговой деформации микровыступов, обеспечивающих относительное увеличение фактической площади контактной поверхности;
  - образования в покрытии слоя из высокотвёрдых интерметаллидных фаз системы *Al-Cu*, обеспечивающего повышение фактического давления на границе сопряжения контактных поверхностей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии 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 эрозионного 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÷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 электроэрозионной плазмы в свободном пространстве в одноимпульсном и двухимпульсном режимах работы плазмодинамической системы.

3. Определены характер и основные закономерности влияния параметров КМПУ на процесс электроэрозионной 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 электродинамических 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.

Автор выражает признательность и благодарность своему научному руководителю профессору ОЭЭ ИШЭ ТПУ, д.т.н. *Александру Анатольевичу Сивкову*, а также коллективу научной группы *«Лаборатория магнитоплазменных технологий»*.

## СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

КМПУ	– коаксиальный магнитоплазменный ускоритель;
УК	– ускорительный канал;
КФПС	– канал формирования плазменной структуры;
ЕНЭ	– емкостной накопитель энергии;
ЦЭ	– центральный электрод;
КР	– камера-реактор;
SEM	– сканирующая электронная микроскопия;
XRD	– рентгенофазовый анализ;
EDAX	– энергодисперсионный анализ;
ХГН	– холодное газодинамическое напыление;
СПП	– сверхглубокое проникание;
Cu-Al	– контактная пара медь-алюминий;
Cu-Cu	– контактная пара медь-медь;
Al-Al	– контактная пара алюминий-алюминий;
Cu-Al <sub>Cu</sub>	– контактная пара медь-алюминий с медным покрытием;
Cu <sub>Al</sub> -Al	– контактная пара алюминий медь с алюминиевым покрытием;
Al <sub>Cu</sub> -Al <sub>Cu</sub>	– контактная пара алюминий-алюминий с медными покрытиями;
C	– ёмкость накопителя энергии;
U <sub>зар</sub>	– зарядное напряжение емкостного накопителя энергии;
W <sub>c</sub>	– накопленная энергия емкостного накопителя энергии;
P <sub>0</sub>	– атмосферное давление в камере-реакторе;
d <sub>УК</sub>	– диаметра ускорительного канала;

$\ell_{\text{УК}}$	– длина ускорительного канала;
$V_{\text{УК}}$	– объём ускорительного канала;
$\ell_{\text{ст-м}}$	– расстояние от среза ускорительного канала до алюминиевой мишени;
$v_c$	– скорость плазменной струи на срезе ускорительного канала;
$I(t)$	– осциллограмма импульсного тока электропитания;
$U(t)$	– осциллограмма напряжения на электродах ускорителя;
$P(t)$	– кривая мощности разряда во времени;
$W(t)$	– кривая изменения подведённой энергии во времени;
$I_m$	– амплитуда импульсного тока электропитания;
$U_m$	– амплитуда напряжения на электродах;
$P_m$	– максимальная мощность разряда;
$W$	– подведённая энергия;
$P_{\text{ср}}$	– средняя мощность разряда;
$P_{\text{ср}100}$	– средняя мощность разряда на интервале 100 мкс;
$t_{\text{имп}}$	– время импульса;
$t_1$	– момент запуска управляемых разрядников (начало работы ускорителя);
$t_3$	– момент задержки подачи второго импульса относительно начала первого;
$t_{\text{п}}$	– время безтоковой паузы между первым и вторым импульсом;
$\eta$	– эффективность передачи энергии из накопителя в нагрузку;
$\Delta m$	– величина удельного дифференциального износа;
$m$	– масса медного материала, эродированная с поверхности ускорительного канала;

$W/V_{\text{УК}}$	– удельной подведённой энергии на единицу объёма ускорительного канала;
$m/W$	– удельная электроэрозионная наработка медного материала;
$R_{\text{к}}$	– переходное контактное сопротивление;
$R_{\text{ш}}$	– сопротивление шунта;
$R_{\text{П}}$	– переходное сопротивление между медным покрытием и алюминиевой подложкой;
$R_0$	– сопротивление углеродной перемычки;
$S$	– площадь, нанесённого медного покрытия;
$S_{\text{к}}$	– площадь контактной поверхности;
$H(x)$	– эпюра твёрдости материала;
$E(x)$	– эпюра модуля упругости материала;
$F_{\text{тр}}$	– сила трения;
$F_{\text{н}}$	– нормальная сила нагружения;
$F_{\text{сц}}$	– сила сцепления покрытия с подложкой;
$P_{\text{сц}}$	– прочность сцепления покрытия с подложкой;
$A_e$	– акустическая эмиссия;
$D$	– ширина царапины от индентора;
$R_a$	– средняя шероховатость профиля;
$S_a$	– средний шаг неровностей профиля;
$h_{\text{max}}$	– максимальная высота пиков поверхности профиля;
$h_{\text{ср}}$	– средняя высота пиков поверхности профиля;
$\delta$	– толщина покрытия.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Meng, Y. Microstructures and formation mechanism of W–Cu composite coatings on copper substrate prepared by mechanical alloying method / Y.Meng, Y.Shen , C.Chen, Y.Li, X.Feng // *Applied Surface Science*. - 2013. - Т. 282. - С. 757-764.
2. Lu, K. The future of metals / K.Lu // *Science*. - 2010. - Т. 328. - №. 5976. - С. 319-320.
3. Maki, K. Solid-solution copper alloys with high strength and high electrical conductivity / K.Maki, Y.Ito, H.Matsunaga, H.Mori // *Scripta Materialia*. - 2013. – Т. 68. - №. 10. - С. 777-780.
4. Kang, H.K. Microstructure and electrical conductivity of high volume Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-reinforced copper matrix composites produced by plasma spray / H.K.Kang // *Surface and Coatings Technology*. - 2005. - Т. 190. - №. 2. - С. 448-452.
5. Findik, F. Microstructure, hardness and electrical properties of silver-based refractory contact materials / F.Findik, H.Uzun // *Materials & design*. - 2003. - Т. 24. - №. 7. - С. 489-492.
6. Shi, Z. The preparation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cu composite by internal oxidation / Z.Shi, M.Yan // *Applied Surface Science*. - 1998. - Т. 134. - №. 1-4. - С. 103-106.
7. Slade, P. Variations in contact resistance resulting from oxide formation and decomposition in Ag-W and Ag-WC-C contacts passing steady currents for long time periods / P.Slade // *IEEE transactions on components, hybrids, and manufacturing technology*. - 1986. - Т. 9. - №. 1. - С. 3-16.
8. ГОСТ 9.602-2005 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М. : Изд-во стандартов, 2005. - 59 с.

9. Martin, P.M. Handbook of deposition technologies for films and coatings: science, applications and technology / P.M.Martin. - Elsevier: William Andrew, 2009. - 912 с.
10. Licari, J.J. Coating materials for electronic applications: polymers, processing, reliability, testing / J.J.Licari. - Elsevier, 2003. - 545 с.
11. Зенин, Б.С. Современные технологии модифицирования поверхности и нанесения покрытий. Учебное пособие / Б.С.Зенин, Б.Б.Овечкин. – Томск: ТПУ, 2008. - 75 с.
12. Масанов, Н.Ф. Присоединение проводников к контактным выводам электрооборудования / Н.Ф.Масанов. - М.: Энергия. - 1969. - 96 с.
13. Мозгалин, А.В. Электропроводящие смазки – надежная мера снижения аварийности в сетях и уменьшения потерь в электрических контактах / А.В.Мозгалин // Промышленная энергетика. - 2010. - № 11. - С. 12-16.
14. Беляев, В.Л. Исследование влияния электропроводящих смазок на сопротивление силовых контактных систем электролизеров и электрических аппаратов / В.Л.Беляев, А.А.Шалагинов // Промышленная энергетика. - 2014. - №. 5. - С. 34-37.
15. Solchenbach, T. Electrical performance of laser braze-welded aluminum–copper interconnects / T.Solchenbach, P. Plapper, W.Cai // Journal of Manufacturing Processes. - 2014. - Т. 16. - №. 2. - С. 183-189.
16. Weigl, M. Influence of the feed rate and the lateral beam displacement on the joining quality of laser-welded copper-stainless steel connections / M.Weigl, M.Schmidt // Physics Procedia. - 2010. - Т. 5. - С. 53-59.
17. Saeid, T. Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum–copper lap joints made by friction stir welding / T.Saeid, A.Abdollah-Zadeh, B.Sazgari // Journal of Alloys and Compounds. - 2010. - Т. 490. - №. 1. - С. 652-655.

18. Декмин, Н.Б. Поверхность деталей машин и эксплуатационные свойства контакта – поверхность / Н.Б.Декмин, В.В.Измайлов // Физика, химия, механика. - 1982. - №11. - с. 16-27.
19. Декмин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б.Декмин, Э.В.Рыжов. - М.: Машиностроение. - 1981. - 243 с.
20. Конон, Ю.А. Сварка взрывом / Ю.А.Конон, Л.Б.Первухин, А.Д.Чудновский. - М.: Машиностроение. - 1987. - 216 с.
21. Елагина, О.Ю. Методы создания износостойких покрытий. Учебное пособие / О.Ю.Елагина. - М.: ИД Недра. - 2010. - 570с.
22. Штанский, Д.В. Структура и свойства покрытий Ti-B-N, Ti-Cr-B-(N) и Cr-B-(N), полученных магнетронным распылением мишеней, приготовленных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза / Д.В.Штанский, Ф.В.Кирюханцев-Корнее, А.Н.Шевейко, И.А.Башкова, О.В.Малочкин, Е.А.Левашов, Н.Б.Дьяконова, И.В.Лясоцкий. - Физика твёрдого тела. - 2005. - Т. 46. - № 2. - стр. 242-251.
23. Лайнер, В.И. Гальванические покрытия легких сплавов / В.И.Лайнер. - М.: Metallurgizdat. - 1959. - 138 с.
24. Лукомский, Ю.Я. Патент № 2214483 от 20.07.2003 Способ меднения алюминия / Ю.Я.Лукомский, Е.М.Румянцев - 2003.
25. Девяткина, Т.И. Нанесение медного гальванического покрытия на детали из алюминия и его сплавов / Т.И.Девяткина // Будущее технической науки: сб. мат. XI Международной научно-технической конференции. - 2012. - С. 297.
26. Виноградов, С.Н. Патент на изобретение №2365686, С25D3/58 от 27.08.09 Гальваническое покрытие сплавом медь-никель из сульфосалицилатно-аммиачного электролита / С.Н. Виноградов, Севостьянов Н.В. - 2009.
27. Blanc, C. Galvanic coupling between copper and aluminum in thin-layer cell / C.Blanc, N.Pebere, B.Tibollet, V.Vivier // Corrosion Science. - 2010. - №52. - С. 991-995.

28. Палеха, К.К. Физико-химические основы нанесения покрытий: учебное пособие для вузов / К.К.Палеха, А.П.Эпик. - К.: Изд-во КПИ. - 1992. -224 с.
29. Волченко, В.Н. Покрытие. Классификация и основные схемы [Электронный ресурс] / В.Н.Волченко // Сварка и свариваемые материалы. - 1996. - Т.2. - Режим доступа – <http://www.autowelding.ru>.
30. Bundaleska, N. Ion sputtering of cathode surface in a hollow cathode discharge / N.Bundaleska, Z.Tomova, V.Steflekova, D.Zhechev, // Vacuum. - 2008. - Т. 82. - №. 5. - С. 455-458.
31. Radyuk, A.G. Properties of the surface layer on copper formed after deposition and thermal treatment of aluminum gas-thermail coating / A.G.Radyuk, A.E.Titlyanov, E.M.Samedov // Russian Journal of non-ferrous metals. - 2007. - Т.48. - № 3. - С. 227-230.
32. Champagne, V. K. Interface material mixing formed by the deposition of copper on aluminum by means of the cold spray process / V.K.Champagne, D.Helfritsch, P.Leyman, S.Grendahl, B.Klotz // Journal of thermal spray technology. - 2005. - Т. 14. - № 3. - С. 330-334.
33. Goyal, T. Surface roughness optimization of cold-sprayed coatings using Taguchi method / T.Goyal, R.S.Walia, T.S.Sidhu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. - 2012. - Т. 60. - №. 5-8. - С. 611-623.
34. Алхимов, А.П. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика под ред. В.М. Фомина. / А.П.Алхимов, С.В.Клишков, В.Ф.Косарев, В.М.Фомин. - М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2010.
35. Буздыгар, Т.В. Патент РФ № 2038411Способ получения покрытий / Т.В.Буздыгар, А.И.Каширин, О.Ф.Клюев, Ю.И.Портнягин. - 1993.
36. Будовских, Е.А. Патент РФ № 2422555 от 27.06.11 г. Способ электровзрывного нанесения металлических покрытий на контактные поверхности / Е.А.Будовских, Д.А.Романов. - 2011.
37. Романов, Д.А. Рельеф поверхности и структура композиционных поверхностных слоев систем W-Cu и Mo-Cu, сформированных

электровзрывным способом / Д.А.Романов, Е.А.Будовских, В.Е.Громов // Физика и химия обработки материалов. - 2011. - №5. - с.51-55.

38. Хольм, Р. Электрические контакты / Р.Хольм. - М.: ИИЛ. - 1961. - 461 с.

39. Raghupathy, Y. Anti-corrosive and anti-microbial properties of nanocrystalline Ni-Ag coatings / Y.Raghupathy, K.A.Natarajan, C.Srivastava // Materials Science and Engineering: B. - 2016. - Т. 206. - С. 1-8.

40. Raghupathy, Y. Microstructure, electrochemical behaviour and bio-fouling of electrodeposited nickel matrix-silver nanoparticles composite coatings on copper / Y.Raghupathy, K.A.Natarajan, C.Srivastava // Surface and Coatings Technology. - 2017. - Т. 328. - С. 266-275.

41. Li, Y. Microstructure evolution of Cr coatings on Cu substrates prepared by mechanical alloying method / Y.Li, C.Chen, R.Deng, X.Feng, Y.Shen // Powder Technology. - 2014. - Т. 268. - С. 165-172.

42. Chen, C. Effects of Cu content on the microstructures and properties of Cr–Cu composite coatings fabricated via mechanical alloying method / C.Chen, C.Duan, Y.Li, Y.Shen // Powder Technology. - 2015. - V. 277. - С. 36-46.

43. Imai, H. Effect of Chromium Behavior on Mechanical and Electrical Properties Of P/M Copper-Chromium Alloy Dispersed with VGCF / H.Imai, K.Y.Chen, K.Kondoh, H.Y.Tsai, J.Umeda // World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering. - 2015. - Т. 9. - №. 7. - С. 793-796.

44. Heshmati, M. Duplex Ni-Zn-Cu-P/Ni-P electroless coating on magnesium alloy via maleic acid pretreatment / M.Heshmati, D.Seifzadeh, P.Shoghi, M.Gholizadeh-Gheshlaghi // Surface and Coatings Technology. - 2017. - Т. 328. - С. 20-29.

45. Zhu, J. Influence of microstructure on the optical property of plasma-sprayed Al, Cu, and Ag coatings / J.Zhu, Z.Ma, L.Gao, Y.Liu, F.Wang // Materials & Design. - 2016. - Т. 111. - С. 192-197.

46. Wu, L. Mechanism for the development of Sn-Cu alloy coatings produced by pulsed current electrodeposition / L.Wu, J.E.Graves, A.J.Cobley // *Materials Letters*. - 2018. - Т. 217. - С. 120-123.
47. Walsh, F.C. A review of developments in the electrodeposition of tin-copper alloys / F.C.Walsh, C.T.J.Low // *Surface and Coatings Technology*. - 2016. - Т. 304. - С. 246-262.
48. Zhang, J. Study of high-strength and high-conductivity Cu-Sn-Fe alloys / J.Zhang, X.Cui, J.Ma, Y.Wang // *Materials Science-Poland*. - 2016. - Т. 34. - № 1. - С. 142-147.
49. Isa, N.N.C. Characterization of Copper Coating Electrodeposited on Stainless Steel Substrate / N.N.C.Isa, Y.Mohd, M.H.M.Zaki, S.A.S.Mohamad // *International Journal of Electrochemical Science*. - 2017. - Т. 12 № 7. - С. 6010-6021.
50. Крамер, Б.М. Благородные металлы и электролитические сплавы на их основе для покрытия электрических контактов / Б.М.Крамер. - Л.: ЛДНТП. - 1984. - 32 с.
51. Волков, А.Ю. Изменение электрических и механических свойств меди при легировании палладием / А.Ю.Волков, О.С.Новикова, А.Е.Костина, Б.Д.Антонов // *Физика металлов и металловедение*. - 2016. - Т. 117. - № 9. - С. 977-986.
52. Karthik, N. Fabrication of corrosion resistant mussel-yarn like superhydrophobic composite coating on aluminum surface / N.Karthik, T.N.J.I.Edison, Y.R.Lee, M.G.Sethuraman // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. - 2017. - Т. 77. - С. 302-310.
53. Андриевский, Р.А. Наноструктурные материалы: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений / Р.А.Андриевский, А.В.Рагуля. - М.: Академия. - 2005. - 192 с.
54. Lim, J.D. Surface roughness effect on copper-alumina adhesion / J. D.Lim, Y. S.Y.Susan, R.M.Daniel, K.C.Leong, C.C.Wong // *Microelectronics Reliability*. - 2013. - Т. 53. - № 9-11. - С. 1548-1552.

55. Дальский, А.М. Технология конструкционных материалов / А.М.Дальский. - М.: Машиностроение. - 2003. - 512 с.
56. Medhisuwakul, M. Development and application of cathodic vacuum arc plasma for nanostructured and nanocomposite film deposition / M.Medhisuwakul, N.Pasaja, S.Sansongsiri, J.Kuhakan, S.Intarasiri, L.D.Yu // Surface and Coatings Technology. - 2013. - Т. 229. - С. 36-41.
57. El-Kaddah, N. Heat transfer and fluid flow in plasma spraying / N.El-Kaddah, J.McKelliget, J.Szekely // Metallurgical Transactions B. - 1984. - Т. 15. - № 1. - С. 59-70.
58. Paik, S. Modeling of a counterflow plasma reactor / S.Paik, X.Chen, P.Kong, E.Pfender // Plasma chemistry and plasma processing. - 1991. - Т. 11. - №. 2. - С. 229-249.
59. Алхимов, А.П. Научные основы технологии холодного газодинамического напыления (ХГН) и свойства напыленных материалов: монография / А.П.Алхимов, В.Ф.Косарев, А.В.Плохов. – Новосибирск: НГТУ, 2006. - 280 с.
60. Van Steenkiste, T.H. Aluminum coatings via kinetic spray with relatively large powder particles / T.H.VanSteenkiste, J.R.Smith, R.E.Teets // Surface and Coatings Technology. - 2002. - Т. 154. - №. 2-3. - С. 237-252.
61. Dykhuizen, R.C. Gas dynamic principles of cold spray / R.C.Dykhuizen, M.F. Smith // Journal of Thermal Spray Technology. - 1998. - Т. 7. -№ 2. - С. 205-212.
62. Winnicki, M. Corrosion protection and electrical conductivity of copper coatings deposited by low-pressure cold spraying / M.Winnicki, A.Małachowska, A.Baszczuk, M.Rutkowska-Gorczyca, D.Kukła, M.Lachowicz, A.Ambroziak // Surface and Coatings Technology. – 2017. – Т. 318. – С. 90-98.
63. Jifeng, X. Preparation of electrical contact materials by cold gas-spray / X.Jifeng, C.Shunhua, B.Xiaoping, L.Guowei, Y.Xiaofang, Z.Lidan // Rare Metal Materials and Engineering. - 2014. - Т. 43. - №. 12. - С. 2989-2992.

64. Barradas, S. Application of laser shock adhesion testing to the study of the interlamellar strength and coating–substrate adhesion in cold-sprayed copper coating of aluminum / S.Barradas, R.Molins, M.Jeandin, M.Arrigoni, M.Boustie, C.Bolis, L.Berthe, M.Ducosd // *Surface and Coatings Technology*. - 2005. - Т. 197. - №. 1. - С. 18-27.
65. Pantelis, D. Microstructural study of copper and copper/alumina composite coatings produced by cold spray process / D.Pantelis, K.Triantou, C.Sarafoglou, D.Christoulis, F.Borit, V.Guipont, M.Jeandin // *Advanced Materials Research*. - Trans Tech Publications, 2010. - Т. 89. - С. 556-561.
66. Chiang, K.T. Aluminization of copper for oxidation protection / K.T.Chiang, K.J.Kallenborn, J.L.Yuen // *Surface and Coatings Technology*. - 1992. - Т. 52. - №. 2. - С. 135-139.
67. Wang, X.G. Induction diffusion brazing of copper to aluminium / X.G.Wang, F.J.Yan, X.G.Li, C.G.Wang // *Science and Technology of Welding and Joining*. - 2017. - Т. 22. - №. 2. - С. 170-175.
68. Gravina, R. Corrosion behaviour of an assembly between an AA1370 cable and a pure copper connector for car manufacturing applications / R.Gravina, N.Pébère, A.Laurino, C.Blanc // *Corrosion Science*. - 2017. - Т. 119. - С. 79-90.
69. Сивков, А.А. Патент на полезную модель № 137443 РФ Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель / А.А.Сивков, А.С.Сайгаш, Ю.Л.Колганова. - 2004.
70. Сивков, А.А. Патент № 2150652 РФ Коаксиальный ускоритель Сивкова / А.А.Сивков. -2000.
71. Kuzenov, V.V. Application of Thomas-Fermi model to evaluation of thermodynamic properties of magnetized plasma / V.V.Kuzenov, S.V.Ryzhkov, V.V.Shumaev // *Prob. of Atom.Science and Technology*. - 2015. - 1(95). - P.97-99.
72. Sivkov, A. High-speed thermal plasma deposition of copper coating on aluminum surface with strong substrate adhesion and low transient resistivity / A.Sivkov, Y.Shanenkova, A.Saigash, I.Shanenkov // *Surface and Coatings Technology*. - 2016. - Т. 292. - С. 63-71.

73. Пак, А.Я. Получение ультрадисперсных кристаллических материалов в сверхзвуковой струе углеродной электроразрядной плазме: диссертация к.т.н.: 05.14.12 / Александр Яковлевич Пак. - Томск, 2014. - 141с.

74. Рахматуллин, И.А. Получение ультрадисперсного карбида бора в сверхзвуковой струе электроразрядной плазмы: диссертация к.т.н.: 05.14.12 / Ильяс Аминович Рахматуллин. - Томск, 2015. - 156 с.

75. Герасимов, Д.Ю. Электроэрозионный износ канала коаксиального магнитоплазменного ускорителя: диссертация к.т.н.: 05.14.12 / Дмитрий Юрьевич Герасимов. - Томск, 2005. - 190 с.

76. Евдокимов, А.А. Плазмодинамический синтез ультрадисперсного нитрида титана и получение TiN-керамики методом искрового плазменного спекания: диссертация к.т.н.: 05.14.12 / Андрей Анатольевич Евдокимов. - Томск, 2013. - 218 с.

77. Дубовик, А.С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. Монография / А.С. Дубовик. – Главная редакция физико-математической литературы изд-ва “Наука”. – 1975.

78. Установка ВФУ–1. Техническое описание и инструкция по эксплуатации БЛ. 728.023 ТО.

79. Дзекцер, Н.Н. Определение электрического сопротивления неподвижных контактных соединений / Н.Н.Дзекцер, В.В.Измайлов, Е.В.Николаева // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - № 9. - 1986. - С. 87-93.

80. Сивков, А.А. Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя / А.А.Сивков, Л.В.Корольков, А.С.Сайгаш // Электротехника. - 2003. - № 8. - с. 41-46.

81. Сивков, А.А. Математическое моделирование коаксиального магнитоплазменного ускорителя / А.А.Сивков, Ю.Н.Исаев, О.В.Васильева, А.М.Купцов // Известия Томского политехнического университета. - 2010. - Т. 317. - №. 4. - С. 74-78.

82. Сивков, А.А. Моделирование газодинамических процессов и оценка термодинамических параметров ударной волны плазменного газа коаксиального магнитоплазменного ускорителя / А.А.Сивков, Ю.Н.Исаев, О.В.Васильева, А.М.Купцов // Известия Томского политехнического университета. - 2012. - Т. 320. - № 2. - С. 53-58.

83. Сивков, А.А. Динамика изменения траектории заряженных частиц в электромагнитном поле в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе / А.А.Сивков, Ю.Н.Исаев, О.В.Васильева, А.М.Купцов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2012. - Т. 320. - № 2. - С. 48-52.

84. Лебедев, А.Д. Импульсные ускорители плазмы высокого давления. Монография / А.Д.Лебедев, Б.А.Урюков. - АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теплофизики. - 1990. - 292 с.

85. Златин, Н.А. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Н.А.Златин, А.П.Красильщиков. Г.И.Мишин, Н.Н.Попов. - М.: Наука. -1974. - 344 с.

86. Соколов, Е.И. Взаимодействие сверхзвуковой струи с преградой и встречным сверхзвуковым потоком / Е.И.Соколов, В.Н.Усков // Струйные и отрывные течения. - М.: Изд. МГУ. -1986. - С. 18-33.

87. Росцишевский. Электрическая дуга, движущаяся со сверхзвуковой скоростью // Ракетная техника и космонавтика. - 1970. - Т.8. №3. - с. 252-254.

88. Сайгаш, А.С. Динамический синтез нанокристаллических высокотвёрдых материалов на основе титана в гиперскоростной струе электроразрядной плазмы: диссертация к.т.н.: 05.14.12 / Анастасия Сергеевна Сайгаш. — Томск, 2010. – 208 с.

89. Швецов, Г.А. Исследование работы рельсотронного ускорителя твёрдых тел с питанием от взрывного МГД-генератора / Г.А.Швецов, В.М.Титов, Ю.Л.Башкатов, А.В.Орлов // Физика горения и взрыва. - 1984. - Т. 20. - № 3. - С. 111-115.

90. Киселев, Ю.В. Искровые разрядники / Ю.В.Киселев, В.П.Черепанов. - М.: Советское радио. - 1976. - 72 с.
91. Сивков, А.А. Влияние подведённой энергии на электроэрозионную наработку материала в электротехнологическом ускорителе / А.А.Сивков, Д.Ю.Герасимов, А.А.Евдокимов // Приборы и техника эксперимента. - 2014. - №. 2. - С. 135-135.
92. Gerasimov, D.Y. Electroerosive wear of the barrel of a coaxial hybrid magnetoplasma accelerator in the acceleration of solids / D.Y.Gerasimov, A.A.Sivkov // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. - 2012. - Т. 53. - №. 1. - С. 140-146.
93. Герасимов, Д.Ю. Влияние магнитного поля соленоида коаксиального магнитоплазменного ускорителя на электроэрозионный износ поверхности ускорительного канала / Д.Ю.Герасимов, А.А.Сивков, А.С.Сайгаш, Р.Р.Шарипов, С.И.Привезенцев // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - № 2. - Том 309. - С. 93–96.
94. Герасимов, Д.Ю. Электроэрозионный износ поверхности ускорительного канала в гибридном коаксиальном магнитоплазменном ускорителе / Д.Ю.Герасимов, А.А.Сивков, А.С.Сайгаш, Р.Р.Шарипов, С.И.Привезенцев // Известия Томского политехнического университета. - 2006. - № 2. - Том 309. - С. 97-102.
95. Сайгаш, А.С. Влияние внешнего магнитного поля на электроэрозионный износ поверхности ускорительного канала коаксиального магнитоплазменного ускорителя / А.С.Сайгаш, А.А.Сивков, Д.Ю.Герасимов, Р.Р.Шарипов, С.И.Привезенцев // Электротехника. - 2006. - № 12. - С. 32-37.
96. Сивков, А.А. Электроэрозионный износ ствола коаксиального магнитоплазменного ускорителя при метании макротел / А.А. Сивков, Д.Ю.Герасимов // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2009. - № 6. - С. 55-60.
97. Сивков, А.А. Исследование электроэрозионного износа поверхности ускорительных каналов коаксиального магнитоплазменного

ускорителя / А.А.Сивков, Д.Ю.Герасимов // Электротехника. - 2018. - № 5. - С. 57-60.

98. Sivkov, A.A. Influence of the supplied energy on electroerosion recovery of material in an electrotechnical accelerator / A.A.Sivkov, D.Y.Gerasimov, A.A.Evdokimov // Instruments and Experimental Techniques. - 2014. - Т. 57. - № 2. - С. 222-225.

99. Сивков, А.А. Исследование многократной и частотной работы коаксиального магнитоплазменного ускорителя для получения сверхтвёрдых нанодисперсных соединений титана / А.А.Сивков, Д.Ю.Герасимов, А.С.Сайгаш, А.А.Евдокимов // Электротехника. - 2012. - №. 1. - С. 39-45.

100. Кляйн, Р.Я. Электрические и электронные аппараты. Часть 1 / Р.Я.Кляйн. - Учебное пособие. - Томск, ТПУ. - 2011. - 128 с.

101. ГОСТ 10434-82 Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования

102. Сивков, А.А., Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя / А.А.Сивков, Л.В.Корольков, А.С.Сайгаш // Электротехника. - 2003. - № 8. - С. 41-46.

103. 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 // Физика и химия обработки материалов. - 2015. - № 4. - С. - 25-34.

104. Андилевко, С.К. Сверхглубокое проникание / С.К.Андиленко // Инженерно-физический журнал. - 2003. - Т. 76. - № 2. - С. 12-23.

105. Киселев, С.П. О механизме сверхглубокого проникания частиц в металлическую преграду / С.П.Киселев, В.П.Киселев // Прикладная механика и техническая физика. - 2000. - Т. 41. - №. 2. - С. 37-46.

106. Сивков, А.А. Сверхглубокое проникание вещества высокоскоростного плазменного потока в металлическую преграду /

А.А.Сивков, А.П.Ильин, А.М.Громов // Физика и химия обработки материалов. - 2003. - № 1. - С. 42-48.

107. Козорезов, А.К. Структурные эффекты при сверхглубоком проникании частиц в металлы / А.К.Козорезов, К.И.Козорезов, Л.И.Миркин // Физика и химия обработки материалов. - 1990. - № 2. - С. 51-55.

108. Ушеренко, Ю.С. Сверхглубокое проникновение твёрдых микрочастиц в металлы / Ю.С.Ушеренко, В.В.Соболев, С.М.Ушеренко // Высокоэнергетическая обработка материалов. - 2009. - С. 186.

109. Колмаков, А.Г. Методы измерения твёрдости: Справочное издание / А.Г.Колмаков, В.Ф.Терентьев, М.Б.Бакиров. - М.: Интернет Инжиниринг. - 2000. - 125 с.

110. Sasaki, T.T. Formation of ultra-fine copper grains in copper-clad aluminum wire / T.T.Sasaki, R.A.Morris, G.B.Thompson, Y.Syarif, D.Fox // Scripta Materialia. -2010. - Т. 63. - №. 5. - С. 488-491.

111. Кикоина, И.К. Таблицы физических величин: справочник / Под ред. И.К.Кикоина. - М.: Атомиздат. - 1976. - 1006 с.

112. Li, C.J. Relationships between feedstock structure, particle parameter, coating deposition, microstructure and properties for thermally sprayed conventional and nanostructured WC-Co / C.J.Li, G.J.Yang // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. - 2013. - Т. 39. - С. 2-17.

113. Prozorova, G.V. Adhesion strength of magnetron sputtered molybdenum and tantalum thin-films on TiNi substrate / G.V.Prozorova, A.I.Lotkov, L.L.Meysner, A.A.Neyman //Proceedings of 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Plows. - 2008. - С. 547-550.

114. Лотков, А.И. Адгезионная прочность и физико-химические свойства покрытий из молибдена и тантала для никелида титана / А.И.Лотков, Л.Л.Мейснер, В.П.Сергеев, Г.В.Прозорова, А.А.Нейман, М.Г.Дементьева // Деформация и разрушение материалов. - 2009. - №5. - С. 26-31.

115. Белоус, В.А. Количественное определение прочности сцепления тонких металлических плёнок со стеклом / В.А.Белоус, В.М.Лунев, В.С.Павлов, А.К.Турчина // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2006. - Т.89. - №4. - С. 221-223.
116. Архипов, В.Е. Нанесение медных покрытий на сталь газодинамическим напылением / В.Е.Архипов, А.Ф.Лондарский, Г.В.Москвитин, А.Ф.Мельшанов, М.С.Пугачев // Металлообработка. - 2012. - №. 2 (68) . - С. 13-17.
117. Pawlicki, M. Cold upset forging joining of ultra-fine-grained aluminium and copper / M.Pawlicki, T.Drenger, M.Pieszak, J.Borowski // Journal of Materials Processing Technology. - 2015. - Т. 223. - С. 193-202.
118. Бойко, Н.И. Ресурсосберегающие технологии повышения качества поверхностных слоев деталей машин / Н.И.Бойко. - М.: Маршрут. - 2006. - 198 с.
119. Bagherifard, S. Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening / S.Bagherifard, R.Ghelichi, M.Guagliano // Applied surface science. - 2012. - Т. 258. - № 18. - С. 6831-6840.
120. Арутюнов, П.А. Система параметров для анализа шероховатости и микрорельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии / П.А.Арутюнов, А.Л.Толстихина, В.Н.Демидов. - Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 1999. - №9.
121. Запрягаев, В.И. Струйные и нестационарные течения в газовой динамике / В.И.Запрягаев, В.Н.Усков, С.А.Гапонов, А.А.Маслов, В.Н.Глазнев - Новосибирск: СО РАН, 2000. - 200 с.

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «ЗКПД ТДСК»

Ефремов Николай Борисович

« 28 » мая 2018 год**АКТ****о внедрении результатов диссертационной работы Шаненковой Ю.Л.****«Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные  
поверхности плазмодинамическим методом»**

Образцы алюминиевых изделий с медным покрытием, нанесенным плазмодинамическим методом в рамках выполнения диссертационного исследования Шаненковой Ю.Л., в виде токопроводящих шин и наконечников были использованы в электросистеме Энергоцеха №9 ООО «ЗКПД ТДСК». Данные изделия были установлены в цепь электропитания асинхронного двигателя подъемного механизма (кран-балка). За период работы с 15.06.2016 г. по 14.05.2018 г. не произошло ни одного отказа в рассматриваемом участке цепи, вызванного неисправностью контактных соединений.

Главный энергетик  
ООО «ЗКПД ТДСК»

A handwritten signature in blue ink, likely belonging to Leonid Pavlovich Kolganov.

Колганов Леонид Павлович