

На правах рукописи

НАЗАРЕНКО Ольга Брониславовна

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДУКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО
ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

05.14.12 – Техника высоких напряжений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 1996

Работа выполнена в НИИ высоких напряжений при Томском политехническом университете

Научные руководители: доктор технических наук,
профессор Ушаков В.Я.;
кандидат химических наук,
ст.науч.сотр. Ильин А.П.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Чепиков А.Т.;
кандидат технических наук,
ст.науч.сотр. Седой В.С.

Ведущая организация: Институт химии нефти СО РАН

Защита диссертации состоится 25 декабря 1996 года на заседании диссертационного Совета К 063. 80. 05 при Томском политехническом университете по адресу: 634004, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Автореферат разослан 23 ноября 1996 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.А.Дульзон

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электрический взрыв проводников (ЭВП) представляет интерес как инструмент мощного энергетического воздействия на металлы и как метод получения ультрадисперсных (УДП) и кластерных порошков. Порошки, образующиеся в результате ЭВП, обладают рядом уникальных свойств, совокупность которых определяет области применения УДП в современной технике и технологиях – использование УДП в качестве катализаторов, сорбентов, компонентов керамик, присадок к смазочным маслам и пр.

По предложенному в начале 70-ых годов Котовым Ю.А., Ивановым Г.В., Мельниковым М.А., Яворовским Н.А. способу получения УДП металлов и сплавов электрическим взрывом проводников в НИИ высоких напряжений создана технология получения электровзрывных УДП, проведены исследования свойств порошков и разработано необходимое оборудование. Развитие работ с целью получения УДП было направлено на исследование ЭВП в газах и производство в основном металлических порошков. В большинстве работ по ЭВП в жидких и твердых средах, который можно использовать в качестве импульсного воздействия на материалы, он рассматривается как преобразователь электрической энергии в механическую. В некоторых работах указывается лишь принципиальная возможность синтеза тех или иных химических соединений. Вопросы механизма образования продуктов взрыва и влияния энергетических характеристик ЭВП на состав продуктов взрыва в них практически не затронуты. В данной работе показано, что с помощью ЭВП в конденсированных средах можно получать новые виды УДП различных химических соединений.

Работа выполнялась в рамках научного направления ТПУ "Разработка научных и инженерных основ и создание высоковольтной импульсной техники и технологии", код темы по ГАСНТИ 45.53.35; 29.19.04; 29.19.27, госбюджетной темы "Кинетические и термодинамические особенности взаимодействия электровзрывных ультрадисперсных порошков с реагентами", межвузовской подпрограммы "Исследование, производство и применение ультрадисперсных сред" в программе ГКВШ РФ "Перспектива",

Томской региональной программы по проекту "Разработка научно-технических основ получения и производства ультрадисперсных порошков и материалов на их основе".

Целью работы является установление закономерностей образования продуктов взрыва в конденсированных средах, изучение влияния режимов электровзрыва и свойств среды на фазовый состав и свойства получаемых порошков, определение областей практического применения полученных результатов.

Методика исследований. Для измерения энергетических характеристик ЭВП использовался осциллографический метод. Состав и свойства продуктов ЭВП определялись с помощью рентгенофазового анализа, дериватографических исследований, метода радиационного зондирования. Форма и размеры частиц исследовались с помощью электронной микроскопии. Площадь удельной поверхности частиц определялась методом низкотемпературной адсорбции аргона. Сорбционные свойства продуктов ЭВП определялись методом фотоколориметрии по изменению оптической плотности модельных растворов.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- получены корреляционные зависимости фазового состава, формы частиц, дисперсности, термостабильности продуктов электрического взрыва (ЭВ) алюминиевых проводников в воде от величины введенной энергии, а также экспериментальные результаты исследования фазового состава продуктов ЭВ титановых и железных проводников;
- установлено, что, наряду с величиной вводимой в проводник энергии, фазовый и химический состав продуктов ЭВП определяется плотностью (вязкостью) окружающей среды;
- исследовано влияние величины введенной энергии на фазовый состав, форму частиц, дисперсность, термостабильность продуктов ЭВ алюминиевых, вольфрамовых, титановых проводников в декане. Показано, что в отличие от ЭВП в газообразных углеводородах, процессы карбидообразования в конденсированных углеводородных средах протекают до более насыщенных углеродом фаз.

Положения, выносимые на защиту.

1. Повышение плотности (вязкости) среды, в которой взрывается проводник, способствует увеличению выхода форм продуктов, более насыщенных компонентами среды, и образованию более высокотемпературных кристаллических модификаций.
2. При ЭВП в конденсированных средах продукты диспергирования проводников химически взаимодействуют с окружающей средой, находящейся в газоподобном состоянии. При ЭВ алюминиевых и железных проводников в воде, содержащей растворимые добавки, продукты диспергирования не дают соединений с примесями, которые остаются в жидкой фазе среды.
3. Окислительно-восстановительные свойства системы металл-вода проявляют ряд особенностей. Присутствие водорода как продукта окисления способствует образованию и стабилизации низших оксидов металлов.

Практическая ценность работы заключается в установлении закономерностей процессов диспергирования проводников в конденсированных средах, их взаимодействия с окружающей средой, в установлении влияния величины вводимой в проводник энергии и агрегатного состояния окружающей среды на фазовый и химический состав УДП. Результаты выполненных исследований позволяют расширить возможности электровзрывной технологии.

Исследования, представленные в диссертации, нашли практическое применение в опытном производстве НИИ ВН при наработке опытных образцов УДП оксидов и карбидов, при выполнении контракта с Центром ядерных исследований (Германия), при оценке технологических возможностей электрического взрыва проводников в водных растворах с целью очистки воды от примесей.

Апробация работы. Основные результаты исследований обсуждались на областной научно-практической конференции молодежи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям (г.Томск, 1995 г.), на международной научно-технической конференции "Вода, которую мы пьем" (г.Москва, 1995 г.), на 9-ом отраслевом совещании "Проблемы и перспективы развития Томского нефтехимического комбината" (г.Томск. 1995г.), на 40-ом

международном научном коллоквиуме (Германия, г.Ильменау, 1995 г.), на международной конференции "Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды - ПООС-95" (г.Томск, 1995 г.), на VII Научной школе "Физика импульсных разрядов в конденсированных средах" (г.Николаев, 1995 г.), на международной научно-технической конференции по использованию результатов конверсии науки в вузах Сибири для международного сотрудничества (СИБКОНВЕРС' 95) (г.Томск, 1995 г.), на 10-ом отраслевом совещании "Проблемы и перспективы развития Томского нефтехимического комбината" (г.Томск, 1996 г.), на научных семинарах НИИ высоких напряжений (г.Томск).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано II научных работ, получено 3 положительных решения по заявкам на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 129 страницах, содержит 36 рисунков, 10 таблиц, список использованной литературы из 108 наименований и приложение с документами, подтверждающими практическую значимость и приоритетность полученных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, определена цель исследований, сформулирована научная новизна результатов, отражена их практическая значимость, приведены сведения об апробации и публикациях основных результатов работы.

В первой главе дано феноменологическое описание явления ЭВП. Приведены классификация видов ЭВП, существующие физические модели и методы расчета параметров ЭВП. Рассмотрены особенности ЭВП в конденсированных средах. Помещение взрываемого проводника в плотную окружающую среду задерживает расширение испаренного материала, затормаживает развитие ионизационных процессов, приводящих к возобновлению разряда, предотвращает появление

неоднородностей, способствует повышению давления и температуры в канале разряда. Перегревы, наблюдаемые при ЭВП в твердом диэлектрике, существенно превышают аналогичные характеристики, имеющие место при взрыве в газе и жидкости при сходных параметрах разрядной цепи.

Проанализированы методы получения порошков химических соединений. Преимуществами метода ЭВП являются:

- универсальность метода - возможность получения УДП чистых металлов, сплавов и химических соединений на одном и том же оборудовании;
- низкие энергозатраты, что связано с прямым нагревом проводника электрическим током без участия теплоносителей и высокой скоростью нагрева;
- достаточно высокая производительность метода (теоретически частота ЭВП может составлять до 10^4 сек^{-1});
- экологическая безопасность метода, что связано с отсутствием технологических выбросов (ЭВП происходит в замкнутой камере).

Представлены основные результаты исследований свойств порошков, полученных методом ЭВП в газовых средах. Работы по исследованию ЭВП в конденсированных средах ограничиваются, как правило, указанием на возможность синтеза химических соединений. Зависимости свойств порошков от параметров взрыва не установлены.

В заключительном разделе главы сформулированы цель и задачи исследований.

Вторая глава является методической; в ней представлено описание экспериментальной установки, использованных при выполнении исследований методов физико-химического анализа, а также методики математической обработки результатов.

Основными элементами экспериментальной установки являются генератор импульсных токов, блок осциллографической регистрации и разрядная камера с размещаемым в ней взрываемым проводником.

В работе исследована зависимость фазового состава и характеристик продуктов электровзрыва проводников от энергосодержания e/e_c (где e_c - энергия сублимации материала

проводника, e – энергия, введенная в проводник) в режиме с бесконечной паузой тока, от налитая дуговой стадии и от окружающей проводник среды – жидкость или воздух при ЭВП над ее поверхностью.

В качестве жидкой окружающей среды выбраны дистиллированная вода и предельный углеводород декан – жидкости, значительно отличающиеся по своему химическому составу и по физическим свойствам. В качестве твердых веществ выбраны лед и парафин. Электровзрыв в воде проволок из алюминия, железа, титана исследован для последующего применения в процессах очистки сточных вод, так как эти металлы при взаимодействии с водой в принципе могут сорбировать примеси. Для исследования продуктов ЭВП в конденсированных углеводородах были взяты проводники из алюминия, вольфрама, титана и меди. Выбор этих металлов обусловлен различной способностью к карбидообразованию и различием свойств образующихся карбидов. Для алюминия известен только один карбид стехиометрического состава Al_4C_3 , титан дает также один карбид TiC с различным соотношением компонентов, а вольфрам – два карбида W_2C и WC . Получение УДП карбидов этих металлов и оксидов алюминия различных модификаций представляет интерес для создания металлообрабатывающего и бурового инструмента, для использования их в качестве порошков для шлифовки и полировки поверхностей твердых сплавов и др. Для меди образование карбидов ранее не наблюдалось. Представляло интерес изучение возможности получения при ЭВП карбидов меди, а также возможности модифицирования минеральных масел и придания им улучшенных триботехнических характеристик.

Фазовый состав порошков, получаемых при ЭВП, исследован методом рентгенофазового анализа. С помощью дифференциально-термического анализа были изучены такие характеристики продуктов электровзрыва, как содержание десорбированных продуктов, температура начала окисления, скорость окисления, максимальная степень окисленности, тепловые эффекты окисления. Метод радиационного зондирования использован для количественного определения оксидно-гидроксидных соединений алюминия. Метод заключается в регистрации ЭПР-спектров парамагнитных центров,

образующихся в результате воздействия небольших доз ионизирующего облучения на материалы, содержащие непарамагнитные приреси различной природы. Для установления формы и размеров частиц, полученных электрическим взрывом проводников, использован метод электронной микроскопии. Площадь удельной поверхности определялась методом БЭТ. Для изучения сорбционных свойств продуктов ЭВП применялся метод фотоколориметрии.

Дано описание математической обработки результатов экспериментов, проведен анализ погрешностей.

В третьей главе представлены результаты исследования влияния режимов ЭВП и состояния воды на состав и характеристики УДП.

Вода в условиях ЭВП, как и кислород, окисляет металлы (алюминий, железо, титан) до оксидов. Особенностью воды как окислителя является образование низших оксидов при ЭВ железных (FeO) и титановых (Ti_2O_3) проводников. В зависимости от механизма диссоциации воды при импульсной воздействию концентрированными потоками энергии окислителями могут быть протон H^+ или атомарный (молекулярный) кислород. При взаимодействии частиц металла с протонами образуется водород, являющийся активным восстановителем, наличие которого и приводит к смещению химического равновесия в сторону исходных веществ.

Основным конечным продуктом ЭВ алюминиевых проводников в воде при $e/e_c > 1,0$ является $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ низкотемпературная. При значениях $e/e_c < 1,0$ эффективно происходит образование гидроксида алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$. На зависимости содержания остаточного алюминия от введенной энергии (рис. I) наблюдаются резкие изменения в области $e/e_c \sim 0,9 - 1,1$. Аналогичные зависимости наблюдались ранее при ЭВП в газах и объясняются наличием двух механизмов образования частиц: диспергированием жидкого проводнике при $e/e_c < 1,0$ и конденсацией при $e/e_c > 2,0$.

Известно, что грубодисперсные порошки алюминия при относительно медленном взаимодействии с водой образуют гидроксид алюминия. Схема превращений гидроксида алюминия при нагревании включает последовательность веществ, из которой следует, что химический и фазовый состав продуктов взаимодействия с водой

определяется температурой реакции:

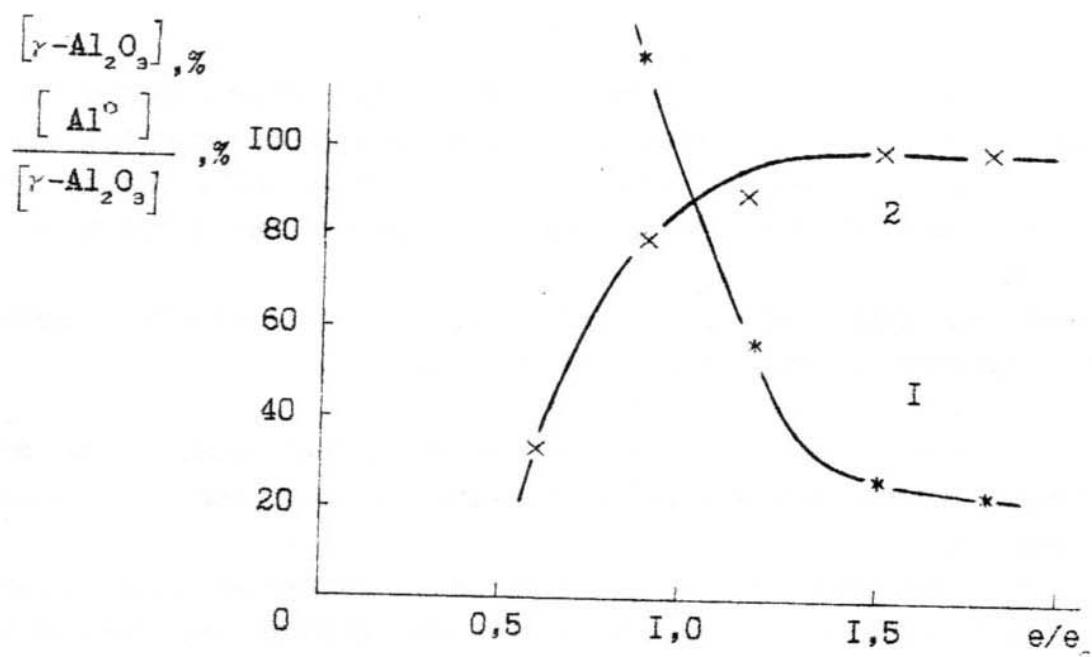


Рис. 1. Зависимости относительного содержания остаточного алюминия (I) и γ - Al_2O_3 (2) в продуктах электрического взрыва алюминиевых проводников в воде от введенной энергии

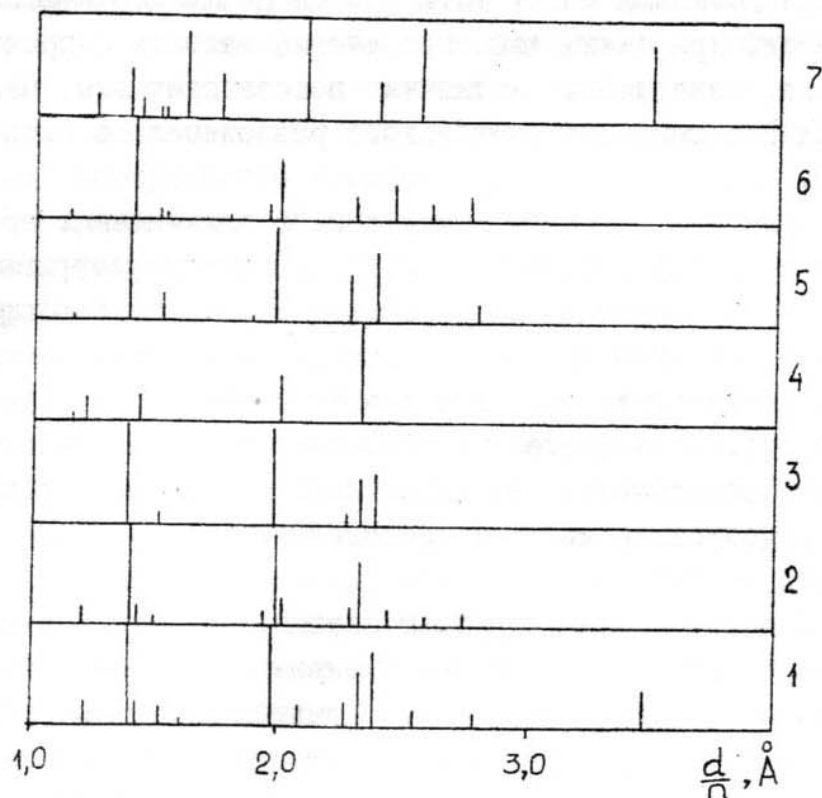
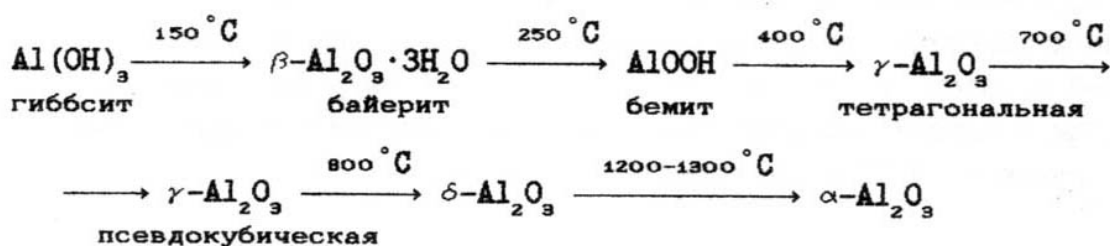


Рис. 2. Штрихрентгенограммы продуктов электрического взрыва алюминиевых проводников в воде при $e/e_0 \approx 1,2$: ЗВП во льду в стальной трубке - 1, ЗВП во льду в полиэтиленовой трубке - 2, ЗВП в жидкой воде - 3; данные ASTM: Al - 4, γ - Al_2O_3 низкотемпературная - 5, γ - Al_2O_3 высокотемпературная - 6, α - Al_2O_3 - 7



Особенностью ЭВП в конденсированных средах является зависимость предельных достигаемых параметров системы взрывающийся проводник – окружающая среда (T , P , $V_{\text{охл}}$) от вязкости среды. Следствием этого является изменение фазового состава образующихся конечных продуктов при изменении вязкости среды. При ЭВ алюминиевого проводника в жидкой воде получена низкотемпературная модификация $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ (рис. 2). ЭВП во льду при условии воздействия на продукты взрыва цилиндрической сходящейся ударной волны приводит к росту давления и температуры в зоне химического взаимодействия и большей длительности процесса. Это вызывает образование высокотемпературных модификаций оксида алюминия – $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ высокотемпературной и $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ в зависимости от жесткости матрицы, в которую помещен лед.

Для исследования возможности выделения примесей из водных растворов путем электровзрыва проводников были взяты растворы с примесями катионов и анионов (Cr^{6+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Hg^{2+} , Ag^+ , NO_3^- , ClO_4^-). Эксперименты показали, что продукты диспергирования проводников практически не взаимодействуют с растворимыми в воде примесями. Для малоактивных металлов (Ag^+ , Ni^{2+} , Hg^{2+}) наблюдалось осаждение, по-видимому, из-за протекания автокатализа. Соли металлов, расположенных в электрохимическом ряду напряжений до водорода (например, Cr^{6+}), достаточно эффективно осаждаются продуктами электровзрыва алюминиевой проволоки при $e/e_c < 1,2$, что связано не с прямым взаимодействием продуктов ЭВП с примесями, а со вторичными более медленными процессами (адсорбция, соосаждение, сокристаллизация), при которых примеси не претерпевают химических изменений, а переходят в твердый осадок.

Отсутствие взаимодействия с растворенными в воде примесями, сохранение сферической формы частиц при ЭВП в жидкой и твердой воде и идентичность характеристик продуктов ЭВП в воде и

продуктов ЭВП в газах в зависимости от введенной энергии, вероятно, связаны с механизмом диффузионного взаимодействия продуктов диспергирования с водой в газоподобном состоянии.

В четвертой главе представлены результаты исследований свойств УДП, получаемых при ЭВП в конденсированных углеводородах.

При увеличении вводимой в проводник (алюминий, вольфрам, титан) энергии растет дисперсность продуктов, повышается содержание карбидов и снижается доля остаточных металлов. При ЭВП медных проводников в жидких углеводородах карбиды не обнаружены, вероятно, из-за их неустойчивости.

Относительное содержание карбидов при ЭВП в углеводородах сильно зависит от величины верхней границы их температурной устойчивости. Низкий выход карбида алюминия при ЭВП (рис. 3,а) можно объяснить, проанализировав зависимость изобарно-изотермического потенциала ΔG реакции образования карбидов от температуры. Условием принципиальной возможности процесса, в том числе и химической реакции, является $\Delta G < 0$, а $\Delta G > 0$ свидетельствует о невозможности самопроизвольного осуществления процесса в данных условиях. Химическое взаимодействие продуктов ЭВП с окружающей средой в основном происходит после нарушения фронта сплошности расширяющегося проводника в процессе спада температуры. Возможность протекания химических процессов – синтеза может быть отнесена к температурному интервалу $(3-4)10^3$ К – $(5-8)10^2$ К. При большей температуре наблюдается деструкция, а при меньшей – скорости реакций малы. Границей температурной устойчивости карбида алюминия является $T=2700$ К, выше которой ΔG быстро снижается до нуля. Для карбидов вольфрама и титана эта граница существенно выше, что объясняет более высокое их содержание в продуктах ЭВП в сравнении с карбидом алюминия в условиях одинаковой вводимой энергии (рис. 3).

При ЭВП в конденсированных средах возможно получение нескольких соединений в качестве конечных продуктов при условии близких величин верхней температурной границы их стабильности и наличия

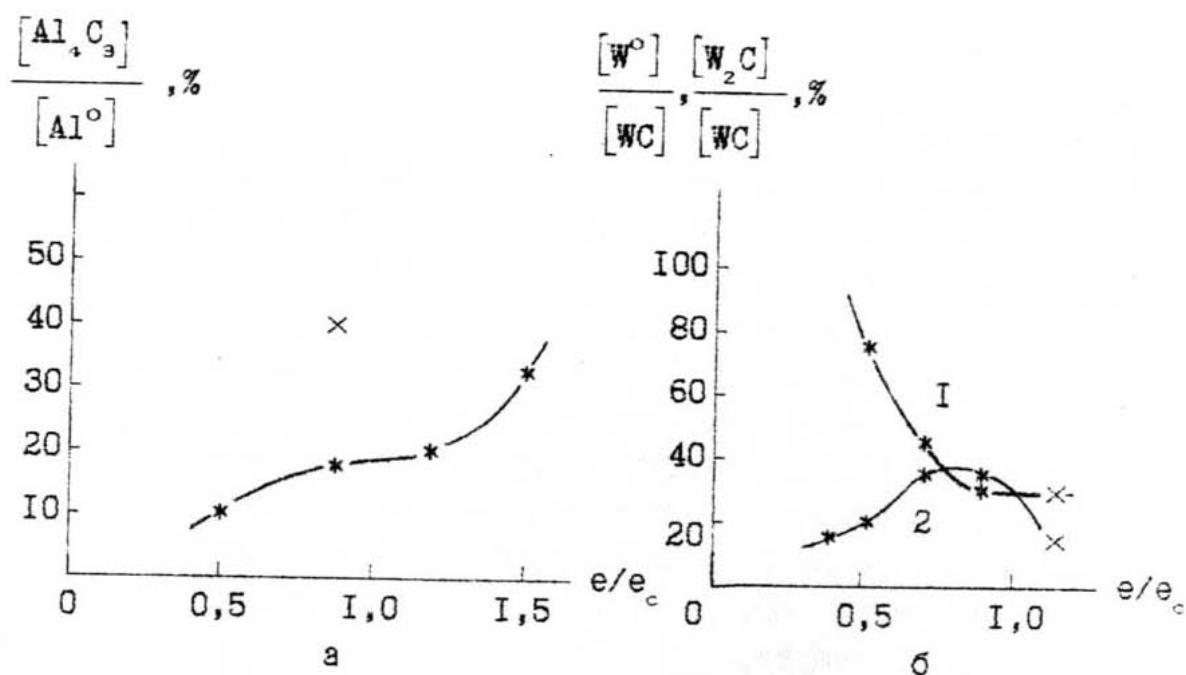


Рис. 3. Зависимости относительного содержания карбида алюминия -а, остаточного вольфрама (I) и карбида вольфрама (2) - б в продуктах ЭВП в декане от введенной энергии: * -взрыв с бесконечной паузой тока, x -с дуговой стадией

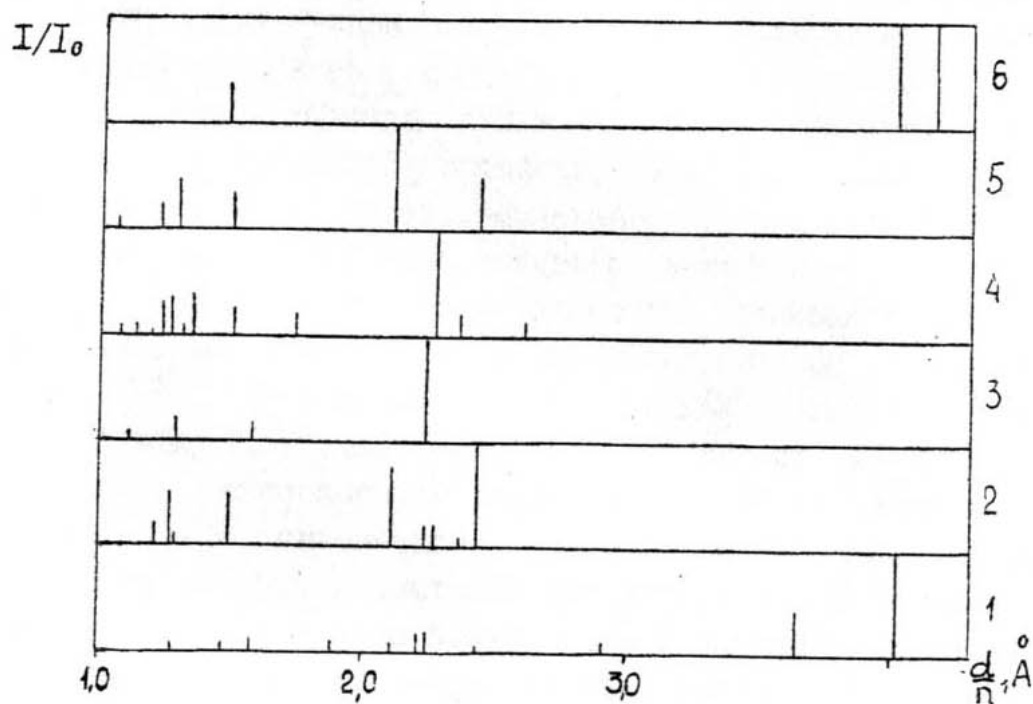


Рис. 4. Штрихрентгенограммы продуктов ЭВ вольфрамовых проводников в конденсированных углеводородах: 1 - ЭВП в парафине, 2 - ЭВП в декане; данные ASTM: 3 - W, 4 - W_2C , 5 - WC_{1-x} , 6 - WC

многокомпонентной реакционной среды. При ЭВ алюминиевых проводников в суспензии гексаметилентетрамина в декане получены карбид и нитрид алюминия.

На примере карбидообразования при ЭВП вольфрамовых проводников показано, что повышение плотности окружающей среды (динамической вязкости) способствует насыщению углеродом конечных продуктов: при переходе от жидкого декана к твердому парафину наблюдается уменьшение содержания остаточного металла и низшего карбида вольфрама W_2C . Конечным продуктом ЭВ вольфрамовых проводников в парафине является WC (рис. 4). Учитывая, что химический состав декана и парафина примерно одинаков, вероятной причиной более сильного насыщения углеродом продуктов взрыва является повышение плотности окружающей среды, что вызывает рост температуры и давления в зоне химического взаимодействия. Также эти факторы позволяют повысить и выход карбида вольфрама.

При ЭВ медных проводников в жидком предельном углеводороде – индустриальном масле И-30 в качестве конечных продуктов образуются УДП меди и кластеры углерода (фуллерены). Изучение триботехнических характеристик суспензии УДП меди в индустриальном масле и масла, содержащего кластеры углерода, позволяет сделать заключение о перспективности обработки масел электрическим взрывом проводников. Суспензия УДП меди является эффективным противоизносным и снижающим коэффициент трения средством, а масло, модифицированное углеродными кластерами, обладает антифрикционным действием. С увеличением вводимой в проводник энергии (от $e/e_c = 0.75$ до 1,5) наблюдалось уменьшение коэффициента трения на 20 – 40% по сравнению с исходным индустриальным маслом.

Конечные продукты ЭВ алюминиевых, вольфрамовых и титановых проводников в конденсированных углеводородах представляют собой сферические частицы (рис. 5). Сохранение сферической формы для карбидов возможно только при действии механизма диффузии окислителя (углерода) внутрь частиц. Такой механизм возможен при высоких температурах, но ниже верхней границы температурной устойчивости карбидов. Таким образом, образование карбидов

происходит при взаимодействии продуктов диспергирования проводников с газоподобной окружающей средой. Другие механизмы, связанные с переносом металлов и карбидов» привели бы к

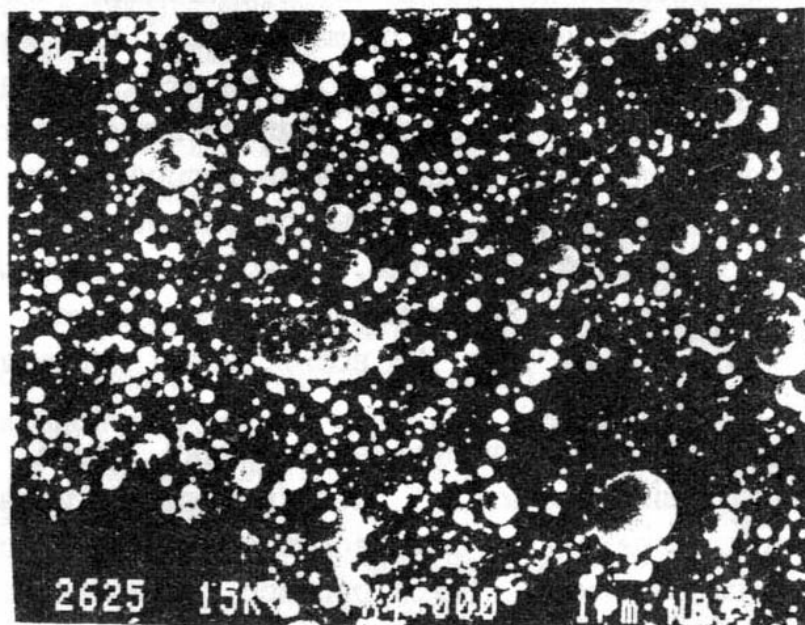
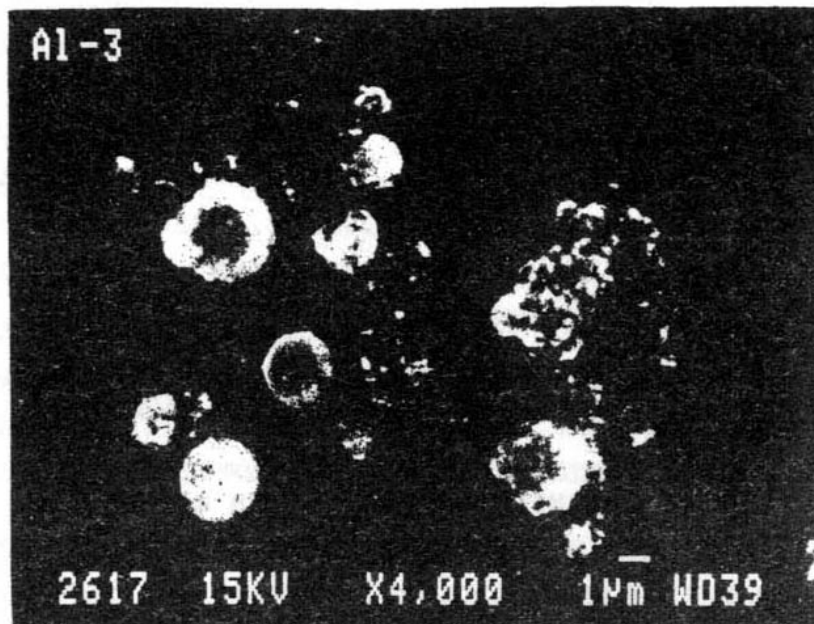


Рис. 5. Микрофотографии продуктов электровзрыва алюминиевых (а) и вольфрамовых (б) проводников в декане

Проведенные исследования позволили выделить направления практического применения ЭВП в конденсированных средах, сущность которых раскрыта в предварительных технологических регламентах, представленных в приложении. Это – синтез оксидов алюминия различных модификаций, синтез карбидов металлов, электровзрывная очистка воды от неорганических примесей, обработка минеральных насел электрическим взрывом проводников.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Условия электрического взрыва алюминиевых, вольфрамовых, титановых, железных и медных проводников в конденсированных средах (вода, предельные углеводороды) влияют на химический и фазовый состав образующихся ультрадисперсных порошков как конечных продуктов.

2. При увеличении вводимой в проводник энергии снижается доля остаточных металлов и увеличивается содержание химических соединений в конечных продуктах. При этом снижение содержания остаточных металлов и изменение физико-химических характеристик УДП (скорость окисления, содержание десорбированных газообразных продуктов, максимальная степень окисленности, тепловые эффекты окисления) с высокой скоростью происходит только в узком диапазоне e/e_c : в случае ЭВ алюминиевых проводников в воде и декане это $e/e_c = 0,9 - 1,2$; для ЭВ вольфрамовых и титановых проводников – $e/e_c = 0,7 - 0,9$.

3. При ЭВП в конденсированных средах (вода, лед, декан, парафин, индустриальное масло) продукты диспергирования проводников после их перехода в химические соединения сохраняют форму, близкую к сферической. Такой процесс возможен при преобладании механизма диффузии окислителя внутрь частиц. Для реализации такого механизма необходимы высокие температуры. Следовательно, вне зависимости от агрегатного состояния среды, окружающей проводник, продукты диспергирования проводников взаимодействуют с окружающей средой в газоподобном состоянии.

4. Особенностью ЭВП в конденсированных средах является зависимость предельно допустимых параметров состояния системы взрывающийся проводник-окружающая среда (T , P , $V_{\text{охл}}$) не только

от величины вводимой энергии e/e_c , но и от плотности (динамической вязкости) среды. Следствием повышения динамической вязкости является образование, например, высокотемпературных модификаций оксида алюминия при ЭВП во льду. При переходе от декана к твердому парафину в случае ЭВ вольфрамовых проводников наблюдается уменьшение остаточного металла и низшего карбида вольфрама W_2C и повышение выхода более насыщенного углеродом стехиометрического карбида вольфрама WC . Таким образом, плотность окружающей среды (динамическая вязкость), наряду с вводимой энергией, является параметром регулирования фазового и химического состава конечных продуктов ЭВП.

5. Вода в условиях ЭВП, как и кислород, окисляет металлы до оксидов. Особенностью воды как окислителя является образование низших оксидов при ЭВ железных и титановых проводников, что может быть объяснено накоплением водорода как продукта окисления.

6. Продукты диспергирования проводников не взаимодействуют с растворимыми в воде примесями, что подтверждает предположение о взаимодействии со средой в газоподобном состоянии, при переходе в которое примеси остаются в жидкой фазе. Для малоактивных металлов наблюдалось осаждение, по-видимому, из-за протекания автокатализа. В случае ЭВ алюминиевых проводников при низких значениях вводимой энергии ($e/e_c < 1,2$) примеси достаточно эффективно осаждаются за счет вторичных, более медленных процессов (адсорбция, соосаждение, сокристаллизация).

7. Относительное содержание карбидов при ЭВП в углеводородах сильно зависит от величины верхней границы их термической устойчивости. Расчеты показали, что в случае карбида алюминия такой границей является $T=2700\text{ K}$, в случае карбида вольфрама WC и карбида титана TiC эта граница существенно выше. Более высокие выходы WC и TiC в сравнении с Al_4C_3 объясняются более высокой температурой начала стабилизации первых двух карбидов.

8. Обработка минеральных масел электрическим взрывом медных проводников, в результате которого образуются УДП меди и кластеры углерода (фуллерены), весьма перспективна. Суспензия меди является эффективным противоизносным и снижающий

коэффициент трения средством, а масло, модифицированное углеродными кластерами, обладает повышенными антифрикционными свойствами.

9. ЭВП в конденсированных средах целесообразно применять для получения оксидов алюминия различной кристаллической структуры, для получения карбидов, для очистки воды и выделения редких и цветных металлов из водных растворов, а также для обработки минеральных масел.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ушаков В.Я., Назаренко О.Б., Ильин А.П. и др. Применение электрического взрыва проводников для очистки воды // Очистка воды и стоков: Сб. науч. тр. - Томск. 1994. - С. 52-57.
2. Назаренко О.Б. Исследование состава продуктов электровзрыва алюминиевой проволоки в жидких углеводородах: Тез. докл. областной научно-практич. конф. молодежи и студентов по техническим наукам и высоким технологиям. - Томск, 1995. - С. 68.
3. Назаренко О.Б., Ушаков В.Я., Ильин А.П. Электровзрывной метод получения суспензии гидроксида алюминия // Вода, которую мы пьем: Тез. докл. международной научно-техн. конф. - Москва, 1995.-С. 61-62.
4. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Яблуновский Г.В. и др. Характеристики и свойства ультрадисперсных наполнителей полиолефинов // Проблемы и перспективы развития Томского нефтехимического комбината: Тез. докл. 9-го отраслевого совещания. - Томск, 1995. - С. 47-48.
5. Шубин Б.Г., Ильин А.П., Миненков В.Р., Назаренко О.Б. и др. Перспективы и проблемы безреагентной очистки воды // Там же. - С. 129.
6. Назаренко О.Б., Ильин А.П., Ушаков В.Я. и др. Особенности очистки воды от неорганических примесей методом электрического взрыва проводников // Фундаментальные и прикладные проблемы охраны окружающей среды - ПООС-95: Тез. докл. международной

конф. - Томск, 1995. - Т.3. - С. 357.

7. Ушаков В.Я., Ильин А.П., Назаренко О.Б. Технологические перспективы применения электрического взрыва проводников в жидких средах в получении ультрадисперсных порошков // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Тез. докл. VII научн. школы. - Николаев, 1995. - С. 52.

8. Положительное решение по заявке на изобретение C01F 7/42; B22F 9/16. Способ получения гидроксида алюминия / Ильин А.П., Назаренко О.Б., Ушаков В.Я. - № 94-17502/26. Заявлено 12.05.94, выдано 15.09.95.

9. Ilin A.P., Nazarenko O.B., Krasnyatov Y.A., Tlkhonov D.V., Ushakov V.Y. Synthesis of metal carbides, oxides and nitrides with wire electric explosion // The Scientific Conference On The Use of Research Conversion Results in the Siberian Institutions of Higher Edlcation for International Cooperation (SIBCONVEKS'95): Abstracts - Tomsk: Tomsk State Academy of Control Systems and Radioelectro-nics, 1995. - P. 55.

10. Положительное решение по заявке на изобретение C01F 7/42. Способ получения порошка оксида алюминия / Ильин А.П., Краснятов В.А., Назаренко О.Б. - № 94027478/26. Заявлено 19.07.95, выдано 2.II.95.

11. Положительное решение по заявке на изобретение B22F 9/14; C01B 13/13; 31/30. Способ получения высокодисперсных порошков соединений металлов с неметаллами / Ильин А.П., Назаренко О.Б. - № 95112615/02(021592). Заявлено 19.07.95, выдано 30.01.96.

12. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. и др. Гидроксидные и оксидные порошки - эффективные пламягасящие добавки в полимеры // Проблемы и перспективы развития Томского нефтехимического комбината: Тез.докл. 10-го отраслевого совещания. - Томск, 1996. -С. 37.

13. Ильин А.П., Краснятов Ю.А., Каратеева Е.А., Назаренко О.Б. и др. Применение ультрадисперсных порошков для очистки технологических и сточных вод // Там же. - С. 129-130.

14. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Ушаков В.Я. Формирование химических соединений при электрическом взрыве металлических проводников в жидкостях // Известия вузов. Физика. - 1996. - №6.