

Модификация гидрофильных свойств поверхности нержавеющей стали, обработанной в плазме диэлектрического барьерного разряда

Панфиленко Е.Д., Провлоцкая Д.В., Аксючиц А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Котов Д.А. – канд. техн. наук, доцент каф. МНЭ

В работе исследовано влияние обработки холодной плазмой диэлектрического барьерного разряда атмосферного давления на гидрофильные свойства поверхности нержавеющей стали марки AISI-304. Плазма генерировалась в коаксиальной разрядной системе с использованием аргона в качестве плазмообразующего газа. Экспериментально установлены зависимости краевого угла смачивания от времени обработки, расстояния от разрядной трубки до образца и расхода газа. Показано, что оптимальные режимы обработки (время 30–50 с, расстояние 1,5 см, расход аргона 150–250 л/ч) позволяют снизить краевой угол смачивания с 75° до 17–20°, что соответствует переходу поверхности из гидрофобного состояния в гидрофильное. Предложен механизм модификации, связанный с атомарной очисткой поверхности и образованием полярных кислородсодержащих функциональных групп на оксидном слое хрома. Метод является экологически безопасным, высокопроизводительным и перспективным для промышленного применения при подготовке металлических поверхностей к склеиванию, пайке и нанесению покрытий.

Введение. Нержавеющая сталь (например, марки AISI-304) благодаря высокой коррозионной стойкости, прочности и технологичности широко применяется в медицинском приборостроении, пищевой промышленности, авиационной и электронике. Однако многие технологические процессы – склеивание, нанесение защитных и функциональных покрытий, пайка – требуют хорошей смачиваемости поверхности, то есть гидрофильности. Исходная поверхность нержавеющей стали характеризуется краевым углом смачивания водой порядка 75°, что соответствует гидрофобным или слабогидрофильным свойствам. Причина – наличие адсорбированных органических загрязнений и пассивирующего оксидного слоя с низкой поверхностной энергией. Традиционные методы химической очистки и активации (органические растворители, щелочи, кислоты) экологически опасны, многостадийны и не всегда обеспечивают воспроизводимый результат. Альтернативой является обработка в холодной плазме атмосферного давления – экологически чистая, быстрая и легко встраиваемая в производственные линии технология. В данной работе исследовано влияние плазмы диэлектрического барьерного разряда (ДБР) на основе аргона на гидрофильные свойства поверхности нержавеющей стали и определены оптимальные режимы обработки.

Экспериментальная часть. Для генерации плазмы использовалась коаксиальная разрядная система с диэлектрическим барьером (кварцевая трубка внешним диаметром 8 мм, внутренний электрод – полый стержень $\varnothing 1,0$ мм, внешний – медная фольга). Питание осуществлялось от импульсного высоковольтного преобразователя (частота 20–100 кГц, напряжение 3–10 кВ). Плазмообразующий газ – аргон высокой чистоты с расходом от 50 до 300 л/ч. Обработка проводилась при атмосферном давлении, температура в зоне обработки не превышала 40 °С, что исключает термическую деструкцию материала. Образцы нержавеющей стали AISI-304 предварительно обезжиривались в изопропиловом спирте и сушились. Параметры обработки изменялись: время обработки от 5 с до 60 с, расстояние от торца разрядной трубки до образца от 0,5 до 3 см, расход газа от 50 до 300 л/ч. Количественная оценка смачиваемости проводилась методом лежащей капли (дистиллированная вода, объём капли $\approx 0,01$ мл) с фотофиксацией и последующей обработкой в AutoCAD. Вычислялся статический краевой угол смачивания, по его изменению судили о степени гидрофилизации.

Результаты и их обсуждение. Установлено, что обработка в плазме ДБР приводит к существенному снижению краевого угла смачивания. Уже за первые 10 секунд воздействия угол уменьшается с 75° до $\sim 30^\circ$, что свидетельствует о быстрой атомарной очистке поверхности от органических загрязнений и адсорбированной влаги. При дальнейшей обработке до 60 с угол снижается до 17° (рис. 1). Временная зависимость носит экспоненциальный характер: основной вклад вносится в первые 10–20 с, затем наступает насыщение. Оптимальное время обработки для нержавеющей стали составляет 30–50 с, поскольку дальнейшее увеличение времени не приводит к значимому улучшению смачиваемости, но повышает энергозатраты.

Исследование влияния расстояния от разрядной трубки до образца (рис. 2) показало, что минимальный краевой угол достигается на расстоянии 1,5 см – около 31° при времени обработки 30 с. При уменьшении расстояния до 0,5 см угол составляет $\sim 38^\circ$, что связано с недостаточным временем взаимодействия плазмы с поверхностью из-за высокой концентрации заряженных частиц и возможной рекомбинации. При увеличении расстояния до 2 см и более угол смачивания возрастает до 50–60°, так как плотность активных частиц (ионов, возбуждённых молекул, радикалов) в плазменном факеле снижается. Интересно, что даже на расстоянии 3 см, превышающем видимую длину факела ($\approx 2,2$ см при расходе 280 л/ч), наблюдается остаточное воздействие – угол смачивания остаётся меньше исходного (60° против 75°), что указывает на наличие долгоживущих активных частиц.

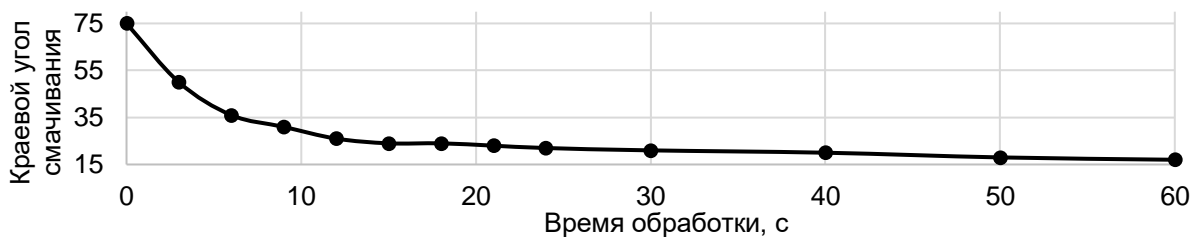


Рисунок 1 – Зависимость краевого угла смачивания нержавеющей стали от времени обработки

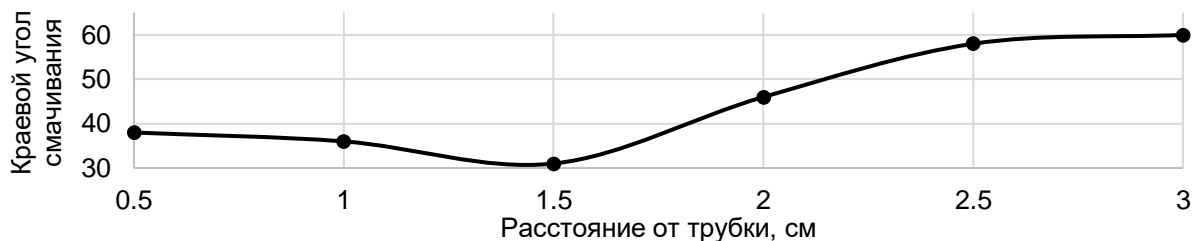


Рисунок 2 – Зависимость краевого угла смачивания нержавеющей стали от расстояния до разрядной трубки

Зависимость от расхода аргона (рис. 3) также имеет немонотонный характер. При увеличении расхода от 50 до 150 л/ч краевой угол резко снижается с 64° до 20°. В диапазоне 150–250 л/ч угол стабилизируется на уровне 18–20°, а при дальнейшем росте до 300 л/ч наблюдается незначительное увеличение (до 22°). Это объясняется тем, что с ростом расхода увеличивается длина факела и количество активных частиц, однако чрезмерно высокий поток может приводить к охлаждению плазмы и снижению эффективности передачи энергии на поверхность. Оптимальным для нержавеющей стали является расход 150–250 л/ч.

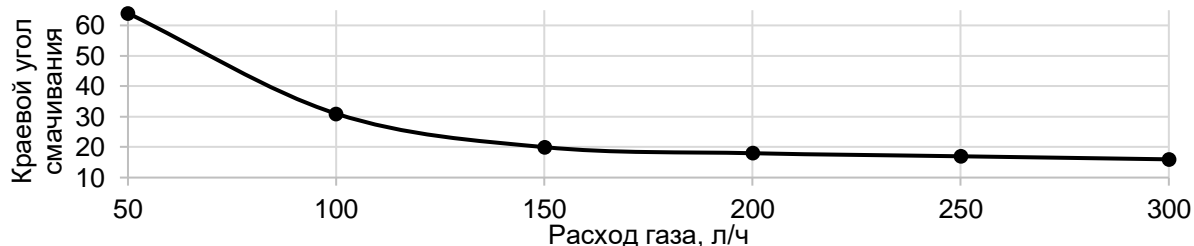


Рисунок 3 – Зависимость краевого угла смачивания нержавеющей стали от расхода аргона

Механизм модификации гидрофильных свойств включает два аспекта: физический (удаление загрязнений бомбардировкой ионами и метастабильными частицами) и химический (образование на поверхности полярных функциональных групп, преимущественно кислородсодержащих – гидроксильных, карбонильных). Для нержавеющей стали важную роль играет оксидный слой хрома (Cr~2~O~3~). Плазменная обработка приводит к его активации: увеличивается количество гидроксильных групп на поверхности, что повышает полярную составляющую поверхностной энергии и, как следствие, улучшает смачиваемость.

Заключение. Обработка поверхности нержавеющей стали в плазме диэлектрического барьерного разряда атмосферного давления является эффективным методом управления гидрофильными свойствами. Экспериментально установлены оптимальные режимы: время обработки 30–50 с, расстояние от разрядной трубки до образца 1,5 см, расход аргона 150–250 л/ч. Достигнуто снижение краевого угла смачивания с 75° до 17–20°, что соответствует переходу от гидрофобного состояния к высокогидрофильному. Преимущества метода – экологичность (отсутствие химических реагентов), быстрота, возможность интеграции в поточные линии, сохранение объёмных свойств материала. Полученные результаты могут быть использованы для подготовки поверхности нержавеющей стали к склеиванию, нанесению защитных покрытий, пайке, а также в биомедицинских приложениях, где требуется контролируемая смачиваемость.

Список использованных источников:

1. Шмаков М., Паршин В., Смирнов А. Очистка поверхности пластин и подложек // Технологии в электронной промышленности. – 2008. – №6. – С. 72–75.
2. Бармашов И. Эффективная очистка плазмой изделий электронной промышленности // Технологии в электронной промышленности. – 2013. – №2. – С. 42–44.
3. Уразаев В. Гидрофильность и гидрофобность / В. Уразаев // Технологии в электронной промышленности. – 2006. – №3. – С. 33–36.