

Лекция 10. Напыление покрытий. Газотермические, газодинамические и конденсационные методы. Механизм физико-химических процессов, обеспечивающих прочное сцепление частиц

Развитие современной технологии обработки материалов сопровождается активным внедрением методов поверхностной инженерии, направленных на целенаправленное изменение свойств поверхностного слоя изделий. Одним из наиболее эффективных и широко применяемых направлений является нанесение покрытий методом напыления. Эти технологии позволяют формировать защитные и функциональные слои на поверхности деталей без значительного изменения структуры основного материала, что делает их особенно ценными для машиностроения, энергетики, авиационной техники и других отраслей промышленности.

Методы напыления обладают рядом важных технологических преимуществ. Прежде всего они позволяют получать покрытия из различных материалов — металлов, сплавов, керамики, полимеров и композиционных систем. Кроме того, данные методы дают возможность наносить покрытия на изделия сложной геометрической формы, обеспечивая высокую производительность технологического процесса и возможность формирования покрытий с заранее заданными свойствами.

В современной технологии поверхностной обработки принято выделять несколько основных групп методов напыления. К наиболее распространённым относятся газотермические методы, газодинамические методы и вакуумно-конденсационные методы нанесения покрытий. Каждая из этих групп основана на определённых физических процессах и имеет свои технологические особенности.

Переходя к рассмотрению газотермических методов напыления, необходимо отметить, что они являются одной из наиболее широко используемых технологий нанесения покрытий. Газотермическое напыление основано на формировании покрытия из потока нагретых дисперсных частиц

материала, которые ускоряются газовой струёй и направляются на поверхность изделия.

Размер частиц напыляемого материала обычно составляет от 10 до 200 микрон. В процессе напыления частицы нагреваются до температуры плавления или несколько выше неё и с высокой скоростью направляются на поверхность детали. При ударе о поверхность расплавленные частицы интенсивно деформируются и растекаются, формируя тонкие дискообразные элементы структуры покрытия, которые получили название «сплэты».

Формирование газотермического покрытия представляет собой сложный процесс, включающий несколько последовательных стадий. На первом этапе происходит нагрев и ускорение частиц напыляемого материала в газовом потоке. Для обеспечения качественного сцепления покрытия с основой важно, чтобы частицы достигали поверхности детали в состоянии перегрева примерно на 50–100 °С выше температуры плавления.

На следующем этапе происходит взаимодействие частиц с поверхностью детали. При ударе о поверхность расплавленные частицы интенсивно деформируются и растекаются, заполняя микронеровности шероховатой поверхности. Одновременно происходит быстрое охлаждение и затвердевание материала, в результате чего формируется слоистая структура покрытия.

Газотермическое напыление включает несколько разновидностей технологических процессов. Одним из наиболее распространённых является плазменное напыление. В данном методе используется струя низкотемпературной плазмы, температура которой может достигать 5000–15000 К. Такая высокая температура позволяет расплавлять практически любые материалы, включая тугоплавкие керамические соединения.

Другим распространённым методом является газопламенное напыление. В этом случае нагрев материала осуществляется пламенем горючего газа, а

расплавленный материал распыляется струёй газа на поверхность изделия. Этот метод является одним из наиболее ранних способов получения напылённых покрытий, однако он до сих пор широко применяется благодаря своей технологической простоте.

Значительное распространение получил также метод детонационного напыления. Источником энергии в данном процессе является детонация газовой смеси, которая создаёт мощную ударную волну. Под действием этой волны частицы материала ускоряются до скоростей порядка 800–1200 м/с. Высокая скорость частиц обеспечивает формирование плотных покрытий с высокой прочностью сцепления.

К числу газотермических методов относится также дуговая металлизация. В данном процессе материал электрода расплавляется электрической дугой, после чего расплавленный металл распыляется струёй газа и осаждается на поверхности детали.

Кроме того, применяется высокочастотная металлизация, при которой нагрев материала осуществляется с использованием высокочастотного электромагнитного поля. Этот метод обеспечивает равномерное расплавление материала и последующее его распыление.

После рассмотрения газотермических методов необходимо перейти к анализу структуры формируемого покрытия. Напылённое покрытие имеет сложную многослойную структуру, которая формируется в результате последовательного осаждения деформированных частиц.

В структуре покрытия можно выделить несколько характерных зон. На границе между покрытием и основным металлом формируется переходная зона, которая определяет прочность адгезии покрытия к подложке. От качества этой зоны во многом зависит долговечность покрытия.

Внутри самого покрытия образуются межслойные границы, возникающие между отдельными слоями сплэтов. Эти границы влияют на когезионную прочность покрытия и его механические свойства.

Кроме того, внутри покрытия присутствуют границы между отдельными частицами. Характер взаимодействия между этими частицами определяет плотность покрытия, его пористость и сопротивление разрушению.

Помимо газотермических методов, в современной технологии всё более широкое распространение получает газодинамическое напыление. Одним из наиболее известных процессов данного типа является холодное газодинамическое напыление.

В отличие от газотермических методов, в данном процессе частицы материала не расплавляются. Они ускоряются потоком холодного газа до сверхзвуковых скоростей, которые могут достигать 1000 м/с и более. При этом температура газовой струи составляет от 0 до 500 °С, что значительно ниже температуры плавления большинства материалов.

Формирование покрытия при холодном газодинамическом напылении происходит за счёт интенсивной пластической деформации частиц при ударе о поверхность детали. Высокая скорость удара вызывает локальный нагрев в зоне контакта и способствует формированию прочного соединения между частицами и поверхностью основы.

Данный метод обладает рядом существенных преимуществ. Прежде всего отсутствует высокотемпературное окисление материала, что позволяет сохранять химический состав напыляемого вещества. Кроме того, минимизируется термическое воздействие на деталь, что предотвращает изменение структуры основного материала.

Важным преимуществом является также высокая плотность получаемого покрытия и низкая пористость. Благодаря этому свойства покрытия оказываются близкими к свойствам исходного материала.

Ещё одной важной группой методов являются вакуумно-конденсационные методы напыления. Эти методы основаны на осаждении покрытия из потока атомов, молекул или ионов в условиях вакуума.

Вакуумные методы позволяют получать покрытия высокой чистоты, плотности и равномерной толщины. Благодаря этим свойствам они широко применяются в электронной промышленности, приборостроении и производстве высокоточных изделий.

Одним из вариантов вакуумного напыления является термовакуумное испарение. В данном процессе материал нагревается до температуры испарения с использованием различных источников энергии, например резистивного нагрева, электронного луча, лазерного излучения или индукционного нагрева.

Другим методом является ионно-плазменное напыление. В этом процессе поток частиц ионизируется и ускоряется электрическим полем, что обеспечивает высокую энергию частиц и способствует формированию прочного покрытия.

Широкое применение получил также метод катодного распыления. В данном случае катод бомбардируется ионами инертного газа, что приводит к выбиванию атомов материала с его поверхности. Эти атомы затем осаждаются на поверхности изделия.

В некоторых случаях применяется реакционное напыление. В процессе осаждения в вакуумную камеру вводятся активные газы, например азот или кислород. В результате химического взаимодействия образуются соединения высокой твёрдости — нитриды, карбиды или оксиды металлов.

Особое внимание при нанесении напылённых покрытий уделяется механизму сцепления покрытия с основным металлом. Прочное соединение покрытия с подложкой обеспечивается совокупным действием нескольких физических и химических механизмов.

Первым механизмом является механическое сцепление. При ударе расплавленные частицы заполняют микронеровности поверхности, формируя своеобразный механический «замок», удерживающий покрытие на поверхности детали.

Вторым механизмом является металлургическое сцепление. При высоких температурах на границе раздела происходит взаимная диффузия атомов покрытия и основного металла. В результате формируется переходная зона, обеспечивающая прочную связь между слоями.

Третьим механизмом является химическое взаимодействие. На границе раздела могут образовываться химические соединения, которые дополнительно усиливают сцепление покрытия с поверхностью детали.

Наконец, важную роль играют межатомные силы притяжения. Эти силы обеспечивают дополнительное удержание покрытия на поверхности и повышают его устойчивость к механическим нагрузкам.

Подводя итог рассмотренному материалу, следует отметить, что методы напыления покрытий являются одним из важнейших направлений современной технологии модификации поверхности материалов. Они позволяют эффективно повышать износостойкость, коррозионную стойкость, жаростойкость и антифрикционные свойства деталей машин.

Благодаря высокой технологической гибкости и возможности применения различных материалов методы напыления продолжают активно развиваться и находят всё более широкое применение в машиностроении, авиационной технике, энергетике и электронике.