

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ДЛЯ КОРОТКОИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЕННО-ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Р.С. Коньшин, Е.В. Харанжевский, А.Р. Газизянова, А.В. Тюкалов.
Место работы ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»
Email: rodion.konsh@yandex.ru

ПРОБЛЕМА И АКТУАЛЬНОСТЬ

Методы плазменно-электрохимической обработки материалов, такие как микродуговое (МДО) и плазменно-электролитическое окисление (ПЭО), применяются для формирования высокотвердых керамических покрытий на вентильных металлах (Al, Mg, Ti, Zr). Важно отметить, что сталь нельзя окислять классическим МДО или ПЭО из-за отсутствия барьерного оксида, что приводит:

1. к анодному растворению вместо роста диэлектрика;
2. к плохой адгезией;
3. к охрупчиванию и трещинам.

Задача создать эффективный и экономически доступный метод плазменной электрохимической обработки металлов и сплавов. В альтернативу вакуумным и импульсным технологиям обработки сталей.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

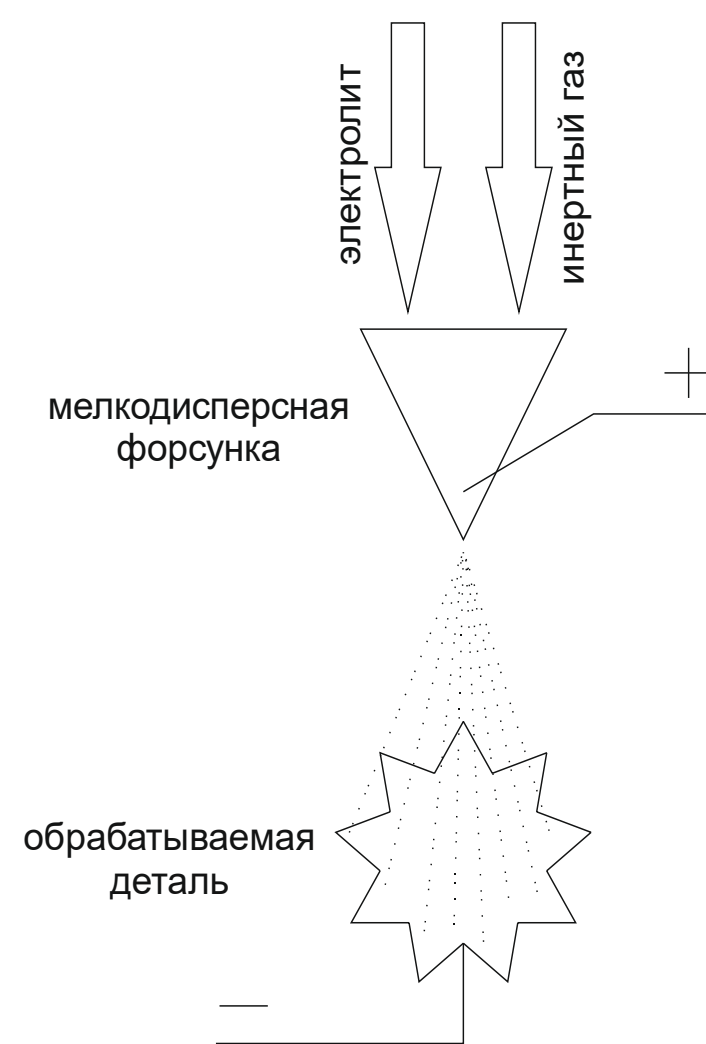
В основе предлагаемого метода лежит принципиальный переход от классических электрохимических процессов, протекающих в объёме жидкого электролита, к контролируемому электростатическому распылению, сопровождающемуся генерацией дискретных локальных микроплазменных каналов. Такой подход позволяет преодолеть фундаментальное ограничение, характерное для микродугового и плазменно-электролитического окисления стали, а именно — отсутствие барьерного оксида и неизбежное анодное растворение материала.

За наносекунды типичные электрохимические реакции, включая растворение железа и образование рыхлых оксидов, просто не успевают инициироваться. В результате реализуется так называемый «холодный» макропроцесс, при котором нагрев до высоких температур происходит лишь в локальных микрообъёмах, тогда как вся деталь в целом остаётся холодной. Это полностью исключает термоциклические напряжения, охрупчивание и появление трещин. Более того, в условиях столь быстрого пробоя возникает эффект прямой имплантации: ионы внедряемых элементов разгоняются до энергий, характерных для вакуумной ионной имплантации

Экспериментальная установка, включает в себя три основных узла. Первым из них является пневматический сопло, которое осуществляет первичное механическое распыление жидкого электролита до фракции капель размером не более 100 микрометров. Вторым узлом служит источник высокого постоянного напряжения в диапазоне от 20 до 60 киловольт, причём положительный полюс (анод) подключается к металлическим частям сопла, а отрицательный (катод) — к обрабатываемой детали. Третьим обязательным элементом является система нагрева подложки, которая поддерживает температуру стали на уровне 200 градусов Цельсия. Нагрев до этой температуры необходим для предотвращения образования на поверхности детали сплошной проводящей водяной плёнки.

ВЫБОР ПОДЛОЖКИ

Сталь 40X выбрана благодаря содержанию около 1% хрома — мощного нитридо- и карбидообразующего элемента. В процессе плазменной обработки внедряющиеся из аэрозоля азот и углерод связываются с хромом, формируя ультрадисперсные высокотвёрдые фазы CrN и Cr₂N. Это позволяет резко повысить микротвёрдость и износостойкость поверхностного слоя без последующей термической закалки.



ОТ КАПЛИ К ПЛАЗМЕ

Процесс модификации проходит три последовательные стадии. Первая стадия реализуется в полёте капли в межэлектродном пространстве. Под действием сильного электрического поля происходит интенсивное испарение растворителя, что приводит к критическому росту плотности поверхностного заряда. При достижении предела неустойчивости Рэлея первичная капля дробится на субмикронные фракции, а высокий потенциал на их поверхности инициирует локальный коронный разряд, частично ионизирующий окружающую среду.

Вторая стадия наступает в момент подлёта заряженной микрокапли к нагретой до 200 °С стальной поверхности. Реализуется эффект Лейденфроста: нижняя часть капли мгновенно вскипает, образуя наноразмерную парогазовую подушку. Вследствие сжатия межэлектродного зазора до микронных значений напряжённость электрического поля превышает порог пробоя газовой фазы, и вскипающий микрозазор пробивается искровым разрядом с формированием дискретного короткоживущего микроплазменного канала, где сама микрокапля выступает в роли жидкого микроэлектрода.

Третья стадия — процессы в точке привязки канала к стали. Локальная температура в наномасштабном пятне контакта мгновенно достигает 1000–3000 °С, обеспечивая скачкообразный рост коэффициента диффузии без объёмных термических деформаций. Компоненты микрокапли претерпевают плазмохимический пиролиз с генерацией сверхактивных атомарных радикалов, скорость поглощения которых металлом на порядки выше, чем у молекулярных газов. Одновременно сильное постоянное поле обеспечивает баллистическую направленность потока положительно заряженных ионов внедрения в разогретую плазмой подложку.

ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОЛИТУ

Принципиальные требования к электролиту для разрабатываемого метода. Электролит должен быть полностью летучим, то есть не оставлять после испарения растворителя твёрдого остатка. Все компоненты электролита должны распадаться в плазме исключительно на целевые элементы внедрения (азот и углерод) и газообразные продукты, которые удаляются из зоны обработки. Такими продуктами могут быть водяной пар, углекислый газ и аммиак. Такой подход обеспечивает чистоту процесса, исключает образование паразитных диэлектрических слоёв и гарантирует, что вся энергия плазменного канала идёт на имплантацию азота и углерода в сталь с образованием твёрдых нитридов и карбидов хрома. Выбор конкретного состава летучего электролита является предметом дальнейших оптимизационных экспериментов.

ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДА

Разрабатываемый атмосферно-плазменный метод модификации конструкционных сталей обладает рядом существенных преимуществ перед существующими технологиями. В отличие от вакуумной ионной имплантации, метод не требует дорогостоящего вакуумного оборудования и работает в обычных атмосферных условиях. В отличие от импульсных технологий, здесь используется простой источник постоянного напряжения без сложных систем формирования наносекундных импульсов. В отличие от классических методов микродугового или плазменно-электролитического окисления, метод применим к сталям, а не только к вентильным металлам. Локальный характер нагрева исключает объёмные термические деформации и необходимость последующей правки деталей. Наконец, глубокая диффузия достигается не за счёт высокой кинетической энергии частиц, а за счёт микроплазменных каналов, что делает процесс энергоэффективным и экономически доступным.