

изготовления. Сборник научных трудов. Вып.1. В 3—х Т.— Т.2. — Мн.: УП «Технопринт», 2002.— с.358— 360. 15. Махутов Н.А., Кокшаров И.И., Лепихин А.М. Применение численных методов расчета показателей надежности элементов конструкций с повреждениями // Проблемы прочности, 1991, № 5.— с. 3 — 8.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (2002 год, грант Т01—088).

УДК 621.793.1

И.А. Иванов, И.С. Фролов, Ж.А. Мрочек, С.А.Иващенко

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА ХОЛЛОВСКОГО ИСПАРИТЕЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОЛЩИНЫ И МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ КОНДЕНСАТОВ

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

Среди различных факторов, влияющих на функциональные свойства вакуумно-плазменных защитных покрытий, является толщина и микрогеометрия поверхности осажденного слоя. В камерах электродуговых вакуумных установок плотность потока материала расходуемого электрода неоднородна по объему вакуумной камеры. Исследованию пространственно-временного распределения толщины покрытий на поверхности металлизированных деталей посвящен ряд работ [1, 2]. Для случая однокомпонентного плазменного потока разработаны номограммы определения толщины покрытия в зависимости от расположения образца в камере установки. Однако, случаи осаждения многокомпонентных потоков и влияние пространственного распределения их плотности на другие технологические параметры покрытий не исследовались.

Цель статьи — исследовать влияние пространственного распределения плотности плазменного потока электродуговых испарительных устройств на формирование толщины и микрогеометрии поверхности многокомпонентных вакуумных конденсатов, оценить влияние различных факторов и предложить эффективные меры по увеличению равномерности формируемых покрытий.

Схема эксперимента проводимого для оценки влияния положения детали в вакуумной камере на некоторые свойства и технологические параметры вакуумных элек-

тродуговых многокомпонентных покрытий типа металл-азот-кремний представлена на рис. 1. Для определения равномерности толщины покрытий использовалась пластина из стали 12Х18Н10Т с размерами 265х62х9 мм, на которой с шагом 30 мм в обе стороны от центра посредством винтов крепились шайбы (Ш18х1 мм), выполненные из того же материала. Пластина устанавливалась перпендикулярно оси катода на расстоянии 300 мм от его торца таким образом, чтобы оси шайб и катода находились в одной горизонтальной плоскости. Наибольшее влияние на равномерность покрытий оказывает ток фокусирующей катушки (I_f, A), поэтому он был выбран в качестве изменяемой величины при проведении экспериментов. Измерение толщины покрытия TiN на пластине после удаления шайб осуществлялось профилометрическим методом по ГОСТ 9.302-88.

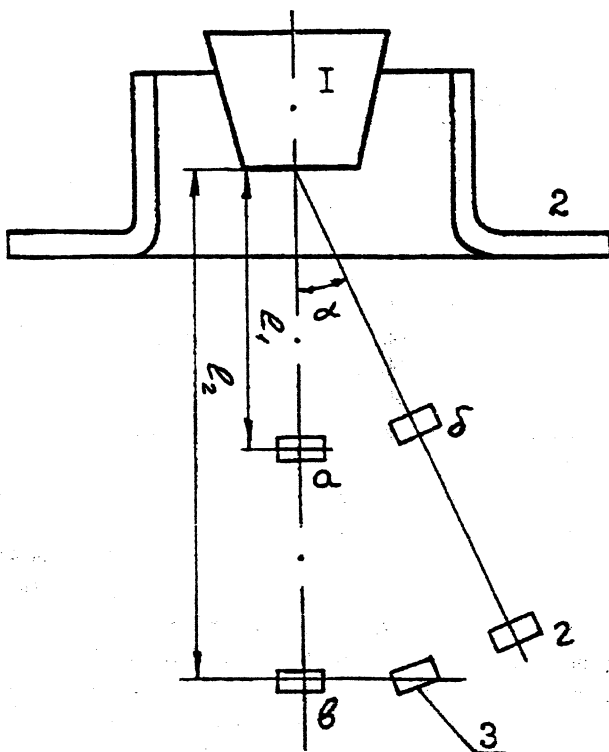


Рис. 1 Схема эксперимента по оценке влияния положения детали в вакуумной камере на свойства покрытий. 1 - катод; 2 - анод;

3 - основа; а, б, в, г - обозначение положения детали в камере.

$$l_1 = 170 \text{ мм}, l_2 = 280 \text{ мм}.$$

Очистка поверхности детали проводилась в импульсном режиме при отрицательном ускоряющем напряжении 1 кВ и токе дуги до 80 А. Формирование покрытия осуществлялось при контролируемом напряжении на основе и давлении реакционного газа в камере $(2...9) \times 10^{-2}$ Па. Ток фокусирующей катушки изменялся в диапазоне 0...1,5 А с шагом 0,5 А.

Получены следующие основные результаты. С удалением от оси испарителя скорость роста многокомпонентных покрытий падает (рис. 2), а шероховатость их поверхности растет (табл. 1).

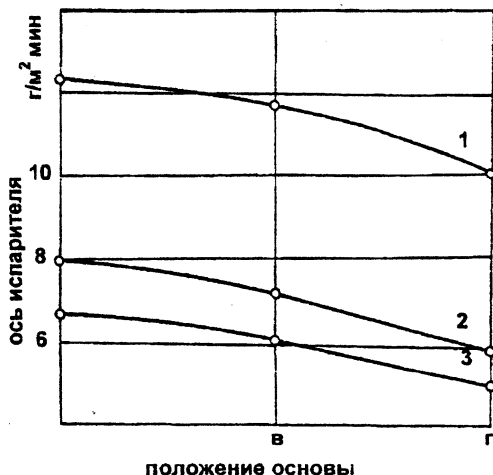


Рис. 2 Зависимость скорости осаждения вакуумных электродуговых силицидных покрытий от положения относительно оси испарителя

Таблица 1

Зависимость шероховатости поверхности покрытий типа металл-азот-кремний от положения основы в вакуумной камере

Тип покрытия	Положение подложки по рис. 1				Ускоряющий потенциал
	а	б	в	г	
Zr - Si	0,862	1,174	0,736	0,926	- 250
Zr - Si	0,876	-	0,78	1,228	- 50
Ti - Si	1,42	1,524	1,025	1,24	- 50

Распределение толщины покрытий TiN по длине пластины в зависимости от тока фокусирующей катушки приведено на рис. 3 (зависимости 1-4). Имеет место значительная неравномерность толщины покрытия по длине детали, которая возрастает

тает с увеличением тока фокусирующей катушки. В частности, при увеличении I_f с 0 до 1,5 А перепад толщины покрытия на длине 120 мм от оси катода возрастает с 4 мкм (в 1,8 раза) до 10 мкм (в 3 раза). Наибольший рост наблюдается по оси испарителя - около 70 %, и лишь при удалении от оси катода в радиальном направлении на 120 мм он падает практически до нуля.

Анализ распределения толщины покрытия по длине детали показывает, что эта зависимость нелинейная и может быть описана уравнением вида:

$Y = ax^2 + b$, где x - расстояние от оси катода до искомой точки на основе в радиальном направлении; a и b - коэффициенты, зависящие от параметров процесса осаждения покрытия. Коэффициент a определяется током фокусирующей катушки, а коэффициент b является функцией как тока фокусирующей катушки, так и времени осаждения.

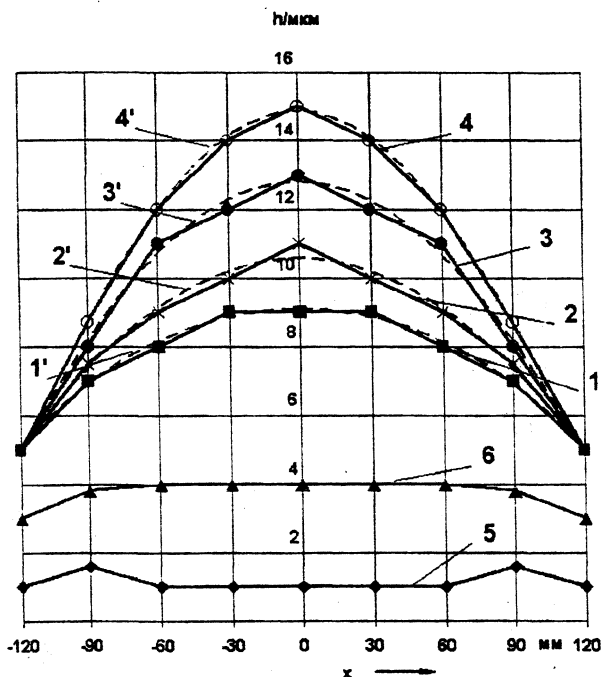


Рис. 3 Радиальное распределение толщины покрытия TiN на основе при поперечном сечении плазменного потока на расстоянии 300 мм от катода: полученное экспериментально (1-4) и теоретически (1'-4') при осаждении прямым потоком и токе фокусирующей катушки соответственно 0; 0,5; 1,0 и 1,5 А; 5 - при использовании экрана - диска Ж50 мм и расстоянии катод - экран 65 мм; 6 - при использовании конического экрана Ж50 мм и расстоянии катод - экран 85 мм

На основании обработки результатов исследований была получена опытно-статистическая модель распределения толщины покрытия на основе как функции тока фокусирующей катушки и времени:

$$h = (-2,73 I_{\phi} - 2,8) \cdot 10^{-7} x^2 + (0,133 I_{\phi} + 0,3) \cdot 10^{-3} \tau,$$

где h - толщина покрытия, мкм; ϕ - время осаждения покрытия, мин.

Проведенный качественный рентгенофазовый анализ покрытий металл-азот-кремний, полученных при различных значениях отрицательного ускоряющего потенциала показал, что отклонение детали от оси испарителя в пределах $\pm 16^\circ$ не приводит каким-либо изменениям в их фазовом составе. Например, во всех случаях при величине отрицательного ускоряющего потенциала 350...450 В обнаруживается присутствие нитридов кремния и титана, низших силицидов титана и кремния. Измерение микротвердости покрытий показывает, что ускоряющий потенциал и величина отклонения детали от оси испарителя по-разному влияют на эту характеристику (рис. 4).

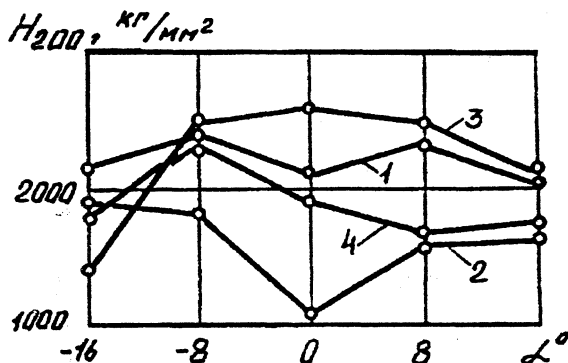


Рис. 4 Зависимость микротвердости конденсата титан-кремний-азот от положения детали в камере. U : 1 - -350 В; 2 - -450 В; 3 - -150 В; 4 - -30 В

Для выявления степени влияния двух факторов на микротвердость покрытий был проведен дисперсионный анализ результатов измерений, который показал значимость для процесса формирования свойств покрытий величины ускоряющего потенциала [1].

В настоящее время известен ряд способов повышения равномерности вакуумно-плазменных покрытий. Основной из них заключается в придании детали сложного движения в пространстве вакуумной камеры. Но для реализации этого способа необходимо изготовление специальных устройств, обладающих малой универсальностью. Повышение равномерности покрытий возможно также за счет использования специальных фокусирующих систем, позволяющих равномерно распределить плазменный поток по длине детали. Однако данные системы значительно усложняют конструкцию вакуумных установок, что препятствует их широкому использованию на практике.

Для получения равномерного покрытия на длинномерных деталях было предложено использовать экраны. Данный способ основан на рассеянии плазменного потока с помощью непрозрачного экрана обтекаемой формы, находящегося под потенциалом анода и установленного по оси испарителя на определенном от него расстоянии (рис. 5). Степень равномерности покрытия регулируется изменением расстояния катод-экран и выбирается с учетом компромисса между производительностью и комплексом свойств покрытия. Кроме повышения равномерности покрытия экран обеспечивает частичную сепарацию плазменного потока, задерживая большую часть капельной фазы.

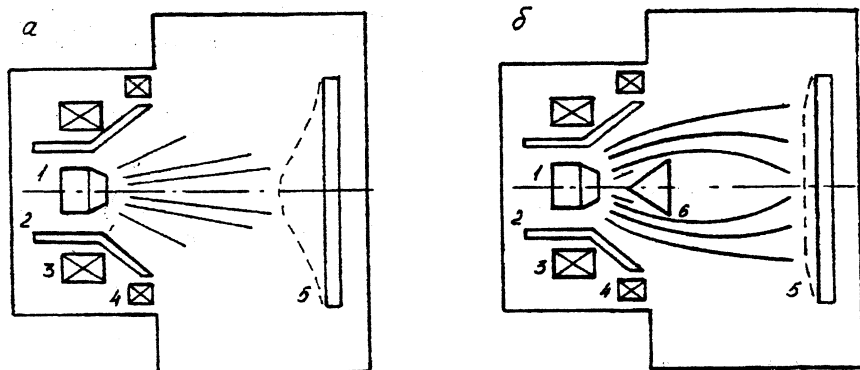


Рис. 5 Схемы осаждения вакуумных электродуговых покрытий на длинномерные детали прямым потоком (а) и с использованием конического экрана (б): 1— катод; 3 и 4 — электромагнитные системы стабилизации разряда и фокусировки плазменного потока; 5 — деталь с покрытием; 6 — конический экран

Наилучшие результаты достигаются при использовании экрана в форме конуса с углом при вершине 60° и диаметром основания 40...50 мм.

Оптимальное расстояние катод-экран варьируется в пределах 40...150 мм. Наилучшие результаты были достигнуты при использовании конического экрана с диаметром основания 50 мм, установленного на расстоянии 85 мм от торца катода. При этом перепад толщины покрытия не превышал 1 мкм по всей длине детали при сохранении достаточно высокой производительности процесса (8 мкм/ч). Качественные характеристики покрытия оказываются высокими за счет значительного уменьшения содержания капельной составляющей в объеме и на поверхности конденсата.

Для оптимизации режимов осаждения защитных покрытий, удовлетворяющих требованиям наибольшей производительности и равномерности распределения толщины по всей поверхности детали, были проведены эксперименты по определению

скорости осаждения покрытий в зависимости от технологических параметров процесса при постоянном времени осаждения τ . Время осаждения было принято равным 18 мин.

Скорость осаждения рассчитывалась по формуле: $V = h/\tau$. Зависимости скорости осаждения покрытия от технологических параметров процесса представлены на рис. 6.

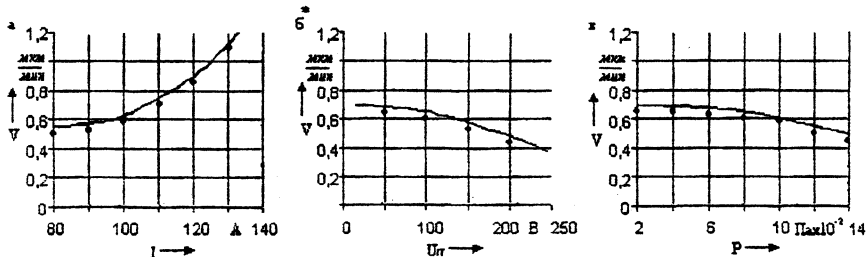


Рис. 6 Зависимость скорости осаждения покрытия TiN от тока дуги при $P=8 \times 10^{-2}$ Па и $U_{п}=100$ В (а); напряжения на основе при $P=8 \times 10^{-2}$ Па и $I=100$ А (б); давления реакционного газа при $I=100$ А и $U_{п}=100$ В (в): основа — сталь 12Х18Н10Т

Установлено, что с увеличением тока дуги скорость конденсации покрытия возрастает, причем особенно значительный рост наблюдается при значениях тока 100...140 А. Это связано с увеличением содержания капельной фазы в продуктах эрозии материала катода, имеющем место в указанном диапазоне. С увеличением ускоряющего напряжения скорость конденсации покрытия незначительно уменьшается, что можно объяснить усилением эффекта распыления конденсата. Увеличение давления реакционного газа в диапазоне $(2...8) \times 10^{-2}$ Па вызывает некоторое снижение скорости конденсации, что связано с уменьшением образования капель в потоке при горении вакуумной дуги. При дальнейшем повышении давления до 14×10^{-2} Па наблюдается более значительное падение скорости конденсации в связи с потерей энергии ионами и увеличением их рассеивания при столкновении с молекулами реакционного газа.

Выводы. 1. При осаждении плазмы прямым потоком имеет место значительная неравномерность покрытия и шероховатости его поверхности по длине основы. При этом распределение толщины покрытия на поверхности детали определяется в основном величиной тока фокусирующей катушки.

2. Влияние отклонения детали от оси испарителя на микротвердость многокомпонентных покрытий (титан-кремний-азот), по сравнению с влиянием ускоряющего потенциала, можно считать незначительным. В тоже время необходимо учитывать изменение скорости роста покрытия и шероховатости поверхности от положения детали в вакуумной камере. Данное различие может быть сведено к минимуму при вращении детали вокруг своей оси, перпендикулярной оси испарителя.

3. Применение конического экрана, установленного на оси испарителя, обеспечивает высокую равномерность покрытия при сохранении достаточной производи-

тельности процесса. Скорость конденсации покрытия зависит от технологических параметров его осаждения. Она возрастает с увеличением тока дуги и убывает с увеличением напряжения на подложке и давления реакционного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий/ Мн.: 1998.- 284 с. 2. Иващенко С.А., Фролов И.С., Мрочек Ж.А. Газотермические и вакуумно-плазменные покрытия со специальными физико-механическими свойствами. – Мн.: УП «Технопринт», 2001.- 236 с.

УДК 621.7

В.С. Ивашко, Г.Ф. Бетенья, Г.И. Анискович, А.В. Кривцов

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЧВОРЕЖУЩИХ ДЕТАЛЕЙ

*Белорусский государственный аграрный технический университет
Минск, Беларусь*

Технический уровень рабочих органов почвообрабатывающей техники (лемеха и долота плугов; лапы культиваторов; зубья и сферические диски борон) предопределяет качество технологического процесса обработки почвы, его энергоемкость, а также надежность машин в целом.

Применяемые материалы, технология упрочнения и конструкция деталей остаются неизменными с 50-х годов. Интенсификация почвообрабатывающих операций связана с необходимостью повышения физико-механических и эксплуатационных свойств деталей.

Зарубежные аналоги по сравнению с отечественными изделиями имеют ресурс в 2..3 раза выше. Для этих целей используются материалы и технологии ("Rabedur", "Conit", "Dreilagenmaterial"), позволяющие получить следующие физико-механические свойства: твердость рабочей поверхности — до 64 HRC, прочность $\sigma_{\text{н}} = 1600 \dots 2100$ МПа, ударную вязкость $a_{\text{н}} \approx 0,8 \dots 1,0$ МДж/м².

Накопленный опыт по проектированию и экспериментальному производству почворежущих деталей повышенной износостойкости и работоспособности позволяет рекомендовать к применению сталь 60ПП и биметаллическую конструкцию режущей части изделия.