

Электрический взрыв проводников для получения наноразмерных карбидов и нанесения функциональных нанопокровтий

^{*,**} Л. З. Богуславский, А. В. Синчук, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,
г. Николаев, 54018, Украина, *e-mail: boguslavsky@mail.ru; ** e-mail: dpes@iip.com.ua*

Поступила 17.05.2019
После доработки 31.05.2019
Принята к публикации 05.06.2019

Проведен анализ последних исследований в области электровзрыва проводников (ЭВП) для выбора режимов и условий ЭВП с высоким удельным сопротивлением, который используется для получения функциональных износостойких твердосплавных покрытий, содержащих тугоплавкие металлы, их карбиды и наноуглеродные частицы. Проанализировано влияние среды, в которой осуществляется ЭВП, на состав получаемых продуктов. Рассмотрено влияние режимов электровзрыва проводника в газообразных углеродсодержащих средах на синтез карбидов тугоплавких металлов. Рассмотрены вопросы получения функциональных композиционных покрытий металлических поверхностей.

Ключевые слова: электрический взрыв проводника, наноразмерные карбиды металлов, износостойкие нанопокровтия, углеродсодержащие газообразные среды, наноуглеродные покрытия.

УДК 669.716.9:621.795.4:621.3.014.31

DOI: 10.5281/zenodo.3522291

ВВЕДЕНИЕ

Получение функциональных износостойких твердосплавных покрытий, содержащих тугоплавкие металлы, их карбиды и наноуглеродные частицы, которые используются для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин и механизмов, является актуальной задачей, так как надежность работы технологических машин непосредственно связана с качеством поверхностного слоя их деталей. От качества поверхностного слоя зависят эксплуатационные свойства – сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и др. В связи с интенсификацией эксплуатационных процессов, увеличением скоростей перемещения рабочих органов, повышением температуры и давления роль качества поверхностного слоя значительно возрастает. Связь характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей свидетельствует о том, что оптимальная поверхность должна быть достаточно твердой, с мелкодисперсной структурой [1].

Карбиды переходных *d*-металлов являются самыми твердыми и тугоплавкими из химических соединений, поэтому естественно стремление исследователей и практиков использовать карбиды W и Ti, в частности монокарбиды, в составе износостойких коррозионно-стойких покрытий.

Так, у монокарбида вольфрама WC, хоть он и не является самым твердым и тугоплавким, температура плавления ниже, а твердость

меньше, чем у нестехиометрических карбидов TiC_x, ZrC_x, NbC_x, TaC_x, однако твердость WC стабильна и мало изменяется с повышением температуры. Кроме того, у монокарбида WC по сравнению с другими карбидами выше модуль Юнга в 1,5–2 раза и значительно ниже коэффициент линейного термического расширения [2]. Благодаря совокупности этих свойств именно монокарбид вольфрама когда-то стал и сегодня по-прежнему является основной составляющей инструментальных износостойких и других стратегически важных материалов, а постоянные попытки на всем этапе существования металло-керамических твердых сплавов исключить или значительно снизить содержание монокарбида вольфрама WC не увенчались успехом. Созданные как альтернатива монокарбиду вольфрама синтетические материалы белбор, эльбор, боразон, гексонит-Р, а также безвольфрамовые твердые сплавы заменяют сплавы на основе WC лишь в узких областях металлообработки (чистовое точение).

Монокарбид титана TiC также износ- и коррозионно-стойкий, твердый, химически инертный материал, который находит широкое применение в качестве компонентов и легирующих добавок безвольфрамовых твердых сплавов [3]. Он является одним из самых стойких к окислению среди карбидов переходных металлов, уступая по этому показателю лишь карбиду хрома Cr₃C₂, а также одним из самых твердых среди чистых карбидов (табл. 1). Это объясняется наиболее прочной связью Ti–C среди всех переходных металлов. Однако с увеличением температуры микротвердость

Таблица 1. Сравнение свойств карбидов WC [2] и TiC [3]

Свойство	WC	TiC
Температура плавления, К	3060	3523
Микротвердость, ГПа	18–22	28
Модуль Юнга, ГПа	700	500
Коэффициент линейного термического расширения, 10^{-6} K^{-1}	3,8	7,95

карбида титана уменьшается более значительно, чем у других карбидов. При испытаниях на абразивное изнашивание карбидов переходных металлов карбид титана показывает наибольшую стойкость.

Таким образом, вполне естествен интерес исследователей к разработке технологий получения карбидов W и Ti, в частности монокарбидов, в составе износ- и коррозионно-стойких покрытий.

В последнее время растет интерес к технологиям, связанным с получением и исследованием твердых аморфных углеродных покрытий, которые являются идеальными износостойкими покрытиями на деталях в парах трения благодаря сочетанию низкого коэффициента трения и высокой твердости. Они потенциально могут найти применение в машиностроении (упрочнение инструмента и штампов), автомобилестроении (упрочнение деталей двигателей внутреннего сгорания) [4].

Одной из перспективных технологий получения износостойких твердосплавных покрытий, содержащих тугоплавкие металлы, их карбиды и наночастицы углерода, является использование электрического взрыва проводников (ЭВП) из тугоплавких металлов в углеродсодержащей газообразной среде.

Цель работы – анализ известных методов получения износостойких покрытий и разработка комбинированного электроразрядного метода нанесения функциональных нанопокровов, упрочняющих рабочие поверхности деталей машин и механизмов.

Для более глубокого изучения физических процессов электрического взрыва проводников, используемого в перспективных технологиях получения износостойких покрытий, проведен анализ последних исследований в области ЭВП по выбору режимов и условий электровзрыва проводников с высоким удельным сопротивлением. Проведен анализ влияния среды, в которой осуществляется ЭВП, на состав получаемых продуктов ЭВП. Рассмотрено влияние режимов электровзрыва проводника в газообразных углеродсодержащих средах на синтез карбидов тугоплавких металлов. Поскольку интерес для промышленности представляет не просто получение наночастиц

карбида, а технология получения функциональных покрытий на основе карбидов тугоплавких металлов, рассмотрены вопросы получения композиционного покрытия металлических поверхностей.

ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Электрический взрыв проводников в углеродсодержащей газообразной среде является комбинированным процессом, в котором диспергирование металла проводника сопровождается высокотемпературным пиролизом органического газа. Образующиеся при этом активные атомы углерода участвуют в образовании химических соединений с металлом проводника. Процесс образования химических соединений в условиях ЭВП ограничивается строго определенным диапазоном термодинамических параметров: давлением, температурой, концентрацией продуктов диссоциации в газообразной фазе, наличием или отсутствием конденсированной фазы – охлажденных продуктов химического синтеза, частиц твердого углерода, остаточных частиц металла. Логично полагать, что наибольшее количество высокодисперсных химических соединений может образовываться именно из газовой среды, в которой скоростная диффузия благоприятствует протеканию химических реакций. В частности, образование карбидных фаз из полностью газообразных компонентов возможно при температурах, несколько превышающих точку кипения материала проводника, которая равна 3300°C и 5555°C соответственно для титана и вольфрама. При более высоких температурах вероятно одновременная деструкция химических веществ, а при более низких температурах, покрывающих диапазон жидкого и твердого состояния проводника, скорости химических реакций малы.

Таким образом, процесс карбидообразования в ходе ЭВП напрямую зависит от режимов взрыва, которые обеспечивают то или иное фазовое состояние продуктов разрушения проводника.

Чтобы перевести взрывающийся проводник в газообразное состояние, необходимо в него ввести электрическую энергию W , которая как

минимум должна быть равна энергии сублимации W_s и обеспечивать прохождение последовательных стадий: разогрев металла от комнатной температуры до температуры плавления металла; плавление; разогрев жидкого металла от температуры плавления до температуры кипения; испарение (парообразование).

При классификации режимов ЭВП за основу берется соотношение времени развития магнитодинамических (МГД) неустойчивостей в жидкой фазе и времени нарушения механизма электрической проводимости, которое определяется скоростью ввода энергии, физическими свойствами и геометрическими размерами проводника [5]. Различают медленный режим ЭВП с типичной скоростью ввода энергии в проводник менее $0,1$ кДж/г·нс и в противном случае – быстрый режим. При скорости более 10^2 кДж/г·нс возникает сверхбыстрый режим (скиновый режим, взрывная абляция) [6].

Медленный режим ЭВП происходит при плотностях тока менее 10^{11} А/м², при этом магнитное давление превышает термодинамическое. Развитие МГД неустойчивости, возникает по завершении плавления и опережает ввод энергии [7]. При медленном ЭВП происходит расширение проводника и резкое возрастание омического сопротивления, вызванное процессом дробления проводника на макроскопические капли жидкого металла, причиной которого являются капиллярные силы на неровной поверхности [8].

Следовательно, медленный ЭВП не реализует условий для однородного испарения проводника и полного перевода вещества в газообразную фазу.

В быстром режиме ЭВП, при быстром введении энергии, которое возможно при плотности тока более 10^{11} А/м, магнитное давление ниже термодинамического, и развитие МГД неустойчивостей замедлено. Цилиндрическая симметрия проводника сохраняется вплоть до полного испарения, и страты не образуются [9]. Быстрый режим ЭВП реализуется, если время ввода энергии короче времени образования гидродинамических перетяжек в жидком проводнике. При этом волна разгрузки с поверхности не должна проникнуть к оси проволоки, при этом сердцевина проволоки перегревается выше температуры кипения, и объем возникшей метастабильной жидкости вскипает. Поведение вещества в быстром режиме ЭВП связывают с физическими законами в области экстремальных состояний. При этом возможно несколько путей превращения жидкого металла в пар. Если давление все время выше значения на жидкостной ветви бинодали, непрерывное пони-

жение плотности металла идет без разделения на фазы, что возможно при наличии окружающей проволочку плотной среды [10]. Быстрый ЭВП позволяет ввести в проводник значительно больше энергии W на стадии резистивного нагрева. Так, в работе [11] условия быстрого электрического взрыва были экспериментально реализованы путем изменения плотности тока от 10^9 до 10^{11} А/м², что соответствовало скорости нагрева от 10^{10} до 10^{13} Дж/г·с проводников из меди, никеля, вольфрама и молибдена. Эксперименты показали, что плотность энергии, вводимой в материал проводника, зависит от скорости нагрева (то есть плотности тока). Варьируя для каждого из металлов плотность тока в указанных пределах, можно достичь четырехкратного перегрева проводника.

Возможность перевода проводника в газообразное состояние зависит не только от условий реализации быстрого взрыва, но и от физических характеристик материала проводника. Изучение динамики взрыва и состояния проводника, его плотности и скорости расширения, которые диагностируются с помощью скоростной фотографии, интерферометрии, лазерного зондирования, рентгеновской радиографии и т.д., дало возможность разделить проводники на три группы [12]:

- металлы с высокой удельной электропроводностью (например, Al, Cu, Ag);
- металлы с низкой удельной электропроводностью (например, Fe, Ni);
- тугоплавкие металлы с низкой удельной электропроводностью и низкой энергией эмиссии электронов (Ti, W, Mo).

Отличительной особенностью металлов первой группы являются хорошо изученные, например в работе [13], режимы взрыва с паузой тока и последующей дуговой стадией протекания тока по продуктам испарения проводника. В такие проводники легко вводится энергия $W > W_s$. Для них легко реализуются так называемые согласованные режимы ЭВП с бесконечной паузой, когда вся энергия конденсатора, за исключением потерь в цепи, расходуется на резистивный нагрев и деструкцию проводника, а дуговая стадия вообще не наступает. Согласованные режимы считаются наиболее эффективными с точки зрения превращения энергии в проводниках и наиболее часто используются для получения методом ЭВП нанопорошков металлов первой группы и их химических соединений.

Металлы второй группы с точки зрения энергетического осаждения занимают промежуточное положение между металлами первой и третьей групп и относительно легко

взрываются при условии $W = W_s$. Электровзрыв проводников из металлов этой группы с точки зрения практического использования менее интересны по сравнению с ЭВП из металлов первой группы.

В металлы третьей группы, куда относятся Ti и W, крайне сложно ввести энергию $W > W_s$, достаточную для испарения проводника, так как в силу развитой электронной эмиссии с поверхности проводника дуговая стадия начинает развиваться, когда он находится еще в твердом состоянии. И поскольку ток течет по поверхностным парам, резистивный нагрев сердцевины прекращается, а дальнейший процесс испарения полностью контролируется взаимодействием горячей дуги с более холодным ядром проводника. Такой сценарий ЭВП для Ti подтвержден экспериментально [14], а также для W, на основе которого выполняются проволоочные сборки Z-пинча [15, 16].

В работе [17] взрывались проводники из Ti и Cu диаметром 0,175 мм и длиной 85 мм в воздухе при пониженном давлении 10 кПа. Конденсатор на 4 мкФ заряжался до 13 кВ. Применение метода интерферометрии позволило авторам установить, что титан – это типичный материал, взрывающийся в режиме с выраженной дуговой стадией. По мере протекания тока сопротивление титанового проводника увеличивалось сначала благодаря джоулеву нагреву, что приводило к увеличению напряжения. Приблизительно через 2,0 мкс на осциллограмме наблюдался пик перенапряжения, а ток резко возрастал из-за шунтирования разрядной плазмой, образованной вокруг высокоплотного ядра проводника. После резкого спада напряжения ток становился синусоидальным с экспоненциально убывающей амплитудой. Далее из-за нагрева горячей плазмой и выделения химической энергии окисления процесс испарения ядра возобновлялся до полной vaporизации, которая зафиксирована на 29-й микросекунде, то есть к моменту, когда ток совершил 1,5 колебания. Наоборот, медь – типичный материал, взрывающийся в однократном режиме, где измеренные сигналы тока и напряжения имели типичные особенности, обусловленные быстрым увеличением сопротивления проводника из-за полномасштабного испарения на момент резкого пика на кривой напряжения и внезапного обвала тока. Такое поведение ЭВП авторы объясняют разностью удельных электро-сопротивлений материалов и количеством энергии, которая была осаждена в проводнике до срыва напряжения и, согласно осциллограммам, составляла $W > W_s$ для меди и $W \ll W_s$ для титана.

В работе [14] в качестве проводников использовалась также тонкая фольга из Al, Cu, Ti и Ni (длиной 20 мм, толщиной 5 мкм, шириной 1 мм). Взрыв производился в вакууме при напряжении конденсатора от 10 до 30 кВ и емкости 250 нФ. Мягкое рентгеновское излучение x -пинча взорванной фольги регистрировалось с временным разрешением 2 нс. Измерение выделившейся энергии показало, что при таких ЭВП в алюминиевые проводники вводится энергия W , которая составляет от 46 до 54% от энергии сублимации, в медные – от 42 до 53%, никелевые – от 21 до 29%, а в титановые – от 10 до 11% от энергии сублимации. Было установлено также, что начало кипения не соответствует спаду напряжения, а задержка, которую авторы истолковали как верхний предел метастабильного состояния расплава, составила 110, 350 и 315 нс для алюминиевой, никелевой и медной фольги соответственно. Но самое главное, что кипения титановой фольги экспериментально не наблюдалось.

В работе [18] сравнивался ЭВП проводников диаметром 0,23 мм и длиной 85 мм из Ti и Cu. Взрывы проходили на воздухе и в азоте при напряжении от 8 до 30 кВ и емкости конденсаторов от 2 до 4 мкФ. Было зафиксировано, что форма временной кривой напряжения титанового проводника сильно отличается от медного проводника: для титанового проводника характерно более высокое плато на кривой напряжения и более низкий пик перенапряжения. Увеличение энергии, введенной в проводник на стадии резистивного нагрева, увеличивало скорость расширения продуктов взрыва, что способствовало уменьшению среднего размера частиц разрушенного проводника. По мере увеличения напряжения от 9 до 24 кВ, то есть по мере приближения вводимой в Ti энергии к W_s , временные профили тока, плато на осциллограмме напряжения и пик перенапряжения повышались со сдвигом в область меньшего времени.

Эксперименты [15, 16], выполненные на вольфрамовых проводниках, также показали, что электрически взрывающийся проводник обычно становится двухфазным: плотная холодная сердцевина в окружении горячей плазмы. Состояние ядра и его скорость расширения коррелируют с количеством энергии, введенной во время фазы резистивного нагрева. Так, в [15] методами интерферометрии и световой эмиссии установлено, что при малом количестве выделившейся энергии, которой не хватает, чтобы расплавить проводник, сердцевина остается в твердом состоянии или частично распадается. При высоком уровне выделения энергии (больше

энергии испарения) сердцевина проводника находится в газоплазменном состоянии, а при промежуточном уровне (больше, чем энергия плавления, но меньше, чем энергия испарения) – распадается на микрокапли горячей жидкости или кластеры субмикронного размера. Эксперименты [15], выполненные на вольфрамовых проволочках, показали, что расширяющееся ядро проводника является однородным, если выделившаяся энергия W составляет более 4 эВ/атом, и неоднородным, с неоднородностями масштаба 100–200 мкм, если $W < 4$ эВ/атом. Показано также, что однородно испаряющийся проводник расширяется со скоростью от 0,1 до 1 км/с, а зависимость между осажденной энергией и скоростью расширения в этом случае является линейной функцией.

Таким образом, анализ литературных источников, в которых представлены экспериментальные результаты исследований режимов ЭВП, свидетельствует, что для реализации режимов ЭВП с полным однородным испарением рефракторных металлов, каковыми являются W и Ti, необходимо предпринимать специальные дополнительные меры, создавать определенные условия ввода энергии.

РЕАЛИЗАЦИЯ УСЛОВИЙ ОДНОРОДНОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ С ВЫСОКИМ УДЕЛЬНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Анализ литературных источников показывает, что увеличить количество вводимой в тугоплавкий проводник энергии до взрыва с целью обеспечения полного однородного испарения можно путем:

- увеличения скорости нарастания тока;
- нанесения на проводник тонких электроизоляционных покрытий или предварительного нагрева проводника;
- выбора полярности тока;
- изменения свойств окружающей среды;
- изменения геометрии проводника.

Увеличение скорости нарастания тока может повысить энергетическое осаждение до взрыва в силу инерционного характера испарения.

В работе [19] для девяти различных, взорванных в вакууме тугоплавких и легкоплавких металлов представлено прямое экспериментальное доказательство значительного увеличения энерговода в металлический проводник до спада напряжения за счет наносекундной скорости нарастания тока в проводнике. Наиболее сильное влияние изменение скорости оказывает на вольфрамовые проводники, для которых увеличение от 20 до 150 А/нс меняет ядро от твердого до кластерного состояния. В случае нерифракторных металлов, таких как

Ag, Al, Cu и Au, быстрый взрыв позволяет осаждать внутри металлического ядра до срыва напряжения энергию от 1,5 до 2,9 раза выше энтальпии испарения, а скорость нарастания тока ниже 20 А/нс дает от 2 до 3 раз меньше осажденной энергии, чем режим быстрого взрыва.

В [20] эксперименты проводились с одиночными проводниками Al, Cu и W. Использовался конденсатор 220 нФ, заряженный от 15 до 25 кВ, индуктивность регулировалась на уровне от 0,2 до 2 мкГн, что дало возможность варьировать скорость нарастания тока в пределах от 5 до 50 А/нс. Результаты также подтвердили увеличение энергетического ввода и более высокие скорости расширения взрывающегося проводника при переходе на большие скорости ввода энергии.

Влияние нанесения тонких диэлектрических покрытий на проводник достаточно емко рассмотрено в [21]. Использование проводников с изоляцией толщиной в несколько микрон (полиамид, полиуретан) может подавлять осевую неоднородную абляцию и продлевать продолжительность ее стадии, а также значительно уменьшать рост МГД неустойчивостей. Эффект диэлектрического покрытия настолько значителен, что большая часть материалов, обычно используемых в проволочной сборке Z-пинча, особенно вольфрам, может получать вводимую энергию до спада напряжения выше, чем энтальпия испарения. Поэтому практически во всех лабораториях, оснащенных высокоэнергетическими установками (LC1 pulser, Laboratory of Plasma Studies, Cornell University [22], Maxwell 40151-B, University of Nevada Reno [23], MAXWELL TG-70, Sandia National Laboratory [24], Pulsed current generator, Xi'an Jiaotong University [25]), в настоящее время этот способ реализации ЭВП активно исследуется.

В [22] проволочки вольфрама толщиной 25 мкм были изолированы полиамидным слоем толщиной 5 мкм, но изоляция была тщательно механически удалена из области контакта с электродами. Вводимая энергия в неизолированный проводник составляла от 35 до 62 МДж (от 0,7 до 1,2 эВ/атом), то есть проволочка осталась твердой или находилась в начале плавления. С помощью диэлектрического слоя, который может продлить фазу резистивного нагрева, отсрочив срыв напряжения, введенную энергию удалось увеличить в пределах от 120 до 210 МДж (от 2,4 до 4,2 эВ/атом). Авторы [25] провели эксперименты по электрическому взрыву вольфрамовых и платиновых проводников в вакууме и в воздухе. Шлирен-фотография и интерферометрия показали, что

непокрытый вольфрамовый проводник сохранял плотное ядро, которое расширялось равномерно в осевом направлении, но с довольно малой скоростью. Для вольфрамовой проволоки с полиамидным покрытием наблюдалась значительная осевая неоднородность: поверхностная часть проволоки была испарена, в то время как ядро находилось в плотном состоянии.

Автором работы [26] также представлены результаты экспериментов электрического взрыва вольфрамовой проволоки, которые показывают, что изоляционные покрытия оказывают существенное влияние на взрывные характеристики и позволяют ввести в проводник от 2 до 3 раз больше энергии до взрыва. Для повышения качества электрического контакта авторами использовались механический способ удаления металлического оксида с поверхности электродов и пайка вольфрамового проводника с электродами. Однако авторы делают вывод, что улучшенный электрический контакт оказывает не столь очевидное влияние на увеличение ввода энергии в отличие от полиамидного покрытия.

Следует заметить, что, несмотря на упомянутые выше и другие экспериментальные работы с покрытыми проводниками, механизмы формирования плазмы короны в присутствии изоляционного покрытия и причины пробоя через изолятор, вызывающие падение напряжения, пока непонятны, равно как и оптимальные параметры покрытий (материалы, толщина).

Авторами [27] представлены результаты экспериментов по взрыву в вакууме вольфрамовых проводников диаметром 30,5 мкм при максимальной плотности тока 140 MA/cm^2 и времени резистивного нагрева от 40 до 100 нс с предварительным прогревом образца, так и без него при положительной и отрицательной полярностях высоковольтного электрода. Показано, что пробой межэлектродного промежутка в случае положительной полярности высоковольтного электрода начинается с образования ярко светящегося пятна на поверхности проводника вблизи катода, а в случае отрицательной полярности – с образования ярких пятен на поверхности катода. Показано, что предварительный прогрев проводника позволяет увеличить энерговыход в керн за счет увеличения длительности резистивной стадии его нагрева.

В работе [28] исследовалось влияние предварительного нагрева вольфрамовой проволоки диаметром 30,48 мкм, длиной 20 мм и энерговыхода в диапазоне от 0 до 1 кДж/г на динамику ЭВП в вакууме. Проводник до взрыва прогревался в течение 1 часа постоянным током 150 мА до 1600 К. В результате предварительного

нагрева и взрыва при начальном напряжении конденсатора 10 кВ и отрицательной полярности высоковольтного электрода время завершения пробоя межэлектродного промежутка удалось задержать приблизительно на 40 нс по сравнению с режимом без предварительного прогрева. При этом за счет импульсного тока проволока нагревалась еще на 1000 К. При положительной полярности и задержке 5 нс дополнительный нагрев импульсным током составил всего 400 К. При более высоких напряжениях в диапазоне от 30 до 35 кВ время задержки пробоя мало зависело от полярности и равнялось порядка 10 нс, но в режимах с предварительным прогревом проволока успевала нагреться до 5600 К и полностью расплавиться.

Влияние полярности тока на динамику ЭВП в литературных источниках объясняется тем, что радиальное электрическое поле может влиять на эмиссию электронов, которая очень развита у тугоплавких металлов, и приводит к более раннему или более позднему началу ионизации паров и срыву напряжения в зависимости от направления поля [29]. Положительное радиальное электрическое поле, направленное внутрь от поверхности проводника, увеличивает потенциальный барьер для излучения электронов (уменьшает эмиссию электронов), тогда как отрицательное поле уменьшает этот барьер (увеличивает эмиссию электронов). Приводятся экспериментальные данные о сильном влиянии радиального электрического поля на энергетическое осаждение в тонких проводниках при ЭВП в вакууме. Взрыв металлической проволоки с положительной полярностью, когда радиальное электрическое поле «толкает» электроны внутрь проводника, дает в два раза больше энергии осаждения, чем взрыв с отрицательной полярностью, когда радиальное поле «вытесняет» электроны из проводника. Кроме того, осаждение энергии также подчиняется радиальному распределению, что можно объяснить влиянием радиального электрического поля на электронную эмиссию и на пробой паров вдоль поверхности проводника. Выполнен оригинальный эксперимент по ЭВП тонких вольфрамовых проводников при времени нарастания тока в несколько десятков наносекунд и различной полярности высоковольтного электрода. В дополнение к обычным измерениям тока и напряжения измерялся ток, проходящий через цилиндрический заземленный экран, расположенный вокруг взрывающегося проводника. Прохождение тока в экране было обнаружено только при ЭВП с высоковольтным электродом, имеющим отрицательный потенциал, что позволило авторам выдвинуть

предположение об эмиссии электронов с поверхности катода, откуда лавинообразный процесс распространяется вдоль поверхности проводника. С помощью систем скоростного фотографирования и видеосъемки также была выявлена зависимость поведения плазмы от полярности высоковольтного электрода. Эксперименты показали, что полярность высоковольтного электрода заметно влияет на контрастность свечения плазмы во время ЭВП: при отрицательной полярности образуются ярко выраженные, контрастные, симметричные плазменные струи и свечение в области высоковольтного электрода гораздо ярче, а при положительной полярности плазменные струи менее контрастны и свечение плазменного канала более равномерно. Выявленная закономерность проявлялась при электрическом взрыве вольфрамовых проволок всех диаметров (от 10 до 200 мкм).

Среда, в которой осуществляется ЭВП, посредством своей электрической прочности также может влиять на величину введенной в проводник энергии, а посредством химической активности – на состав получаемых продуктов ЭВП.

Например, в [30] электрический взрыв проводников из Al и Fe осуществляли в атмосфере воздуха при нормальных условиях, в атмосфере аргона при давлении от 1 до 6 атм, а также в смеси аргона с O_2 и CO_2 при давлении 2 атм. Было установлено, что при уменьшении длины взрываемого проводника и сохранении остальных условий взрыва удельная энергия, вводимая в проводник при взрыве, увеличивается, но ее рост ограничен величиной напряжения пробоя газа. Уменьшение давления Ar с 6 до 2 атм приводит к уменьшению максимального уровня вводимой в проводник энергии от 1,6 W_s до 1,2 W_s для Al, и от 1,8 W_s до 1,4 W_s для Fe.

Авторами работы [31] были исследованы электрические взрывы медных проводников в воздухе и воде под действием импульсного напряжения в несколько микросекунд. Результаты показывают, что существует явное различие между взрывом электрической медной проволоки в воздухе и воде, а накопленная энергия при взрыве медной проволоки в воде гораздо больше, чем в воздухе, особенно после начала испарения.

Анализ режимов взрыва проводников с высоким удельным сопротивлением показывает, что среда, в которой осуществляется ЭВП, посредством своей электрической прочности влияет на величину введенной в проводник энергии, а посредством химической активности – на состав получаемых продуктов ЭВП.

Актуальным является исследование ЭВП в углеродсодержащих средах, позволяющих получать карбиды тугоплавких металлов.

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ПРОВОДНИКА В ГАЗООБРАЗНЫХ УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ НА СИНТЕЗ КАРБИДОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

История синтеза карбидов металлов (Al_4C_3 , LaC_2 , TiC , ZrC , NbC , Ta_2C , MoC , Mo_2C и W_2C) в наноразмерном диапазоне с помощью ЭВП в газообразных углеводородах, таких как метан, этан, изобутан и ацетилен, берет начало с работ [32, 33]. Современные исследования ввиду изученной на сегодня динамики ЭВП и более развитой технической базы для его реализации в основном нацелены на решение вопросов производительности синтеза карбидов или комбинирования синтеза с другими технологическими процессами.

В работе [34] наночастицы карбида вольфрама получали путем взрыва вольфрамовой проволоки в метане с использованием метода оптической эмиссии в качестве диагностики. Установлено, что с увеличением внешнего давления внутри камеры и количества энергии, введенной во взрывающийся проводник, количество непрореагировавшей вольфрамовой фазы уменьшается, а интенсивность рентгеновских пиков кубических карбидов вольфрама (WC_{1-x}) и гексагональной фазы WC возрастает. Авторы объясняют это увеличением концентрации углерода при более высоком давлении и увеличением тепловой энергии с ростом W , что позволяет повысить скорость реакции между вольфрамом и углеродом. Также установлено, что размеры частиц, синтезированных при отрицательной полярности тока, относительно больше, чем частицы, полученные при положительной полярности.

В работе [35] в качестве газовой атмосферы для синтеза порошков карбидов металлов использовались смеси ацетилена и аргона, пропана и аргона при давлении 1,5 атм. Взрывались проводники из W, Ta, Ti и Al диаметром 0,2–0,5 мм и длиной 50–120 мм при варьировании введенной в проводник энергии W в диапазоне от 0,4 до 2,0 W_s (емкость накопителя энергии составляла от 1 до 5 мкФ; напряжение зарядки накопителя энергии – от 12,5 до 30 кВ; индуктивность разрядного контура – 0,58 мкГн).

Исследование фазового состава продуктов электрического взрыва вольфрамовых проводников в ацетилен-аргоновой среде показало, что полученные порошки содержат фазы β -WC

(WC_{1-x}), W₂C, α-W и β-W. С повышением введенной в проводник энергии и энергии дуговой стадии, а также при снижении степени разбавления ацетилена аргоном наблюдаются уменьшение количества карбида вольфрама W₂C и увеличение содержания более насыщенного углеродом фазы WC_{1-x}. Наоборот, к увеличению относительного выхода фазы ненасыщенного W₂C по отношению к WC_{1-x} привела замена ацетилена на пропан. Электрическая дуга, возникающая после собственно взрыва проводника, вызывает увеличение дисперсности получаемых порошков.

Рентгенофазовый анализ порошков, полученных при электрическом взрыве титановых проводников в ацетилене, разбавленном аргоном, показал, что они состоят только из карбида титана. Порошки, полученные при ЭВП в пропане, разбавленном аргоном, состоят из карбида TiC и металлического α-Ti.

Таким образом, выход насыщенных углеродом фаз карбидов возрастает, а содержание остаточного металла в продуктах взрыва уменьшается с уменьшением степени разбавления ацетилена аргоном, с ростом отношения атомов C/N в молекулах углеводородов и величины введенной в проводник энергии. Установлено также, что выход химических соединений зависит от их термической стабильности: наблюдается более высокий выход термически устойчивых карбидов вольфрама и титана по сравнению с менее устойчивым карбидом алюминия.

На основании полученных результатов авторы [35] приходят к выводу, что ЭВП в газовых средах приводит к образованию продуктов, в составе которых в значительных количествах сохраняются остаточные металлы, а карбиды имеют дефицит по углероду. Поэтому для увеличения выхода карбидов и получения фаз, более насыщенных углеродом, необходимо повышать давление в разрядной камере или использовать более плотные конденсированные среды, в которых при взрыве существенно увеличивается концентрация активных реагентов, – жидких углеводородов гексана C₆H₁₄, бензола C₆H₆, толуола C₆H₅CH₃ и декана C₁₀H₂₂.

К выводу о более продуктивных ЭВП в более плотных органических средах пришли и авторы [36], синтезировавшие наночастицы карбида молибдена MoC путем взрыва молибденового проводника в атмосфере метана при различных давлениях, а для повышения уровня науглероживания взрывающийся проводник покрывали графитопарафиновой смесью.

Аналогично в [37] наночастицы карбида вольфрама были получены методом ЭВП в различных углеродсодержащих средах. Высокоскоростная фотография, примененная во время взрыва, показала, что активность образования наночастиц была более высокой в атмосфере метана и парафина по сравнению с процессом образования наночастиц в чистой метановой атмосфере.

Интерес для промышленности представляет не просто получение наночастиц карбида, а технология получения функциональных покрытий на основе карбидов тугоплавких металлов.

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА ПРОВОДНИКОВ В УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ КАРБИДОВ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ

Анализ литературных источников показывает, что традиционно получение износостойких покрытий на основе монокарбидов проходит в два этапа: вначале отдельно получают порошки карбидов, а затем наносят их на упрочняемые поверхности. Для этого могут использоваться такие способы, как высокотемпературный электрохимический синтез из ионных расплавов [38] или электронно-лучевая наплавка [39].

Однако, согласно [40], наиболее коммерчески значимым и динамично развивающимся сегодня является газотермическое напыление (газопламенное и плазменное), которое позволяет наносить функциональные покрытия толщиной от 0,05 мкм и более и пористостью менее 2% на детали и оборудование со сложной конфигурацией поверхностей [41]. С точки зрения максимально высокого качества покрытия и энергетических параметров струи, нагревающей и ускоряющей напыление материала, следует выделить скоростное газопламенное напыление порошковых материалов с применением углеводородного газообразного топлива (HVOF), которое позволяет наносить на детали покрытия из карбидов вольфрама, титана и оксидной керамики [42].

Первые попытки нанесения твердосплавных покрытий путем ЭВП были предприняты около 50 лет тому назад. При этом либо взрывались специально изготовленные порошковые проволоочки, содержащие карбиды металлов, либо порошковые навески карбидов, которые подрывались металлическим проводником. Первый вариант был использован, например, в работе [43] для нанесения покрытия из молибдена, а в

работе [44] – для нанесения покрытия системы WC–Mo на детали ткацкого станка и режущий инструмент. Вторым вариантом с подрывом порошковых навесок из карбида тантала Ta₂C использовали авторы [45]. И если ранее единственно пригодными для упрочнения ЭВП логично считались внутренние цилиндрические поверхности деталей, то в настоящее время идет поиск технологических схем нанесения покрытий и на профильные, и плоские поверхности. Например, авторы [46] разработали с этой целью способ нанесения распылением непрерывно подаваемого порошка карбида вольфрама в ограничительной трубке. Результаты исследований показали, что в определенном оптимальном диапазоне расстояний между источником взрыва и поверхностью этим способом получают покрытие из расплавленных частиц порошка WC. И это покрытие является плотным и имеет более высокую прочность сцепления с подложкой. На расстоянии до поверхности около 1 мм морфология осаждения на покрытие происходит из паровой фазы, а на больших расстояниях часть расплавленных частиц начинает затвердевать, не достигнув поверхности, и осажается на нее в виде твердых частиц. Такое покрытие, естественно, имеет более низкую прочность сцепления с подложкой. При повышении начального напряжения диапазон расстояний до поверхности для получения качественных покрытий из паровой и жидкой фаз увеличивается.

Для анализа режимов электровзрыва проводников следует учитывать результаты, приведенные в работах [47, 48], где взрывался проводник – никелевый провод диаметром $d_n = 0,3$ мм и длиной $l_n = 140$ мм, $W = W_s$, подложка – латунная сетка, свернутая в цилиндр, диаметр подложки (обуславливающий расстояние от взрывающегося проводника) $d_c = 27$ мм. Использовали две вложенные цилиндрические подложки. Условия и результаты экспериментов сведены в табл. 2. Первый опыт №1.1 показывает, что после взрыва $n = 50$ проводников на внутренней подложке прибавка массы составила $m_1 = 220$ мг, а на внешней – $m_2 = 120$ мг. Во втором опыте №1.2 сетка дополнительно обернута фольгой. В следующих опытах варьировались часть введенной энергии W за счет изменения зарядного напряжения U_0 и длины проводника l_n , диаметр подложки d_c , масса проводника m_n и измерялась дополнительно прибавка массы на фольге m_f .

Анализ результатов, приведенных в табл. 2, показал, что при колебательном режиме разрядного тока $W = 2W_s$ масса покрытия меньше массы, полученной при согласованном режиме

$W = W_s$, но дисперсность и устойчивость покрытия больше при колебательном режиме. В работе [48] применен критериальный подход для определения режимов взрыва проводников в газовой среде.

Анализируя по результатам указанных выше работ достоинства и недостатки способа нанесения твердосплавных покрытий с помощью ЭВП в углеродсодержащих средах, который призван заменить в едином цикле обе стадии – получение тугоплавких карбидов и нанесение их на поверхность, нужно отметить следующее. Существующие сегодня способы получения тугоплавких карбидов, которые основаны на прямой реакции порошков металла или оксида металла с углеродом при нагревании в течение нескольких часов, являются энергоемкими, а высокие температуры синтеза (до 1800°С) затрудняют получение порошков карбидов в наноразмерном виде, так как в процессе термической деструкции дают активные атомы углерода. Напротив, при ЭВП происходит формирование частиц сферической формы, наноструктурированных по объему, что обеспечивает их высокую химическую активность. Энергозатраты на получение таких частиц ниже, так как энергия, которой хватает и на разрушение проводника, и на деструкцию углеводорода, вводится непосредственно в металл импульсно и объемно, а не с поверхности, поэтому расход энергии на нагрев окружающей среды относительно низок. Частицы формируются как за счет конденсации паровой фазы, так и за счет диспергирования жидкого металла. Причем долю металла, перешедшего в парообразное состояние, можно регулировать путем увеличения вводимой в проводник энергии, а не вступивший в реакцию свободный углерод можно использовать для упрочнения поверхности науглероживанием или включения углеродных onion-like структур, которые образуются в результате деструкции углеводородов, в состав карбидных покрытий. Для увеличения в нанопокровых количествах углерода луковичной структуры надо проводить одновременную непрерывную обработку углеродсодержащих сред. Подтверждением сказанному могут служить результаты, показывающие, что высокочастотная электроразрядная обработка углеводородных газов [49–51] позволяет синтезировать до 20 г/ч наноуглеродных частиц, подавляющее количество которых имеет луковичную структуру. Химическая чистота получаемого наноуглерода превышает 99%, а распределение частиц по размерам лежит в достаточно узком диапазоне – от 10 до 40 нм. Управление режимами обработки, которая

Таблица 2. Результаты экспериментов [47]

№ опыта	d_n , мм	l_n , мм	d_c , мм	n	m_n , мг	U_0 , кВ	C , мкФ	Покрытие	W	m_1 , мг	m_2 , мг	m_ϕ , мг	Дисперсность
1,1	0,3	140	27	50	4354	15	3	нестойкое	W_s	220	120		
1,2	0,3	140	27	50	4354	15	3	нестойкое	W_s	430	30	...	меньше
2	0,3	140	11	50	4354	15	3	нестойкое	W_s	1200		620	меньше
3	0,3	98	27	50	3048	18	3	стойкое	$2 W_s$	130		270	больше
4	0,3	98	11	50	3048	18	3	стойкое	$2 W_s$	400		...	больше

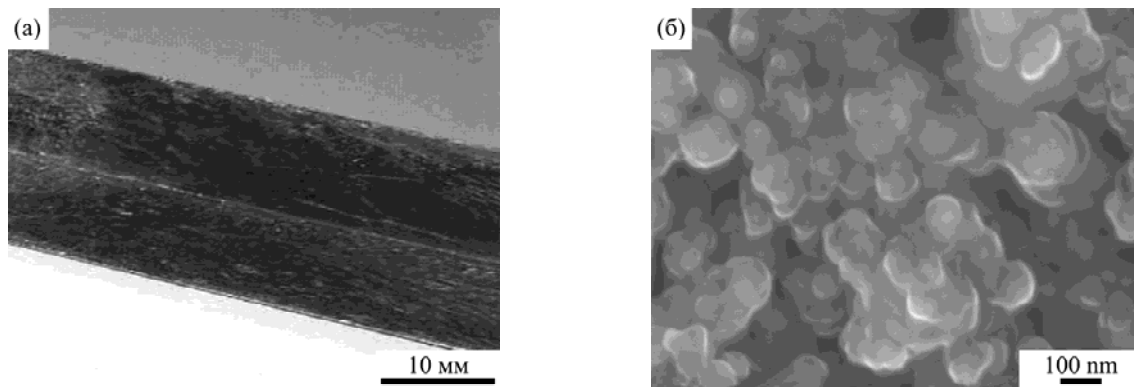


Рис. 1. Изображения наноструктурированного композиционного покрытия, полученные с помощью фотоаппарата (а) и электронного сканирующего микроскопа (б).

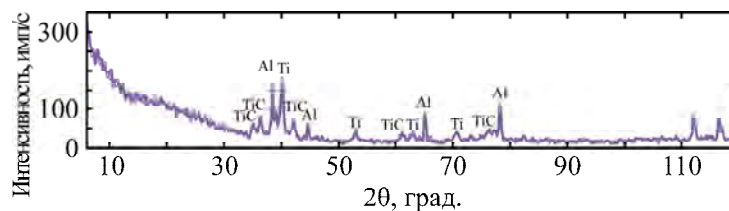


Рис. 2. Рентгеновская дифрактограмма обработанной поверхности алюминия, полученная с помощью рентгеновской трубки с медным анодом (длина волны характеристического излучения равна 0,154178 нм).

приводит к образованию луковичных структур, осуществляется посредством адаптивной системы управления силовым инвертором установки для получения наноуглерода [52]. Именно такой наноуглерод является качественным материалом для формирования функциональных поверхностей изделий и, как показано в работе [53], его можно наносить в наноразмерном виде на любые металлические поверхности, включая медь, не образуя с углеродом твердые растворы и карбиды.

Предложен способ получения композиционного покрытия металлических поверхностей, который позволяет ввести в место нанесения покрытия материалы и энергию, необходимые для получения композиционного покрытия, содержащего углеродные материалы с заданной наноструктурой, наноразмерные частицы металла и карбида металла. Покрытие наносится непосредственно на обрабатываемую металлическую поверхность и позволяет укреплять металлообрабатывающие инструменты и поверхности трения. Способ получения композиционного покрытия металлических поверхностей включает синтез углеродных наночастиц с помощью плазмы, которая образуется под воздействием электрических разрядов на углеродсодержащий газ из ряда алканов, и одновременное осаждение углеродных наночастиц на металлическую поверхность. Осаждение на металлическую поверхность углеродных наночастиц осуществляют одновременно с осаждением на нее частиц продуктов взрыва электрического проводника в углеродсодержащем газе. В межэлектродный промежуток

подают электрический проводник, который взрывается при осуществлении электрических разрядов между электродами. Электрические разряды производят с энергией по меньшей мере вдвое большей энергии сублимации электрического проводника. Предложенный способ позволяет обрабатывать как внешние, так и внутренние поверхности деталей диаметром от 5 мм, в которых длина больше внутреннего диаметра более чем на порядок.

Примером такой обработки является взрыв титанового проводника для нанесения покрытия на поверхность алюминия в углеродсодержащем газе. В результате действия импульсов разрядного тока, которые проходят по плазменному каналу, образованному продуктами взрыва титанового проводника и углеродсодержащего газа, на поверхности алюминия получено наноструктурированное композиционное покрытие, содержащее титан, карбид титана и наноуглерод (рис. 1). Рентгеновские дифрактограммы обработанной поверхности алюминия (рис. 2), полученные на дифрактометре ДРОН-3 (рентгеновская трубка с медным анодом – длина волны характеристического излучения равна 0,154178 нм), показали наличие пиков, соответствующих материалу поверхности – алюминию и покрытия – титана, карбидов титана. Наноуглерод, который является рентгеноаморфным и не отображается на рентгенограмме, обеспечивает черный или темно-серый цвет покрытия (рис. 1а). Углеродные глобулы на рис. 1б имеют темно-серый цвет, а наночастицы, содержащие титан и карбид титана, отличаются большей яркостью.

Таким образом, аналитический обзор методов электровзрывного получения твердосплавных износостойких наноразмерных материалов и функциональных покрытий показал, что такие методы являются перспективными, существуют развитая теория и практика электрического взрыва проводников, которые можно использовать при разработке новых способов получения наноразмерных покрытий. Дальнейшее развитие технологий получения твердосплавных износостойких наноразмерных функциональных покрытий, содержащих тугоплавкие металлы, их карбиды и наноуглеродные частицы, направлено на получение специальных наноструктур в составе покрытий, обеспечивающих заданные функциональные свойства этих покрытий. Перспективными являются исследования по получению углеродных onion-like структур в составе функциональных наноразмерных покрытий [53, 54].

ВЫВОДЫ

Проведенный анализ показал, что получение функциональных износостойких твердосплавных покрытий, содержащих тугоплавкие металлы, их карбиды и наноуглеродные частицы, которые используются для упрочнения рабочих поверхностей деталей машин и механизмов, является актуальной задачей. Одной из перспективных технологий получения таких покрытий является использование электрического взрыва проводников из тугоплавких металлов в углеродсодержащей газообразной среде.

С целью более глубокого изучения физических процессов электрического взрыва проводников, используемого в перспективных технологиях получения износостойких покрытий, проведен анализ последних исследований в области ЭВП по выбору режимов и условий электровзрыва проводников с высоким удельным сопротивлением.

Анализ литературных источников, в которых представлены экспериментальные результаты исследований режимов ЭВП, свидетельствует, что для реализации режимов ЭВП с полным однородным испарением рефракторных металлов, каковыми являются W и Ti, необходимо предпринимать специальные дополнительные меры, создавать определенные условия ввода энергии. Среда, в которой осуществляется ЭВП, посредством своей электрической прочности влияет на величину введенной в проводник энергии, а посредством химической активности – на состав получаемых продуктов ЭВП.

Рассмотрено влияние режимов электровзрыва проводника в газообразных углеродсодержащих средах на синтез карбидов тугоплавких металлов. Поскольку интерес для промышленности представляет не просто получение наночастиц карбида, а технология получения функциональных покрытий на основе карбидов тугоплавких металлов, рассмотрены вопросы получения композиционного покрытия металлических поверхностей.

Электровзрывные методы получения твердосплавных износостойких наноразмерных материалов и функциональных покрытий на их основе являются перспективными. Разработка методов получения наноразмерных покрытий базируется на развитой теории и практике электрического взрыва проводников. Дальнейшее развитие технологий получения твердосплавных износостойких наноразмерных функциональных покрытий с заданными функциональными свойствами требует проведения исследований по получению углеродных onion-like структур в составе функциональных наноразмерных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бафаев Д.Х. *Молодой ученый*. 2016, **20**, 121–124.
2. Самсонов Г.В., Витрянюк В.К., Чаплыгин Ф.И. *Карбиды вольфрама*. Киев: Наукова думка, 1974. 176 с.
3. Гарбузова А.К., Галевский Г.В., Руднева В.В., Ширяева Л.С. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2014, **1**(7), 34–39.
4. Оскомов К.В., Соловьев А.А., Работкин С.В. *Журнал технической физики*. 2014, **84**(12), 73–76.
5. Иваненков Г.В., Пикуз С.А., Шелковенко Т.А. *Обзор литературы по моделированию процессов электрического взрыва тонких металлических проволочек в вакууме*. М.: ФИАН, 2004. 26 с.
6. Chase W.G., Levine M.A. *J Appl Phys*. 1960, **31**(7), 1298.
7. Абрамова К.Б., Валицкий В.П., Вандакуров Ю.В. и др. *Доклады АН СССР*. 1966, **167**(4), 778–781.
8. Лебедев С.В., Савватимский А.И. *Успехи физических наук*. 1984, **144**(3), 215–250.
9. Колгатин С.Н., Лев М.Л., Перегуд Б.П. *Журнал технической физики*. 1989, **59**(9), 123–133.
10. Мартынюк М.М. *Журнал технической физики*. 1978, **48**(7), 1482–1493.
11. Sedoy V.S., Mesyats G.A., Oreshkin V.I., Valevich V.V. et al. *IEEE Trans Plasma Sci*. 1999, **27**(4), 845–850.
12. Romanova V.M., Ivanenkov G.V., Mingaleev A.R., Ter-Oganesyan A.E. et al. *Plasma Phys Rep*. 2015, **41**, 617–36.
13. Кривицкий Е.В. *Динамика электровзрыва в жидкости*. Киев: Наукова думка, 1986. 206 с.

14. Zhigalin A.S., Rousskikh A.G., Oreshkin V.I., Chaikovskiy S.A. et al. *J Phys Conf Ser.* 2014, **552**, 012027(1–6). doi:10.1088/1742-6596/552/1/012027.
15. Sarkisov G.S., Sasorov P.V., Struve K.W., McDaniel D.H. *J Appl Phys.* 2004, **96**, 1674–86.
16. Sarkisov G.S., Struve K.W., McDaniel D.H. *Phys Plasmas.* 2005, **12**(5), 052702–052709. doi: 10.1063/1.1883180.
17. Kaselouris E., Dimitriou V., Fitis I., Skoulakis A. et al. *Nat Commun.* 2017, **8**, Art. No 1713.
18. Zou Xiao-Bing, Mao Zhi-Guo, Wang Xin-Xin, Jiang Wei-Hua. *Chinese Phys B.* 2013, **22**(4), 045206 (1–4).
19. Sarkisov G.S., Struve K.W., McDaniel D.H. *Phys Plasmas.* 2004, **11**(10), 4573–4581. doi:10.1063/1.1784452.
20. Duselis P.U., Vaughan J.A., Kusse B.R. *Phys Plasmas.* 2004, **11**(8), 4025–4031.
21. Wu J., Li X.W., Mo Li, Li Y. et al. *J Phys D Appl Phys.* 2017, **50**, 403002 (1–15). doi: 10.1088/1361-6463/aa86a1.
22. Sinars D.B., Hu M., Chandler K.M., Shelkovenko T.A. et al. *Phys Plasmas.* 2001, **8**(1), 216–230.
23. Chandler K.M., Hu M., Sinars D.B., Shelkovenko T.A. et al. *Plasma Sci.* 2000, **3**(6), 139–145.
24. Sarkisov G.S., Rosenthal S.E., Struve K.W. *Phys Rev E.* 2008, **77**(5), 056406. doi:10.1103/PhysRevE.77.056406.
25. Li Y., Sheng L., Wu J., Li X.W. et al. *Phys Plasmas.* 2014, **21**(10), 102513. doi: 10.1063/1.4899042.
26. Wang K. *Physics of Plasmas.* 2017, **24**(2), 022702. doi:10.1063/1.4975650.
27. Русских А.Г., Бакшт Р.Б., Лабецкий А.Ю., Левашов П.Р. и др. *Физика плазмы.* 2006, **32**(10), 893–906.
28. Русских А.Г., Бакшт Р.Б., Лабецкий А.Ю., Левашов П.Р. и др. *Сборник статей «Физика экстремальных состояний вещества».* 2005, С. 152–155.
29. Beilis I.I., Baksht R.B., Russkikh A.G., Chaikovskii S.A. *IEEE 35th International Conference on Plasma Science.* Karlsruhe, Germany. 15–19 June 2008. doi: 10.1109/PLASMA.2008.4591067.
30. Tkachenko S.I., Barishpoltsev D.V., Ivanenkov G.V., Romanova V.M. et al. *Phys Plasmas.* 2007, **14**, 123502.
31. Zhou Qing, Zhang Qiao-gen, Zhang Jun, Zhao Junping, Ren Bao-zhong, Pang Lei. *IEEE Trans Plasma Science.* 2012, **40**(9), 2198–2204.
32. Johnson R.L., Siegel B. *J Electrochem Soc.* 1968, **155**(1), 24–28.
33. Cook E., Siegel B. *J Inorg Nucl Chem.* 1968, **30**(7), 1699–1706.
34. Debalina B., Kamaraj M., Chakravarthi S.R., Vasa N.J. et al. *Plasma Sci Technol.* 2013, **15**(6), 562–569.
35. Ильин А.П., Назаренко О.Б., Тихонов Д.В. *Вестник науки Сибири.* 2012, **3** (4), 80–88.
36. Sarathi R., Sugunakar R., Rashmi R., Tavarmani S. *IEEE Transactions on Plasma Science.* 2015, **43**(10), 3470–3475. DOI: 10.1109/TPS.2015.2426019.
37. Debalina B., Kamaraj M., Murthy B., Chakravarthi S. et al. *J Alloy Compd.* 2010, **496**(1–2), 122–128.
38. Малышев В.В. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования.* 2007, (6), 108–112.
39. Полетика И.М., Крылова Т.А., Тетюцкая М.В., Макаров С.А. *Известия Томского политехнического университета.* 2013, **323**(2), 108–110.
40. Данько К.А., Зорик И.В. *Авиационно-космическая техника и технология.* 2010, **71**(4), 47–53.
41. Кулик А.Я., Борисов Ю.С., Мнухин А.С., Никитин М.Д. *Газотермическое напыление композиционных порошков.* Ленинград: Машиностроение, 1989. 199 с.
42. Kulkarni J., Gutleber S., Sampath A., Goland W.B. et al. *Mater Sci Eng A.* 2004, **369**(1–2), 124–137.
43. Mihashi Y., Ito H., Kase K., Kawamura M. *J Metal Finish Soc Japan.* 1975, **26**(4), 164–167. doi:10.4139/sfj1950.26.164.
44. Дерibas А.А., Шаков В.П., Крейчман Б.М., Таран В.С. и др. *Физика горения и взрыва.* 1981, (2), 110–116.
45. Tamura H., Konoue M., Sawaoka A.B. *J Therm Spray Techn.* 1997, **6**(4), 463–468.
46. Zhu L., Qiao H., Zhang P., Shi M. *Gaodianya Jishu High Voltage Engineering.* 2012, **38**, 1039–1044.
47. Baklar' V.Yu., Terekhov A.Yu., Kuskova N.I. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2011, **47**(6), 504–509.
48. Khainatskii S.A. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2009, **45**(5), 397–404.
49. Богуславский Л.З., Винниченко Д.В., Назарова Н.С., Овчинникова Л.Е. *Вісник НТУ «ХПИ».* 2012, **958**(52), 25–30.
50. Boguslavskii L.Z., Vinnichenko D.V., Nazarova N.S., Adamchuk Yu.O. et al. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2019, **55**(3), 274–279.
51. Boguslavskii L.Z., Rud' A.D., Kir'yan I.M., Nazarova N.S. et al. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2015, **51**(2), 105–110.
52. Vinnichenko D., Nazarova N. *Conference Proceedings of 2018 IEEE 38th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO).* April 24–26, 2018 Kyiv, Ukraine. 2018, 515–520.
53. Adamchuk Yu.O., Boguslavskii L.Z., Sinchuk A.V. *Surf Eng Appl Electrochem.* 2017, **55**(1), 31–37.
54. Rud A.D., Kuskova N.I., Ivaschuk L.I., Boguslavskii L.Z., Perekos A.E. *Nanomaterials, InTech.* 2011, 211–230.

Summary

An analytical review of recent studies in the field of electrical explosion of conductors (EEC) has been conducted to select modes and conditions of high-resistivity EECs, which is used to obtain functional wear-resistant carbide coatings containing refractory metals, their carbides, and nanocarbon particles. The influence of the environment, in which the EEC is carried out, on the composition of the products obtained is analyzed.

The influence of the conductor electric explosion modes in gaseous carbon-containing media on the synthesis of refractory metal carbides is considered. The issues of obtaining functional composite coatings of metal surfaces are also discussed.

Keywords: electrical conductor explosion, nano-sized metal carbides, wear-resistant nano-coatings, carbon-containing gaseous media, nanocarbon coatings.