

УДК 621.7.043, 621.317.727.1

## Особенности нанесения покрытий высокочастотной плазмой в динамическом вакууме

И. Ш. Абдуллин, Р. Т. Галяутдинов, Н. Ф. Кашапов

Казанский государственный технологический университет, г. Казань, Россия

*Изучены электромагнитные поля и плотности токов струйного высокочастотного (ВЧ) плазмотрона. Плазменная струя ВЧ-разряда в процессах напыления представляет собой комбинированный разряд, имеющий индукционную и емкостную составляющие, и характеризуется слоем положительного заряда. Исследованы тонкопленочные покрытия, полученные с помощью высокочастотной плазмы при пониженном давлении.*

Эффективным путем повышения качества, надежности и долговечности изделий является нанесение на его поверхность покрытия, которое добавляет или создает новые свойства поверхности.

Наиболее перспективными для процессов напыления являются разрабатываемые в последние годы электрофизические методы получения покрытий. Однако анализ показывает, что электроискровое микролегирование, ионно-плазменное напыление, ионная имплантация, плазменное напыление при атмосферном давлении, вакуумные методы осаждения имеют ограниченные возможности с точки зрения придания поверхности изделий заданных свойств. Ряд основных свойств рабочих поверхностей изделий, определяемых конкретными направлениями областей применения, эти процессы не могут улучшить даже в принципе. Так, струйные плазменные методы напыления при атмосферном давлении, обладая рядом существенных достоинств, не позволяют получать высокоплотные покрытия, достаточно равномерные по толщине, и требуют последующей дорогостоящей механообработки, а на некоторые материалы вообще невозможно нанести покрытия с требуемыми свойствами. Напыление в вакууме лишено этих недостатков, однако малая скорость напыления и высокие остаточные напряжения не позволяют получать толстые пленки с высокой адгезионной прочностью.

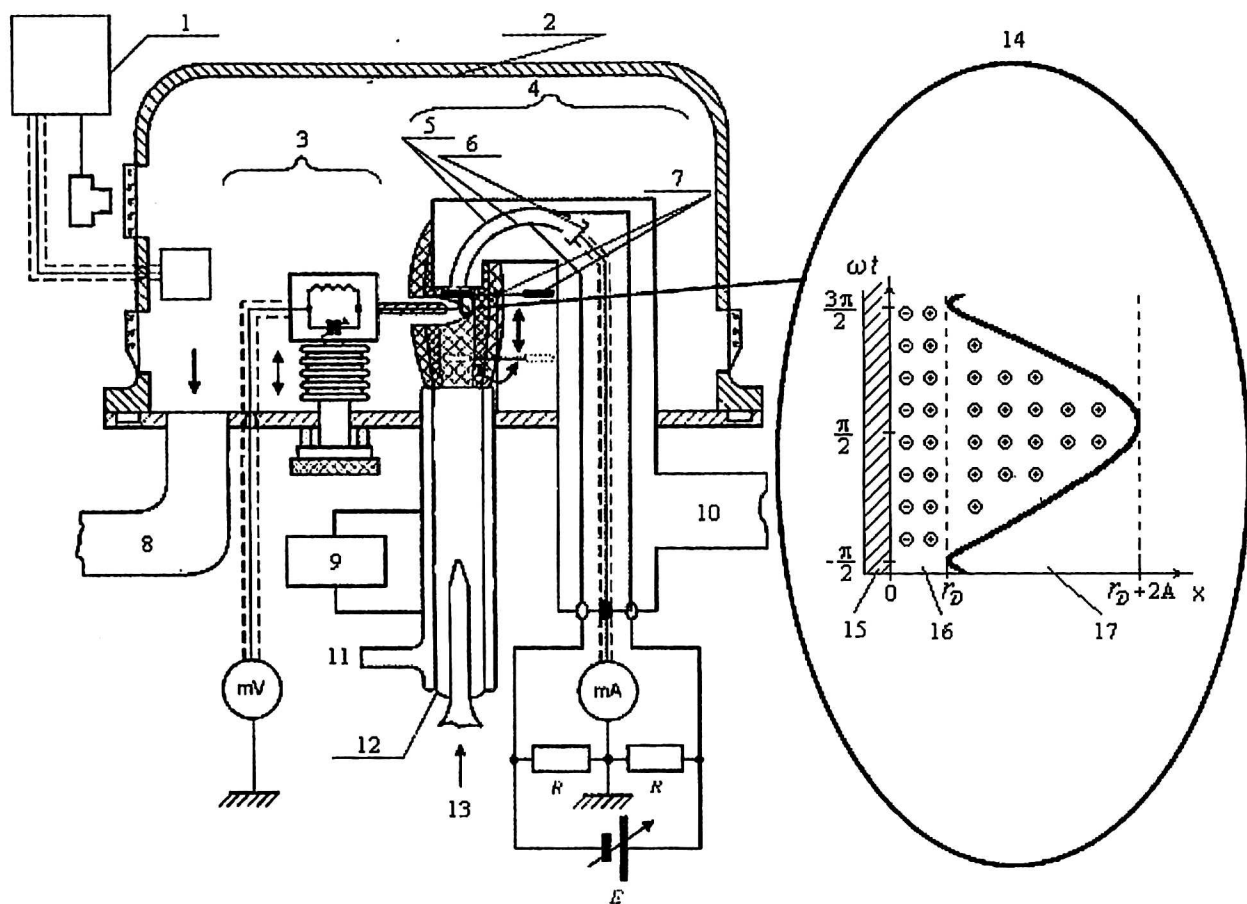
Возможность совмещения достоинств этих методов может быть реализована с помощью струйного ВЧ-плазмотрона в условиях динамического вакуума. Последние работы ряда авторов показали, что ВЧ-плазменная обработка в диапазоне энергий от нескольких до 100 эВ является эффективным способом модификации поверх-

ностей материалов органической и неорганической природы. Однако в настоящее время довольно ограниченно исследованы механизмы взаимодействия неравновесной низкотемпературной плазмы с материалами, а единый цикл модификации поверхности с помощью струйных ВЧ-плазмотронов, заключающийся в сменяющихся и сопровождающих друг друга процессах обработки и нанесения покрытий на поверхности в условиях динамического вакуума, оказался практически не исследованным.

Таким образом, исследование струйного метода нанесения покрытий при пониженном давлении и одновременной плазменной обработке формируемой пленки представляет несомненный научный и практический интерес. Детальная разработка этого способа модификации поверхности твердых тел обеспечит возможность регулировать рабочие свойства поверхностей изделий в широких диапазонах.

### Аппаратура экспериментальных исследований струйного ВЧ-разряда пониженного давления

Для выполнения работы создана установка, которая состоит из стандартных блоков и элементов, включающих в себя генератор, струйный ВЧ-плазмотрон, вакуумную систему, систему подачи плазмообразующего газа и напыляемого вещества, диагностическую аппаратуру (рис. 1). Высокочастотный генератор, собранный по одноконтурной схеме с общим катодом, может быть настроен на индуктивную и емкостную нагрузку и позволяет получать ВЧ-разряды различных типов на разрешенных частотах 1,76; 5,28 и 13,56 МГц [1].



**Рис. 1. Экспериментальная ВЧ-плазменная установка для напыления в динамическом вакууме и схема распределения ионов и движения границы плазмы в слое около модифицируемого тела:**

1 — аппаратура контроля; 2 — рабочая камера; 3 — одиночный электростатический зонд с механизмом перемещения; 4 — анализатор энергии ионов; 5 — отклоняющие электроды; 6 — коллектор; 7 — подложки с механизмом перемещения; 8 — к вакуумному насосу; 9 — ВЧ-генератор; 10 — к диффузионному вакуумному насосу; 11 — охлажденная вода; 12 — ВЧ-плазмотрон; 13 — плазмообразующий газ и напыляемый материал; 14 — слой положительного заряда; 15 — тело; 16 — двойной слой; 17 — колебательная часть

Экспериментальные исследования ВЧ-разрядов пониженного давления, в отличие от разрядов постоянного тока атмосферного давления, имеют ряд характерных особенностей, обусловленных как пониженным давлением, так и наличием сильного высокочастотного электромагнитного поля. К ним относятся, в частности, необходимость разработки специальных мер для обеспечения заданного давления в плазмотроне, защиты измерительно-диагностического комплекса от ВЧ-наводки, обеспечение защиты обслуживающего персонала от воздействия высокочастотного электромагнитного поля.

При разработке методик измерений параметров ВЧ-разрядов пониженного давления необходимо учитывать существенный отрыв электронной температуры от температуры тяжелых частиц. Из-за отсутствия локального термодинамического равновесия спектральная диагностика ВЧ-разрядов пониженного давления связана с определенными трудностями, так как все спектральные методы исследования параметров плазмы, в частности ее температуры, требуют наличия термодинамического равновесия или по крайней мере равновесия между свободными электронами и возбужденными атомами.

На основании анализа характерных особенностей, проявляющихся в процессах, протекающих в струе неравновесной низкотемпературной плазмы при динамическом вакууме, разработан исследовательский комплекс (оборудование и методики измерений) для экспериментальных исследований параметров ВЧ-разрядов при напылении пленок. В состав измерительного комплекса входят одиночный зонд Ленгмюра для измерения плавающего потенциала плазмы; система измерения температуры электронов; система СВЧ-измерения концентрации электронов методом свободного пространства и резонаторным методом; миниатюрный магнитный зонд для определения напряженности магнитного поля; миниатюрный пояс Роговского для измерения плотности тока; модифицированная трубка Пито для измерения скорости плазменного потока; пакет термопар с экранизацией от ВЧ-наводок для измерения температуры образцов [2].

В исследуемом диапазоне (давление 0,1–650 Па, расход плазмообразующего газа 0–0,3 г/с, мощность в разряде 0,1–4 кВт, частота генератора 1,76–18 МГц) реализованы ВЧ-емкостный (ВЧЕ) и ВЧ-индукционный (ВЧИ) разряды. В качестве плазмообразующего газа в экспериментах ис-

пользовался аргон особой чистоты. Содержание кислорода в аргоне не превышало  $7 \cdot 10^{-4} \%$ , азота —  $5 \cdot 10^{-3} \%$  [3].

### Электрические параметры струйного ВЧ-разряда при пониженном давлении

Зависимости плотности тока в ВЧ-разрядах от расхода газа  $G_g$ , мощности разряда  $P_r$  и пространственные распределения азимутальной составляющей плотности тока  $j_\phi$  представлены на рис. 2, 3. Как видно из рис. 2,  $j_\phi$  имеет максимальное значение вблизи границы разряда и спадает до нуля к оси разряда. Такое поведение плотности тока объясняется тем, что на оси напряженность высокочастотного электрического поля  $E_\phi$  равна нулю, а при  $r = R$  достигает своего максимального значения.

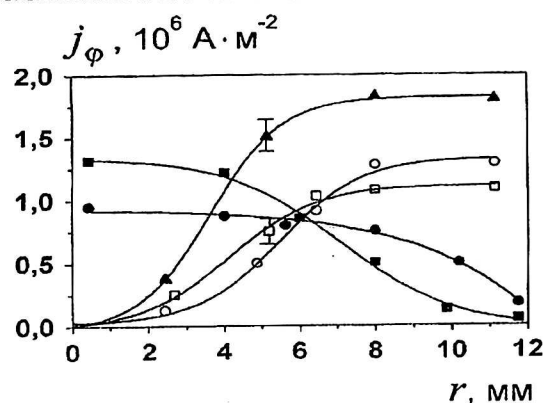


Рис. 2. Распределение плотности ВЧ-тока в плазме по радиусу разрядной камеры:

- , ● — ВЧЕ-разряд в аргоне, частота  $f = 13,56 \text{ МГц}$ , мощность разряда  $P_r = 2,7 \text{ кВт}$ , давление  $p = 165 \text{ Па}$ ;
- — расход газа  $G_g = 0,18 \text{ г/с}$ ; ● —  $G_g = 0$ ;
- ▲ — ВЧИ-разряд,  $f = 1,76 \text{ МГц}$ ;  $P_r = 2,4 \text{ кВт}$ ,  $p = 133 \text{ Па}$ ;
- ▲ —  $G_g = 0$ , аргон; □ —  $G_g = 0,1 \text{ г/с}$ , воздух; ○ —  $G_g = 0,1 \text{ г/с}$ , аргон

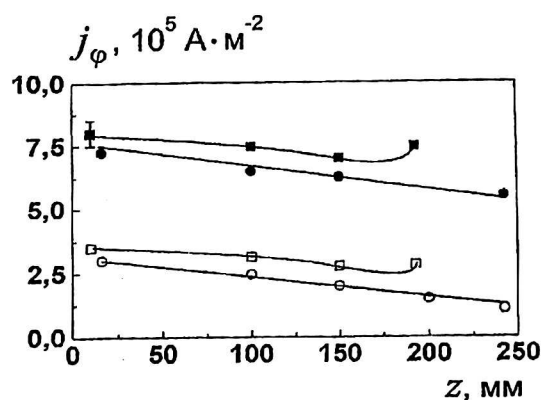


Рис. 3. Распределение плотности тока вдоль потока ВЧИ-плазмы аргона при обработке изделия из ВТ 8 ( $z = 200 \text{ мм}$ ,  $G_g = 0,1 \text{ г/с}$ ), где  $z$  — расстояние от верхнего среза плазмотрона:

- , ○ —  $P_r = 1,8 \text{ кВт}$ ; ■, ● —  $P_r = 3,8 \text{ кВт}$ ;
- , ● — без изделия; □, ■ — с изделием

В ВЧЕ-разряде напряженность электрического поля на оси разряда отлична от нуля, а плотность тока максимальна и плавно уменьшается к

стенкам разряда. Зависимость плотности тока от расхода плазмообразующего газа  $G_g$  нелинейна. Максимальное значение  $j_\phi$  достигается при  $G_g = 0$ . При небольших расходах  $j_\phi$  убывает, а начиная с  $G_g = 0,04 \text{ г/с}$  возрастает, достигнув при  $G_g = 0,08 \text{ г/с}$  своего локального экстремума,  $j_\phi$  снова начинает уменьшаться. Такая зависимость  $j_\phi(G_g)$  может быть объяснена следующим образом. В отсутствие продува газа перенос энергии в область вакуумной камеры также практически отсутствует, и вся мощность вкладывается в плазменный сгусток. За счет этого повышается проводимость плазмы, что влечет за собой более сильное поглощение электромагнитного поля. При подаче газа часть энергии, вкладываемой в разряд, уносится плазменной струей в вакуумную камеру. При оптимальном расходе газа КПД разряда максимален, в плазму вкладывается наибольшая мощность, и плотность тока в разряде увеличивается, что связано с увеличением напряженности электрического поля в плазме. При дальнейшем увеличении расхода газа нарастает рассогласование системы "генератор—разряд", что приводит к уменьшению как концентрации заряженных частиц, так и напряженности электрического поля. Следствием этого является уменьшение плотности тока.

Амплитуда азимутальной составляющей ВЧ-тока в плазме при введении образца в струю возрастает на 20—30 % вблизи поверхности и практически не меняется на выходе из плазмотрона (см. рис. 3). При этом появляется осевая составляющая плотности ВЧ-тока, амплитуда которой пропорциональна мощности разряда. Осевая составляющая плотности тока достигает  $4000 \text{ А/м}^2$ . Результаты исследований ВЧЕ-разряда, представленные на рис. 2, позволяют определить переход от диффузного режима к режиму, при котором объемная рекомбинация начинает конкурировать с амбиполярной диффузией. Эксперименты показали, что в диапазоне давлений 10—350 Па при частоте поля  $f = 13,56 \text{ МГц}$  в безрасходном режиме разряда в аргоне реализуется диффузный режим, так как распределение плотности тока по радиусу РК имеет колоколообразную форму с максимумом на оси разряда.

Визуальные наблюдения показывают, что в безрасходном режиме ВЧЕ-разряда плазма равномерно заполняет РК. Подача плазмообразующего газа приводит к тому, что интенсивность свечения на оси камеры увеличивается, при этом плотность тока на оси разряда возрастает. Так, при  $P_r = 2,7 \text{ кВт}$ ,  $G_g = 0,18 \text{ г/с}$ ,  $p = 165 \text{ Па}$  аксиальная составляющая плотности тока  $j_z$  возрастает на 35—38 % и уменьшается к стенкам камеры более резко, чем в безрасходном режиме. При расходах  $G_g \approx 0,18 \text{ г/с}$  происходит нарушение диффузного режима, распределение  $j_z$  вытягивается вдоль оси; при  $G_g \approx 0,2 \text{ г/с}$  в разряде появляются пульсации и неустойчивости.

Установлено, что с ростом давления до 150—180 Па концентрация электронов в ВЧ-разрядах увеличивается, достигая максимального значения. При дальнейшем повышении давления концентрация  $n_e$  уменьшается. Это объясняется тем, что первоначально по мере увеличения давления концентрация электронов растет за счет снижения потерь заряженных частиц вследствие их диффузии и повышения частоты ионизирующих столкновений с тяжелыми частицами. После достижения максимального значения концентрация начинает падать, так как при переходе в область больших давлений уменьшаются длина свободного пробега электронов и их энергия.

Рост мощности в разряде приводит к повышению концентрации электронов. Это характерно для всех форм ВЧ-разрядов. С увеличением мощности в индукционном разряде  $n_e$  возрастает более резко, чем в емкостном. Концентрация электронов на оси потока существенно больше, чем на границе электропроводной области. Так, например, величина  $n_e$  при  $r = 0$  на 16—17 % больше, чем при  $r = 14$  мм для мощности в разряде 1,06 кВт. Увеличение расхода до значений, не приводящих к нарушению согласования системы "плазма—генератор", приводит к росту концентрации электронов.

С увеличением  $P_r$  растут концентрация электронов в плазменном сгустке и их средняя энергия. Поэтому с увеличением  $P_r$  большее число электронов может достигать определенного сечения плазменной струи, что ведет к увеличению  $n_e$  в ней.

Для установления зависимости технологических параметров обработки материалов в плазме ВЧ-разрядов от характеристик плазменных установок исследовано распределение концентрации электронов вдоль потока плазмы для различных значений расхода газа  $G_g$  (рис. 4). Максимум  $n_e$  в ВЧЕ-разряде в центре межэлектродного промежутка при  $G_g \approx 0,08$  г/с связан с улучшением согласования генератора с нагрузкой при этом расходе и вследствие этого с увеличением энерговклада в разряд, причем наблюдается смещение максимальной концентрации электронов в сторону больших расходов.

Зависимость концентрации электронов в струе ВЧИ-разряда от расхода газа также нелинейная. С ростом расхода газа концентрация электронов возрастает вначале быстро ( $G_g < 0,08$  г/с), достигает своего максимума, а при  $G_g > 0,2$  г/с — резко снижается. Это указывает на то, что для данного диаметра РК существует оптимальный расход плазмообразующего газа, при котором доля энергии ионизации максимальна в общем потоке энергии, уносимой струей. При диаметре РК ВЧЕ-плазмотрона 24 мм оптимальный диапазон расхода аргона составляет 0,08—0,1 г/с.

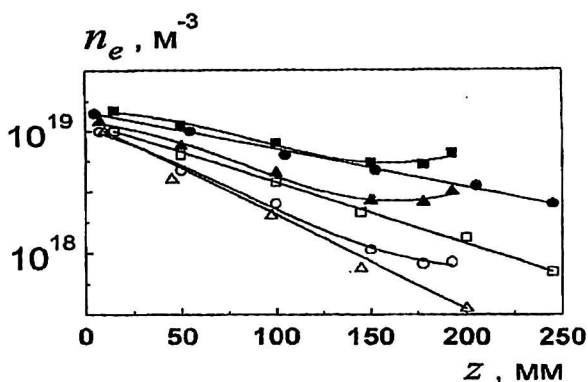


Рис. 4. Зависимость распределения концентрации электронов вдоль струи ВЧИ плазмы аргона от расхода газа ( $r = 0$ ;  $f = 1,76$  МГц;  $P_r = 3,8$  кВт, изделие из ВТ8 расположено при  $z = 200$  мм), где  $z$  — расстояние от верхнего среза плазмотрона:  
 ■, ● —  $G_g = 0,2$  г/с; ▲, □ —  $G_g = 0,1$  г/с; ○, —  $G_g = 0,07$  г/с;  
 ■, ▲, ○ — с изделием; ●, □, ▲ — без изделия

Зависимости  $n_e = n_e(G_g)$  иллюстрируют возможность настройки ВЧ-генератора с плазменной нагрузкой на необходимый расход газа, при котором достигаются достаточно высокие концентрации заряженных частиц, что важно при проведении тонких технологических процессов, когда требуется поддержание концентрации на определенном уровне с минимальным отклонением расхода газа. При этом высокие концентрации  $n_e \geq 5 \cdot 10^{17}$  м<sup>-3</sup> позволяют расширить оптимальный диапазон согласования ВЧ-плазмы пониженного давления с генератором.

Распределение концентрации электронов в поперечном сечении ВЧИ-разряда существенно неоднородно и имеет колоколообразную форму. Площадь под кривой  $n_e = n_e(r)$  зависит от мощности, вкладываемой в разряд. Распределение концентрации электронов по  $r$  симметрично относительно оси плазмотрона, что указывает на диффузный характер разряда. С увеличением расхода плазмообразующего газа концентрация электронов на оси растет быстрее, чем на краях струи.

По мере удаления от плазмотрона  $n_e$  уменьшается (см. рис. 4), увеличение мощности разряда увеличивает  $n_e$  пропорционально по всей длине струи.

Анализ результатов измерений параметров плазмы показывает, что сами по себе электромагнитные поля и токи в плазме невелики и не могут оказать существенного влияния на обрабатываемое тело. Однако взаимодействуя с заряженными частицами плазмы, электромагнитные поля передают им энергию, достаточную для поддержания в струе высоких концентраций заряженных частиц и эффективного взаимодействия их с поверхностью.

Из представленных выше результатов исследований следует, что напряженность магнитной составляющей ВЧ-электромагнитного поля в свободно-истекающей струе не превышает

3200 А/м, а в зоне обработки изменяется от 600 до 2500 А/м. Кроме магнитной составляющей в струе ВЧИ-разряда существует осевая  $E$ -составляющая электромагнитного поля, т. е. в струе поддерживается комбинированный разряд. Плотность ВЧ-тока в плазме у поверхности обрабатываемого тела достигает значения  $7,5 \cdot 10^5$  А/м<sup>2</sup>. Концентрация заряженных частиц в струе разряда составляет  $10^{17} - 10^{19}$  м<sup>-3</sup>, что достаточно для реализации процессов модификации и активации поверхности изделий.

Введение твердого тела изменяет ситуацию у поверхности тела: в результате торможения потока возрастает концентрация электронов в 2—2,5 раза у поверхности, вследствие этого на 30—40 % снижается напряженность ВЧ-электромагнитного поля у поверхности, возрастает амплитуда азимутальной составляющей плотности токов в плазме. Однако существенного перераспределения потоков энергии при этом не происходит.

Изменение профиля  $n_e$  и  $n_i$  в присутствии тела обусловлено не только торможением потока, но и возникновением дополнительного разряда между изделием и электродом (в ВЧЕ- или комбинированном разряде) или верхним витком индуктора (в ВЧИ-разряде), или базовой плитой и как следствие наличием слоя пространственного заряда у поверхности. В результате возникновения дополнительной емкостной связи между изделием и ВЧ-плазмотроном существенно изменяются распределения заряженных частиц и электромагнитных полей в области изделия. На усиление емкостной связи указывает и то, что при введении обрабатываемого тела возрастают азимутальная составляющая магнитного поля и осевая составляющая плотности ВЧ-тока.

Таким образом, упрощенное представление, что вся энергия, вкладываемая ВЧ-генератором, выделяется только в сгустке в зоне индуктора, а струя ВЧИ-плазмы пониженного давления представляет собой поток рекомбинационной плазмы, оказывается неверным. Например, при расходе плазмообразующего газа 0,2 г/с и мощности разряда выше 3 кВт длина струи превышает 0,6 м, и она замыкается на колпак вакуумной камеры. Диаметр струи при этом на всей длине примерно одинаков и равен 50—70 мм. Скорость потока плазмы не превышает 500 м/с. Следовательно, время, за которое ионы достигают поверхности колпака, превышает 1,2 мс. Время жизни иона аргона в рекомбинационной плазме не превышает 100 мкс, т. е. почти в 12 раз меньше. Для сравнения, струя плазмы тлеющего разряда при тех же температурах потока и мощности разряда 3 кВт не превышает в длину 50 мм, что хорошо согласуется с расчетами процессов рекомбинации в потоке плазмы.

Совокупность представленных экспериментальных данных говорит о том, что струя высокочастотной плазмы пониженного давления сама

представляет собой ВЧ-разряд, в котором существует ВЧ-электромагнитное поле, достаточно сильное для поддержания значительных концентраций заряженных частиц. При введении тела в струю происходит усиление ВЧ-тока, направленного вдоль оси, и азимутальной составляющей электромагнитного ВЧ-поля в плазме. Это означает, что между плазмотроном и деталью усиливается емкостная составляющая комбинированного разряда.

#### Характеристики тонкопленочных покрытий, полученных с помощью ВЧ-разряда при пониженном давлении

Поверхность получаемых пленок, наносимых на металлические подложки с помощью плазмы ВЧ-разряда при пониженном давлении, имела однородную структуру с минимальным размером микронеровностей  $\leq 0,5$  мкм. Увеличение энергии ионов  $W_i$ , бомбардирующих поверхность подложки, свыше 25 эВ и плотности ионного тока на поверхность подложки  $j_i$  свыше 22 А/м<sup>2</sup> приводило к возрастанию размеров микронеровностей. Это можно объяснить выбиванием с поверхности подложки частиц материала ионами газа. Кроме того, увеличение мощности в разряде  $> 2,6$  кВт или давления аргона  $> 100$  Па приводило к образованию капельной фазы в покрытии. Размер капель менялся от сотых долей до единиц микрометра и определялся степенью пресыщения паров напыляемого материала у поверхности подложки и условиями эрозии испаряемого материала.

При нанесении на подложки из алюминия, меди марки МОО, титана марки ВТ-9, стали 20Х13 пленок SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в режиме  $G_g = 0,08$  г/с,  $P_r = 2,7$  кВт,  $p = 60 - 100$  Па,  $l = 0,18 - 0,21$  м,  $T = 500 - 650$  К,  $t = 15$  мин получено следующее [4]:

- покрытия устойчивы к истиранию и выдерживают более 5000 тыс. оборотов на приборе СМ-55 до появления царапины, что соответствует нулевой группе механической прочности;
  - адгезионная прочность покрытия из SiO<sub>2</sub> —  $30 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> —  $80 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>;
  - толщина покрытия пленок SiO<sub>2</sub> — до 7,5 мкм; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — до 10 мкм;
  - плотность покрытий близка к плотности объемного материала и составляет более 98 % от плотности объемного материала.
- Зависимость плотности покрытий SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на металлических подложках от энергии ионов, бомбардирующих поверхность подложки,  $W_i$  и плотности ионного тока на поверхность подложки  $j_i$  представлена на рис. 5. Установлено, что увеличение энергии ионов и плотности ионного тока приводило к увеличению плотности покрытий. Зависимости носили экстремальный характер. Ход графиков не изменялся от

вида материала покрытия. Максимальные значения плотности покрытий  $\rho_p$  достигались в интервале  $W_i = 24-26$  эВ,  $j_i = 21-23$  А/м<sup>2</sup>, причем величина плотности покрытий практически равна плотностям соответствующих объемных материалов. Разница в значениях составила  $\leq 5\%$ . Дальнейшее увеличение  $W_i$  и  $j_i$  приводило к снижению прочности покрытий, что связано с образованием капельной фазы покрытий SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

$\rho_p, 10^3 \text{ кг/м}^3$

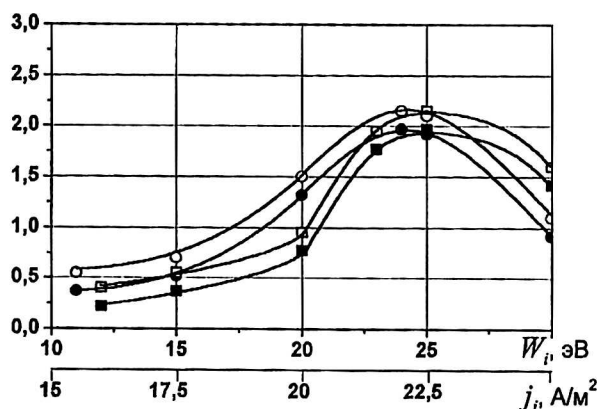


Рис. 5. Влияние энергии ионов  $W_i$  и плотности ионного тока  $j_i$  на плотность покрытий  $\rho_p$  на металлических подложках ( $G_g = 0,08 \text{ г/с}$ ;  $p = 70 \text{ Па}$ ;  $z = 0,2 \text{ м}$ ):  
 ■, ● — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (толщина пленки  $d_p = 10 \text{ мкм}$ );  
 □, ○ — SiO<sub>2</sub> (толщина пленки  $d_p = 6 \text{ мкм}$ );  
 ■, □ —  $W_i$ ; ●, ○ —  $j_i$

Влияние энергии ионов, бомбардирующих поверхность подложки, и плотности ионного тока на поверхность в процессе напыления на размеры микронеровностей позволило получать покрытия с требуемой величиной шероховатости, что дало возможность улучшить спектральные характеристики оптических фильтров.

Установлено, что струя ВЧИ-разряда низкого давления является эффективным инструментом для подготовки поверхности к нанесению и для нанесения оптических покрытий. Выявленные зависимости между входными параметрами уста-

новки и параметрами разряда указывают на возможность эффективной и достаточно простой регулировки характеристик струи ВЧИ-разряда в условиях динамического вакуума. Определены оптимальный диапазон расхода плазмообразующего газа 0,06–0,12 г/с, мощность разряда 0,5–2,5 кВт и расстояние по оси потока плазмы от испаряемого материала  $l = 170-250$  мм, при которых степень ионизации максимальна, а радиальное распределение концентрации заряженных частиц наиболее однородно. При этих режимах наблюдается максимальная равномерность обработки подложек, испарения пленкообразующего материала и конденсации покрытия.

### Заклучение

Исследования струйной плазмы высокочастотного разряда при пониженном давлении в процессах нанесения покрытий показали, что данный разряд является эффективным инструментом для нанесения покрытий с улучшенными характеристиками за счет объединения струйных методов напыления при атмосферном давлении и вакуумных методов распыления. Совместное действие процессов напыления и обработки растущей пленки позволяет получать покрытия с уникальными свойствами.

### Литература

1. Дзюба В. Л., Даутов Г. Ю., Абдуллин И. Ш. Электродуговые и высокочастотные плазмотроны в химико-металлургических процессах. — Киев: Вища школа, 1991.
2. Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Кашапов Н. Ф. Высоочастотная плазменно-струйная обработка материалов при пониженных давлениях. Теория и практика применения. — Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2000.
3. Абдуллин И. Ш., Кашапов Н. Ф., Кудинов В. В. // Технология металлов. 2000. № 8. С. 34.

Abdullin I. Sh., Zheltoukhin V. S., Kashapov N. F. // XVth Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases, Hungary, 26–30 august 2000. P. 298.

## Peculiarities of coatings deposition by a RF plasma in dynamic vacuum

I. Sh. Abdullin, R. T. Galiaoutdinov, N. F. Kashapov  
 Kazan State Technological University, Kazan, Russia

*Electromagnetic fields and current densities of a jet RF plasmatron are studied. The plasma jet of a RF discharge in the process of deposition represents a combined discharge having inductive and capacitive components, and is characterized by a sheath of a positive charge. The thin-film coatings obtained with the help of a RF plasma at low pressure are being investigated.*