

**ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
КАК УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТ**

магистр техн. наук П. Н. СОЛДАТЕНКО,

канд. техн. наук, доц. Ю. П. ГОЛУБЕВ

*(Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой)*

Обладая рядом преимуществ перед традиционными способами обработки поверхностей изделий, электронно-лучевые технологии, наряду с лазерными, занимают одну из лидирующих позиций среди технологий модифицирующего воздействия на изделия не только машиностроительной отрасли, но и в металлургии, микроэлектронике, медицине и т.д. Несмотря на первоначальную направленность применения электронных пучков в качестве инструмента, для реализации электронно-лучевой сварки, в последнее время активно развиваются технологии получения тонких пленок, очистки поверхности, локального упрочнения и прочие. В данной работе представлены основные направления электронно- и ионно-лучевых технологий, применяемые для решения определенных технологических задач.

Ключевые слова: *электронно-лучевые технологии, сварка, нанесение покрытий, переплав.*

Электронно-лучевая сварка. Электронно-лучевая сварка – сварка с высокой концентрацией энергии. Сущность процесса состоит в использовании кинетической энергии потока электронов, движущихся с высокими скоростями. Для уменьшения потери кинетической энергии электронов за счет соударения с молекулами газов воздуха, а также для химической и тепловой защиты катода в электронной пушке создают вакуум порядка $0,1 - 10^{-4}$ Па. Достоинства электронно-лучевой сварки: высокая плотность мощности в пучке, которая выделяется не только на поверхности изделия, но и на некоторой глубине в объеме основного металла; малое количество вводимой энергии, в сравнении с другими технологиями получения сварных соединений с аналогичными параметрами шва; отсутствие насыщения расплавленного и нагретого металла газами[1].

Электронно-лучевой переплав. Физической основой процесса электронно-лучевого переплава, является превращение кинетической энергии электронов, разогнанных в электрическом поле до скоростей $10^4 - 10^5$ м/с, в тепловую, при их торможении в поверхностном слое металла. Под влиянием бомбардировки ускоренными электронами осуществляется нагрев и плавление торца расходуемой

заготовки, а расплавленный металл стекает при этом в водоохлаждаемый медный кристаллизатор, где создается ванна жидкого металла, подогреваемая электронными лучами. По мере плавления расходуемой заготовки осуществляют вытягивание формируемого слитка со скоростью, обеспечивающей поддержание постоянного уровня жидкой ванны в кристаллизаторе. Так как при столкновении с атомами и молекулами газовой среды электроны теряют свою энергию и рассеиваются, то внутреннее пространство электронной пушки откачивают вакуумными насосами до давления $10^{-2} - 10^{-3}$ Па, а камеры плавки – до давления $10^{-1} - 10^{-2}$ Па. Технологии электронно-лучевого переплава позволяют получать сверхчистые вещества, включая металлы и полупроводники (кремний), за счет рафинирования в вакууме, сопровождающего переплав. Применение ПИЭЛ для технологии переплава открывает новые возможности, поскольку предельное допустимое рабочее давление, максимальные значения которого существенно ограничивают ресурс термокатодных пушек в технологиях переплава, в таких системах существенно выше.

Электронно-лучевое нанесение покрытий. При электронно-лучевом нанесении вакуумных покрытий нагрев и испарение вещества осуществляются в результате теплового действия электронов, бомбардирующих испаряемую мишень. Данным методом получают покрытия из сплавов металлов, полупроводников и даже диэлектриков. Электронно-лучевое нанесение покрытий характеризуется следующими преимуществами: при электронно-лучевом испарении капельная фаза практически отсутствует; при использовании составных тиглей (испаряемых материалов) достаточно просто изменять химический состав испаряемых частиц и их пространственное распределение; возможность автоматизации процесса испарения и, соответственно, нанесения покрытия в целом; получение химически чистых покрытий, т. к. нагревается только испаряемый материал.

Для реализации технологий электронно-лучевого нанесения покрытий необходимо: ускоряющее напряжение до 10 кВ; плотность мощности $10^4 - 10^5$ Вт/см²; скорость испарения $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^{-2}$ г/(см² · с); скорость роста покрытий – 10...60 нм/с.

Однако электронно-лучевые методы нанесения покрытий посредством высокоэнергетичных пучков, имеют ряд недостатков: относительно невысокий КПД электронно-лучевых устройств, поскольку более 25% потребляемой мощности идет на вторичное электронное излучение, нагрев тигля и т.д.; в процессе роста покрытия поверхность подложки подвергается воздействию высокоэнергетичных электронов, что может приводить к возникновению дефектов. Поэтому интересным представляется разработка методов нанесения покрытий с помощью низкоэнергетичных электронных и ионных пучков.

Электронно-лучевое испарение диэлектриков имеет ряд особенностей, основная из которых состоит в том, что их поверхность имеет высокое электрическое

сопротивление и при взаимодействии с ней потока электронов происходит накопление электронов в поверхностном слое (зарядка поверхности), приводящее к образованию тормозящего электрического поля.

Для увеличения скорости испарения диэлектриков используются ряд технологических приемов: предварительный нагрев поверхности мишени до температуры, при которой поверхностная электрическая проводимость возрастает и соответственно снижается эффективность зарядки поверхности; испарение диэлектрика с помощью двух и более электронных пушек, одна из которых является источником медленных электронов, при взаимодействии которых с поверхностью происходит снятие электрического заряда. Поэтому перспективным является использование источников электронов, работающих при повышенных давлениях и имеющих высокий ресурс, например ПИЭЛ или пушек на основе ВТР, когда объемный заряд электронного пучка компенсируется зарядом ионов [2].

Ионно-лучевое упрочнение. Ионно-плазменное азотирование (ИПА) – метод химико-термической обработки изделий из стали и чугуна с большими технологическими возможностями, позволяющий получать диффузионные слои нужного состава путем использования разных газовых сред, т. е. процесс диффузионного насыщения управляем, и может быть оптимизирован в зависимости от конкретных требований к глубине слоя и твердости поверхности.

Упрочняющей обработке методом ИПА могут подвергаться различные детали и инструменты. В результате ИПА можно улучшить следующие характеристики изделий: износостойкость, усталостную выносливость, антизадириные свойства, теплостойкость и коррозионную стойкость.

В сравнении с широко используемыми способами упрочняющей химико-термической обработки стальных деталей, такими, как цементация, нитроцементация, цианирование и газовое азотирование в печах, метод ИПА имеет следующие основные преимущества: более высокая поверхностная твердость азотированных деталей; отсутствие деформации деталей после обработки и высокая чистота поверхности; повышение предела выносливости и увеличение износостойкости обработанных деталей; более низкая температура обработки (400–600 °С), благодаря чему в стали не происходит структурных превращений; возможность обработки глухих и сквозных отверстий; сохранение твердости азотированного слоя после нагрева до 600–650 °С; возможность получения слоев заданного состава; возможность обработки изделий неограниченных размеров и форм; отсутствие загрязнения окружающей среды; повышение культуры производства; снижение себестоимости обработки в несколько раз.

Принцип действия ИПА заключается в том, что в разряженной (от единиц до сотен паскаль) азотсодержащей газовой среде между катодом (деталью) и анодом (стенками вакуумной камеры) возбуждается газовый разряд, образующий

активную среду (ионы, атомы, возбужденные молекулы), обеспечивающую формирование азотированного слоя, состоящего из внешней – нитридной зоны и располагающейся под ней диффузионной зоны.

Технологическими факторами, влияющими на эффективность ионного азотирования, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление, состав и расход рабочей газовой смеси. Основным недостатком такого процесса является существенное время воздействия (десятки и сотни часов), необходимого для достижения требуемой толщины. Поэтому современные исследования по улучшению этого метода направлены на поиск способов уменьшения времени обработки. Одним из факторов, способствующих этому, является температура подложки. Для повышения температуры подложки применяют различные нагреватели. Электронный пучок способен обеспечить эффективный управляемый локальный (поверхностный) нагрев. Поэтому предполагается перспективным использование электронного пучка, для повышения температуры подложки и, тем самым увеличивая эффективность азотирования.

Термоионное нанесение покрытий. Термоионное нанесение покрытий широко применяется при изготовлении интегральных микросхем, магнитных пленок, оптических и износостойких слоев. Осаждение пленок в условиях, когда материал поступает на подложку в виде атомов и ионов позволяет в широких пределах изменять композиционный состав покрытия и его структуру. Ионная бомбардировка в ряде случаев способствует снижению внутренних напряжений, возникающих в процессе формирования пленки.

Более простыми и надежными при сравнимой эффективности осаждения являются плазменные электронно-лучевые системы, в которых формирование электронного пучка происходит непосредственно у поверхности испаряемого вещества. В таких системах эмиттером электронов служит не катод электронной пушки, а окружающая тигель поверхность плазмы. Ускорение же электронного потока происходит электрическим полем приповерхностного слоя, которое возникает за счет разности потенциалов между плазмой и тиглем. При этом неотъемлемым элементом плазменных электронно-лучевых систем является внешний источник плазмы, основанный на каком-либо типе газового разряда.

Процесс образования ионного потока на обрабатываемую подложку происходит следующим образом. Пушкой создается первичный пучок электронов с энергиями порядка нескольких сотен эВ. Атомы рабочего газа в разрядном промежутке ионизируются первичными электронами, создавая плотную газоразрядную плазму. К тиглю с испаряемым веществом прикладывается положительный потенциал, необходимый для создания положительного смещения у поверхности тигля. При подаче положительного смещения на тигель, испаряемое вещество разогревается с образованием потоков ионов и нейтрального пара на обрабатываемую поверхность.

Процесс осаждения покрытий осуществляется как при заземленном, так и при изолированном подложкодержателе. В случае изолированного подложкодержателя его поверхность за счет непрерывного потока на нее электронов первичного пучка термоэлектронного источника заряжается отрицательно и начинает притягивать к себе ионы плазмы, тем самым, формируя ионный поток. Формирование ионного потока на изолированную поверхность посредством первичного электронного пучка используется для предварительной ионной очистки обрабатываемого образца и при синтезе покрытий на основе сложных химических соединений.

В работе [3] представлены результаты исследования по осаждению пленок на основе Al, Co, Cr, Cu, Ni, Ti. В качестве материала тигеля, в экспериментах был использован графит. Выбор графита был обусловлен его электропроводностью и температурной стойкостью.

Осаждение металлических покрытий осуществлялось в атмосфере аргона при давлении 10^{-2} Па. В случае Al и Cu энергия испаряющего электронного пучка поддерживалась на уровне $\sim 0,5$ кэВ, а его ток - в пределах 1...1,5 А. Энергия и ток первичного электронного пучка составляли 200 эВ и 2,5 А соответственно. Нанесение покрытий на проводящие подложки производилось как при заземленном, так и при изолированном подложкодержателе, а в случае диэлектрических поверхностей только при изолированном. Испарение более тугоплавких Co, Cr, Ni, Ti требовало увеличения энергии пучка-испарителя до 1 кэВ одновременно с увеличением его тока до 2,5...3 А. Покрытия на основе оксидов и нитридов выше перечисленных металлов формировались путем синтеза непосредственно на обрабатываемой поверхности. При этом металлическая фаза в виде частично ионизованного пара поступала с накаливаемого тигля, а кислород или азот (также в частично ионизованном виде) – из области транспортировки первичного электронного пучка. Энергия ионов металла соответствовала положительному смещению потенциала на тигле и лежала в пределах 0,5...1 кэВ (более высокая энергия соответствует металлам с более высокой температурой плавления). Энергия ионов газа-реагента посредством изменения энергии первичного электронного пучка поддерживалась в диапазоне 100...200 эВ, что было вполне достаточно для протекания реакции синтеза и не приводило к чрезмерному распылению осаждаемых покрытий.

Проведенные эксперименты [3] показали высокую эффективность плазменного электронно-лучевого метода осаждения покрытий на основе оксидов и нитридов металлов. Скорость роста покрытия из нитрида титана составляла порядка 0,2...0,3 мкм/мин. Скорости осаждения оксидных и нитридных пленок других металлов несколько отличались в ту или другую сторону, но были того же порядка. Полученные покрытия, которые обладают уникальными свойствами, показали хорошую прочность и высокую адгезию, как на металлических, так и на диэлектрических поверхностях.

Заключение. Проведенный анализ основных корпускулярно-лучевых технологий показал, что существует ряд технологий, в которых требуется обеспечить комбинированное воздействие электронными и ионными потоками. Причем в ряде случаев энергия таких потоков может не превышать единиц кэВ. Разработка систем, позволяющих формировать не только электронные, но и ионные пучки, является одним из перспективнейших направлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Плазменные эмиссионные системы для электронно-лучевых технологий. Часть I. / В. Г. Залесский [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. – 2016. – № 12. – С. 37–44.
2. Рыкалин, Н. Н. Основы электронно-лучевой обработки материалов / Н. Н. Рыкалин, И. В. Зув, А. А. Углов. – М. : Машиностроение, 1978. – 239 с.
3. Целуйко, А. Ф. Методические указания по термоионному формированию покрытий на основе нитрида титана / А. Ф. Целуйко, М. М. Юнаков. – Харьков, 2000. – С. 12