

УДК 620.193.01

МОНИТОРИНГ РАННИХ СТАДИЙ КОРРОЗИИ СТАЛИ МЕТОДОМ  
СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНАК. В. ПАНТЕЛЕЕВ, А. Л. СВИСТУН, Д. Н. СЁМИН  
Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

Продление срока безопасной эксплуатации распределительных газопроводов является критически важной экономической и технической задачей. Значительная часть сетей эксплуатируется более 50 лет, а их полная замена требует высоких затрат. В связи с этим необходимы точные методы неразрушающего контроля, позволяющие оценить остаточный ресурс и локализовать зарождающиеся дефекты. Коррозия, инициируемая агрессивным грунтом, является ключевым фактором старения подземных трубопроводов. Традиционные методы оценки часто фиксируют изменения уже на развитой стадии. Для предиктивной диагностики требуются методы, чувствительные к ультраранним изменениям поверхности. Целью работы является исследование чувствительности метода сканирующего зонда Кельвина к ультраранним стадиям коррозии конструкционной стали с целью разработки подхода к предиктивной диагностике состояния материалов инженерной инфраструктуры.

Метод сканирующего зонда Кельвина является одним из наиболее перспективных методов исследования коррозионных процессов. Он позволяет бесконтактно картировать распределение контактной разности потенциалов (КРП) по поверхности, которое напрямую коррелирует с распределением работы выхода электрона (РВЭ) [1]. РВЭ представляет собой фундаментальную характеристику материала, чрезвычайно чувствительную к изменению химического состава поверхности, наличию оксидных плёнок, процессам адсорбции и зарождению коррозии [2]. Даже начальные стадии окисления, не обнаруживаемые оптическими методами, приводят к изменениям электронной структуры поверхности, что непосредственно отражается на величине РВЭ.

Исследования проведены на автоматизированной установке сканирующей электрометрии «СКАН». Ключевые характеристики установки:

- диапазон измеряемых потенциалов – от  $\pm 2$  до  $\pm 2500$  мВ;
- пространственное разрешение – 0,5 мм;
- максимальный размер сканируемой области –  $200 \times 200$  мм.

Для испытаний использовали образец из низкоуглеродистой стали Ст3. Поверхность образца была механически отшлифована, обезжирена и стабилизирована на воздухе для формирования естественной оксидной пленки. Коррозионное воздействие моделировали с помощью 5-процентного водного раствора NaCl. Образец погружали в раствор наполовину, создавая зону дифференциальной аэрации, что инициирует интенсивную локальную коррозию. Сканирование поверхности выполняли до погружения и через фиксированные интервалы времени после него (15 мин, 1 ч, 8 ч, 14 ч) (рис. 1).

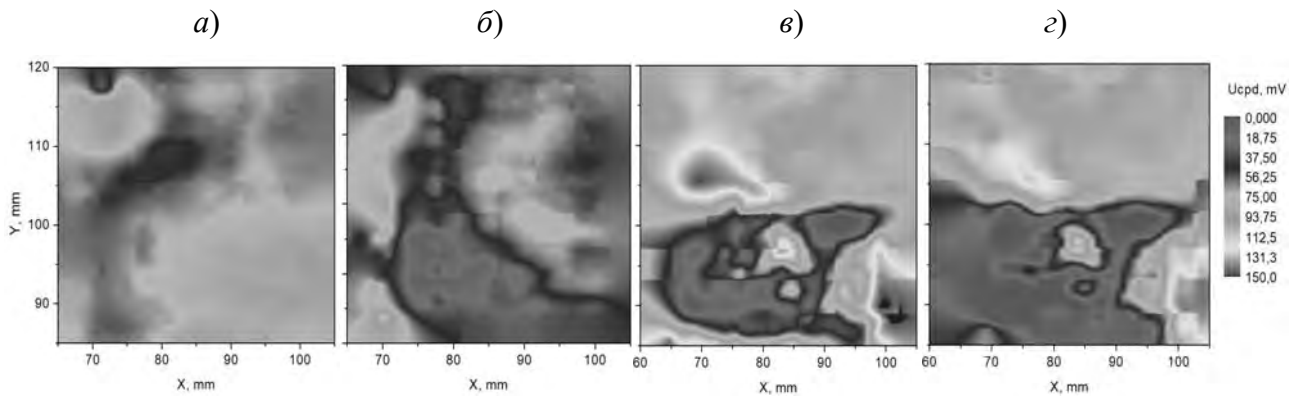


Рис. 1. Карты распределения контактной разности потенциалов образца низкоуглеродистой стали Ст3 при воздействии агрессивной среды (NaCl): *a* – в исходном состоянии; *б–г* – при времени экспозиции 1, 8 и 14 ч соответственно

В исходном состоянии (см. рис. 1, *a*) карта распределения КРП демонстрировала равномерное распределение потенциала (диапазон 45...90 мВ), что соответствует однородной пассивной оксидной пленке. Через 15 мин воздействия (рис. 1, *б*) зафиксировано появление локализованной зоны со сниженным потенциалом (10...30 мВ). Данная область соответствует активному анодному участку, где началось разрушение пассивного слоя. Через 1 ч (см. рис. 1, *в*) отмечено увеличение площади анодной зоны, что свидетельствует о прогрессирующем анодном растворении металла и разрастании питтинга. Через 8 и 14 ч наблюдалось качественное изменение картины. Погруженная часть образца приобрела сложную мозаичную структуру с чередованием зон низкого (активные аноды) и высокого (зоны с продуктами коррозии) потенциалов. Это соответствует стадии генерализованной коррозии с формированием неоднородного слоя вторичных продуктов.

Таким образом, экспериментально подтверждена высокая чувствительность метода сканирующего зонда Кельвина к начальным стадиям коррозии стали в хлоридсодержащей среде. Метод позволяет не только детектировать зарождение коррозионного очага за минуты, но и визуализировать пространственную динамику развития процесса, идентифицируя анодные и катодные зоны. Полученные результаты демонстрируют перспективность использования метода для предиктивной оценки коррозионного состояния конструкционных материалов, в том числе элементов подземных газопроводов, с целью обоснования продления их срока службы.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин / А. Л. Жарин, В. А. Микитевич, А. И. Свистун, К. В. Пантелеев // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172
2. **Panteleyev, K. V.** Methods for work function measurements for the test of a surface in a during friction / К. V. Panteleyev, А. I. Svistun, А. L. Zharin // Devices and Methods of Measurements. – 2015. – № 2. – С. 107–113.