

М.: Машиностроение, 1971.- 672 с. 3. Осипов А.Ф. Объемные гидравлические машины. М.: Машиностроение, 1966.- 160 с. 4. Гидравлическое оборудование. Каталог-справочник., М.: НИИМАШ, 1967.- 232 с. 5. Богдан Н.В., Кишкевич П.Н., Шевченко В.С. Гидропневмоавтоматика и гидропривод мобильных машин. Эксплуатация и надежность гидро-пневмосистем. Минск, Ураджай, 2001.- 397 с. 6. Шевченко В.С. Введение в оптимальное проектирование машин. Минск, Наука и техника, 1974.- 112 с.

УДК 621.793

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

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ НЕМАГНИТНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Повышение работоспособности деталей машин и механизмов является важнейшей народнохозяйственной задачей. Наиболее остро она проявляется в тех отраслях промышленности, где для изготовления деталей широко используются коррозионно-стойкие немагнитные металлические материалы (стали аустенитного класса, латуни, бронзы и алюминиевые сплавы), которые не упрочняются традиционными методами объемной и поверхностной обработки.

Практически единственным и эффективным путем повышения работоспособности деталей из немагнитных металлических материалов является нанесение на их рабочие поверхности износостойких покрытий. Анализ способов формирования износостойких покрытий показал, что наиболее перспективным для этих материалов является вакуумно-плазменный электродуговой способ [1].

Сущность этого способа заключается в том, что генерация плазменного потока обеспечивается за счет 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. Такая высокая степень ионизации позволяет управлять потоком, во-первых, на стадии его ускорения (например, использование криволинейных плазмодов или магнитных островков позволяет полностью избавиться от микрокапельной фазы в потоке) и, во-вторых, на стадии его конденсации. Процесс взаимодействия потока с подложкой сводится к протеканию взаимосвязанных физических процессов конденсации, внедрения в поверхность и распыления.

К достоинствам способа следует отнести универсальность, позволяющую использовать подложки из различных по физико-механическим свойствам материалов; высокие энергии частиц, обеспечивающие необходимую адгезию покрытий; сравнительно низкие температуры процесса и возможность их регулировки, в том числе за счет импульсного режима работы испарителей; достаточно высокую производительность способа; простоту оборудования и возможность получения композиционных покрытий без его переналадки.

Наиболее широко этот способ используется для нанесения защитно-декоративных

покрытий, упрочнения режущего и штампового инструмента, деталей из высокопрочных и твердых материалов. Одним из путей расширения его технологических возможностей является нанесение упрочняющих покрытий на прецизионные детали из немагнитных металлических материалов, работающие в условиях трения и износа особенно при особых условиях эксплуатации (вакуум, отсутствие смазки и т.д.).

Для данного класса деталей была разработана технология формирования покрытий, которая учитывает их особенности и в общем случае включает следующие этапы: предварительную подготовку поверхности; установку детали в вакуумной камере; откачку вакуумной камеры; очистку ионами инертных газов; очистку ионами материала катода; конденсацию покрытия. Этап конденсации покрытия в свою очередь состоит из нанесения подслоя титана, переходного и рабочего слоев покрытия.

**Предварительная подготовка поверхности.** Ее предлагается проводить методом электроимпульсного полирования (ЭИП) [2]. Технология ЭИП основана на использовании импульсных электрических разрядов, возникающих вдоль всей поверхности обрабатываемой детали, погруженной в электролит. Отличие от обычного электрохимического процесса полирования состоит в том, что вследствие интенсивного протекания электролитических процессов и вскипания электролита под действием тока значительной плотности около обрабатываемой поверхности детали образуется динамически устойчивая парогазовая оболочка, имеющая по сравнению с электролитом повышенное электрическое сопротивление. Комплексное физико-химическое воздействие на поверхность детали позволяет за короткое время производить полирование поверхности с использованием в качестве электролита нетоксичных бескислотных растворов.

В частности, для полирования аустенитных хромоникелевых сталей используются 2...6 % водные растворы  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  [3]. Полирование медных сплавов осуществляют в электролите того же состава. Алюминий и его сплавы полируют в водных растворах  $\text{FeCl}_3$  и  $\text{NH}_4\text{Cl}$  [4].

Процесс электроимпульсного полирования деталей из немагнитных материалов осуществляется на серийно изготавливаемых установках ЭИП-1, ЭПОЛ-5Н и др.

После полирования для удаления остатков электролита детали рекомендуется промывать в двух водах, например, холодной проточной и дистиллированной воде. Далее для удаления остатков влаги производится сушка деталей горячим воздухом в сушильном шкафу при температуре 60...150 °С.

**Установка детали в вакуумной камере.** Способ установки определяется формой и габаритными размерами деталей. Для установки мелкогабаритных деталей используются карусели, входящие в комплектацию вакуумных установок, которые обеспечивают планетарное движение деталей в процессе напыления. Для установки крупногабаритных деталей типа тел вращения рекомендуется использовать столики, обеспечивающие расположение детали по оси плазменного потока и кинематически связанные с вводом вращения вакуумной камеры, что обеспечивает вращательное движение детали в процессе напыления.

Установку длинномерных деталей типа направляющих рекомендуется производить по оси плазменного потока без вращения в процессе напыления, а необходимая равномерность покрытия в этом случае обеспечивается за счет специальных технологических приемов [5,6], которые, однако, имеют ряд существенных недостатков. Поэтому для получения равномерного покрытия на длинномерных деталях было предложено использовать специальные 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. Степень равномерности покрытия регулируется изменением расстояния катод-экран и выбирается с учетом компромисса между производительностью и ком-

плексом защитно-декоративных свойств покрытия. Кроме повышения равномерности покрытия экран обеспечивает частичную сепарацию плазменного потока, задерживая большую часть капельной фазы. Анализ результатов экспериментов показал, что наилучшие результаты достигаются при использовании экрана в форме конуса с углом при вершине  $60^\circ$  и диаметром основания 40...50 мм.

**Откачка вакуумной камеры.** Производится до достижения необходимого вакуума (остаточного давления) в камере. Данный параметр зависит от конструкции и особенностей вакуумной установки. Для установки УРМЗ.279.048 рекомендуется производить откачку камеры до давления  $(1... 3) \times 10^{-3}$  Па.

**Очистка ионами инертных газов.** Этот этап не является обязательным во всех случаях. Его можно рекомендовать для деталей с тонкими стенками и малой теплоустойчивостью материала (алюминиевые сплавы, бронза), а также для немагнитных материалов, не обрабатываемых электроимпульсным полированием, с целью удаления дефектного поверхностного слоя.

Режимы очистки: рабочий газ — аргон; ускоряющее напряжение 1,5...4 кВ; ток подложки 100 мА; ток соленоида 1,5...3 А; давление в камере  $(2,66...6,65) \times 10^{-2}$  Па, время обработки — 15...30 мин. Оборудование — газовый источник ионов с холодным катодом типа «радикал».

Следует отметить, что процесс очистки ионами инертных газов характеризуется малыми температурами разогрева детали, что не позволяет полностью исключить из техпроцесса ионную бомбардировку, так как для качественной конденсации покрытия необходим разогрев поверхностного слоя детали до температуры не ниже 150...200°C [6].

**Очистка ионами материала катода.** На данном этапе происходит окончательная очистка поверхности детали от различных загрязнений, снятие окисной пленки, активация поверхностного слоя, внедрение и диффундирование атомов титана в подложку с образованием интерметаллических соединений и разогрев поверхностного слоя до необходимой температуры. Этот этап особенно важен для материалов с малой теплоустойчивостью (алюминиевые сплавы), так как с одной стороны необходимо разрушить окисную пленку и провести активацию поверхности, а с другой стороны не допустить перегрева детали. Поэтому ионную бомбардировку деталей из немагнитных материалов рекомендуется проводить в импульсном режиме. Следует отметить, что для аустенитных сталей типа 12X18H10T данный этап является обязательным, так как за счет высоких локальных температур, развивающихся в поверхностном слое детали, устраняется магнитная  $\alpha$ -фаза (мартенсит), оставшаяся после предварительной подготовки поверхности.

Для избежания перегрева деталей из легкоплавких материалов предлагается использовать метод косвенного нагрева. Суть его заключается в том, что в вакуумной камере устанавливаются специальные термоэлементы, запитанные от внешнего источника тока. При этом нагрев деталей происходит за счет теплоизлучения элементов. Преимуществом данного метода является то, что разогрев деталей совмещается с откачкой вакуумной камеры и тем самым сокращается время цикла нанесения покрытия. Кроме того, исключается подплавление поверхности деталей вследствие концентрации теплового потока в тонком поверхностном слое. Применение метода косвенного нагрева позволяет полностью отказаться от ионной бомбардировки (при использовании газового источника ионов) или свести ее время к безопасному минимуму.

После очистки поверхности ионами материала катода может выдерживаться стабилизирующая пауза (5...20 с) для выравнивания температуры по сечению детали и снижения уровня термических внутренних напряжений.

**Конденсация покрытия.** На данном этапе технологического процесса первона-

начально производится нанесение подслоя титана. Это обеспечивает увеличение адгезионной прочности покрытия за счет образования переходного слоя вследствие частичной диффузии титана в подложку и релаксацию внутренних напряжений при формировании покрытия.

После нанесения адгезионного подслоя Ti наносится переходной слой, представляющий собой смесь твердого раствора  $\alpha$ -Ti и нитрида титана. Данный слой обеспечивает снижение внутренних напряжений и уменьшает вероятность образования поверхностных микротрещин в покрытии.

После осаждения адгезионного и переходного слоев наносится наружный рабочий слой из нитрида титана стехиометрического состава. Общая толщина покрытия рекомендуется в пределах 8...10 мкм, а толщины подслоя титана и переходного слоя — 5...15% от общей толщины покрытия.

Технологические режимы очистки поверхностей деталей из немагнитных металлических материалов и нанесения покрытия TiN представлены в табл. 1. Времена, указанные в таблице, соответствуют напылению прямым потоком без вращения. При использовании вращения табличные значения следует увеличивать в 2...2,5 раза.

Для осаждения вакуумных электродуговых покрытий используются установки периодического действия типа Булат, ННВ, Юнион и др. В основное оборудование таких установок входят металлизационная камера, вакуумная система и пульт управления. Процесс металлизации осуществляется в автоматическом и полуавтоматическом режимах.

Основные технологические характеристики некоторых моделей установок периодического действия, рекомендуемых для упрочнения прецизионных деталей, представлены в табл.2. Установки предназначены для нанесения покрытий на детали, выполненные из различных материалов - металлов, стекла, пластмассы, керамики. Время нанесения покрытий в среднем составляет 15...25 мин. Вакуумная система, обеспечивающая чистоту протекания рабочих процессов, выполняется либо двухступенчатой - форвакуумный и высоковакуумный насосы, либо трехступенчатый - форвакуумный, бустерный и высоковакуумный. В качестве высоковакуумных насосов обычно используются паромасленные диффузионные насосы.

Разработанная технология обеспечивает формирование качественных вакуумно-плазменных покрытий на прецизионных деталях из немагнитных металлических материалов. Она прошла промышленную апробацию на ряде предприятий республики и доказала свою экономическую эффективность.

**Литература.** 1. Емельянов В.А., Иванов И.А., Мрочек Ж.А. Вакуумно-плазменные способы формирования защитных и упрочняющих покрытий. - Мн.: Изд-во НПО «Интеграл», 1998.- 285 с. 2. Метод электроимпульсного полирования металлов / Е.Я. Головкина, С.Н. Терехов, Ю.В. Синькевич, О.И. Авсеевич // Машиностроение. — Минск, 1988. — Вып. 13. — С. 40-43. 3. А.с. 1665727 СССР, МКИ<sup>3</sup> C25F 3/00. Раствор для полирования металлических изделий / С.И. Романчук, Ю.В. Синькевич, Е.Я. Головкина. 4. Исследование и внедрение технологии электролитно-плазменной обработки конструкционных сталей и алюминия: Отчет о НИР (заключит.) / Бел. политехн. ин-т; Рук. В.К. Станишевский; № 01.88.0014649. — Минск, 1990. — 68 с. 5. Дьяков И.И., Юмштык Г.М. Кинематические параметры упрочняемого концевой инструмента // Машиностроение. — Минск, 1988. — Вып. 13. — С. 77-80. 6. Волин Э.М., Сувор И.С., Булычев Г.Т. Нанесение ионно-плазменных износостойких покрытий на деформирующий инструмент // Современное электротермическое оборудование для поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов: Тез. докл. 1-го Всесоюзного науч.-технич. симпозиума, Саратов, 30 мая-3 июня 1988 г. — М.: Информэлектро, 1988. — С. 27-28.

Таблица 1.

Режимы нанесения покрытий на детали из немагнитных металлических материалов

Режимы нанесения покрытия	Этапы формирования покрытия			
	Ионная очистка	Адгезионный подслои Ti	Переходной слой $\alpha$ -Ti + TiN	Рабочий слой TiN
Давление в рабочей камере P, Па	$(1...3) \times 10^{-3}$	$(1...3) \times 10^{-3}$	$(1...7) \times 10^{-2}$	$(7...9) \times 10^{-2}$
Ток дугового испарителя I, А	50-130	70-100	70-100	70-100
Напряжение на подложке U <sub>n</sub> , В	600-1500	50-150	50-150	50-150
Режим и время проведения операции	Импульсно 40-90 с	Непрерывно 2-3 мин	Непрерывно 2-3 мин	Непрерывно 20-25 мин

Основные технические характеристики установок вакуумного электродугового нанесения упрочняющих покрытий

Параметры	Модель			
	ВУ-2МБС	УРМ3.279.048	УРМ3.279.070	Булат-3Т
Предельное давление, Па	$1,33 \times 10^{-3}$	$6,65 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,33 \times 10^{-3}$
Размер камеры, мм	Ø700x776	560x550x240	Ø700x1100	Ø900x500
Время достижения предельного давления, мин	20	20	30	30
Потребляемая мощность, кВт	40	60	30	50
Количество циклов за смену	6-8	6-8	8-10	6-8
Производительность, м <sup>2</sup> /цикл	0,5	Количество позиций для установки деталей не менее 64 шт.	Количество позиций для установки деталей не менее 54 шт.	0,04
Количество: - электродуговых испарителей, шт. - ионных источников, шт.	4 -	2 -	2 1	2 -
Масса, кг	2400	2500	2500	2000

ДК 621.831

М.М. Кане, Б.В. Иванов

### ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ШЕСТЕРЕН ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Задача оптимизации режимов резания заключается в определении таких их значений, которые обеспечили бы максимальную эффективность в том или ином смысле процесса резания в заданных конкретных производственных условиях при выполнении всех требований, предъявляемых к технологическому процессу. Данная задача относится к классу задач параметрической оптимизации при разработке технологических процессов. При ее решении широко используются операционные модели, в которых отражаются требования, предъявляемые к искомому проектному решению, и факторы, которые должны быть учтены при принятии этого решения /1, 2/.

При технологическом проектировании операционные модели записывают в следующем виде: