

На правах рукописи

Герасимов Дмитрий Юрьевич

**ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС КАНАЛА КОАКСИАЛЬНОГО
МАГНИТОПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ**

Специальность 05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2005

Работа выполнена в научно-исследовательском институте высоких напряжений
при Томском политехническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный сотрудник
Сивков Александр Анатольевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
Усов Юрий Петрович

кандидат физико-математических наук
Буркин Виктор Владимирович

Ведущая организация: Московский государственный инженерно-физический институт
(технический университет), г. Москва.

Защита состоится «___»_____2005 г. в _____ часов на заседании диссертационного
Совета К 212.269.02 в Томском политехническом университете по адресу: 634050, г.Томск,
пр.Ленина, 2а, НИИ высоких напряжений, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «___»_____2005 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник

М.А. Соловьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Значимость проблемы гиперскоростного ускорения плазмы, микро- и макротел обусловлена его использованием в самых современных и перспективных областях физики и новейших технологиях, в том числе технологиях двойного назначения. Характерной особенностью кондукционных электродинамических ускорителей с плазменным поршнем является сильная электрическая эрозия поверхности электродов в ускорительном канале (УК). В первом приложении – электродинамическом ускорении электроэрозионной плазмы с целью получения ультрадисперсных порошков металлов и некоторых соединений, и нанесения различных функциональных покрытий - это явление носит позитивный характер. На нем основывается работа так называемых эрозионных электромагнитных ускорителей (ЭМУ). Получение рабочего материала эрозионным путем с поверхности электродов в процессе рабочего цикла является их отличием и преимуществом перед другими типами ЭМУ, например, электротермическими. Во втором приложении - электромагнитном высокоскоростном метании макротел, электрическая эрозия поверхности электродов является принципиально негативным явлением, борьба с которым является одной из основных проблем, стоящих перед разработчиками ЭМУ макротел и перспективных систем кинетических вооружений на новых физических принципах. Электроэрозионный износ поверхности электродов в УК препятствует получению высоких, теоретически прогнозируемых, скоростей метания из-за накопления и вовлечения в движение большой паразитной эродированной массы, а так же исключает повторное использование УК.

Эти особенности присущи как рельсовым ускорителям (РУ), так и коаксиальным ускорителям (КУ) с сильноточным разрядом типа Z-пинч. Не является исключением и гибридный коаксиальный магнитоплазменный ускоритель (КМПУ), рассматриваемый в настоящей работе. В отличие от РУ и традиционных Z-пинч ускорителей гибридный КМПУ имеет более высокую эффективность преобразования электромагнитной энергии в кинетическую энергию ускоряемой массы и электроэрозионной наработки рабочего материала.

В связи с этим исследование электроэрозионного износа поверхности УК КМПУ является актуальной задачей.

Цели работы и задачи исследований. Цель работы заключается в установлении основных закономерностей динамики ускорения и электроэрозионной наработки рабочего материала с поверхности УК КМПУ.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследование динамики ускорения электроэрозионной плазмы и дифференциального электроэрозионного износа по длине УК.
2. Определение наиболее значимого фактора и основных закономерностей интегрального электроэрозионного износа в зависимости от энергетических и конструктивных параметров КМПУ.
3. Повышение эффективности КМПУ за счет оптимизации системы электромагнитного взаимодействия.
4. Поиск возможностей снижения электроэрозионного износа поверхности УК.

Работы по теме выполнялись в рамках следующих научно-технических программ:

1. Сотрудничество Министерства Образования РФ и Министерства Обороны РФ по направлению "Научно-инновационное сотрудничество" по теме: «Создание высокоэффективной гибридной электромагнитной системы гиперскоростного метания масс», 2002-2003 гг.
2. Министерство Образования РФ "Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники". Подпрограмма (202): "Новые материалы". Проект 202.05.02.034. «Разработка научно-технических основ динамического синтеза сверхтвердых материалов и получение покрытий на их основе», 2002 г.

3. Министерство Образования РФ “Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники”. «Исследование взаимодействия сильнотоочного дугового разряда с конденсированными средами при высоких динамических нагрузках и в сильных магнитных полях», 2003 г.
4. Министерство Образования РФ: Санкт-Петербургский государственный университет. «Исследование процесса электроэрозионной наработки материала с поверхности ускорительного канала коаксиального магнитоплазменного ускорителя для нанесения функциональных покрытий на металлические поверхности», 2004 г.
5. Министерство Образования и науки РФ “Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники”. «Исследование явления сверхглубокого проникания вещества гиперзвуковой струи коаксиального магнитоплазменного ускорителя в металлические преграды», 2005 г.

Научная новизна. В работе проведены исследования и получены следующие результаты:

1. Установлена связь между волновой неустойчивостью скорости плазменного течения в УК КМПУ с волновой неравномерностью электроэрозионного износа поверхности УК.
2. Установлены закономерности влияния энергетических и конструктивных параметров КМПУ на интегральную величину электроэрозионного износа поверхности УК.
3. Найдены возможности снижения электроэрозионного износа поверхности УК.
4. Установлены особенности влияния электромагнитной системы КМПУ на динамику ускорения и электроэрозионный износ поверхности УК.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Волнообразная неравномерность электроэрозионного износа поверхности УК КМПУ обусловлена волновой неустойчивостью скорости плазменного течения в УК, вызванной установлением квазистационарного гиперзвукового течения с характерной “бочкообразной” ударно-волновой структурой в соответствии с основными газодинамическими закономерностями гиперзвуковых течений.
2. Интегральный электроэрозионный износ поверхности УК определяется величиной подведенной энергии. Обобщающая зависимость удельного интегрального электроэрозионного износа m/W от удельной подведенной энергии $W/V_{ук}$ носит линейный характер в диапазоне изменения энергии от 20 до 200 кДж.
3. Существенное снижение эрозионного износа обеспечивается введением в плазму разряда углерода, бора, кремния (подтверждено патентом РФ). Этот эффект усиливается с уменьшением потенциала ионизации вещества добавки.
4. Максимальная эффективность использования энергии на электроэрозионную наработку материала достигается при: встречном направлении аксиального магнитного поля внешней индукционной системы, с короткозамкнутым витком на выходе соленоида и при минимально возможном экранировании УК цилиндрической стенкой ствола.

Практическая значимость результатов работы. Совокупность полученных результатов представляет собой научно-технические основы способа, который ляжет в основу создания новых технологий нанесения функциональных покрытий на твердые поверхности и получения новых сверхтвердых материалов. Наиболее перспективным направлением практического использования представляется:

1. Нанесение медных покрытий на металлические контактные поверхности с целью согласования контактных пар и снижения переходного сопротивления.
2. Нанесение покрытий состава нержавеющей стали на рабочие поверхности электродов электроразрядных устройств с целью повышения стойкости к внешним воздействиям и электроэрозионной стойкости.
3. Получение сверхтвердых материалов на основе: W, Ti, Al, Si, B и нанесение сверхтвердых покрытий на их основе на металлические поверхности с целью:

- получения твердосплавного слоя (в виде покрытия) на режущие поверхности металлообрабатывающего лезвийного инструмента;
 - поверхностного упрочнения пластин средств индивидуальной броневой защиты.
4. Полученные результаты используются при разработке электромагнитных ускорителей макротел с целью повышения эффективности метания и ресурса ствола.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих симпозиумах и конференциях:

- “KORUS-2003”. Proceedings the 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. – Republic of Korea, Ulsan. The IEEE. 28 June – 6 July 2003;
- IV International Conference Plasma Physics and Plasma Technology Contributed Papers. Minsk, Belarus. 15-19 September 2003;
- Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии. Материалы II Всероссийской конференции молодых ученых. Томск: ИФПМ СО РАН, 2003;
- Энергетика: экология, надежность, безопасность. Материалы докладов 9-ой Всероссийской научно-технической конференции. Томск, 2003;
- Современные техника и технологии. X-Юбилейная международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск. 29 марта – 2 апреля 2004;
- “KORUS-2004”. Proceedings the 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. Tomsk. 26 June – 3 July 2004;
- 13th International Symposium on High Current Electronics. Proceedings Edited by B. Kovalchuk and G. Remnev. Russia, Institute of HCE Tomsk. 25–29 July 2004;
- European Pulsed Power Symposium. Hamburg-Germany DESY. 20-23 September 2004;
- Энергетика: экология, надежность, безопасность. Материалы докладов 10-ой Всероссийской научно-технической конференции. Томск, 2004;
- Современные техника и технологии. XI-Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых. Томск. 28 марта – 1 апреля 2005;
- “KORUS-2005”. Proceedings the 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. Russia, Novosibirsk. 26 June – 2 July 2005.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 26 работ, в том числе 2 статьи в рецензируемых журналах, и получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 190 страницах, состоит из введения, 6 глав, заключения, списка используемой литературы (158 наименований) и приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследований, изложена научная новизна, определены защищаемые положения и показана практическая значимость результатов.

В первой главе рассмотрены и проанализированы литературные данные по электродинамическим ускорителям, электрической эрозии электродов и динамике ускорения плазменного поршня. Сформулированы наиболее актуальные задачи, требующие решения, как для разработки электроэрозионных ускорителей, так и для совершенствования ускорителей макротел.

Во второй главе рассмотрено устройство и принцип действия КМПУ в режиме ускорения электроэрозионной плазмы при электропитании от высоковольтного емкостного накопителя энергии С (рис.1). Подводимая к ускорителю энергия W менялась путем изменения зарядного напряжения $U_{зар}$ до 4 кВ и емкости С конденсаторной батареи до 48 мФ. С целью сохранения условий ввода энергии изменение W производилось путем отсечки

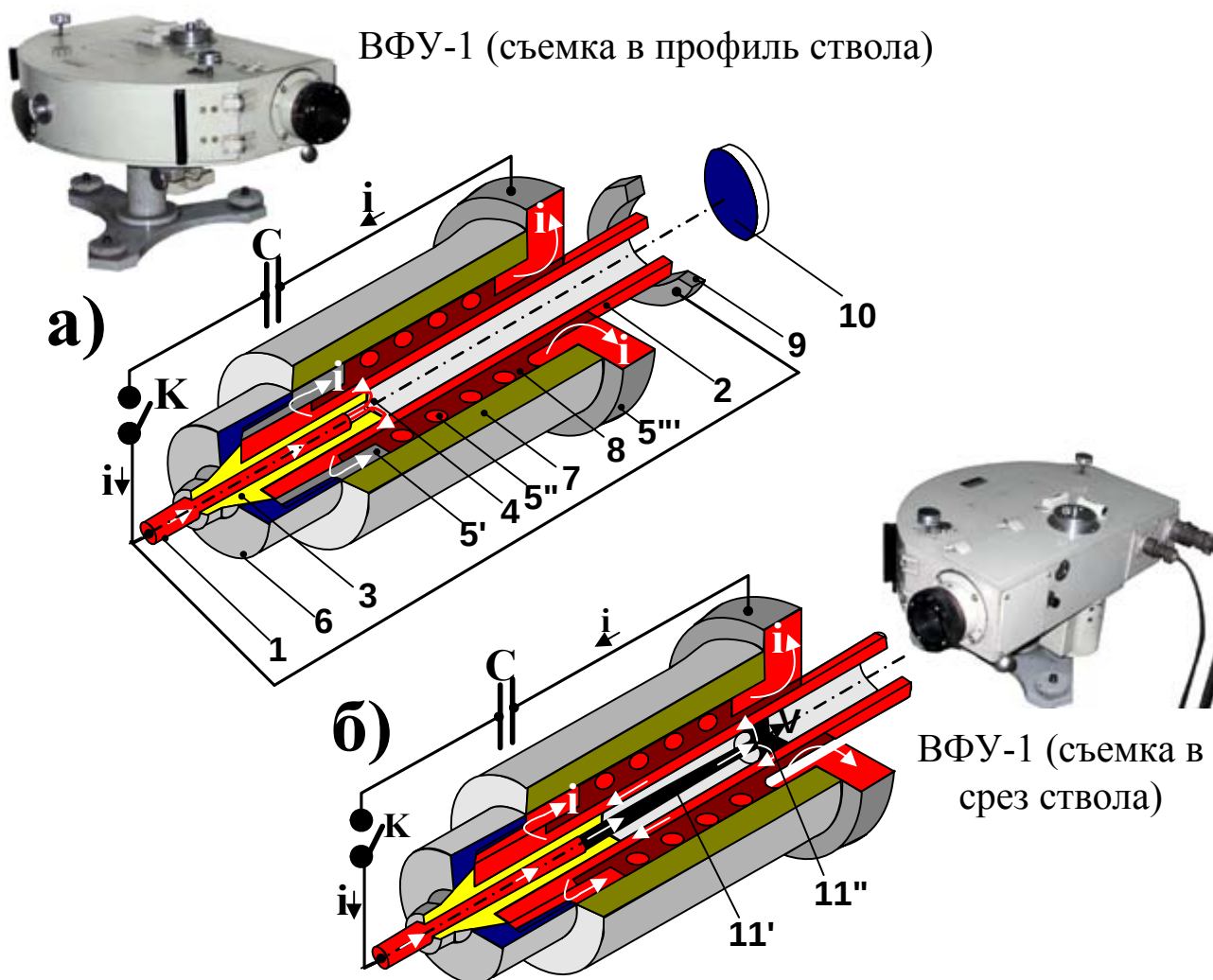


Рис.1. Схема, устройство и принцип действия коаксиального магнитоплазменного ускорителя: а)исходное состояние, б)работа ускорителя. 1.Центральный электрод. 2.Электрод-ствол. 3.Изолятор центрального электрода. 4.Электровзрывающиеся проводники. 5.Индуктор (5'-контактный цилиндр, 5"-соленоид, 5'''-контактный фланец). 6.Заглушка. 7.Корпус. 8.Изоляция (стеклоэпоксидный компаунд). 9.Электрод шунтирующей цепи. 10.Мишень-подложка. 11.Плазменная структура сильноточного разряда (11'-плазменный жгут-Z пинч, 11''-круговая плазменная перемычка). ВФУ-1 - Камера высокоскоростной фотоустановки.

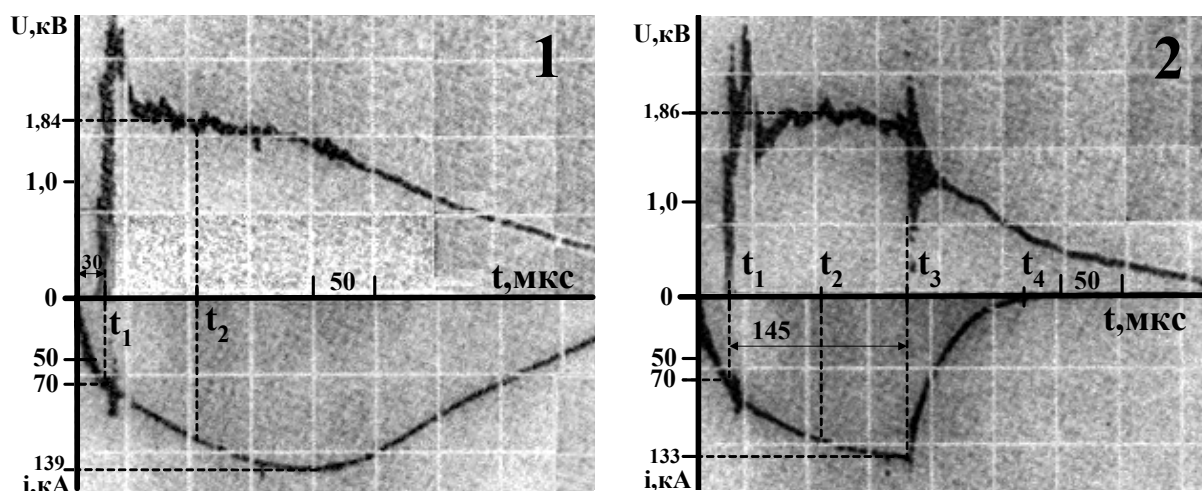


Рис.2. Осциллограммы $U(t)$ и $i(t)$ плазменных выстрелов: 1-при полном импульсе тока; 2-с шунтированием разряда в УК; t_1 -момент электровзрыва проводников; t_2 -момент выхода головной ударной волны из УК; t_3 -момент пробоя шунтирующего промежутка; t_4 -момент прекращения тока разряда в УК.

хвостовой части импульса тока с помощью системы шунтирования разряда 9 (рис.1). В экспериментах регистрировались рабочий ток $i(t)$ и напряжение на электродах $U(t)$. W определялась интегрированием кривой мощности. Динамические параметры ускорения плазменной структуры в УК и гиперзвуковой струи в свободном пространстве определялись с помощью высокоскоростной кадрированной фотосъемки на ВФУ-1 соответственно в срез ствола и в профиль (рис.1).

В исходном состоянии вершина центрального электрода 1 (рис.1а) электрически соединена с поверхностью УК пучком электровзрывающихся проводников (ЭВП) 4. Такая конструкция узла центрального электрода и конфигурация ЭВП обеспечивают формирование плазменной структуры (ПС) высоковольтного сильноточного дугового разряда типа Z-пинч 11 (рис.1б) с круговой плазменной переемычкой 11'. Для усиления стартовой динамики за счет электротермохимического преобразования энергии канал формирования плазменной структуры (КФПС) в изоляторе у вершины центрального электрода заполняется водородонасыщенным газогенерирующим веществом (ГГВ), например, техническим вазелином или трансформаторным маслом. В момент времени $t = 0$ замыкания цепи электропитания (рис.1а) по ускорителю начинает протекать рабочий ток $i(t)$ (рис.2). В момент t_1 , принятый за начало работы ускорителя, происходит электровзрыв проводников 4, сопровождающийся электровзрывным импульсом напряжения. По мере формирования плазменной структуры напряжение снижается до уровня дуговой стадии, и происходит ограничение скорости нарастания тока. Расширение разогретых газообразных продуктов термического разложения ГГВ задает начальную динамику ускорения круговой плазменной переемычки 11'' (рис.1б), за которой вытягивается токоведущий плазменный жгут 11'. Устойчивое компактное состояние ПС обеспечивается суммарным магнитным полем собственного тока и аксиальным внешним магнитным полем (ВМП) соленоида индукционной системы. В такой коаксиальной магнитоплазменной системе на ПС действует ускоряющаяся электродинамическая сила Лоренца. Высокоэффективное ускорение плазмы до гиперзвуковых скоростей обеспечивается в режиме нарастающего тока (рис.2). Головная часть ПС выходит из ствола в момент t_2 . На осциллограммах (рис.2) видно срабатывание системы отсечки хвостовой части импульса тока в момент времени t_3 . Его можно регулировать положением шунтирующего электрода относительно среза ствола.

В процессе работы КМПУ в разряде накапливается и вовлекается в течение масса материала, эродированного с поверхности УК. Этот материал выносится струей из УК и является основой для нанесения покрытия на мишень-подложку 10 (рис.1а).

В третьей главе рассмотрены динамика ускорения и дифференциальный электроэрозионный износ поверхности УК КМПУ. Особенность методики, выбранной для изучения динамики головной части ПС, заключалась в том, что высокоскоростная кадрированная фотосъемка процесса производилась в срез ствола КМПУ. На типичной фотограмме съемки в срез ствола (рис.3) видны основные моменты и этапы ускорения фронта ПС. Условия эксперимента: материал УК – нержавеющая сталь 12Х18Н9Т, калибр УК $d_{ук}=24$ мм, длина УК $l_{ук}=266$ мм, число ЭВП $n = 8$ (медь, $\varnothing 0,5$ мм, длина ЭВП 16 мм), ГГВ – технический

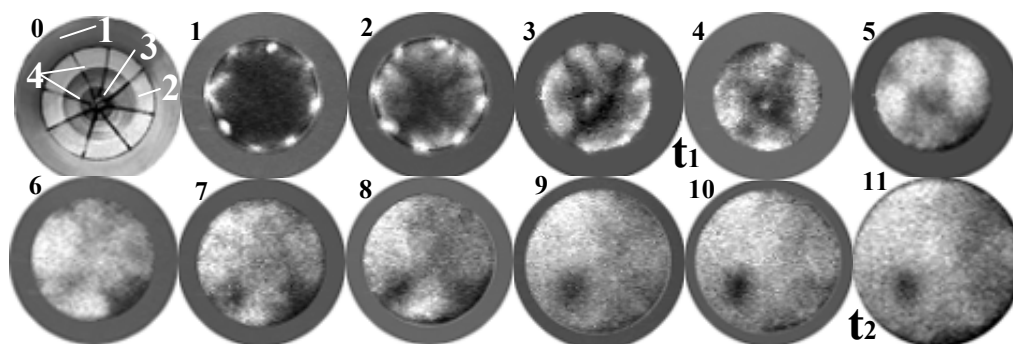


Рис.3. Фотограмма движения фронта ПС по УК. $\Delta t_k=10,7$ мкс.

вазелин, массой 0,33 г, $C = 48$ мФ, $U_{зар} = 3,0$ кВ, внешняя среда - воздух при нормальном давлении. Фотоизображения представляют собой перспективу внутри УК, где: внутренний круг 2 - торец изолятора центрального электрода 3, внешняя окружность - срез ствола ускорителя, кольцо 1 между указанными окружностями - поверхность УК. 4 - ЭВП. Симметрично расположенные по малой окружности светлые пятна - это искрение точек контакта ЭВП с поверхностью УК. В момент t_1 (кадр 4) происходит электровзрыв проводников, образуется неравномерно светящаяся круговая плазменная перемычка и начинается ее ускорение. На последующих кадрах видно увеличение ее диаметра и яркости свечения вследствие увеличения тока и приближения к объективу камеры ВФУ-1. Выход фронта ПС из УК соответствует t_2 . По таким фотограммам определялся закон движения фронта ПС и характер изменения скорости движения по длине УК (рис.4а). Видно, что скорость не возрастает монотонно, а носит явно выраженный колебательный характер. Волновая неустойчивость скорости плазменной перемычки наблюдается в экспериментах с различными энергетическими и конструктивными параметрами ускорителя, в частности, при сплошном и разомкнутом токоподводящем фланце 5''' (рис.1а), в атмосферных условиях и при пониженном давлении $P = 0,1$ атм. (практически двукратное увеличение скорости), при различной степени экранирования УК стенкой ствола. На интервале времени t_1 - t_2 электрическая мощность плавно нарастает и не может быть причиной колебаний скорости. Анализ полученных данных позволил сделать предположение, что в УК КМПУ при первом прохождении ПС сильноточного разряда формируется квазистационарный режим гиперзвукового течения с "бочкообразной" ударно-волновой структурой, с одним или несколькими прямыми скачками уплотнения в соответствии с основными газодинамическими закономерностями сверхзвуковых течений в каналах и соплах. В скачках уплотнения имеет место снижение числа Маха ($M=v/c$) и увеличение давления, плотности и температуры.

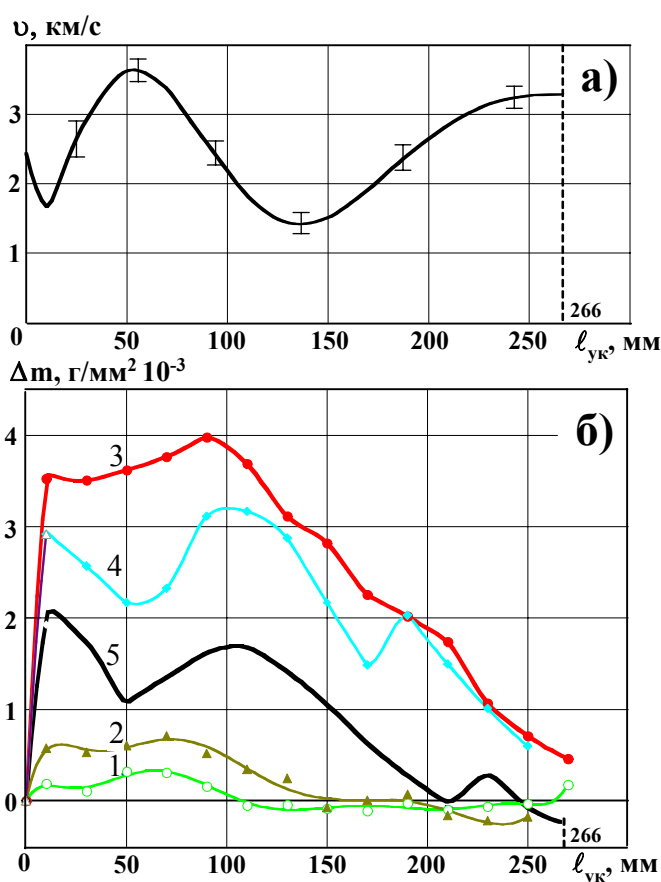


Рис.4. Изменение скорости фронта ПС $v(l_{ук})$ (а) и эпюры дифференциального электроэрозионного износа $\Delta m(l_{ук})$ (б) по длине УК. Номера соответствуют номерам опытов в таблице 1.

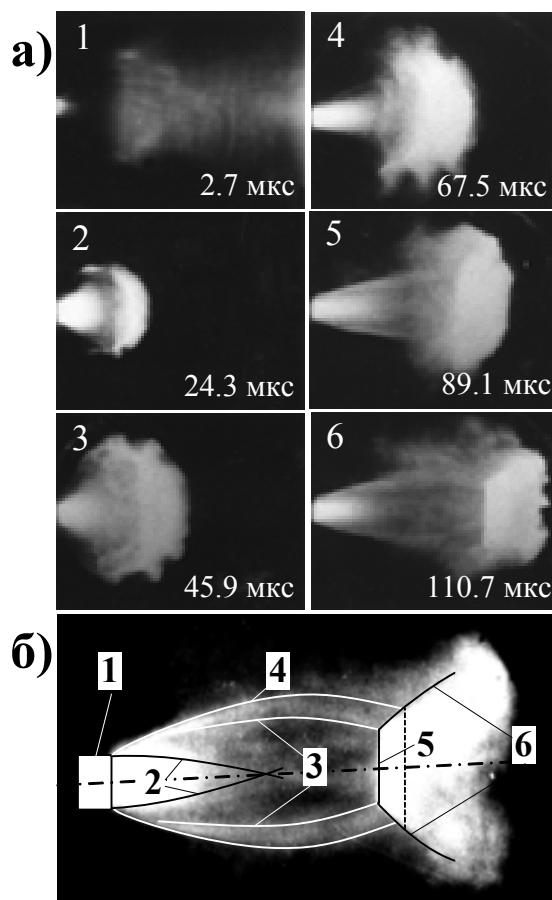


Рис.5. Фотограмма плазменной струи (а) истекающей из УК медного ствола и ее ударно-волновая структура (б).

Установление квазистационарного режима гиперзвукового течения подтверждается результатами съемки в профиль плазменной струи КМПУ в свободном пространстве (рис.5), полученная в плазменном выстреле с медным стволом в следующих условиях: $C=9,0$ мФ, $U_{зар}=3,5$ кВ, $\ell_{ук}=262$ мм, $d_{ук}=12$ мм. На фотограмме виден выход ПС из УК в момент t_2 и постепенное формирование “бочкообразной” ударно-волновой структуры в свободном пространстве. На отдельной фотографии (рис.5б) крупно показан кадр, соответствующий времени ~ 132 мкс с момента выхода. На нем четко видны и условно обозначены линиями: срез УК 1; косой скачок уплотнения 2, ограничивающий зону продолжения ствольного течения; висячий скачок 3; граница струи 4, ограничивающая так называемую первую “бочку”; центральный скачок 5 - “диск Маха”; граница второй “бочки” 6.

Далее рассмотрен дифференциальный электроэрозионный износ поверхности УК. Изменение толщины стенки ствола по его длине указывает на сильную неравномерность электроэрозионного износа поверхности УК. Изучение электроэрозионного износа поверхности УК с использованием лишь данных, полученных путем определения разницы массы ствола до и после выстрела, не дают представления ни о динамике этого процесса, ни о характере износа по длине УК, не о полной интегральной эрозии. Поэтому были проведены исследования дифференциального электроэрозионного износа в связи с динамикой ускорения ПС. Отработанный ствол разрезался на отрезки длиной 10-20 мм. Производилось взвешивание каждого отрезка и измерение его длины. Величина удельного дифференциального электроэрозионного износа, определялась по выражению:

$$\Delta m = \frac{(m_0 \cdot \ell_i - m_i)}{\pi \cdot d_{ук} \cdot \ell_i} \left[\text{г} / \text{мм}^2 \right] \quad (1)$$

где: m_0 - масса кольца (длиной 1 мм) исходной трубы-ствола; ℓ_i - длина i -го отрезка разрезанного ствола; m_i - масса i -го отрезка разрезанного ствола; $d_{ук}$ - внутренний диаметр УК. По полученным данным строились эпюры удельного дифференциального электроэрозионного износа по длине УК $\Delta m(\ell_{ук})$ (рис.4б). Величина интегрального электроэрозионного износа определялась по выражению:

$$m = \left[\int_0^{\ell_{ук}} \Delta m(\ell) d\ell \right] \cdot \pi \cdot d_{ук} \quad (2)$$

Табл.1. Влияние энергетических и конструктивных параметров КМПУ на электроэрозионный износ поверхности УК.

Параметры / № опыта	Ед. изм.	1	2	3	4	5
Емкость накопителя, С	мФ	12	12	48	48	48
Зарядное напряжение, $U_{зар}$	кВ	4,0	4,0	3,0	3,0	3,0
Длина ускорительного канала, $\ell_{ук}$	мм	271	272	272	269	266
Наружный диаметр УК, D	мм	20	20	20	25	32
Внутренний диаметр УК, $d_{ук}$	мм	16	16	16	19	24
Максимальное напряжение, U_{max}	кВ	1,86	1,84	1,78	2,08	2,19
Максимальный ток, I_{max}	кА	133	139	159	140	140
Подведенная энергия, W	кДж	33,1	55,0	117,4	140,2	134,0
Эродированная масса, m	г	0,8	3,3	37,1	34,4	15,3
Удельная эродированная масса, m/W	г/кДж	0,024	0,060	0,316	0,246	0,116
Удельная подведенная энергия, W/V _{ук}	кДж/см ³	0,608	1,010	2,144	1,836	1,114
Время ускорения головной части, Δt_{1-2}	мкс	75	75	61	69	80
Скорость на срезе УК, v_c	км/с	4,3	4,2	5,1	4,5	3,4

Анализ эпюр (рис.4б), соответствующих экспериментам с разными энергетическими и конструктивными параметрами КМПУ (табл.1) показывает, что износ по длине УК сильно

неравномерен и носит явно выраженный колебательный характер. Износ задается при первом прохождении ПС по УК, как это видно из эпюры 1 эксперимента с шунтирование разряда после его выхода из УК. Из сравнения эпюр 1, 2, 3 видно, что Δm увеличивается с увеличением энергии. Увеличение $d_{ук}$ сопровождается уменьшением Δm (эпюры 3, 4, 5). Это свидетельствует о том, что в данной системе некорректно рассматривать зависимость m от какого либо энергетического параметра, а необходимо анализировать данные экспериментов, используя удельные параметры.

Кривая $v(\ell_{ук})$ (рис.4а) и эпюра 5 (рис.4б) получены в одном эксперименте (табл.1, опыт 5). Видно, что колебания $\Delta m(\ell_{ук})$ достаточно точно, но в противофазе соответствуют колебаниям $v(\ell_{ук})$. Начальное относительно высокое значение скорости обусловлено электровзрывом проводников 4 (рис.1) и разлетом электровзрывной плазмы на расстояние до 10 мм. Поэтому, в самом начале УК $\Delta m = 0$. Далее плазма резко тормозится, а Δm быстро увеличивается до первого максимума, примерно соответствующего по координате минимуму скорости движения плазмы. Затем, по мере роста тока в формирующемся дуговом разряде скорость начинает вновь увеличиваться, а Δm соответственно уменьшаться. Координата появления второго максимума скорости так же соответствует положению второго минимума эрозии и так далее. Некоторое несоответствие экстремумов кривых $v(\ell_{ук})$ и $\Delta m(\ell_{ук})$ обусловлено погрешностью обработки данных по v и Δm , а также тем, что $v(\ell_{ук})$ получена для первого прохождения плазмы по УК, в течение интервала времени t_1 - t_2 при постоянном нарастании мощности разряда, а эпюра $\Delta m(\ell_{ук})$ соответствуют полному импульсу мощности. После t_2 мощность увеличивается незначительно, а затем снижается до нуля. Соответственно меняется скорость течения, конфигурация ударно-волновой структуры в УК и положение прямого скачка уплотнения.

Колебания дифференциального электроэрозионного износа по длине УК обусловлены колебаниями скорости фронта ПС, которые вызваны установлением в УК квазистационарного режима сверхзвукового течения, в соответствии с газодинамическими закономерностями, с характерной “бочкообразной” ударно-волновой структурой, с одним или несколькими скачками уплотнения (дисками Маха). В них имеет место уменьшение числа Маха (скорости), увеличение плотности, температуры, теплового потока на стенку УК, и соответственно, увеличение эрозионного износа.

Четвертая глава посвящена анализу результатов экспериментальных исследований влияния энергетических и конструктивных параметров КМПУ на величину интегрального электроэрозионного износа m поверхности УК.

В обычных электроразрядных устройствах и электродинамических РУ электрическая эрозия электродов пропорциональна величине электрического заряда $\int i(t)dt$, перенесенного разрядом, либо интегралу действия $\int i^2(t)dt$. В работе показано, что в КМПУ с высоковольтным сильноточным дуговым разрядом типа Z-пинч, наиболее значимым фактором, определяющим эрозионный износ поверхности УК, является величина подведенной энергии. Обусловлено это тем, что разряд, замыкаясь на центральный электрод, все время горит по всей длине УК, где и выделяется вся W , расходуемая на электроэрозионную работу материала и ускорение. С учетом особенностей рассматриваемой системы и приведенных выше результатов, показывающих влияние геометрии УК на Δm , обобщить полученные данные удастся в виде зависимости удельного интегрального электроэрозионного износа m/W от величины удельной подведенной энергии $W/V_{ук}$ ($V_{ук}$ – объем УК). Зависимость для всех исследуемых материалов носит явно линейный характер (рис.6) и аппроксимируется выражением вида:

$$m/W = A(W/V_{ук} - B) \quad (3)$$

где: A – коэффициент удельного интегрального электроэрозионного износа;

B – величина критической удельной подведенной энергии.

Для нержавеющей стали 12Х18Н9Т: $A=0,171 \text{ г}\cdot\text{см}^3/\text{кДж}^2$; $B=0,368 \text{ кДж}/\text{см}^3$; для меди: $A=0,249 \text{ г}\cdot\text{см}^3/\text{кДж}^2$; $B=0,072 \text{ кДж}/\text{см}^3$; для дюралюминия: $A=0,251 \text{ г}\cdot\text{см}^3/\text{кДж}^2$; $B=0,0052 \text{ кДж}/\text{см}^3$ и для титана: $A=0,170 \text{ г}\cdot\text{см}^3/\text{кДж}^2$; $B=0,447 \text{ кДж}/\text{см}^3$.

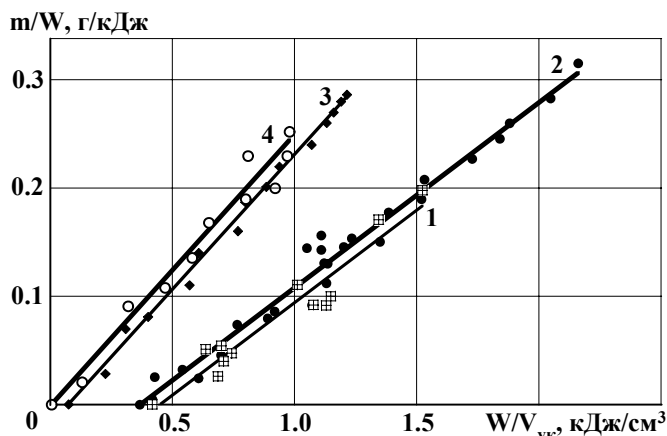


Рис.6. Зависимость m/W от $W/V_{ук}$: 1-титан, 2-нержавеющая сталь 12Х18Н9Т, 3-медь, 4-дюралюминий.

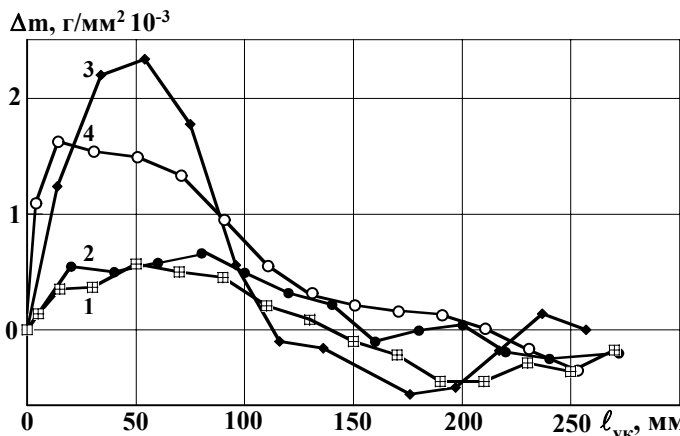


Рис.7. Эпюры дифференциального износа поверхности УК: 1-титан, 2-нержавеющая сталь 12Х18Н9Т, 3-медь, 4-дюралюминий.

Из выражения (3) следует, что эрозия отсутствует, если W меньше критической:

$$W^* = B \cdot V_{ук} \quad (4)$$

Это соотношение не лишено физического смысла. В эксперименте при $W \leq W^*$ на начальном участке поверхности УК остаются лишь следы плавления, а вынос металла отсутствует. То есть B представляет собой критическое значение удельной подведенной энергии еще не вызывающей электроэрозионного износа в силу недостаточного прогрева металлической поверхности, и зависит от физико-химических свойств материала ствола. Коэффициент A определяет наклон зависимости и динамику роста m/W с увеличением $W/V_{ук}$.

Табл.2. Влияние материала ствола на электроэрозионный износ поверхности УК.

Параметры / № опыта	Ед. изм.	1	2	3	4
Материал УК	-	титан	нерж.ст	медь	дюрал
Длина ускорительного канала, $\ell_{ук}$	мм	274	272	267	276
Температура плавления УК, $T_{пл}$	°С	1941	1530	1080	660
Максимальный ток, I_{max}	кА	158	139	153	149
Максимальное напряжение, U_{max}	кВ	1,7	1,8	1,3	1,4
Подведенная энергия, W	кДж	60,4	50,1	43,0	44,8
Эродированная масса, m	г	3,1	3,3	8,1	10,8
Удельная эродированная масса, m/W	г/кДж	0,051	0,066	0,188	0,240
Удельная подведенная энергия, $W/V_{ук}$	кДж/см ³	0,637	0,917	0,801	0,806

Анализ эпюр (рис.7) и данных табл.2 показывает, что колебательный характер $\Delta m(\ell_{ук})$ сохраняются для всех рассматриваемых металлов. Крутизна эпюр на первом участке обратно пропорциональна $T_{пл}$, а эродированная масса прямо пропорциональна. На эпюрах $\Delta m(\ell_{ук})$ имеются участки в конце УК, на которых Δm принимает отрицательные значения. Это свидетельствует о наслоении эродированного материала на поверхность УК неподверженную эрозии. Этот факт показывает некорректность использования данных по эрозии, полученных путем взвешивания ствола до и после выстрела, так как получаемая разница является вынесенной из ствола массой, а не полной интегральной эрозией. Минимальная эродированная длина УК имеет место на медном стволе, вследствие большей теплопроводности и большего экранирующего действия.

С учетом этого в работе определены оптимальные длины УК в рассматриваемом диапазоне $W=50-150$ кДж, при которых наиболее эффективно используется ствол и обрабатывается до 90% материала, выносимого гиперзвуковой струей из УК: для титана, нержавеющей стали и дюралюминия ~ 200 мм; для меди ~ 150 мм.

Из рис.6 видно, что для всех рассматриваемых металлов значения B и взаимное расположение зависимостей прямо соответствует $T_{пл}$ (табл.2), а зависимость B от $T_{пл}$ аппроксимируется выражением: $B = B_1 \cdot e^{B_2 \cdot T_{к}^0}$. С учетом этого и при усреднении коэффициента A получено эмпирическое выражение позволяющее выполнять оценочные расчеты для рассматриваемой группы металлов:

$$\frac{m}{W} = 0.21 \cdot \left(\frac{W}{V_{ук}} - 10^{-4} \cdot e^{4,4 \cdot 10^{-3} T_{к}^0} \right) \quad (5)$$

Скорость плазменного течения за срезом УК во многом определяет плотность энергии в струе и на обрабатываемой поверхности, которая в свою очередь определяет свойства и характеристики получаемых материалов и покрытий. Используемая в работе методика высокоскоростной съемки позволила определять скорость головной ударной волны на срезе ствола. Анализ полученных данных дал возможность установить связь между v_c и подведенной энергией W_1 (на этапе t_1-t_2) и получить эмпирическое выражение:

$$v_c = 70,48 [W_1 / (V_{ук} \cdot M)]^{0,496} \quad (6)$$

Оно соответствует существующим представлением для аналогичных систем электроэрозионных ускорителей, согласно которым, скорость струи плазмы обратно пропорциональна $M^{0,5}$ (M - атомная масса материала струи). Совокупный анализ данных по интегральной эрозии и скорости течения показывает, что в близких условиях проведения экспериментов увеличение $W/V_{ук}$, в диапазоне от 0,4 до 2,2 кДж/см³, сопровождается сильным увеличением m/W (0-0,3 г/кДж) и менее ощутимым ростом скорости (4,2-5,1 км/с). Уменьшение внешнего давления (1,0-0,1 атм), при сохранении $W/V_{ук}$, обеспечивает значительно большее изменение скорости (4,1-7,5 км/с), при сравнимом значении m/W .

Таким образом, изменение скорости на срезе ствола в диапазоне 3-11 км/с не сказывается на общей закономерности, связывающей m и W .

Одной из основных проблем в создании электродинамических ускорителей макротел кондукционного типа с плазменным поршнем является уменьшение или полное исключение электроэрозионного износа различными способами. Решить ее пытаются путем изготовления электродов из тугоплавких материалов, с использованием композиционных материалов с введением в металл добавок в виде частиц с низким потенциалом ионизации. В технологических ускорителях электроэрозионной плазмы, такой способ дает возможность регулировать эрозионный процесс с целью получения более низкой плотности рабочего материала в струе и более высокой скорости струйного течения.

Табл.3. Влияние добавок бора и кремния на электроэрозионный износ поверхности УК.

Параметры / № опыта	Ед. изм.	1	2	3	4
Длина ускорительного канала, $\ell_{ук}$	мм	269,0	271,8	273,0	300,0
Внутренний диаметр УК, $d_{ук}$	мм	19,1	19,1	19,0	19,0
ЭАФ и его масса	г	-	B-0,6	B-0,9	Si-0,6
Подведенная энергия, W	кДж	140,0	127,0	132,6	148,8
Эродированная масса, m	г	34,4	17,5	16,2	7,9
Удельная эродированная масса, m/W	г/кДж	0,246	0,138	0,122	0,053
Удельная подведенная энергия, $W/V_{ук}$	кДж/см ³	1,836	1,632	1,714	1,750

В работе предложен способ снижения электроэрозионного износа поверхности УК, заключающийся во введении в плазму разряда эмиссионно-активной фазы (ЭАФ): углерода, бора, кремния. Эти порошкообразные вещества закладываются в КФПС в смеси с ГВ техническим вазелином, в количестве до 1,0 г. Сравнительные эксперименты проведены на стволах из нержавеющей стали 12X18H9T (табл.3), титана и меди.

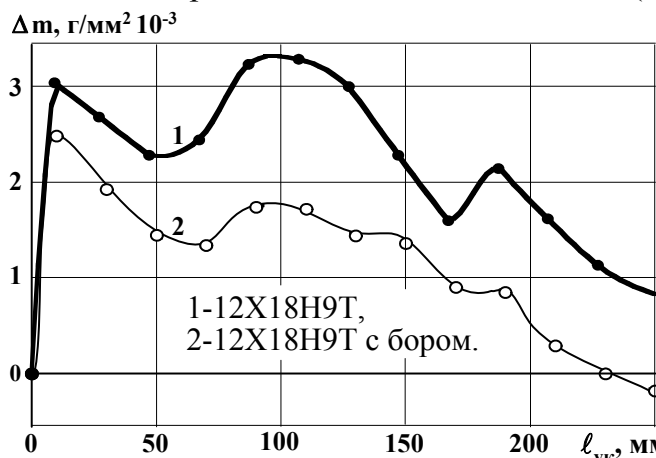


Рис.8. Эпюры $\Delta m(\ell_{ук})$ при введении бора в плазму разряда.

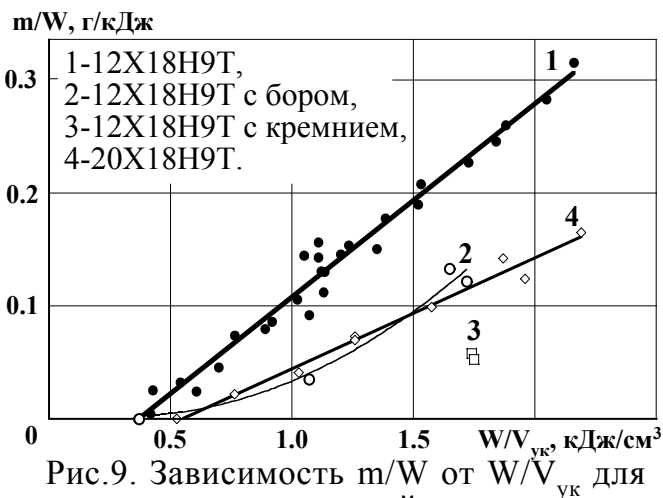


Рис.9. Зависимость m/W от $W/V_{ук}$ для ствол из нержавеющей стали.

Из сравнения эпюр $\Delta m(\ell_{ук})$ (рис.8) и данных табл.3 видно существенное уменьшение Δm и m при введении бора и кремния в плазму разряда, с усилением эффекта при увеличении массы добавки. При этом наблюдается уменьшение коэффициента A и увеличение B , как это видно по взаимному расположению зависимостей 1 (без добавок), 2 (с добавкой бора) и 3 (с добавкой кремния) (рис.9). Аналогичный эффект достигается при введении углерода в плазму разряда и использовании высокоуглеродистой нержавеющей стали 20X18H9T в качестве материала ствола. Такое же действие оказывают добавки C , B , Si при использовании ствол из титана и меди. Последовательное усиление эффекта снижения эрозии с применением C , B , Si , как показал Меккер, обусловлено снижением потенциала ионизации вещества добавки, и соответственно, температуры дуги. Новизна этого технического решения подтверждена патентом РФ.

В пятой главе показаны возможности повышения эффективности электроэрозионной наработки материала за счет оптимизации электромагнитной системы КМПУ. Для исследования влияния направления аксиального ВМП соленоида и полярности электродов на электроэрозионный износ были изготовлены два одинаковых индуктора с противоположным направлением намотки витков соленоида. Это дало возможность изменять направление аксиального поля с сохранением полярности электродов, и менять полярность с сохранением поля. В экспериментах при $C=24$ мФ и $U_{зар}=3,0$ кВ использовались стволы из нержавеющей стали 12X18H9T с $D \times d_{ук} = 25 \times 19,7$ мм, $\ell_{ук} = 250$ мм.

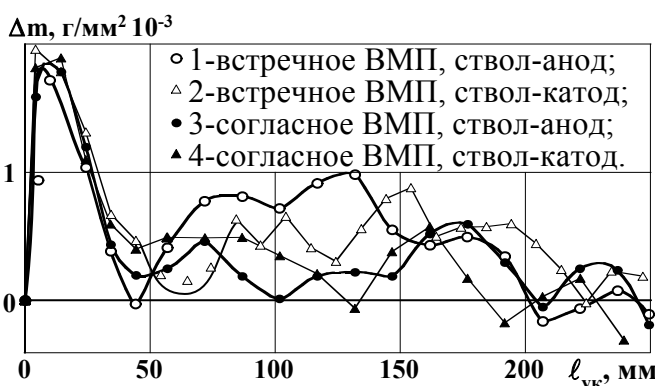


Рис.10. Эпюры $\Delta m(\ell_{ук})$ при разном направлении ВМП и полярностях электрода-ствола.

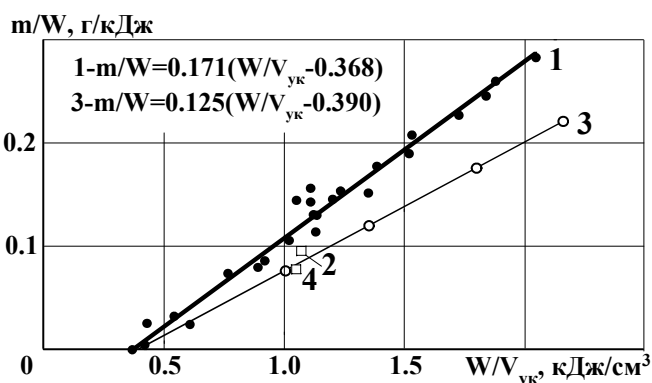


Рис.11. Зависимость $m/W(W/V_{ук})$. Номера соответствуют номерам эпюр на рис.10.

Из приведенных эпюр $\Delta m(\ell_{\text{ук}})$ (рис.10) и зависимости $m/W(W/V_{\text{ук}})$ (рис.11) видно, что m увеличивается при положительной полярности электрода-ствола (что согласуется с известными данными) и при встречном направлении аксиального ВМП. По-видимому, встречное аксиальное поле оказывает тормозящее действие в центральной области УК (рис.10), способствует сжатию дискретных радиальных каналов проводимости и повышению в них плотности тока. Это может сопровождаться повышением температуры в опорных пятнах и усилением эрозии. Однако исследования динамики плазменной струи в свободном пространстве показали, что во всех рассматриваемых вариантах скорость струи на срезе ствола практически одинакова.

Величина аксиального ВМП проникающего в УК в зависимости от степени его экранирования цилиндрической стенкой ствола должна так же оказывать влияние на электроэрозионный износ, в силу изменяющейся плотности тока в плазме и особенностей динамики ПС.

Степень экранирования менялась за счет изменения D и $d_{\text{ук}}$, и использования дополнительных трубчатых экранов из меди и дюралюминия. Абсолютное экранирование имитировалось в экспериментах на классическом пинч-ускорителе (без соленоида) с сохранением параметров контура электропитания.

В качестве критерия, характеризующего степень проникания ВМП соленоида в УК, принят коэффициент поля $K_{\text{п}}$, равный:

$$K_{\text{п}} = \int_0^t H_i(t) dt / \int_0^t H_0(t) dt \quad (7)$$

где: t - длительность импульса тока протекающего по соленоиду, $H_i(t)$, $H_0(t)$ - соответственно функции изменения во времени напряженности аксиального поля в центре участка УК, охваченного соленоидом, при наличии экрана и без него.

Экспериментальные данные, полученные в сильно отличающихся условиях по экранированию УК на стволах из нержавеющей стали 12X18H9T с $D \times d_{\text{ук}} = 25 \times 19$ мм, $\ell_{\text{ук}} \approx 270$ мм, при $C = 48$ мФ, $U_{\text{зар}} = 3,0$ кВ. Направление $\vec{H}_z$ в опыте 1 совпадало с направлением плазменного течения. Сравнение эпюр $\Delta m(\ell_{\text{ук}})$ (рис.12а) и зависимостей $m/W(W/V_{\text{ук}})$ (рис.13) показывает значительное увеличение как уровня Δm , так и m при наличии ВМП. Следует выделить два основных фактора,

усиливающих электроэрозионный износ: вращение плазмы в УК, охваченном соленоидом, и повышение плотности тока в дискретных каналах проводимости ПС. Вращение ПС в направлении намотки витков соленоида при взаимодействии аксиального ВМП и азимутальных полей токов, протекающих по радиальным каналам проводимости, видно по структуре плазменно-эрозионного следа (ПЭС) на развернутой поверхности УК (рис.12б). Треки ПЭС имеют явный наклон, уменьшающийся по длине УК вследствие увеличения скорости плазменного течения. При отсутствии ВМП эти треки параллельны продольной оси УК.

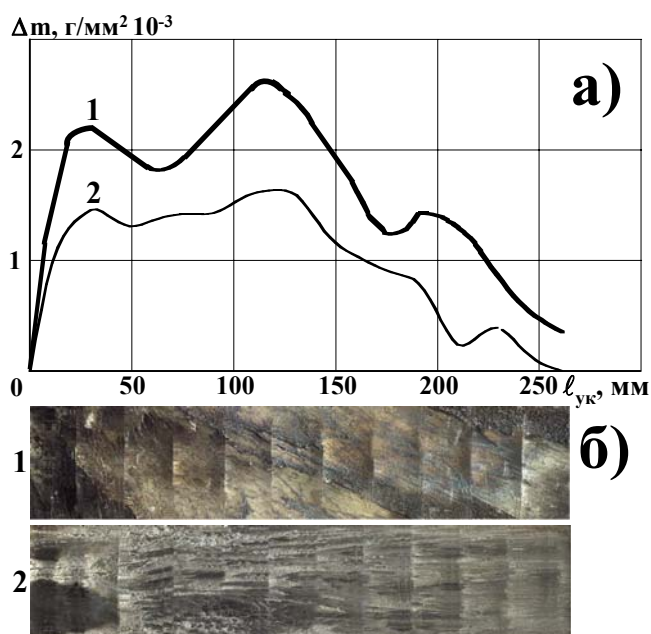


Рис.12. Эпюры $\Delta m(\ell_{\text{ук}})$ (а) и фотографии ПЭС (б): 1- $K_{\text{п}} = 0,954$; 2- $K_{\text{п}} = 0$.

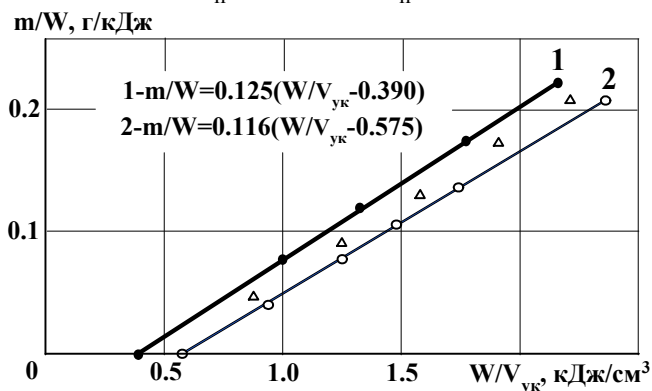


Рис.13. Зависимость $m/W(W/V_{\text{ук}})$: 1-при наличии ВМП, 2-без ВМП.

Конструктивной особенностью индуктора КМПУ является наличие контактного фланца 6^{'''} на выходном конце соленоида 6^{''} (рис.1). Вместе с токоподводящими шпильками он обеспечивает токоподвод к соленоиду и механическую прочность конструкции. С другой стороны он представляет собой короткозамкнутый виток большого сечения. Магнитное поле, наведенного в нем тока в суперпозиции с торцевым полем соленоида и полем наведенным в стенке ствола может оказывать тормозящее действие при прохождении плазменной структуры и привести к увеличению эрозии. Экспериментальные исследования показали, что радиальная составляющая ВМП при наличии короткозамкнутого фланца на порядок выше, чем в условиях, когда фланец имеет радиальный разрез.

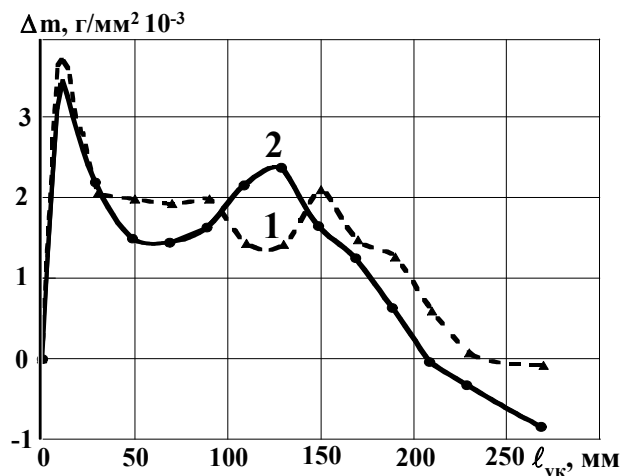


Рис.14. Эпюры $\Delta m(\ell_{ук})$: 1-с короткозамкнутым витком, 2-с распиленным.

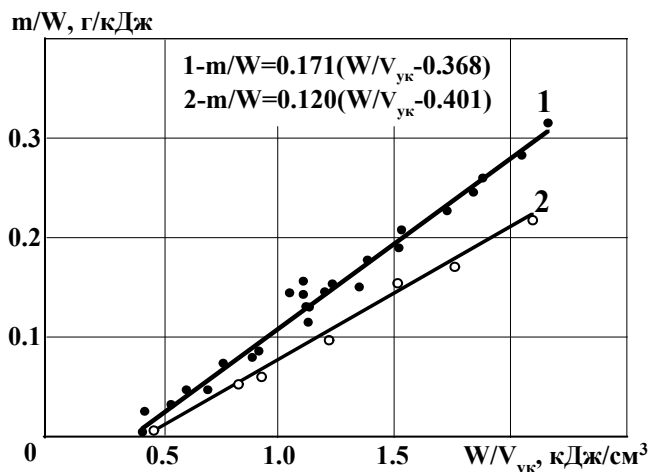


Рис.15. Зависимость $m/W(W/V_{ук})$: 1-с короткозамкнутым витком, 2-с распиленным.

Подтверждение высказанного предположения следует из сравнения эпюр $\Delta m(\ell_{ук})$ (рис.14). Анализ данных по интегральному износу (рис.15) показывает существенное увеличение коэффициента A при наличии короткозамкнутого фланца. При этом скорость плазмы на срезе ствола снижается незначительно (1-4,83 км/с, 2-4,51 км/с).

Таким образом, максимальная эффективность использования энергии на электроэрозионную наработку рабочего материала для нанесения покрытий и получения порошкообразных материалов, достигается при встречном направлении ВМП, положительной полярности электрода-ствола, минимальном экранировании УК и наличии короткозамкнутого фланца на выходном конце соленоида.

В шестой главе показаны некоторые возможности технологического использования КМПУ для нанесения покрытий. Одним из перспективных способов решения ряда практических задач, улучшения свойств металлических поверхностей, подвергающихся механическим, термическим, электрическим, химическим и др. воздействиям является их специальная обработка с модификацией приповерхностных слоев и нанесением соответствующих функциональных покрытий.

Проблема уменьшения переходного сопротивления и совмещения электрического контакта медь-алюминий, повсеместно встречающегося в промышленной электротехнике, общеизвестна. В работе предпринята попытка решения этой проблемы путем нанесения медного покрытия на алюминиевую поверхность с помощью КМПУ с медными электродами.



Рис.16. Микрофотография шлифа вертикального среза алюминиевого образца с медным покрытием.

Исследования полученных образцов из алюминиевого сплава АД-31 с медным покрытием проведены на растровом электронном микроскопе Jeol-840 с приставкой Link для рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Они показали, что медное покрытие толщиной не менее 100 мкм не имеет пор, однородно по структуре и абсолютно плотно прилегает к поверхности подложки (рис.16). Частицы меди размером ~10 мкм обнаруживаются в подложке на глубине до ~50 мкм. Согласно данным РФЭС на такой глубине в алюминии присутствует до 1,0 % меди. Исследования сопротивления контактных переходов, проведенные вольтамперным способом при длительном и циклическом пропускании тока промышленной частоты при различных плотностях (до 0,8 А/мм²) и усилии сжатия 230 Н показали, что сопротивление перехода Cu-Al с медным покрытием в 1,73 раза меньше сопротивления обычного перехода Cu-Al.

При использовании электродов КМПУ из нержавеющей стали, показана возможность нанесения покрытий состава нержавеющей стали. Микроэлектронная фотография шлифа вертикального среза дюралюминиевой подложки с покрытием состава нержавеющей стали, приведена на рис.17.

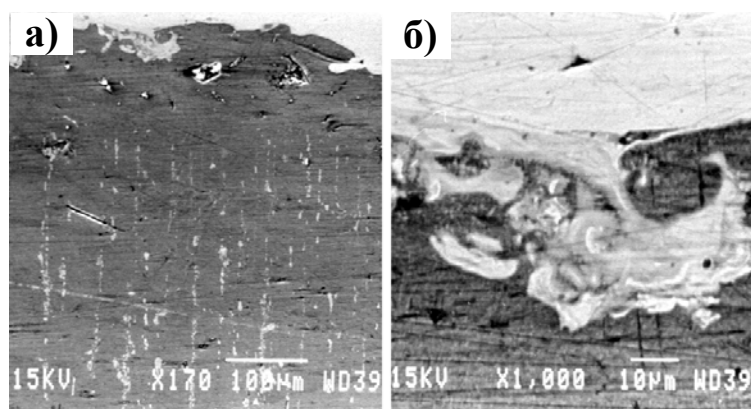


Рис.17. Микрофотографии шлифа вертикального среза дюралюминиевого образца с покрытием состава нержавеющей стали: а) обзорный снимок; б) фрагмент слоя взаимного перемешивания материалов.

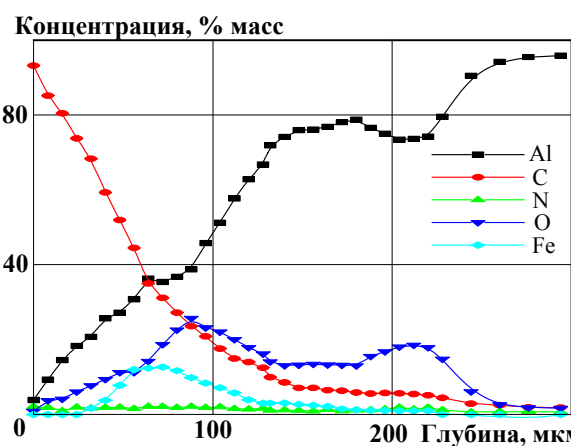


Рис.18. Кривые массовой концентрации элементов в граничном слое поверхности подложки.

Из микрофотографии видно, что покрытие абсолютно плотно прилегает к поверхности подложки и не имеет пор. На границе раздела образуется слой взаимного перемешивания материалов толщиной ~100 мкм, что подтверждается данными РФЭС. На микрофотографии (рис.17б) видно, что слой подложки толщиной порядка 100 мкм насыщен точечными и струйными включениями более плотного вещества потока. ОЖЕ – электронная спектроскопия, показывает насыщение поверхностного слоя толщиной более 300 мкм углеродом, кислородом и железом (рис.18). Железо является основной составляющей высокоскоростного потока, кислород и азот захватываются из воздуха. Углерод в большом количестве присутствует в потоке как основной продукт электротермохимического разложения технического вазелина, закладываемого в КФПС. При необходимости его содержание может быть полностью исключено. Результаты высокотемпературных трибологических испытаний обработанного и исходного образцов, проведенные на High temperature tribometr, показали, что износостойкость обработанного образца увеличилась на 1÷2 порядка. Покрытия состава нержавеющей стали могут выполнять антикоррозионные, антиэрозионные и термобарьерные функции. Совокупность приобретенных свойств позволяет значительно повысить рабочие параметры деталей и конструктивных элементов из алюминиевых сплавов, в частности, рабочей поверхности поршней двигателей внутреннего сгорания, а так же лопаток газовых турбин.

В работе показана возможность динамического синтеза сверхтвердых материалов на основе титана (TiC, TiN, TiB₂, TiCN и др.) в гиперзвуковой струе электроэрозионной плаз-

мы при использовании в КМПУ титановых электродов, и нанесения покрытий на их основе. Эксперименты проводились в атмосферных условиях при: $C=48$ мФ, $U_{\text{зар}}=2,5$ кВ, $\ell_{\text{ук}}=280$ мм, $d_{\text{ук}}=14$ мм, масса закладываемого порошка графита 0,4 г, расстояние от среза ствола до мишени $\ell_{\text{см}}=420$ мм. Скорость плазменной струи на срезе ствола составляла $\sim 4,0$ км/с. Получено твердое покрытие площадью ~ 100 см². Следует отметить большую толщину покрытия (до 1 мм), его однородность, высокую плотность и отсутствие пор. В теле

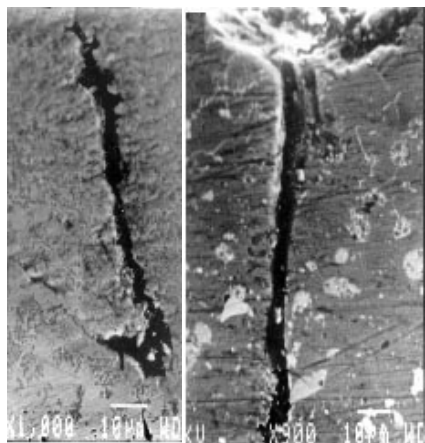


Рис.19. Микроэлектронные фотографии каналов СПП.

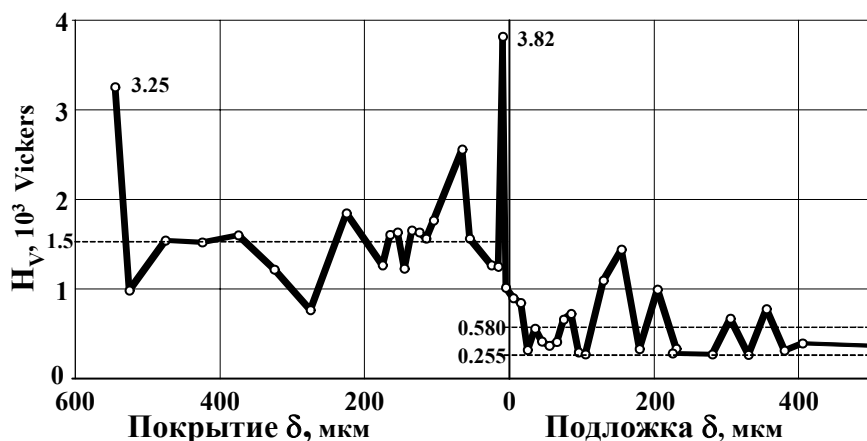


Рис.20. Кривая изменения нанотвердости по толщине стального образца с покрытием на основе титана.

подложки обнаруживаются многочисленные треки с поперечным размером менее 5 мкм, нормальные к поверхности стального образца, заканчивающиеся на глубине подложки 350-400 мкм. Анализ этих данных позволяет идентифицировать обнаруженные треки как каналы сверхглубокого проникания (СПП) твердых микрочастиц в металлическую преграду (рис.19). За СПП принято внедрение частиц на глубину на 2-3 порядка превышающую размер частиц. Исследования нанотвердости (рис.20) этого образца показали, что на поверхности она имеет очень высокий уровень. Рентгеноструктурный анализ показал, что материал покрытия состоит из $C_{0,3}N_{0,7}Ti$ и $TiN_{0,3}$. Среднее значение H_v покрытия составляет 1500. H_v подложки значительно меньше, однако, более чем в два раза превышающий твердость исходного материала. С углублением в подложку наблюдаются колебания H_v с экспоненциально затухающими максимальными значениями. Толщина поверхностного слоя подложки с повышенной H_v соответствует глубине СПП материала покрытия.

Актуальность задачи повышения поверхностной прочности и устойчивости к мощным динамическим воздействиям пластин из алюминиевых сплавов обусловлена их широким использованием в качестве облицовки аппаратов космической и авиационной техники,

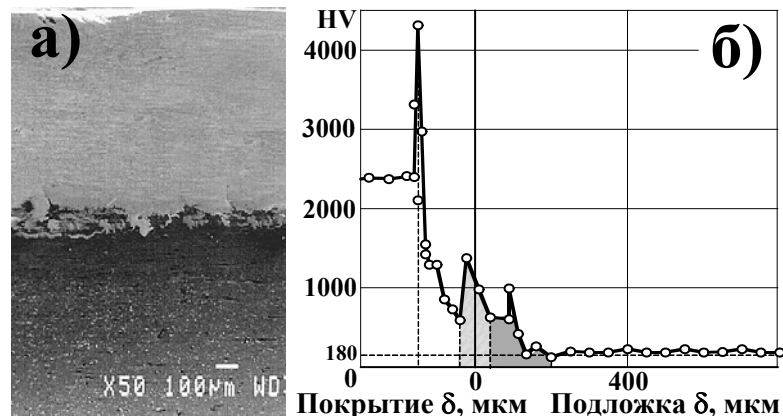


Рис.21. Микроэлектронная фотография шлифа вертикального среза образца из алюминиевого сплава 1903М с покрытием на основе титана (а), и кривая изменения H_v по его толщине (б).

легкой бронетехники и основы бронеструктур легких бронежилетов. На дюралюминий удается нанести твердое покрытие площадью ~ 100 см² в атмосферных условиях при: $C=48$ мФ, $U_{\text{зар}}=2,0$ кВ, $\ell_{\text{ук}}=275$ мм, $d_{\text{ук}}=14$ мм, $\ell_{\text{см}}=170$ мм. На рис.21а приведена микроэлектронная фотография шлифа вертикального среза образца из алюминиевого сплава 1903М с покрытием на основе титана. Видно, что покрытие по всей толщине однородно, не имеет пор и абсолютно плотно прилегает к подложке. Граница раздела представляет собой

слой взаимного перемешивания и сцепления материалов покрытия и подложки толщиной около 100 мкм. Дифрактометрические исследования порошкообразного материала, собранного в рабочей технологической камере, показали образование TiO_2 и TiN , однако доминирующей фазой материала покрытия оказывается $\text{Al}_{11}\text{Ti}_5$. Слой покрытия (рис.21б) толщиной ~150 мкм имеет $\text{Hv} \sim 2400$, далее уменьшается до среднего уровня ~1000. Поверхностный слой подложки имеет повышенное значение Hv и на глубине ~200 мкм приближается к Hv исходного образца. Испытания на противоположную стойкость пластин из алюминиевого сплава 1903М с нанесенным покрытием проведены в ОАО "НИИ Стали", путем обстрела из пистолета ТТ калибра 7,62 мм. Они показали, что рассматриваемая технология обеспечивает сохранение микроструктуры подложки и не приводит к ее охрупчиванию. Покрытие не отслаивается от подложки при динамическом воздействии и обеспечивает существенное повышение противоположной стойкости. Эти свойства оказываются уникальными, так как ими не обладают покрытия нанесенные другими известными способами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленной целью выполнен комплекс исследований электроэрозионного износа поверхности УК и динамики ускорения электроэрозионной плазмы в КМПУ и получены следующие результаты:

1. Показана волновая неустойчивость скорости плазменного течения в УК КМПУ, обусловленная установлением квазистационарного гиперзвукового течения с характерной "бочкообразной" ударно-волновой структурой в соответствии с основными газодинамическими закономерностями гиперзвуковых струй.
2. Колебательный характер дифференциального электроэрозионного износа поверхности УК КМПУ обусловлен и в противофазе соответствует колебаниям скорости плазменного течения.
3. Определены оптимальные длины УК для диапазона $W=50-150$ кДж и калибров УК 12-25 мм, при которых наиболее эффективно используется ствол и нарабатывается до 90% материала, выносимого гиперзвуковой струей из УК: для титана, нержавеющей стали и дюралюминия ~200 мм; для меди ~150 мм.
4. Экспериментально показано, что увеличение эффективности использования энергии на электроэрозионную наработку материала достигается при: уменьшении калибра УК, положительной полярности электрода-ствола, встречном направлении ВМП, наличии короткозамкнутого фланца на выходе соленоиды, минимальном экранировании УК стенкой ствола, оптимальной геометрии КФПС и условиях его снаряжения.
5. Интегральный электроэрозионный износ поверхности УК КМПУ определяется величиной подведенной к ускорителю энергии.
6. Экспериментальные данные в указанных диапазонах изменения подведенной энергии обобщены в виде линейной функции: $m/W = A(W/V_{\text{ук}} - B)$. В рассматриваемых условиях эта закономерность выполняется для всех рассматриваемых материалов ствола в диапазоне изменения скорости плазменного течения от 3 до 11 км/с.
7. Показана возможность существенного снижения эрозионного износа поверхности УК КМПУ с повышением динамических параметров струйного течения при введении в плазму разряда небольших добавок эмиссионно-активных веществ в виде углерода, бора, кремния.
8. Показаны возможности технологии нанесения различных функциональных металлических и композиционных покрытий на твердые поверхности и получения сверхтвердых материалов с помощью КМПУ. Наиболее перспективными направлениями являются:

- Нанесение медного покрытия на металлические контактные поверхности с целью снижения переходного контактного сопротивления;
- Нанесение покрытий состава нержавеющей стали на рабочие поверхности электродов электроразрядных устройств с целью повышения стойкости к внешним воздействиям и электроэрозионной стойкости;
- Получение сверхтвердых материалов на основе: W, Ti, Al, Si, B, и нанесение покрытий на их основе на металлические поверхности с целью: получения ультрадисперсного абразивного материала; нанесение твердосплавного слоя (в виде покрытия) на режущие поверхности металлообрабатывающего лезвийного инструмента;
- Поверхностного упрочнения бронепластин средств индивидуальной броневой защиты.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Sivkov A.A., Ilyin A.P., Gerasimov D.U., Saigash A.S., Kwon Y.S. Hybrid magneto-plasma accelerator use for the deposition of coatings // "KORUS-2003": Proceedings the 7th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. Korea, Ulsan. The IEEE. 28June – 6July 2003. - Vol. I. – p.91-96.
2. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Saigash A.S. Hybrid Magneto-plasma Acceleration use for the Deposition of coatings // IV International Conference Plasma Physics and Plasma Technology Contributed Papers. Minsk, Belarus. 15-19 September 2003. Vol. II. – p.526-529.
3. Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Обработка поверхности из алюминиевого сплава высокоскоростной струей электроразрядной плазмы // Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии. Материалы II Всероссийской конференции молодых ученых. - Томск: ИФПМ СО РАН, 2003. - с.292-295.
4. Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Динамика электроэрозионного процесса в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе // Там же с.295-298.
5. Цыбина А.С., Герасимов Д.Ю. Сверхглубокое проникание микрочастиц в твердые материалы при обработке поверхности высокоскоростной струей электроразрядной плазмы // Там же с.344-347.
6. Цыбина А.С., Герасимов Д.Ю. Нанесение медного покрытия на алюминиевые контактные поверхности с помощью магнитоплазменного ускорителя // Там же с.347-350.
7. Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Эрозия ускорительного канала магнитоплазменного ускорителя // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Материалы докладов 9-ой Всероссийской научно-технической конференции. Томск: Изд-во ТПУ, 2003. Т.1. - с.143-146.
8. Герасимов Д.Ю. Импульсный электромагнитный ускоритель электроразрядной плазмы // Современные техника и технологии. X-Юбилейная международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. 29 марта – 2 апреля 2004. Томск: Изд-во ТПУ. Том II. – с.254-256.
9. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Tsibina A.S. Copper coating of aluminium contact surfaces using magneto-plasma accelerator // "KORUS-2004": Proceedings the 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology. Russia, Tomsk, 26June - 3July 2004. - p.295-298.
10. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Tsibina A.S. Obtaining of the aluminium alloy surface by high velocity flux of electro discharge plasma // Там же p.298-300.
11. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Tsibina A.S. Electrical Erosion of the Magnetoplasma Accelerator Channel // 13th International Symposium on High Current Electronics. Proceedings Ed-

- ited by B. Kovalchuk and G. Remnev. Institute of HCE Tomsk, Russia, 25–29 July 2004. - p.417-420.
12. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Tsibina A.S. Processing of Duralumin Surface by a High-Speed jet of Electric-Discharge Plasma // Там же p.460-461.
 13. Sivkov A.A., Gerasimov D.U., Tsibina A.S., Lopatin V.V. Processing of a surface from an aluminium alloy a high-velocity stream of electrodigit plasma // European Pulsed Power Symposium. Hamburg-Germany DESY 20-23 September 2004. – p.80-81.
 14. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозионный износ ствола магнито-плазменного ускорителя // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Материалы докладов 10-ой Всероссийской научно-технической конференции. Томск: Изд-во ТПУ, - 2004. - с.88-91.
 15. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Повышение динамической стойкости пластин из алюминиевого сплава за счет композиционного покрытия $TiC+Ti$, нанесенного с помощью магнитоплазменного ускорителя // Там же с.134-137.
 16. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Нанесение покрытий состава нержавеющей стали на поверхность изделий из алюминиевого сплава с помощью магнитоплазменного ускорителя // Там же с.161-164.
 17. Sivkov A.A., Gerasimov D.Y., Tsibina A.S. Electroerosive production of coating material in a coaxial magnetoplasma accelerator. "KORUS-2005": Proceedings the 9th Russian-Korean International Symposium on Science and Technology. Russia, Novosibirsk, 26June – 2July 2005. - p.389-392.
 18. Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С., Сивков А.А. Использование коаксиального магнито-плазменного ускорителя для нанесения медного покрытия на алюминиевую поверхность // Приборы. 2005 г., № 6, с.33-40.
 19. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Цыбина А.С. Электроэрозионная наработка материала в коаксиальном магнитоплазменном ускорителе для нанесения покрытий // «Электротехника», № 6, 2005 г., с.25-33.
 20. Герасимов Д.Ю., Сивков А.А. Коаксиальный ускоритель. Патент № 2243474 РФ, 7F41B 6/00, Зарегистр. 27.12.2004, Бюл. №36, Приор. 31.07.2003.