

Таблица 2

Образец	Корпус		Поршень		Штуцер	
	Скор.,%	Балл	Скор.,%	Балл	Скор.,%	Балл
Без покрытия	0	10	80	1	90	1
С цинковым покрытием	0	10	40	2	90	1
С оксидированным слоем	0	10	80	1	0	10

Анализ результатов исследований показывает, что изделия, изготовленные из чугуна практически имеют одинаковую коррозионную стойкость без покрытия и с исследуемыми покрытиями. В этом случае основную роль играет их декоративность, а на эксплуатационные свойства изделий покрытие влияния не оказывает. Образцы, изготовленные из стали Ст 5 (поршень) оценивается низкой коррозионной стойкостью при любых видах покрытия, но наиболее лучший результат получен при использовании цинкового покрытия. Испытуемые образцы типа “штуцер”, изготовленные из автомобильной стали показали наибольшую стойкость после оксидирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 9.308.85 Испытания на коррозионную стойкость. 2. Новые методы исследований коррозии металлов / Под ред. И.Л. Розенфельда. – М.: Наука, 1983. 3. Михайловский Ю.Н. Коррозия металлов в атмосферных условиях // Коррозия и защита от коррозии. – М.: ВИНТИ, 1984.

УДК 621.793.1

Ж.А. Мрочек, И.А. Иванов, В.А. Соколовский

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННЫХ СПОСОБОВ ОСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ В ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

*Белорусская государственная политехническая академия*

*Минск, Беларусь*

*Борисовский завод агрегатов*

*Борисов, Беларусь*

По данным специальных исследований мирового рынка режущего инструмента (РИ), проведенных американской фирмой “Frost and Sullivan”, в ближайшие 4-5 лет среднегодовые темпы роста мировых продаж РИ составят 4,8%. Ожидается, что в 2003 году они составят 22 млрд долларов против 15,8 млрд долларов в 1996 году [1]. Только в Германии – признанного лидера в области машиностроения – общее производство инструмента (режущего, измерительного, зажимного) в 1998 году выросло на 9,5% [2]. Большое внимание уделяется разработке и производству РИ для скорос-

тного резания. Значительная роль в производстве такого инструмента отводится технологиям упрочнения его рабочих поверхностей. Анализ показывает, что наибольший интерес в последнее время вызывают способы нанесения многокомпонентных композиционных покрытий использующих в качестве рабочего вещества ионно-плазменные потоки, а в качестве рабочей среды – вакуум. Это связано с такими свойствами ионно-плазменных потоков, как высокие степень ионизации и энергия конденсирующихся частиц; нахождение элементов в потоке в атомарном возбужденном состоянии, что определяет управляемость потоком; высокой адгезией осаждаемых покрытий с основой и формированием плотных конденсатов. Среди этих методов всё более широкое распространение получают методы осаждения в вакууме, обладающие, кроме уже перечисленных, такими основными преимуществами как технологическая и экологическая чистота процесса, нанесение покрытий, отличающихся по своему химическому составу от материала подложки, возможность комбинирования методов осаждения и простота управления ими, низкие температуры подложки. Кроме этого, вакуумные технологии находятся на переднем крае научно-технического прогресса, следовательно, их освоение в инструментальном производстве будет способствовать повышению конкурентоспособности изготавливаемого РИ [3]. Для более эффективного использования данных методов упрочнения в инструментальном производстве надо знать не только их технологические возможности, но и сравнительные экономические показатели.

**Цель работы** – систематизировать имеющиеся в технической литературе сведения по эффективности использования вакуумно-плазменных технологий в машиностроении и инструментальном производстве.

В научной и технической литературе существующие вакуумно-плазменные методы нанесения покрытий в вакууме делят на методы катодного распыления, ионного осаждения и электродугового испарения в вакууме.

**Катодное распыление.** Суть метода состоит в распылении катода-мишени ионами газоразрядной плазмы с последующим осаждением атомов распыленного материала на поверхность детали. Коэффициент ионизации потока порядка 1%, энергия распыляемых частиц 1–3 эВ. Коэффициент использования материала близок к 100%. Однако, расстояние между мишенью и деталью должно быть небольшим, что накладывает ограничения на размеры обрабатываемой заготовки. Плазмообразующим газом, давление которого в разрядном промежутке составляет  $10^{-1}$  Па, являются инертные газы (например, аргон) или смесь инертного и реакционного газа (например, смесь азота или ацетилен с аргоном), что позволяет получать на поверхности конденсации как металлические покрытия так и покрытия из карбидов или нитридов. Адгезия получаемых покрытий существенно выше адгезии вакуумных конденсатов. Недостатком способа является низкая скорость осаждения покрытий 0,005–0,3 мкм/мин ( $10^{-9}$  м/с). Разновидностью катодного распыления является магнетронный метод, позволяющий увеличить скорость осаждения покрытий до  $10^{-7}$  м/с.

**Ионное осаждение.** Разновидность термического испарения в вакууме с ионизацией паров в плазме тлеющего разряда, поддерживаемого между испарителем и подложкой, сочетает в себе высокие производительность (до 20 мкм/мин) и хорошую адгезионную прочность к основе получаемых покрытий. Плотность ионного тока до 2 мА/см<sup>2</sup>. Напряжение на разрядном промежутке от 1 до 10кВ, давление аргона в вакуумной камере 0,1–6 Па. Коэффициент ионизации –0,035–2%. Энергия нейтральных частиц превышает энергию таких же частиц при вакуумном осаждении покрытий. К недостаткам способа стоит отнести использование относительно громоздкого и дорогостоящего высоковольтного оборудования для испарения мишени, дополнительной ионизации парового потока и активации поверхности основы перед нанесением покрытий. Метод требует учета фракционирования компонентов при испарении многокомпонентных сплавов. Для преодоления этих трудностей при нанесении многокомпонентных покрытий разрабатываются методы взрывного испарения малых навесок и диффузионный отжиг предварительно нанесенных многослойных композиций [4].

**Электродуговое испарение в вакууме.** Стадия генерации в рассматриваемом способе нанесения покрытий обеспечивается за счёт эрозии одного из электродов в вакуумной электрической дуге. При этом имеет место самогенерация, т.е. среда необходимая для поддержания разряда возникает вследствие испарения материала электрода и дуга горит в его парах. Процесс испарения сопровождается интенсивной ионизацией, степень которой зависит от материала эродирующего электрода, и может составлять от 12–15% для легкоплавких металлов, до 50–100% для тугоплавких металлов. Процесс вакуумного электродугового нанесения покрытий включает две основные операции: ионную очистку поверхности детали и конденсацию материала покрытия. Процесс конденсации осуществляется сразу после ионной очистки путем уменьшения значения ускоряющего потенциала, т.е. снижения энергии конденсирующихся ионов [3]. Основные сравнительные показатели рассмотренных методов сведены в табл. 1.

Таблица 1

**Сравнительная характеристика вакуумно-плазменных методов**

Сравниваемые параметры	Катодное распыление	Ионное осаждение	Электродуговое испарение
Рабочее давление, Па	$10^{-1} \dots 10^0$	0.1...6	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Степень ионизации потока, %	1...10	2	10...100
Энергия частиц, эВ	1...20	1...3	10...1000
Состав потока	Ионы, атомы	Ионы, атомы	Ионы, атомы капли
Производительность, мкм/мин	$5 \times 10^{-3} \dots 3$	До 20	0.1...1
Другие особенности	Ограничения на размер подложки, коэф. использования 100%, использование реакционного газа	Использование дополнительных источников энергии для ионизации потока	Высокая управляемость потоком, использование реакционного газа

Рядом исследователей был проведен сравнительный анализ вакуумных ионно-плазменных методов нанесения покрытий как друг с другом так и с другими методами получения защитных покрытий широко используемых в различных отраслях машиностроения. Так, в [5] проведено сравнение по плотностям потока осаждаемых частиц ( $j$ , ат/(см<sup>2</sup>.с)) и средним кинетическим энергиям направленного движения конденсирующихся частиц ( $E$ , эВ) для способов термического испарения, катодного и магнетронного распыления, ионного и плазменного осаждения, металлургических и газотермических методов. Показано, что методы ионно-плазменного осаждения имеют наибольшие значения сравниваемых величин ( $j = 10^{17} - 10^{23}$  ат/(см<sup>2</sup>.с);  $E = 10 - 1000$  эВ). Способ магнетронного распыления при тех же плотностях потока осаждаемых частиц имеет значительно меньшее значение средней кинетической энергии направленного движения конденсирующихся частиц ( $E = 0,1 - 10$  эВ). Газотермические и металлургические способы, превосходящие все другие по плотностям потока осаждаемых частиц ( $j$  до  $10^{26}$  ат/(см<sup>2</sup>.с)), значительно уступают плазменным методам по энергиям частиц потока ( $E$  менее  $10^2$  эВ).

В [6] было проведено сравнение некоторых свойств покрытий формируемых разными способами. Показано, что покрытия из хрома осаждаемые способом магнетронного распыления имеют значительно более высокую прочность сцепления с основой чем покрытия полученные газоплазменным, электрохимическим методами или наплавкой. При этом коэффициент использования материала может достигать 0,95 [7]. В сравнении с гальваническими методами нанесения металлических пленок, электродуговые методы обладают лучшими экономическими показателями по производительности и затратам электроэнергии (табл. 2).

Таблица 2.

**Сравнение параметров различных методов осаждения покрытий**

сравниваемые параметры	гальванический способ	Электродуговой способ
скорость нанесения никеля, (мкм/мин)	0.24	0.4
толщина покрытия, (мкм)	40	15
время нанесения покрытия, (ч)	3	1
потребляемая мощность, (кВт)	15	8
удельный расход электроэнергии, (кВт.ч/дм <sup>2</sup> )	0.3	0.15
удельный расход электроэнергии на перенос 1 г вещества, (кВт.ч/г)	90	45

Представляет интерес систематизация данных по количественному сравнению различных способов нанесения покрытий в вакууме (по пятибалльной системе) [8]. Сравнения проводились по свойствам формируемых покрытий, по особенностям технологии, по материалу покрытия и по стоимости оборудования. Наибольший балл присваивался наиболее технологичному параметру, а наименьший параметру, с точки

зрения которого оцениваемый метод неприемлем. Анализ показывает, что наиболее дорогими среди методов нанесения покрытий в вакууме являются технологии ионного осаждения, которые однако по свойствам формируемых покрытий и по материалу покрытия имеют наибольшее преимущество.

Приведенные данные говорят о том, что чем более высокую степень ионизации и энергию частиц потока допускает метод, тем более перспективным и универсальным является он для машиностроения. В сравнении с традиционно используемыми в инструментальном производстве металлургическими методами (ХТО) и методами химического осаждения, вакуумно-плазменные способы осаждения поверхности наиболее полно отвечают требованиям формирования на рабочих покрытиях РИ плотных конденсатов с высокими эксплуатационными свойствами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Спрос на металлорежущие инструменты будет расти// Деловой визит. – 1999. – № 5. – С.54.
2. Stagnation auf hohem Niveau/ Sengebusck W.// Werkzeuge. – 1999. – Sonderpubl. № 1. – P.70, 72.
3. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. – Мн.: БЕС-ТПРИНТ, 1998. – 284 с.
4. Вакуумные покрытия в машиностроении. – 1981. – 40 с.
5. Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. – М: Машиностроение, 1990. – 383 с.
6. Зеленин В.А., Миньков А.Л. Перспективы развития и использования вакуумных методов нанесения покрытий// Ресурсосберегающие технологии/Под ред. А.И.Свириденко, Гродно, БИТА, 1995. – Ч. 2. С. 103–109.
7. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин/Н.В.Спиридонов и др. Под ред. В.Н.Чачина. – Мн.: Выш.шк., 1988. – 56 с.
8. Костржицкий А.И., Лебединский О.В. Многокомпонентные вакуумные покрытия. – М.: Машиностроение, 1987. – 207 с.

УДК 621.785.048:669

Н.В. Спиридонов, А.С. Володько, В.В. Зенкевич, Л.И. Пилецкая

### УПРОЧНЕНИЕ НИКЕЛЬ-ТИТАНОВЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

*Белорусская государственная политехническая академия*

*Минск, Беларусь*

К основным контролируемым параметрам газотермических покрытий относится адгезия покрытий к основе – одна из наиболее важных прочностных характеристик, влияющих на эксплуатационные свойства поверхности деталей машин и оборудования. Она определяется характером механо-физико-химических процессов взаимодействия