АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАЗАНСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. А.Н. ТУПОЛЕВА – КАИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КАЗАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ПЛАЗМА В ПРОЦЕССАХ НАНЕСЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

XIII Международная научно-техническая конференция

Казань, 02–04 ноября 2021 г.

Сборник статей

КАЗАНЬ
2022

УДК 5
ББК 22
Н61

Оргкомитет:
Кашапов Н.Ф. – доктор технических наук,
член-корреспондент АН РТ (**председатель**);
Даутов Г.Ю. – доктор технических наук,
член-корреспондент АН РТ (**зам. председателя**);
Кашапов Р.Н. – кандидат технических наук (**ученый секретарь**);
Лучкин А.Г. – кандидат технических наук;
Фадеев С.А. – кандидат физико-математических наук;
Кашапов Л.Н.

Программный комитет:
Баязитов Р.М. – доктор физико-математических наук;
Бухараев А.А. – доктор физико-математических наук, член-корреспондент АН РТ;
Гайсин Ф.М. – доктор физико-математических наук;
Даутов Г.Ю. – доктор технических наук,
член-корреспондент АН РТ (**зам. председателя**);
Зиганшин Р.Р. – доктор технических наук;
Исрафилов И.М. – доктор технических наук;
Кашапов Н.Ф. – доктор технических наук,
член-корреспондент АН РТ (**председатель**);
Кашапов Р.Н. – кандидат технических наук (**ученый секретарь**);
Тимеркаев Б.А. – доктор физико-математических наук;
Файзрахманов И.А. – доктор физико-математических наук;
Шаехов М.Ф. – доктор технических наук

Н61 **Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. XIII Международная научно-техническая конференция** (Казань, 02–04 ноября 2021 г.): сб. статей. – Казань: Издательство Казанского университета, 2022. – 200 с.

ISSN 2312-2285
ISBN

Сборник содержит материалы XIII Международной научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий», предоставленные учеными из ведущих учебных и научных учреждений Российской Федерации.

Организаторами конференции являются Академия наук РТ, Министерство образования и науки РТ, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук».

УДК 5
ББК 22

ISSN 2312-2285
ISBN

© Издательство Казанского университета, 2022

УДК 621.793

ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

П.А. Тополянский[1], С.А. Ермаков[2], А.П. Тополянский[1]
[1]ООО «Плазмацентр»,
[2]Санкт-Петербургский университет Петра Великого, Россия, Санкт-Петербург

topoljansky@mail.ru

Ключевые слова: напыление; покрытия; газотермическое напыление.

Рассмотрен процесс микроплазменного напыления, который является разновидностью атмосферного плазменного напыления и относится к прецизионным технологиям нанесения покрытий с применением сжатой электрической дуги низкой электрической мощности, в основном, до 2,5 кВт и током до 60 А.

Среди различных плазменных технологий, использующих плазму дугового разряда, атмосферное плазменное напыление (англ. Atmospheric Plasma Spraying - APS) применяется со второй половины прошлого века [1]. В качестве источника энергии для нагрева и разгона напыляемого материала при APS используется дуговой разряд мощностью до 40 кВт, током дуги до 600 А (в российском оборудовании) и до 150 кВт и током дуги до 1000 А (в зарубежных установках). Генерирование такого разряда осуществляется в устройствах, называемых плазмотронами, где электрическая дуга горит между изолированными катодом и анодом, обжатая газом и соплом. Плазмообразующей средой в большинстве случаев являются инертные и активные газы или их смеси - аргон, азот, воздух, водород, пропан и другие, которые поступают в дуговой разряд аксиально или тангенциально. Аксиальный ввод обеспечивает эффективную стабилизацию разряда, снижает турбулентные пульсации в плазме, обеспечивает возможность получения ламинарных потоков, повышает однородность прогрева газа в разряде и распределение его по сечению дугового канала. Область дуги, заполненная газоразрядной плазмой, имеет конечные размеры и окружена холодными стенками водоохлаждаемых элементов плазмотрона и относительно холодным газом. В этой области существования дуги важную роль играют процессы переноса тепла и частиц, которые протекают совместно с объемными процессами энерговыделения, образования и нейтрализации заряженных частиц. Поэтому газоразрядная плазма всегда отличается высокой пространственной неоднородностью, как по скоростным, так и по температурным параметрам.

В оборудовании для APS используются два типа плазмотронов - с самоустанавливающейся и фиксированной длиной дуги. Основными недостатками плазмотронов с самоустанавливающейся длиной дуги являются колебания точки привязки анодного пятна и шунтирование дуги. Данные эффекты приводят к периодическому изменению тока и напряжения, подводимых к плазмотрону, что в свою очередь вызывает пульсации температуры и скорости плазменной струи. Фиксированная длина дуги обеспечивается установкой в дуговом канале плазмотрона изолированных межэлектродных вставок (МЭВ). При этом длина столба дуги увеличивается, повышается напряжение на дуге и, соответственно, энтальпия и температура плазмы. Общим недостатком конструкций плазмотронов является интенсивное турбулентное перемешивание плазменного потока с холодным окружающим воздухом за его срезом, что приводит к уменьшению скорости и температуры частиц порошка. При этом возможно появление не оплавленных частиц порошка в зоне формирования покрытия, а также химическое взаимодействие с газами

воздуха. Минимизация этих проблем возможна за счет использования ламинарного течения плазменного потока на выходе из плазмотрона, которое уменьшает подмешивание холодного воздуха. Ламинарная струя имеет бо̀льшую протяженность и, соответственно, частицы порошка лучше проплавляются за счет увеличения времени их пребывания в плазменном потоке, малое сечение и более концентрированный вид, что приводит к повышению коэффициента использования порошка.

Микроплазменное напыление (МПН) является разновидностью APS, при этом в большинстве случаев оно относится к прецизионным технологиям, где требуется нанесение функциональных покрытий на локальные зоны малогабаритных или тонкостенных деталей с высоким коэффициентом использования материала и минимальным тепловложением. Термин «микро» в технологии МПН связан с применением сжатой электрической дуги низкой электрической мощности, в основном, до 2,5 кВт и током до 60 А. Используемые при МПН плазменные струи создаются при не высоких расходах плазмообразующего газа (до 3 л/мин), имеют сфокусированное ламинарное течение и, соответственно, не высокий уровень шума (менее 50 Дб). Основное достоинство плазмотронов с таким расходом плазмообразующего газа - это придание вводимым порошкам повышенной температуры за счет более длительного времени их пребывания в горячей зоне плазменного потока. Из-за низкого расхода плазмообразующего газа ввод порошка в плазменную струю обеспечивается порошковым дозатором специальной конструкции. Плазмообразующим газом при МПН является аргон, обеспечивающий наибольшую стабильность работы и долговечность элементов плазмотрона, минимальный нагрев подложки за счет быстрого падения температуры по длине плазменной струи, повышенные скорости аргоновой плазмы. В качестве материала катода используется стержневой легированный вольфрамовый электрод с модификацией наружной поверхности для защиты от окисления. Дополнительная стабилизация плазменной струи, защита анода и подложки от окисления при МПН осуществляется защитным газом - аргоном.

Конструктивно плазмотроны для МПН имеют два варианта исполнения - с вынесенным анодом (рис. 1) и с аксиальным вводом порошка (рис. 2). В плазмотронах с вынесенным анодом отсутствует традиционный анод с внутренним цилиндрическим или коническим каналом, а применяются вращающиеся или неподвижные поверхности, расположенные под углом к оси плазменного потока отдельно от катодного узла. В плазмотронах с аксиальным вводом порошка используются аноды с цилиндрическим каналом, а для обеспечения фиксированной длины дуги применяется МЭВ. Катодный и анодный узлы плазмотрона во всех вариантах имеют водяное охлаждение.

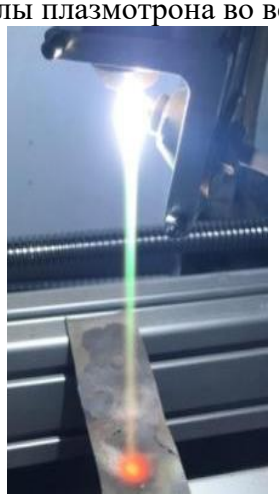

Рис. 1. Вид плазменной струи при МПН с вынесенным анодом

Рис. 2. Вид плазменной струи при МПН металлического порошка плазмотроном с аксиальным вводом

При МПН используются плазмотроны, как с аксиальным вводом, так и с вводом порошка в дуговой промежуток (в зону максимально приближенную к анодному пятну). При аксиальном вводе значительно уменьшаются потери порошка, расширяются возможности напыления порошковых материалов с разной зернистостью, отличающихся химическим составом и плотностями. Для стабилизации потока порошка используется фокусирующий газ, который дополнительно экранирует плазменный поток от повышенного охлаждения деталей дугового канала. В плазмотронах с вынесенном анодом ввод порошка в приосевую зону максимально приближенную к анодному пятну позволяет использовать наиболее высокотемпературную зону плазменного потока. В связи с тем, что расход плазмообразующего газа при МПН имеет не высокие значения (до 3 л/мин), то влияние расхода транспортирующего газа на турбулизацию плазменной струи также минимально. Подмешивание в минимальных количествах холодного транспортирующего и фокусирующего газов к плазмообразующему также не критично и не приводит к значительному снижению температуры в месте ввода порошка. Все это способствует увеличению коэффициента использования порошка и уменьшению угла его распыла.

Для подачи порошков в установке МПН используется порошковый дозатор эжекционно-импульсного принципа действия с дополнительной микровибрацией. Стабильная подача порошкового материала при МПН в режиме малых расходов (0,5-5 г/мин) обеспечивает его эффективное расплавление и формирование равномерного и сплошного покрытия заданной толщины в единицу времени.

Расход плазмообразующего газа для используемых плазмотронов МПН составляет 0,5-3,0 л/мин (при процессах APS – 30-50 л/мин). Средняя скорость частиц порошка при МПН – 50-70 м/сек (при обычном APS плазмотроном Sulzer Metco F4 скорость частиц достигает 140 м/сек). Температура частиц порошка при МПН в среднем составляет 2100-2300 °С, что сопоставимо с температурой порошка при APS процессах [2]. Удельная энтальпия плазмы (количество тепла, содержащегося в единице массы плазменного потока) при МПН в результате большей мощности, приходящейся на единицу расхода плазмообразующего газа, превышает удельную энтальпию плазмы в традиционных плазмотронах для APS. Металлические покрытия, наносимые МПН, могут иметь пористость ≤ 2%, адгезионную прочность – 40-70 МПа, коэффициент использования порошка – 60-80 % [2]. Последний параметр (коэффициент использования порошка) является интегральной характеристикой, по которому можно судить об энергетическом состоянии порошка в момент его соударения с подложкой.

Сфокусированное ламинарное течение плазменной струи при МПН, в отличие от турбулентного течения в APS процессах, обеспечивает получение минимальной ширины полосы покрытия (2-5 мм) и максимальную эффективность использования порошка. Известно, что турбулентное течение плазменной струи характеризуется:

- повышенным смешиванием с окружающим холодным воздухом, вызывающим быстрое охлаждение струи и ухудшающим прогрев порошка;
- окислением и неоднородным прогревом порошковых материалов;
- образованием большого угла распыла, приводящего к низкому коэффициенту использования материала.

Особенно следует отметить эффективность использования МПН по минимальному расходу плазмообразующего газа (до 3 л/мин). Для сравнения, в процессах газопламенного напыления совокупный расход газов больше в 15 раз (например, в газопламенной горелке CASTODYN DS 8000 расход ацетилена – 16 л/мин, кислорода – 20 л/мин, воздуха – 8 л/мин). Важно отметить, что в отличие от газопламенных методов все плазменные технологии напыления характеризуется

дополнительными механизмами воздействия плазменного потока на порошок, напыляемую деталь и покрытие за счет:

- направленного потока ионизированных, возбужденных частиц и озона;
- испускания инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения;
- термической неоднородности и неоднородности структуры плазмы;
- низкочастотных и высокочастотных пульсаций плазмы;
- специфического взаимодействия с поверхностью металла, всегда имеющим ионизированные пылевые частицы, слой жировых молекул, слой водяных молекул, адсорбированный слой кислородных анионов и нейтральных молекул воздуха.

Благодаря этим механизмам плазменный поток активирует как вводимый в плазму порошковый материал, так и напыляемую поверхность, что обеспечивает получение достаточно высокой прочности сцепления наносимых покрытий.

Наиболее близкой по форме плазменной струе при МПН соответствует вид пламени при высокоскоростных газопламенных процессах (HVOF, HVAF). Например, в установке HVOF TERMIKA 3 расход газов: пропан 15-20 л/мин, кислород 30-40 л/мин, воздух 500-700 л/мин, что по совокупному расходу в 200 раз выше, чем расход газов при МПН. При МПН источником нагрева деталей, на которые наносятся покрытие, является тепло передаваемое распыляемым порошком, в отличие от HVOF, где деталь нагревается пламенем, образуемым от сгорания горючих газов, поэтому из-за перегрева методами HVOF не целесообразно наносить покрытия на детали небольших габаритов. Дополнительным важным отличием МПН от HVOF является использование инертного газа, который обеспечивает защиту наносимого покрытия от окисления. При HVOF всегда применяется окислительная среда - кислородосодержащее пламя, которое взаимодействует с образованием тонкой оксидной пленки, как на напыляемом порошке, так и на подложке.

Для МПН используется широкая номенклатура порошковых материалов на основе сплавов железа, никеля, кобальта, меди, молибдена, титана, интерметаллиды, гидроксиапатит, керамика и другие. Оптимальный фракционный состав порошков для МПН – -45+15 мкм. В связи с температурой порошковых материалов (2100-2300 °С) и выбором оптимальной дистанции напыления (от 50 мм) при МПН возможно нанесение износостойких покрытий на основе карбидов вольфрама, в отличие от их сгорания при использовании традиционного процесса APS.

Виды реализуемых покрытий при МПН аналогичны традиционному процессу APS. Это износостойкие, антифрикционные, термостойкие, жаростойкие, эрозионностойкие, фреттингостойкие, кавитационностойкие, коррозионностойкие, диэлектрические, поглощающие и отражающие излучение, биосовместимые и другие покрытия. При МПН возможно совмещение напыления и оплавления самофлюсующих покрытий.

Приведенный анализ процесса и оборудования для МПН показывает широкие возможности данной технологии для напыления различных порошковых материалов. Минимальные габариты оборудования позволяют его использовать как в промышленных условиях, так и различных научно-исследовательских лабораториях.

Литература

1. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. Изд-во Политехнического ун-та. СПб.: 2013. - 406 с.
2. Lugscheider E., Bobzin K., Zhao L., Zwick J. Assessment of the microplasma spraying process for the coating application. Advanced Engineering Materials. 2006. № 8: 635-639.