

сохраняется исходная шероховатость упрочняемой поверхности, но не обеспечивается выполнение повышенных требований к твердости и износостойкости упрочненного слоя, образуемого в результате одновременного науглероживания и закалки. Рекомендации по выбору материалов электрода приведены в табл. 45. При отсутствии пластинок требуемых форм и размеров, а также для более полного использования твердого сплава можно применять электроды, изготовленные напайкой или приваркой твердосплавных пластинок к стальной державке.

Рабочая часть электрода должна иметь форму конуса или пирамиды с затуплением вершины радиусом 1,6-2,0 мм, что способствует получению качественной поверхности упрочненного слоя.

### Упрочнение методами ионно-плазменной обработки

*Ионно-плазменную обработку* применяют для повышения износостойкости инструментов, рабочих элементов штампов, пресс-форм, приспособлений, а также ответственных стальных деталей машин, работающих в условиях адгезионного и диффузионного изнашивания при высоких температурах окружающей среды; выполняют преимущественно в вакуумных установках. Вещество осаждаемого металла в вакууме последовательно превращают в газ, пар, ионизированный пар и плазму и осаждают в атмосфере реакционного или нейтрального газа в виде конденсата на упрочняемую поверхность.

Покрытие получают термическим испарением, катодным или ионно-плазменным распылением или бомбардировкой поверхности ионами осаждаемого вещества. В качестве реакционного газа используют азот или углеводород. Соответственно покрытие состоит из нитридных или карбидных соединений

#### 45. Рекомендуемые упрочняющие электроды для нанесения покрытий на различные изделия

Упрочняемые изделия	Материал упрочняющего электрода и его марка	Эксплуатационные особенности электродов
Развертки, зенкеры, сверла, протяжки, фрезы и другой режущий инструмент	Графиты ЭГ-2 и ЭГ-4	Сохраняет заданные чертежом размеры и шероховатость поверхности инструмента
	Твердые сплавы ВК-2 и ВК-3	После упрочнения требует доводочного шлифования
Пуансоны, матрицы, кондукторные втулки, втулки наплавляющих колонок, адаптеры протяжных станков	Твердые сплавы ВК-3, ВК-8, Т15К6, Т60К6 и Т30К4	Возможно многократное восстановление с последующим шлифованием
Инструмент и детали машин, работающие в условиях высоких контактных напряжений и абразивного изнашивания	Твердый сплав Т15К6, хром Хр5 и Хр6, белый чугун	
Подающие и зажимные цанги, детали типа вал-подшипник	Литой карбид вольфрама	
Измерительные инструменты, детали с повышенными требованиями точности	Графит ЭГ-2, ЭГ-3, ЭГ-4, ЭГ-6	Сохраняет первоначальные геометрические размеры и форму обработанной поверхности

тугоплавких металлов. Способ термического испарения можно осуществить в безокислительной атмосфере нейтральных газов или в воздушной среде. Существенное отличие методов состоит в различном качестве создаваемой плазмы; наличии в плазме нейтральной или заряженной ионизированной составляющей.

Основные факторы, определяющие работоспособность покрытий, – свойства материала основы, обеспечивающего прочность, сопротивление тепловому удару и деформации; качество подготовки поверхности, сцепление между покрытием и основой; качество материала покрытия. Самыми распространенными материалами покрытия являются карбид титана TiC, нитрид титана TiN и оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Большое значение для работоспособности покрытия имеет его толщина. Слишком тонкое покрытие плохо сопротивляется изнашиванию, слишком толстое может скалываться.

**Химическое осаждение покрытия из газовой фазы при термическом испарении.** На пластинки из твердых сплавов из газообразной смеси бензола, хлорида титана, аргона и водорода химически осаждают слой TiC. Параметры осаждения: скорость потока смеси 55-70 л/мин; температуры пластин 1030-1060 °С, смеси 900-1100 °С. Наибольшей износостойкостью обладает слой TiC толщиной 4-8 мм. Слой толщиной менее 2 мкм быстро изнашивается. Износостойкость слоя толщиной более 8 мкм уменьшается при дальнейшем увеличении толщины слоя.

Твердые покрытия толщиной 5-10 мкм (однослойные из TiN или TiC и двухслойные из TiN и TiC) осаждаются на поверхность деталей из газовой фазы при температуре 800-1000 °С. Твердость покрытия TiN составляет 2000 HV. TiC и TiN + TiC 3000 HV (в то время как твердого хрома 1200 HV). Покрытия наносят на детали, материалом которых являются твердые сплавы, углеродистые и легированные стали, стеллит, коррозионно-стойкая аустенитная сталь, инконель, монель-металл, нейзильбер, а также твердый хром. Применяют покрытия для повышения стойкости против изнашивания и коррозии режущих и других инструментов, коленчатых валов, деталей насосов, дизелей и др.

Для осаждения покрытий используют герметизированные камеры-печи и вакуумные установки с автоматизированным регулированием температуры. Химическое осаждение карбидов титана из смеси TiCl<sub>4</sub>, водорода и углеводорода при температуре 1000 °С дает возможность получать покрытия малой толщины. Опасность отделения покрытия от основы уменьшается при толщине покрытия менее 10 мкм, если материал основы имеет другой коэффициент температурного расширения.

Нитрид титана обладает меньшей химической активностью, чем карбид титана. Двойное покрытие хорошо защищает инструмент от диффузионного изнашивания (слой покрытия из TiN) и изнашивания по задней поверхности (слой покрытия из TiC). Перспективно покрытие из оксида алюминия, которое на атомарном уровне осаждается на предварительно нанесенный на основу слой карбидов. Благодаря низкой активности оксида алюминия режущие свойства пластин могут быть значительно (до 5 раз) выше, чем у обычных твердых сплавов.

Слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, препятствующий диффузии, можно наносить непосредственно на твердый сплав и затем на слой оксида – износостойкие слои TiC, TiN, TiCN. Покрытия наносят в вакуумной печи методом осаждения из газовой фазы. Режим нанесения покрытий при давлении 6,56 кПа следующий. В потоке смеси (скорость потока 40 л/мин), содержащей 92,5% H<sub>2</sub>, 3% AlCl<sub>3</sub> и 4,5% CO<sub>2</sub>, при 1027 °С за 15 мин осаждают слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 0,2-0,3 мкм. В печь вводят H<sub>2</sub> до атмосферного давления. В потоке смеси (скорость потока 80 л/мин), содержащей 88% H<sub>2</sub>,

5% TiCl и 7% CH<sub>4</sub>, за 150 мин осаждают слой TiC толщиной 5-6 мкм. Давление снижают до 13,3 кПа. Далее в потоке смеси (скорость потока 70 л/мин), содержащей 90% H<sub>2</sub>, 4% AlCl<sub>4</sub> и 6% CO<sub>2</sub>, за 120 мин осаждают слой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> толщиной 1,5-2 мкм. Для формирования слоев TiN и TiCN в смесь вводят N<sub>2</sub>. Износостойкость твердосплавного инструмента с многослойными покрытиями намного выше, чем с покрытием из TiC.

В штампах с двухслойным покрытием, осажденным из карбида и нитрида титана, можно отформовать, например, 80 000-120 000 (вместо 25 000) головок винтов со шлицем. На отдельных штампах изготавливают до 180 000 винтов. Высокая твердость карбида и нитрида титана (соответственно 3000 и 2000 HV) предотвращает абразивное изнашивание штампов, а химическая инертность этих неметаллических покрытий снижает вероятность возникновения микроадгезии между обрабатываемым металлом и штампами, что уменьшает адгезионное изнашивание штампов.

Слой TiC может быть нанесен методом высокочастотного напыления в вакуумной камере с вращающейся платформой, обеспечивающей последовательное покрытие нескольких инструментов. До напыления поверхность очищают ультразвуком или струей распыленного аргона. Предварительная обработка поверхности аргоном очень важна для возникновения качественной адгезии напыленного слоя TiC с твердым сплавом основы, так как адгезия улучшает режущую способность напыленного инструмента.

Износостойкость инструмента из твердых сплавов повышают, нанося многослойное покрытие в процессе химической реакции, протекающей при температуре 850-1200 °С, в газовой фазе напыляемых компонентов. Покрытие имеет не менее трех слоев. Первый, примыкающий к поверхности, состоит из карбидов Hf или Ti, наружный из оксидов Hf, Zr или Al, промежуточный – из нитридов или оксикарбидов Hf, Zr или Ti. Если средний слой состоит из нитридов, рекомендуется между ним и слоем карбидов наносить слой карбонитридов. Толщина каждого слоя 0,5-20 мкм. При обработке резанием скорость изнашивания инструмента с трехслойным покрытием примерно в 2 раза меньше, чем у инструмента с двухслойным покрытием, и в 18 раз меньше, чем у незащищенного инструмента.

Для увеличения адгезии между износостойким покрытием и основой режущей пластины из быстрорежущей стали на поверхность пластины наносят слой чистого титана толщиной до 2 мкм, затем один или несколько слоев (толщиной 0,5-10 мкм) соединений титана типа TiC, TiN, TiCN, TiCNO и TiCO [пат. 56-25960 (Япония)].

Многослойные покрытия режущей части инструментов, состоящие из слоев различной твердости и толщины, часто не обеспечивают требуемую стойкость металлорежущего инструмента из-за хрупкости покрытия (толщина слоев в покрытии убывает к поверхности).

Увеличить прочность покрытия можно следующим способом [а. с. 607659 (СССР)]. Для повышения стойкости инструмента слои покрытия с более высокой твердостью (2600-3600 HV) чередуют со слоями, твердость которых плавно изменяется от 600-900 до 2600-3600 HV. Причем толщина твердого слоя составляет 1-3 мкм, а общая толщина покрытия не превышает 25 мкм. Такое покрытие на металлорежущем инструменте может быть получено распылением металла в вакуумной камере. Получение слоев различной твердости и плавное изменение твердости достигаются благодаря изменению параметров процесса напыления.

Слои с уменьшенной твердостью препятствуют выкрашиванию твердого слоя при работе в условиях вибрации и ударных нагрузок, так как мягкие слои деформируются и допускают тем самым некоторый прогиб твердого слоя.

Износостойкость сопрягаемых взаимно перемещающихся поверхностей можно увеличить, нанося на них покрытия, отличающиеся по своим физико-механическим свойствам, но в комплексе обеспечивающие повышение износостойкости трущейся пары, например, направляющей колонки и втулки штампа [а. с. 778873 (СССР)]. Для этого на поверхность направляющей колонки наносят пленку на основе нитрида титана толщиной 0,005-0,007 мм, на поверхность втулки – пористое твердосплавное покрытие толщиной 0,12-0,15 мм.

**Пример.** Направляющую колонку изготавливают из стали 38Х2МЮА и наносят на ее рабочую поверхность пленку на основе нитрида титана в процессе конденсации титана в вакууме с плотной бомбардировкой. Толщина полученной пленки составляет 0,006 мм. Направляющую втулку изготавливают из стали 20. На ее рабочую поверхность наносят детонационным способом твердосплавное покрытие толщиной 0,14 мм из порошка ВК15 с величиной зерна 15-20 мкм.

Износостойкость направляющих элементов штампов с покрытиями рабочих поверхностей, нанесенными этим способом, превышает в 18-20 раз износостойкость элементов, изготовленных из высокопрочных легированных сталей, прошедших термическую обработку, и в 4-5 раз элементов, армированных твердым сплавом. Предварительная очистка поверхности основного металла возбуждением тлеющего разряда в непосредственной близости от очищаемой поверхности часто недостаточно эффективна, особенно в высоковакуумных напылительных установках.

Для повышения качества очистки поверхности перед ее напылением [а. с. 211265 (СССР)] можно поверхность основного металла детали предварительно очистить с помощью пучка электромагнитных волн (генерируемых, например, лазером), используя эффект фотодесорбции. Способ обеспечивает более качественную очистку поверхности подложки перед началом или, в случае нанесения многослойных покрытий, непосредственно в процессе напыления. Тем самым повышают качество напыляемых пленок.

Изнашивание режущего инструмента связано главным образом с температурой рабочей поверхности. При низкой скорости резания скорость изнашивания определяется адгезионными процессами, возникающими в зоне резания. При высокой температуре возникает диффузионное проникновение, отрыв, изнашивание и истирание. Поэтому следует учесть, что покрытие TiN наиболее эффективно работает в условиях изнашивания по передней поверхности, а TiC – при изнашивании по задней поверхности.

Износостойкие покрытия из нитрида титана наносят на дисковые долбяки, червячные и дисковые резцы, осевые инструменты, изготовленные из быстрорежущей стали, а также на инструменты, оснащенные твердым сплавом.

На стандартизованные неперетачиваемые твердосплавные пластины из сплавов типа ТК целесообразно наносить равномерное покрытие нитрида титана (твердостью 2500 HV) толщиной 5-7 мкм. Стойкость твердосплавных пластин с таким покрытием возрастает в 1,5-1,8 раза при увеличении скорости резания на 25-30%. Для инструмента, изготовленного из быстрорежущих сталей типа P18, P9, P6M5 и P6M3, толщина покрытия должна быть в пределах 3-5 мкм при твердости 2600-2800 HV.

**Нанесение многослойного покрытия на режущие твердосплавные пластины.** Прочность и износостойкость покрытия зависят от химического состава и физико-механических свойств материала слоев. Например, двухслойное износостойкое покрытие может состоять из карбидов титана TiC (нижний слой) и боридов титана TiB<sub>2</sub> (верхний слой). В качестве подложки используют твердые сплавы на основа WC и Co с достаточно высокой прочностью и твердостью (до 1800 HV), которая в диффузионной зоне повышается (до 2200 HV).

На режущие пластины может быть нанесено трехслойное покрытие из TiN со следующими слоями: первый – из TiC толщиной 2-3 мкм, второй – из смеси TiC и TiN, третий – из TiN толщиной 2-3 мкм.

Многослойное покрытие из карбонитридов и карбида титана при общей толщине слоя до 10 мкм может состоять из нескольких очень тонких слоев. Наружный слой образует очень стойкий к износу и диффузии карбонитрид титана. Под этим располагается несколько промежуточных слоев из карбонитридов титана различного состава. Нижний слой из карбида титана обеспечивает прочное сцепление с основой. Наружный слой придает покрытию золотистый оттенок.

Тонкий защитный слой, наносимый на поверхность твердосплавной режущей пластины, обладает низкой теплопроводностью. Он уменьшает силу трения на поверхности контакта инструмент-стружка. Это приводит к снижению температуры рабочей поверхности и, следовательно, к уменьшению скорости диффузионного изнашивания. Кроме того, защитный слой выполняет роль барьера, препятствующего диффузии и уменьшающего схватывание металлов инструмента и стружки. Степень уменьшения скорости изнашивания зависит от свойств материала защитного слоя. Изнашивание по задней поверхности становится значительно меньше при замене защитного слоя из TiN защитным слоем из TiC. Многофазное защитное покрытие, в котором каждый отдельный тонкий слой имеет определенное назначение, обеспечивает улучшение вязкости и износостойкости режущих пластин.

**Осаждение покрытий катодно-ионной бомбардировкой в вакууме** выполняют для упрочнения деталей машин, технологической оснастки и инструментов, изготовленных из конструкционных и инструментальных материалов, в том числе твердых сплавов и быстрорежущих сталей, осаждавая на детали из этих материалов тонкопленочные износостойкие покрытия.

Сущность способа состоит в распылении тугоплавкого металла катода, образовании ионов в низкотемпературной плазме и бомбардировке ими упрочняемой поверхности. Материал катода (напыляемый материал) испаряется в виде высокоскоростных струй (скорость испарения  $1 \times 10^6$  см/с), содержащих как заряженные, так и нейтральные частицы. Струи представляют собой плазменные потоки атомов и ионов с высокой степенью ионизации.

Деталь (анод) помещают на пути плазменных потоков. На нее подают отрицательный потенциал, ускоряющий поток ионов. Выбитые из катода атомы разгоняются до высоких энергий, с большой скоростью бомбардируют поверхность анода, очищают ее, внедряются в кристаллические решетки поверхностного слоя и, накапливаясь, образуют на поверхности микропленку осаждаемого (конденсируемого) вещества.

Способ позволяет создавать износостойкие покрытия из карбидов, нитридов, оксидов, карбонитридов тугоплавких металлов (Ti, Mo, Cr, W, V и др.), а также многослойные и многосоставные (композиционные) покрытия.

Принципиальная особенность способа по сравнению с другими способами создания покрытий в вакууме (термическим испарением, катодным и ионно-плазменным распылением) в том, что в условиях электродугового разряда вещество катода превращается в потоки плазмы, и конденсат паров осаждаемых металлов образуется за счет как нейтральной, так и заряженной компонент плазмы. Процесс начинается с того, что перед осаждением покрытия поверхность детали, помещенной в вакуумированную камеру установки, очищают интенсивной бомбардировкой ее ионами осаждаемого вещества, обладающими энергией 1 кэВ и выше. Одновременно происходит нагрев детали до температуры конденсации, которая также обеспечивает высокую адгезию покрытия.

В процессе осаждения на деталь подают отрицательный потенциал 150-200 В и поддерживают необходимую температуру конденсации. Очистка и термомеханическое активирование поверхности подложки способствуют созданию адгезионной сцепляемости основы и пленки, закрытию (“залечиванию”) поверхностных микротрещин и частичному упрочнению поверхности твердосплавной или стальной подложки. Для получения износостойкого покрытия в вакуумную камеру вводят реакционный газ, который, реагируя с распыленным материалом катода и осаждаясь (конденсируясь) на поверхность изделия, создает соответствующее упрочняющее покрытие в виде химического соединения (нитридов, карбидов и др.), обладающего хорошей адгезией с основным материалом. Покрытие можно наносить не только при высоких, но и при достаточно низких температурах плазмы, что расширяет диапазон упрочняемых материалов. Способ позволяет наносить покрытия на инструмент из закаленной быстрорежущей стали без применения последующей термообработки. В процессе нанесения материал покрытия приобретает новые физико-механические свойства, существенно отличающиеся от исходных.

Микротвердость покрытия можно изменять, регулируя параметры процесса, что создает возможность осаждать пленку с заранее заданными свойствами. Процесс проводят при температуре 400-600 °С, без разупрочнения подложки из твердых сплавов или быстрорежущих сталей. Параметр шероховатости  $Ra$  покрытия достигает 0,08-0,32 мкм, а его толщина зависит от условий работы инструмента, оснастки или детали и обычно составляет 5-20 мкм.

Способ дает возможность образовывать и осаждать слоистый конденсат, состоящий из чередующихся твердых слоев [например, из нитридов Мо либо Тi (3000-3600 HV) ] и мягких [например, из чистых Мо либо Тi (600 HV)].

Покрытие из нитрида титана обладает высокой микротвердостью, пониженным коэффициентом трения, низкой химической активностью. Сочетание таких свойств приводит к снижению сил резания, уменьшению температуры в зоне резания и сокращению интенсивности изнашивания режущих инструментов. Преимущества способа в сравнении с методами химико-термической обработки – возможность получения на рабочих поверхностях покрытия с высокой микротвердостью (2600-3800 HV); более высокая (в 2-6 раз) производительность технологического процесса упрочнения; возможность проведения технологического процесса осаждения покрытия при температурах нагрева подложки, не превышающих температуру ее отпуска на высокую твердость; возможность упрочнения прецизионных режущих инструментов и деталей без дополнительной последующей размерной обработки резанием; стабильно высокая стойкость покрытия к износу, коррозии и образованию окалины.

Технологический процесс осаждения покрытия разделяют на этапы: прогрев, очистку и напыление.

Основные операции типового технологического процесса: подготовка поверхностей упрочняемой детали или инструмента (обезжиривание поверхности); загрузка детали или инструмента на позиции напыления в камеру установки; вакуумирование камеры до рабочего давления; очистка поверхности в тлеющем разряде (бомбардировка упрочняемых поверхностей тяжелыми ионами реагирующего газа); ионная бомбардировка и нагрев упрочняемой детали или инструмента; конденсация продуктов плазмохимической реакции на рабочие упрочняемые поверхности; охлаждение детали или инструмента в среде газообразного азота; выгрузка упрочняемых деталей или инструментов из установки.

Для предотвращения конденсации паров воды, удаления паров с поверхностей стенок и дегазации этих поверхностей в процессе откачки и вакуумирования осуществляют прогрев камеры горячей водой (60 °С), текущей по трубам, приваренным к стенкам рабочей камеры. Очистку поверхности подложки (анода) от загрязнений обеспечивают ионным облучением ("травлением"). Для этого напыляемой заготовке сообщают высокий отрицательный потенциал. Ионы металла катода, возникающие в результате электродугового разряда, ускоряются под действием потенциала до энергии, позволяющей выбить с поверхности изделия атомы поверхностного слоя. В режиме напыления происходит испарение материала катода (например, Ti) и обдув поверхности заготовки (анода) ионизированным паром металла катода и реакционным газом (например, азотом). В результате на поверхности изделия образуется покрытие из нитрида титана.