

СТАЦИОНАРНАЯ ВАКУУМНАЯ ДУГА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В.М. Хороших

Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", (Украина)

Поступила в редакцию 23.01.2003

В обзоре обобщены результаты изучения процессов генерации, фокусировки и сепарации потоков частиц в вакуумно-дуговых ионно-плазменных системах для обработки поверхностей. Описаны особенности характера прикатодных процессов в стационарной вакуумной дуге. Изучена капельная фаза эрозии катода. Исследовано пространственное распределение состава плазмы вакуумной дуги. Исследованы радиальные потоки частиц. Изучены плазмооптические свойства электромагнитных систем транспортировки плазмы. Показано, что они определяются, в основном, структурой электрического поля в плазме. Изучены условия формирования покрытий сложного состава в системах с электромагнитными полями. Получены данные для проектирования установок и разработки ряда новых технологических процессов получения ионно-плазменных покрытий.

ВВЕДЕНИЕ

С середины 70-х годов в технологии упрочнения инструментов и в машиностроении широко применяются защитные покрытия, получаемые конденсацией вещества из плазменного потока, генерируемого дугой низкого давления, в условиях ионной бомбардировки конденсата [1]. Преимущества вакуумно-дугового метода получения покрытий связаны с тем, что используемый тип газового разряда генерирует интенсивные потоки плазмы катодного материала. Так, например, это обстоятельство позволяет проводить обработку поверхностей ионами при подаче на изделие высокого отрицательного потенциала. Это обеспечивает эффективную очистку поверхности изделия от загрязнений и обуславливает высокие адгезионные свойства покрытий. Введение в рабочий объем химически активных газов позволяет получать покрытия на основе карбидов, оксидов и нитридов, большинство из которых обладает полезными физическими свойствами. Высокая эффективность процесса синтеза связана с тем, что оба компонента реакции, то есть и газ, и металл, в зоне конденсации находятся в активированном состоянии. Характер взаимодействия плазменных потоков с поверхностью и степень активации газа определяется параметрами плазмы в установке для получения покрытий. Поэтому, очевидно, что прогнозирование свойств конденсатов и в конечном итоге разработка надежно воспроизводимых технологических процессов, требует изучения явлений, которые определяют генерацию и динамику потоков частиц.

Основной объем результатов экспериментальных исследований вакуумной дуги получен для разрядов длительностью до нескольких секунд, в разрядных промежутках длиной до нескольких миллиметров.

Между тем, к особенностям дуги в установках для получения покрытий относятся стационарный режим горения, большая (до 0,5 м) длина разрядного промежутка и присутствие различных газов в разрядном промежутке. Эти особенности затрудняют использование опубликованных ранее данных для интерпретации результатов изучения процессов в вакуумно-плазменных установках. С другой стороны, стационарный режим работы таких установок позволяет с помощью простых экспериментальных методик уточнить ряд данных, которые необходимы для понимания физической природы вакуумной дуги. Таких как, например, данные о флуктуациях параметров плазмы и о структуре плазменных струй. Все перечисленное указывает на важность и актуальность исследований дугового раз-

ряда в плазменных системах для модификации поверхности. Актуальность развития методов поверхностной модификации свойств изделий особенно велика для Украины, которая испытывает острый дефицит легирующих материалов.

К настоящему времени накоплен обширный материал по свойствам потоков частиц и методам формирования плазменных потоков в вакуумно-дуговых системах для обработки поверхностей, однако опубликованные данные имеют разрозненный характер. Анализ опубликованных результатов посвящен настоящему краткий обзор, не претендующий на полноту, но дающий общее представление об обсуждаемой проблеме.

ЭРОЗИЯ КАТОДА И РАСХОД МАССЫ КАТОДНОГО МАТЕРИАЛА

Измерения расхода массы плазмообразующего катодного материала указывают на то, что значения коэффициентов электропереноса [2 - 8] отличаются от результатов измерений для импульсных разрядов [9 - 16] (табл.1).

Таблица 1

Коэффициенты электропереноса в вакуумных дугах

Материал катода	χ , мкг/К
Алюминий АВ0000 110[5]	120[15]
Медь электролитическая	65[3] 115[8] 130[15] 76[16] 70[13]
Молибден МЧВП	52[5] 47[8]
Цирконий сплав 100	51[5]
Титан ВТ-1-1	52[8] 39[3]
Хром ВХ2И	36[5] 40[8] 22[16]
Ниобий	38[5]
Графит АГ-1500	27[5] 17[8]

Экспериментально установлено, что эти отличия связаны с влиянием интегральной температуры на характер катодных процессов. Так, характерным для катода с рабочей температурой около 800 К являются существенно большие, чем для катодов с температурой в 400 К, размеры следов катодного пятна дуги. Скорость эрозии катода повышается почти в два раза [17].

Зависимости коэффициентов эрозии для титана, циркония и алюминия от давления газа для дуги, горящей в азоте или аргоне, указывают на то, что величина эрозии уменьшается с ростом давления для обоих газов [2 – 5].

Однако отличие зависимостей скорости эрозии от давления для азота и аргона весьма существенно. Наличие азота ведет к более значительному уменьшению скорости эрозии с ростом давления и этот эффект проявляется при более низком давлении (рис. 1) [3].

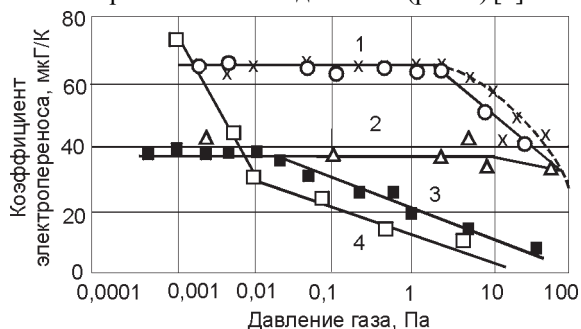


Рис. 1. Зависимости коэффициентов электропереноса от давления газа: 1 – медный катод (светлые треугольники – Cu – N₂; темные – Cu – Ag; пунктир – расчетная кривая из работы [73]); 2 – титановый катод (Ti – Ag); 3, 4 – титановый катод (Ti – N₂). Температура катода: 1 – 3 – 390 К, 4 – 800 К.

Характер эрозии катодов с ростом давления азота также изменяется: поверхность катода становится более гладкой, средний размер неоднородностей рельефа их поверхности уменьшается.

Возможными причинами уменьшения скорости эрозии катода в этих условиях могут быть: изменение характера движения катодного пятна, возврат частиц на катод за счет столкновений с частицами газа или образование на поверхности катода дугостойких соединений. Исследования динамики катодных пятен и оценки величины обратных потоков на катод указывают на незначительный вклад этих процессов в изменении скорости эрозии. Появление на катоде дугостойких соединений может являться основной причиной снижения эрозии. Для проверки предположения о возможности образования нитридов в данных условиях методом рентгеновской электронной спектроскопии проводился анализ поверхности титановых катодов, которые подвергали воздействию дуги в присутствии либо в отсутствие азота [5]. В случае, если азот специально не подается в объем разряда, интенсивность его линии находится на уровне линий большинства примесей, попадающих на поверхность катода. Однако в присутствии азота в системе в спектре фотоэлектронов регистрируется интенсивная линия азота. Этот результат говорит о возможности связывания азота в химических соединениях на катоде в условиях подачи газа в объем дугового разряда. Следует отметить что дугостойкие покрытия на основе нитрида титана применяют в элементах тер-

модерных установок для снижения степени загрязнения плазмы униполярными дугами.

Анализ соотношения эрозии частиц в нейтральной и ионной фазе указывает на то, что наблюдаемое уменьшение коэффициента эрозии катода происходит за счет снижения генерации нейтральных частиц (атомов и капель катодного материала) [2, 3].

Изучение влияния на скорость эрозии катода таких параметров, как ток дуги и величина магнитного поля, указывает на то, что их влияние проявляется через температуру катода [2, 3]. В сравнительно больших магнитных полях пробочной конфигурации происходит уменьшение эрозии за счет обратных потоков частиц на поверхность катода.

КАПЕЛЬНАЯ ФАЗА ЭРОЗИИ КАТОДА

Изучение капельной фазы эрозии катода показало, что максимальный диаметр капель зависит от материала катода и давления газа. Для титана он составляет 40 мкм в отсутствие азота и 30 мкм при давлении газа один Па [18 – 20]. Нижний предел размера капель находится на уровне 5 ÷ 20 нм [21].

Основное количество капель движется под малыми углами к плоскости катода (рис. 2) [18, 19].

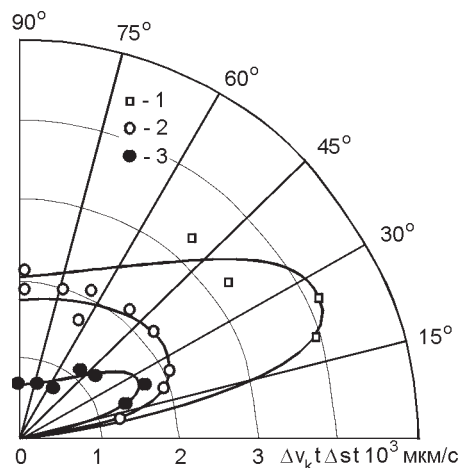


Рис. 2. Угловые распределения объема титановых капель, падающих на единицу поверхности в единицу времени $\Delta V_k/St$: 1 – $p = 10^{-3}$ Па; 2 – $p = 0,1$ Па; 3 – $p = 1$ Па.

Содержание капель уменьшается с ростом давления газа. Причиной уменьшения количества капель в азоте является образование слоя нитрида титана на поверхности катода. Поскольку массоперенос в капельной фазе уменьшается при росте температуры плавления катодного материала, то образование тугоплавкого слоя TiN на катоде ведет к уменьшению эрозии в капельной фазе.

Сравнение данных по определению доли заряженных и нейтральных частиц в продуктах эрозии катода с измерениями содержания капель в конденсатах свидетельствует о том, что основным компонентом нейтральной фазы эрозии катода являются капли [18].

Капли в стационарной дуге с титановым катодом, движутся со скоростями порядка нескольких метров в секунду [22]. Скорость капель с ростом давления азота увеличивается. Эти значения скоростей близки к результатам для стационарной дуги с жидким ртутным катодом и гораздо меньше, чем для импульсной дуги

на твердых металлических катодах. Движение капель в вакуумном дуговом разряде обусловлено воздействием давления плазмы на слой жидкого металла, расплавленного пятном дуги [23, 24]. С увеличением длительности горения дуги интегральная температура поверхности катода повышается, что ведет к росту объема металла, расплавляемого в окрестностях катодного пятна. При одинаковых разрядных токах объем расплава на катоде стационарной дуги выше, а скорость капле ниже, чем в импульсных разрядах, что хорошо согласуется с данными экспериментов.

При отрицательном потенциале образца происходит уменьшение количества капель малого (~1 мкм) размера на его поверхности [18]. Это связано с тем, что капли в плазме вакуумной дуги заряжаются отрицательно и могут отталкиваться поверхностью, находящейся под отрицательным потенциалом.

ПОТОКИ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ МАЛЫХ ДАВЛЕНИЙ ГАЗА В ОТСУТСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Изучение плазмы вакуумной дуги в области малых давлений газа в отсутствие магнитного поля указывает на то, что данные по составу плазмы для стационарной дуги с медным катодом [25, 26] близки к приведенным ранее результатам для квазистационарных разрядов [27, 28]. Что же касается материалов с худшей теплопроводностью, то расхождение результатов существенно (табл. 2) [29].

Таблица 2

Содержание ионов различной зарядности и их средние энергии в плазме вакуумной дуги (ток дуги – Fe, Cr, Ti, Cu, C, Al, Nb – 100 А, Mo – 170 А)

		Кратность заряда				
		1	2	3	4	5
Fe	$\frac{n_p}{n_i}, \%$	54	46	0,5	-	-
	$\frac{E_i}{Z}, \text{эВ}$	92	61	-	-	-
Cr	$\frac{n_p}{n_i}, \%$	16	68	14	2	-
	$\frac{E_i}{Z}, \text{эВ}$	73	37	34	-	-
Ti	$\frac{n_p}{n_i}, \%$	27	67	6	-	-
	$\frac{E_i}{Z}, \text{эВ}$	65	39	34	-	-
Cu	$\frac{n_p}{n_i}, \%$	38	55	7	0,5	-
	$\frac{n_{i2}}{n_i}, \%$ [16]	30	54	15	0,4	-
	$\frac{E_i}{Z}, \text{эВ}$	59	45	44	-	-
Al	$\frac{n_p}{n_i}, \%$	68	32	-	-	-
	$\frac{E_i}{Z}, \text{эВ}$	26	19	-	-	-
C	$\frac{n_p}{n_i}, \%$	98	2	-	-	-
	$\frac{E_i}{Z}, \text{эВ}$	22	15	-	-	-
Nb	$\frac{n_p}{n_i}, \%$	12	38	36	4	-
	$\frac{E_i}{Z}, \text{эВ}$	-	-	-	-	-
Mo	$\frac{n_p}{n_i}, \%$	3	33	42	19	3
	$\frac{n_{i2}}{n_i}, \%$ [16]	16	64	13	1,5	-
	$\frac{E_i}{Z}, \text{эВ}$	95	65	51	45	49

Отличия связаны с влиянием температуры катода на процессы генерации частиц. Установлено, что при повышении температуры поверхности катода происходит трансформация энергетических спектров ионов: появляются дополнительные максимумы и регистрируются группы частиц с энергией, не превышающей несколько электронвольт [17].

Изменения характеристик плазмы, а также характера и скорости эрозии катода при росте его температуры находят объяснение в рамках представлений о существовании на катоде дуги двух типов катодных пятен: быстро перемещающихся пятен первого рода, которые вызывают минимальную эрозию, и более медленных пятен второго рода, эрозия в которых гораздо выше [30, 31]. Катодные пятна первого рода существуют при наличии на поверхности катода неметаллических включений и слоев сорбированных газов [32, 33]. Катодные пятна второго рода существуют на чистой поверхности металла. Концентрация газов на катоде при их физической сорбции зависит от температуры катодной поверхности и с ростом ее в пределах диапазона проведенных измерений уменьшается в пятьсот раз. Это ведет к изменению типа пятна в соответствии с рассмотренным выше механизмом и к повышению скорости и характера эрозии катодного материала. В случае трансформации катодных пятен первого рода в пятна второго рода становятся существенными термические эффекты и, в частности, испарение материала катода. При этом плазменный поток, генерируемый катодным пятном дуги, движется через примыкающую к катоду мишень, состоящую из атомов катодного материала. Изменение параметров плазменного потока является следствием взаимодействия плазмы с атомами мишени. Влияние дугового тока на состав плазмы, также как и его влияние на скорость эрозии катода, проявляется через изменение температуры катода. Если при изменении тока дуги температура катода остается постоянной, то характеристики плазмы не меняются [34].

Масс-спектрометрические измерения, проведенные для титана, меди и алюминия, указывают на то, что угловые распределения токов отличаются для ионов различной кратности заряда (рис. 3) [35].

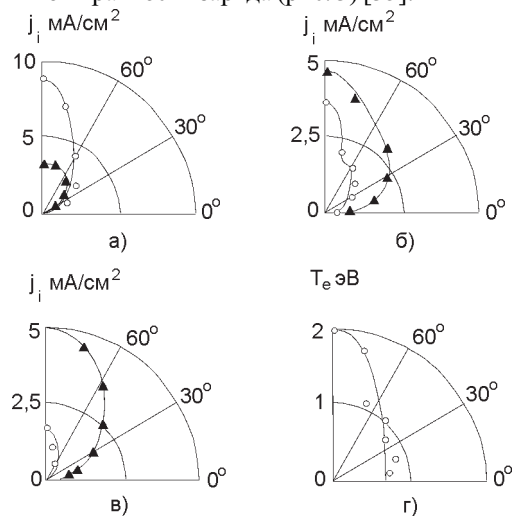


Рис. 3. Угловые распределения тока ионов различной кратности заряда и электронной температуры для дуги с алюминиевым (а), медным (б) и титановым (в, г) катодами. Кружки – однозарядные, треугольники – двухзарядные ионы.

С уменьшением кратности заряда иона угловая расходимость потока ионов также уменьшается. В связи с этим на катодах из материалов, характеризующихся высоким содержанием однозарядных ионов, например для графита, струя плазмы гораздо уже, чем для материалов с высоким содержанием многозарядных ионов, таких как титан и молибден. Характер угловых распределений ионов зависит от температуры катода и геометрии рабочей поверхности катода [36, 37]. Полученные результаты могут свидетельствовать о том, что процессы генерации ионов различной кратности заряда разнесены во времени и в пространстве, что хорошо согласуется с взрывной, нестационарной моделью катодного пятна. Энергия ионов и температура электронов также зависят от угловой координаты и уменьшаются в области малых углов к плоскости катода. Это связано с взаимодействием плазмы с капельной фазой эрозии катода [38].

В области малых давлений газа относительное движение электронного и ионного компонентов плазмы может привести к возбуждению бунемановской неустойчивости [39]. При наличии этой неустойчивости появляется турбулентная сила трения между электронами и ионами плазмы, приводящая к ускорению ионов в направлении от катода к аноду за счет передачи импульса от электронов к ионам через колебания в плазме. Значения энергии ионов титана и концентрации частиц в объеме удовлетворительно описываются соотношениями, получаемыми при анализе бунемановской неустойчивости.

ПЛАЗМА В ПРИСУТСТВИИ ГАЗА В РАЗРЯДНОМ ПРОМЕЖУТКЕ

При исследовании взаимодействия плазменных потоков с газовой мишенью установлено, что на параметры этих потоков заметное влияние оказывают свойства катодной поверхности и различный характер угловых распределений потоков ионов различной кратности заряда [40]. Для вогнутых катодов в плазме регистрируются атомарные ионы азота, содержание которых зависит от глубины впадины на катодной поверхности и растет с ее увеличением. Энергия атомарных ионов азота близка к энергии ионов титана. Поток ионов азота возрастает с приближением к поверхности катода. Этот факт позволяет сделать заключение о том, что ионы азота генерируются на катоде при горении пятна на включениях нитрида титана.

Масс-спектрометрические измерения, проведенные для плоских катодов в азоте и аргоне и вогнутых катодов в аргоне, говорят об отсутствии в плазменном потоке ионов газа, которые движутся вдоль оси системы. Однако при анализе частиц, движущихся в поперечном, относительно оси системы, направлении, ионы газа регистрируются во всем исследуемом диапазоне давлений (рис. 4) [41 – 43].

Зависимость токов от давления для ионов аргона и азота имеет два явно выраженных максимума различной интенсивности. Это связано с тем, что при различных давлениях ионы газа образуются при взаимодействии его частиц с ионами титана различной кратности заряда.

Взаимодействие ионов металла с газом ведет к его ионизации. Расчеты показывают, что накопление ионов

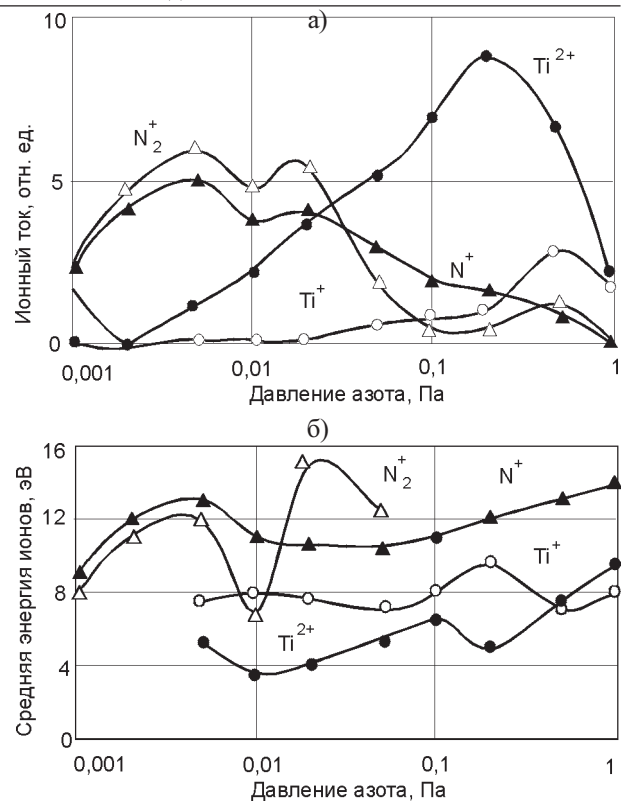


Рис. 4. Зависимость состава плазмы (а) и средней энергии ионов (б) от давления азота.

газа ведет к развитию неустойчивости ионно-звукового типа, имеющей пороговый характер [44]. По порядку величины оценка частоты колебаний плазмы хорошо совпадает с измерениями. С появлением неустойчивости и увеличением эффективной частоты столкновений электронов с ионами сила трения, действующая на ионы газа, должна скомпенсировать электрическую силу. В этом случае ионы газа останутся холодными и будут быстро накапливаться в объеме. В свою очередь резкое увеличение положительного объемного заряда приведет к появлению потенциальной ямы для электронов. Этими причинами объясняется внезапное появление немонотонной зависимости электрического потенциала от координаты, скоррелированное с появлением колебаний, регистрируемых зондом. С этим же эффектом связано резкое повышение напряжения на разряде за счет появления положительного анодного падения, которое наблюдается при достижении значений давления газа, соответствующего появлению колебаний в плазме. В режиме с положительным анодным падением на аноде наблюдаются характерные светящиеся области – анодные пятна.

ДИНАМИКА ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ И ПЛАЗМООПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Управление потоками плазмы тяжелых элементов целесообразно проводить с помощью магнитных полей порядка сотен эрстед, обеспечивающих замагничивание электронного компонента плазмы. Управление потоками металлической плазмы при наличии столь малых магнитных полей связано с плазмооптическими свойствами используемых систем [45 - 48]. В условиях замагниченности и азимутального дрейфа электронов поперек магнитного поля в электроно-холодной плаз-

ме возникает электрическое поле, вектор которого перпендикулярен вектору магнитного поля и вектору дрейфовой скорости электронов. Структура электрического поля определяется потенциалами электродов, пересекаемых магнитными силовыми линиями, которые в этом случае являются электрическими эквипотенциалами. В плазмооптических системах производят фокусировку и поворот плазменных потоков с целью сепарации заряженных и нейтральных компонентов плазмы [49-63]. Исследования фокусировки потоков плазмы показали, что сложный характер зависимости параметров плазмы от магнитного поля связан с зависимостью состава плазмы и средней энергии ионов от угловой координаты, а также с изменением структуры электрического поля, определяемое изменением соотношения магнитных полей катушек, стабилизирующего и фокусирующего устройств [64].

Анализ энергии и состава ионного компонента плазмы на оси системы не выявил существенных отличий в характере зависимостей свойств плазмы от давления газа в отсутствие и при наличии магнитного поля. Однако для радиальных плазменных потоков влияние магнитного поля весьма существенно. Наличие магнитного поля ведет к заметному росту содержания ионов азота, движущихся по нормали к оси разряда (рис. 5) [41].

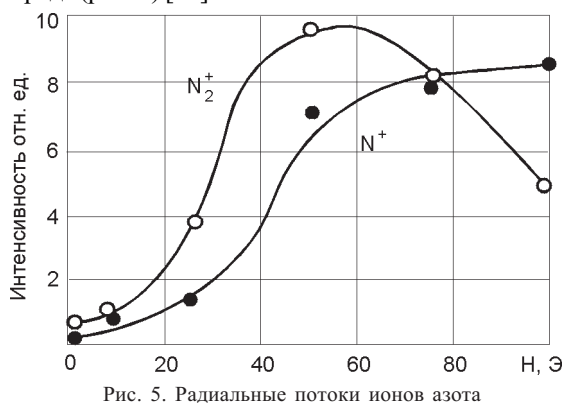


Рис. 5. Радиальные потоки ионов азота

Повышение содержания ионов газа в магнитном поле связано с увеличением эффективности взаимодействия замагниченных электронов плазмы с частицами газа [65].

Результаты теоретических расчетов движения иона в системе, образованной слабо сопряженными полями зеркальной и тороидальной конфигурацией, применяемой для очистки плазмы от капель, говорят об определяющей роли электрического поля в транспортировке частиц в системе [66]. Хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными наблюдается также для зависимости выходного тока от потенциала стенки тороидального плазмоведа и для оценки прохождения частиц входного участка с полем зеркальной конфигурации. Это указывает на то, что предложенная теоретическая модель может быть использована при расчете таких плазмооптических систем.

Транспортировка плазмы в криволинейном плазмоведе обеспечивает наиболее полную ее очистку от макрочастиц. Вместе с тем большие потери ионов на стенках плазмоведа, громоздкость и сложность в изготовлении системы ограничивает ее практическое применение

в технологии покрытий. В этой связи представляют интерес устройства с осесимметричными магнитоэлектрическими транспортирующими полями [67]. В таких системах для подавления потока макрочастиц применяются перехватывающие экраны. Максимальное прохождение заряженных частиц обеспечивается путем выбора структуры магнитного и, соответственно, электрического поля в аноде системы.

ПРИМЕНЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ДУГОВОГО РАЗРЯДА НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

Системы фокусировки плазменного потока и устройства для очистки плазмы от капельной фазы эрозии катода широко применяют для получения различного рода покрытий. Фокусирующие системы применяют, в частности, для получения защитно-декоративных покрытий на основе нитридов титана и молибдена. Устройства с сепарацией плазмы применяют для получения оптических и антикоррозионных покрытий. Сравнение свойств конденсатов с параметрами частиц в плазме свидетельствуют о том, что наиболее активными частицами газа являются его ионы. Значения давления газа и напряженности магнитного поля, соответствующие максимальному содержанию ионов газа в плазме, соответствуют максимальному выходу реакций синтеза его соединений [68].

Повышенное содержание ионов газа в радиальных плазменных потоках позволяет предложить ряд новых методов обработки поверхностей, основанных на этом явлении. Так, с применением аргона, ионы которого обладают высоким коэффициентом распыления, возможна реализация комбинированного метода, сочетающего положительные качества магнетронного распыления и вакуумно-дугового осаждения (рис. 6) [69].

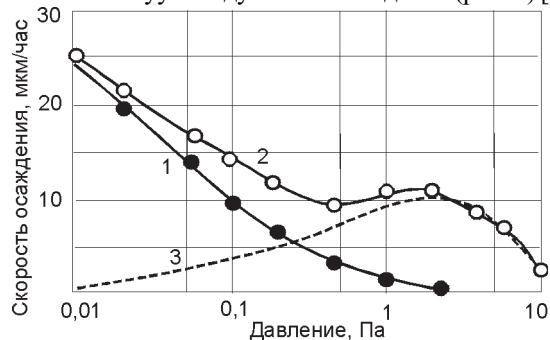


Рис. 6. Влияние аргона на скорость осаждения покрытий: 1 — потенциал на мишени отсутствует, 2 — потенциал мишени — 650 В, 3 — разность кривых 2,1.

С применением азота в радиальных потоках можно проводить как азотирование поверхностей, так и осаждение нитридных покрытий (рис. 7) [70].

На рис. 8 представлены характеристики процесса осаждения покрытий. Приведенные зависимости свидетельствуют о том, что в режиме с положительным анодным падением, несмотря на значительное снижение ионного тока на подложку, происходит существенное увеличение скорости конденсации покрытия. Этот эффект связан, по-видимому, с тем, что в данном режиме горения разряда за счет увеличения напряжения на дуге происходит сильное сжатие плазменного потока в прикатодной области [54], обеспечивающее его эффективную транспортировку

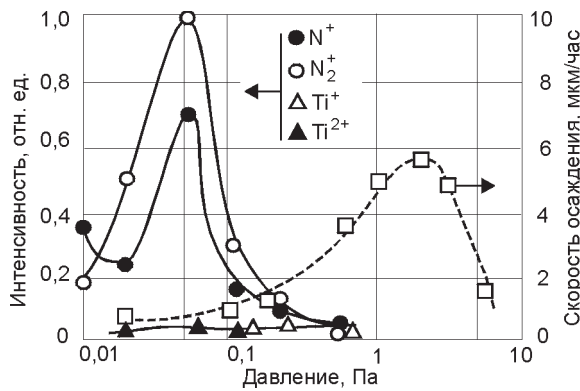


Рис. 7. Влияние давления азота на радиальные потоки частиц на выход устройства.

Приведенные характеристики процесса осаждения покрытий в режиме с положительным анодным падением потенциала показывают, что данная методика получения покрытий обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными технологиями [71].

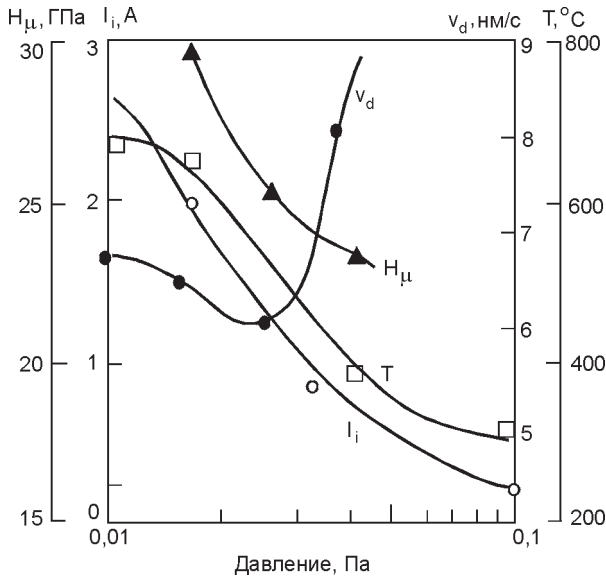


Рис. 8. Ионный ток (I_i), скорость осаждения покрытия (v_d), температура подложки (Т) и микротвердость (H_μ) покрытия в функции давления азота (р).

Некоторые данные, полученные в результате проведенных исследований, уже сейчас используются в установках для осаждения покрытий, которые обладают высокими эксплуатационными характеристиками [72].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, к настоящему времени проведен обширный комплекс исследований стационарного дугового разряда низкого давления, включающий исследования приэлектродных явлений, процессов в объеме разрядного промежутка и на поверхности конденсации потоков плазмы. Исследования проведены в широком диапазоне параметров разряда: для различных катодных материалов; в высоком вакууме и в присутствии различных газов; в отсутствие и при наличии магнитного поля. Полученные результаты представляют собой научную базу и образуют физические основы процессов формирования потоков частиц в системах для плазменной обработки поверхностей. Установлено, что

при анализе явлений в стационарном дуговом разряде низкого давления следует учитывать взаимосвязь процессов на электродах и в разрядном промежутке, а также взаимодействие различных групп частиц друг с другом. Результаты исследований используются в проектировании установок и в разработке новых технологических процессов получения ионно-плазменных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Толоч В.Т., Падалка В.Г. Методы плазменной технологии высоких энергий//Атомная энергия.-1978.-Т. 44.-С. 476-479.
2. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М., Брень В.Г. Исследование эрозии катода стационарной вакуумной дуги: Препр./ХФТИ, ЦНИИатоминформ; 84-6.-М.: 1984.-23 с.
3. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Исследование влияния давления газа в объеме на прикатодные процессы стационарной вакуумной дуги // ТВТ.-1984.-Т. 22, № 4.-С. 650-654.
4. Аксенов И.И., Хороших В.М. О влиянии условий горения разряда на эрозию катода стационарной вакуумной дуги.//Научно-технический сборник "Вопросы атомной науки и техники". Сер.: Общая и ядерная физика.-1984.-Вып. 3 (28).-С. 52-56.
5. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Першин В.Ф., Шпилинский Л.Ф. Об эрозии катода дуг и низкого давления. // ТВТ.-1986.-Т. 26, № 3.-С. 441-444.
6. Хороших В.М. Катодный узел электродугового источника плазмы // Вопросы атомной науки и техники; вакуум, чистые материалы, сверхпроводники.-1999.-Вып.2(10),.-С. 6-9.
7. Аксенов И.И., Брень В.Г., Коновалов И.И., Хороших В.М. О влиянии теплового режима катода на характеристики электродугового источника плазмы. // Тезисы докладов Всесоюзной конференции "Новые технологии и робототехнические комплексы при производстве авиатехники".-Харьков.-1990.-С.30-31.
8. Kimblin C.W. Erosion and ionization in the cathode spot regions of vacuum arcs // J. Appl. Phys.-1973.- Vol. 44, № 7.-P. 3074-3081.
9. Кимблин С.В. Ионные токи и электродные явления в вакуумной дуге.// ТИИЭР.-1971.-Т.59, № 4.-С. 121-130.
10. Башаров Р., Гавриловская Е.Н., Малкин О.А., Трехов Е.С. Исследование катодных пятен импульсного разряда между параллельными электродами.// ЖТФ.-1965.-Т. 35, Вып. 10.-С. 1853-1859.
11. Rakhovskii V.I. Experimental study of the dynamics of cathode apots developoptaent // IEEE Transactions on Plasma Science.-1976.-Vol. PS-4, № 2.-P. 81-102.
12. Rondeel W.G.J. Cathodic erosion in the vacuum arc// J. Phys. D: Appl. Phys.-1973.-Vol.6, № 14.-P. 1705-1711.
13. Reece M.P. The vacuum switch. Part I. Properties of the vacuum arc. // Proc. IEE.-1963.-Vol. 110, № 4.-P. 793-811.
14. Зыкова Н.М., Канцель В.В., Раховский В.И., Селиверстова И.Ф., Устинец А.П. Динамика развития катодной и анодной областей электрической дуги. 1. Исследование поведения катодных и анодной областей при пониженных давлениях и в вакууме // ЖТФ.-1970.-Т. 40, вып. 11.-С. 2361-2367.
15. Плюто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т. Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг. // ЖЭТФ.-1964.-Т. 47, № 2. С. 494-507.
16. Rondeel W.G.J. Investigation of the ions emitted from a copper vapour arc in vacuum // J. Phys. D: Appl. Phys.-1974.-Vol. 7, № 4.-P. 629-634.
17. Аксенов И.И., Брень В.Г., Коновалов И.И. и др. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. II. Влияние интегральной температуры катода // ТВТ.-1983.-Т. 21, № 4.-С. 646-651.
18. Аксенов И.И., Кудрявцева Е.Е., Кунченко В.В., Падалка В.Г., Попов А.И., Хороших В.М. Исследование влияния давления газа в объеме на параметры капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги: Препр./ХФТИ. ЦНИИатоминформ; 84-18. М.: -1984.-17 с

19. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Кудрявцева Е.Е., Хороших В.М. Исследование капельной фазы эрозии катода стационарной вакуумной дуги // ЖТФ.-1984.-Т. 54, вып. 8.-С. 1530-1533.
20. Хороших. Об эрозии катода стационарной вакуумной дуги в капельной вазе // Материалы Международной конференции по физике радиационных повреждений и радиационного материаловедения. – Алушта (Украина).-2000.- С. 57-61.
21. Гасилин В.В., Мирошниченко Ю.Т., Хороших В.М. О минимальном размере капель, генерируемых стационарной вакуумной дугой // Источники и ускорители плазмы.-Харьков: Изд-во ХАИ, 1986.-С. 131-133.
22. Кудрявцева Е.Е., Осипов В.А., Хороших В.М. Измерение скорости капель, генерируемых катодным пятном вакуумной дуги // Ионно-плазменные установки для технологических целей.-Харьков: Изд. ХАИ, 1988.-С. 11-16.
23. Hurley R.E., Parnell T.M. Field emission from metal particles in a vacuum gap // Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D).-1969.-Vol.2, № 2.-P.881-888.
24. Juttner B. Erosion craters and arc cathode spots in vacuum // Beitrage Plasmaphysik.-1979.-Bd.19, h.1.-S. 29-48.
25. Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.И. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги. II // ЖТФ.-1977.-Т. 47, вып. 7.-С. 1491-1495.
26. Лунев В.М., Падалка В.Г., Хороших В.М. Применение однопольного масс-спектрометра для исследования ионного компонента плазменного потока, генерируемого вакуумной дугой // ПТЭ.-1976.-№ 5.-С.189-190
27. Плюгто А.А., Рыжков В.Н., Капин А.Т. Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг. // ЖЭТФ. - 1964. - Т. 47, № 2. С. 494-507.
28. Davis W.D., Miller H.C. Analysis of the electrode products emitted by dc arcs in a vacuum ambient // J. Appl. Phys.-1969.-Vol. 40, № 5.-P. 2212-2221
29. Аксенов И.И., Хороших В.М. Потоки частиц и массоперенос в вакуумной дуге. Обзор / ЦНИИАтоминформ; М.: 1984. – 57 с.
30. Rakhovskii V.I. Experimental study of the dynamics of cathode apots developoatent // IEEE Transactions on Plasma Science.-1976.-V. PS-4, № 2.-P. 81-102.
31. Любимов Г.А., Раховский В.И. Катодное пятно вакуумной дуги // УФН.-1978.-Т. 125, вып. 4.-С. 665-706.
32. Проскуровский Д.И., Пучкарев В.Ф. Образование новых эмиссионных центров на катоде в процессе коммутации электрического тока в вакууме. 1. Закономерности образования новых эмиссионных центров // ЖТФ.-1979.-Т. 49, вып. 12.-С. 2611-2618.
33. Проскуровский Д.И., Пучкарев В.Ф. Образование новых эмиссионных центров на катоде в процессе коммутации электрического тока в вакууме. 2. Проявление установленных закономерностей в вакуумных разрядах // ЖТФ.-1979.-Т. 49, вып. 12.-С. 2619-2622.
34. Аксенов И.И., Брень В.Г., Осипов В.А., Хороших В.М. Исследование плазмы стационарного вакуумного дугового разряда. I. Формирование потоков плазмы // ТВТ.-1983.-Т. 21, № 2.-С. 214-220.
35. Хороших В. М., Аксенов И.И., Коновалов И.И. О структуре плазменных струй, генерируемых катодным пятном вакуумной дуги // ЖТФ.-1988.-Т. 58, вып. 6.-С. 1220-1221.
36. Аксенов И.И., Белоус В.А., Коновалов И.И., Осипов В.А., Падалка В.Г., Сафонов В.И., Хороших В.М. Угловое распределение потока ионов в плазме стационарной вакуумной дуги // Ионно-плазменные установки для технологических целей.-Харьков: Изд. ХАИ.-1988.-С. 3-10.
37. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M., Angular distributions of ions in a plasma stream of steady-state vacuum arc. // Proc. 18-th ISDEIV.- Eindhoven (The Netherlands).-1998.-P. 211-214.
38. Voxman R.L., Goldsmith S. The interaction between plasma and macroparticles in a multicathode-spot vacuum arc // J. Appl. Phys.-1981.-Vol. 52, № 1.-P. 151-159.
39. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Падалка В.Г., Сизоненко В.Л., Хороших В.М. Неустойчивости в плазме вакуумной дуги при наличии газа в разрядном промежутке. I // Физика плазмы.-1985.-Т. 11, вып. 11.-С. 1373-1379.
40. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M., The influence of nitrogen on the erosion plasma ion component in a vacuum-arc sources // Proc. 18 ISDEIV.-Vol. 2.-Eindhoven (The Netherlands).-1998.-P. 573-576.
41. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M., Radial ion flows in a vacuum – arc plasma // Proc. 17-th ISDEIV.-Berkley (USA).-1996.-P. 900-903.
42. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Осипов В.А., Хороших В.М. Масс-спектрометрические исследования плазменных потоков в линейной плазмооптической системе // Сб. тезисов докл. I Вс. симпозиума “Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов”, Саратов.- 1988.-М.-Информэлектро.-С. 34-35.
43. Аксенов И.И., Осипов В.А., Тимошенко А.И., Хороших В.М. Анализ ионного состава плазмы в вакуумно-дуговой установке с радиальным плазменным потоком // Тезисы докладов Всесоюзной конференции “Новые технологии и робототехнические комплексы при производстве авиатехники”.-Харьков.-1990.-С.5-6.
44. Аксенов И.И., Коновалов И.И., Падалка В.Г., Сизоненко В.Л., Хороших В.М. Неустойчивости в плазме вакуумной дуги при наличии газа в разрядном промежутке.2 // Физика плазмы.-1985.-Т. 11, вып. 11.-С. 1380-1384.
45. Морозов А.И. Фокусировка холодных квазинейтральных пучков в электромагнитных полях // ДАН СССР.-1965.-Т. 163, вып. 6.-С. 1363-1367.
46. Морозов А.И., Лебедев С.В. Плазмооптика // В кн.: Вопросы теории плазмы. Вып. 8.-М.: Атомиздат, 1974.-С. 247-260.
47. Gabor D. A space-charge lens of the focusing of ion beams // Nature.-1947.-Vol. 160, № 4055.-P. 89-91.
48. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Формирование потоков металлической плазмы: Обзор. / ЦНИИАтоминформ; М.: 1984. – 83 с.
49. Хороших В.М. Исследование плазмооптических методов управления потоками плазмы вакуумной дуги: Дис...канд. Физ.-мат. наук: 01.04.08.-Харьков, 1979.-151 с.
50. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Фокусировка потока металлической плазмы, генерируемой стационарным электро-дуговым ускорителем с автостабилизацией катодного пятна // Материалы 4-ой Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям и ионным инжекторам.-М.: ВНИИЦ.-1978.-С. 375-376.
51. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Толоч В.Т., Хороших В.М. Фокусировка потока металлической плазмы, генерируемой стационарным электродуговым ускорителем / В кн.: Источники и ускорители плазмы. Вып. 3, Харьков, изд-во ХАИ, 1978, с. 45-50.
51. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Толоч В.Т., Хороших В.М. Фокусировка потока металлической плазмы, генерируемой стационарным электродуговым ускорителем / В кн.: Источники и ускорители плазмы. Вып. 3, Харьков, изд-во ХАИ, 1978, с. 45-50.
52. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Толоч В.Т., Хороших В.М. Экспериментальное исследование плазмооптической фокусировки потока металлической плазмы. //Источники и ускорители плазмы.-Вып. 3.-Харьков, изд-во ХАИ.-1978.-С. 51-55.
53. Аксенов И.И., Брень В.Г., Падалка В.Г., Хороших В.М. О распределении потенциала плазмы стационарной вакуумной дуги // Тезисы докладов 4-ой Всесоюзной конференции по физике низкотемпературной плазмы.-Т. 2.-Л.: Изд-во ЛИЯФ.-1983.-С. 93-94.
54. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Толоч В.Т., Хороших В.М. Исследование движения потоков плазмы вакуумной дуги в линейной протяженной плазмооптической системе //Физика плазмы. – 1980.-Т. 6, вып. 4.-С. 918-924.
55. Аксенов И.И., Осипов В.А., Падалка В.Г., Хороших В.М. Управление диаграммой направленности плазменных потоков, генерируемых электродуговыми ускорителями // Источники и ускорители плазмы.-Вып. 4.-Харьков: Изд-во ХАИ.-1980.-С. 19-23.

56. Аксенов И.И., Белоус В.А., Падалка В.Г., Хороших В.М. Транспортировка плазменных потоков в криволинейной плазмооптической системе // Физика плазмы.-1978.-Т. 4, вып. 6.-С. 758-763.
57. Аксенов И.И., Белоус В.А., Падалка В.Г., Хороших В.М. Устройство для очистки плазмы вакуумной дуги от макрочастиц // ПТЭ.-1978.-№ 5.-С. 236-237.
58. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Хороших В.М. Транспортировка стационарных потоков металлической плазмы в криволинейных плазмооптических системах / / Тезисы докладов 4-ой Всесоюзной конференции по плазменным ускорителям и ионным инжекторам.-М.: ВНИИЦ ГКНТ.-1978.-С. 375.
59. Аксенов И.И., Падалка В.Г., Репалов Н.С., Хороших В.М. Исследование движения плазменного потока в криволинейной плазмооптической системе // Физика плазмы.-1980.-Т. 6, вып. 2.-С. 312-317.
60. Anders S., Anders A., Dickinson M.R., MacGill R.A., Brown S-shaped magnetic macroparticle filter for cathodic arc deposition // IEEE Transaction on Plasma Science.-1997.-Vol. 25, № 5.-P. 670-674.
61. Witke T., Schuelke T., Schultrich H., Siemroth P., Vetter J. Comparison of filtered high-current pulsed arc deposition I. (phi – HCA) with conventional vacuum arc methods // Surf. and Coat. Technol.-2000.-Vol. 126.-P. 81-88.
62. Boxman R.L., Zhitomirsky V., Alterkop B., Gidalevitch E., Beilis I., Keidar M., Goldsmith S. Recent progress in filtered vacuum arc deposition // Surf. and Coat. Technol.-1996.-Vol. 86-87.-P. 243-253.
63. Bilec M., Anders A., Brown I.G. Characterization of linear venitan-blind macroparticle filter for cathodic vacuum arcs // IEEE Transaction on Plasma Science.-1999.-Vol. 27, № 4.-P. 1197-1202.
64. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M., Charge composition and ion energy in the plasma of magnetically focused vacuum-arc source // Proc. 18 ISDEIV.-Vol. 2.-Eindhoven (The Netherlands).-1998.-P. 570-572.
65. Аксенов И.И., Антуфьев Ю.П., Брень В.Г., Падалка В.Г., Попов А.И., Хороших В.М. Влияние замагниченности электронов плазмы вакуумной дуги на кинетику реакций синтеза нитридысодержащих покрытий // ЖТФ.-1981.-Т.51, вып. 2.-С. 303-309.
66. Aksenov I.I., Belokhvostikov A.N., Padalka V.G., Repalov N.S., Khoroshikh V.M. Plasma flux motion in a toroidal plasma guide // Plasma Physics and Controlled Fusion.-1986.-Vol. 28, № 5.-P. 761-770.
67. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M. Filtering shields in vacuum-arc plasma sources // Proc. TATF'98. – Regensburg (Germany).-1998.- P. 283-288.
68. Аксенов И.И. Антуфьев Ю.П., Брень В.Г., Хороших В.М. Влияние давления газа в реакционном объеме на процесс синтеза нитридов при конденсации плазмы металлов // Химия высоких энергий.-1986.-Т. 20, № 1.-С. 82-86.
69. Хороших В.М. Формирование ионно-плазменных покрытий при пониженных тепловых потоках в зону конденсации // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники 1999.- Вып. 2(10).-С. 40-49.
70. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M. Treatment of materials in radial low-pressure arc plasma stream//Proc. TATF'98.– Regensburg (Germany).-1998.-P. 295-298.
71. Aksenov I.I., Khoroshikh V.M. A low-pressure steady-state arc with a positive anode drop potential and its use in coating processes // Proc. 18 ISDEIV.-Vol. 2.-Eindhoven (The Netherlands).-1998.-P. 577-580.
72. Плазменное напыление при производстве авиационной техники и режущего инструмента. Учебное пособие / Костюк Г.И., Аксенов И.И., Приезжев В.Г., Хороших В.М., Цыбин А.С.-Харьков: ХАИ,1988.-103 с
73. Emtage P.R. Interaction of the cathode spot with low pressure of ambient gas//J. Appl. Phys. – 1975. – Vol. 46, № 9. – P.R.P. 3809 – 3816.

**СТАЦИОНАРНА ВАКУУМНА ДУГА В
ТЕХНОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ ОБРОБКИ
ПОВЕРХОНЬ
В.М. Хороших**

В огляді узагальнені результати вивчення процесів генерації, фокусування і сепарації потоків частинок у електродугових іонно-плазмових системах для обробки поверхонь. Описано особливості характеру прикатодних процесів у стаціонарній вакуумній дузі. Вивчено краплинну фазу ерозії катода. Досліджено просторовий розподіл складу плазми вакуумної дуги та радіальні потоки часток. Вивчені плазмооптичні властивості електромагнітних систем транспортування плазми. Показано, що вони визначаються, в основному, структурою електричного поля в плазмі. Вивчено умови формування покриттів складної структури в системах з електромагнітними полями. Отримано дані для проектування установок і розробки ряду нових технологічних процесів одержання іонно-плазмових покриттів.

**STEADY STATE VACUUM ARC IN TECHNOLOGICAL
SYSTEMS FOR SURFACE TREATMENT
V.M. Khoroshikh**

The review is devoted to problems of generation, focussing and filtering of particle flows in vacuum arc ion-plasma systems for surface treatment. Particularities of cathode processes in the stationary vacuum arc have been studied. The droplet phase of the cathodic materials has been investigated. The plasma of stationary vacuum arc discharge was studied in detail. The radial flows of particles were investigated. The high content of gas ions caused by charge exchange processes of the metal plasma particles on the gas target was found. The plasma-optical properties of electromagnetic systems for plasma transportation were studied. It was shown that they do mainly differ in the structure of electric field in the plasma. The conditions of the nitride coatings formation in systems with electromagnetic fields were studied. The data were obtained for design of equipment and development of some new technological processes for production of ion-plasma coatings.