

УДК 622.691.4:620.193.01

DOI 10.52928/2070-1683-2026-44-1-50-58

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДА КЕЛЬВИНА ДЛЯ РАННЕЙ ДИАГНОСТИКИ КОРРОЗИИ ТРУБОПРОВОДНОЙ СТАЛИ

А.Л. СВИСТУН,

канд. техн. наук, доц. К.В. ПАНТЕЛЕЕВ,

д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНЮК

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

*Раскрытие механизмов коррозии и повышение стойкости материалов требуют перехода от оценки интегральных характеристик к анализу процессов на микроуровне. Целью данной работы является установление корреляции между пространственным распределением работы выхода электрона (РВЭ) поверхности стали и локализацией очагов коррозионного разрушения с использованием метода сканирующего зонда Кельвина (СЗК). Эксперименты на образце трубопроводной стали в растворе NaCl продемонстрировали, что СЗК способен детектировать зарождение питтинговой коррозии путем картирования распределения РВЭ. В результате установлена корреляция между локальными вариациями РВЭ и иницированием коррозии, что позволяет диагностировать разрушение на докритической стадии, задолго до появления видимых дефектов. Таким образом, работа подтверждает, что метод СЗК служит высокоинформативным инструментом для микроуровневого анализа механизмов коррозии. Прямым развитием данного исследования является применение метода СЗК для изучения кинетики коррозии стали газопроводов в модельных и натуральных почвенных электролитах с целью разработки прогнозных моделей и карт коррозионной опасности.*

**Ключевые слова:** сканирующий зонд Кельвина (СЗК), подземные газопроводы, коррозия стали, потенциал Вольта, работа выхода электрона (РВЭ), питтинговая коррозия, распределение поверхностного потенциала, сталь Ст3, контактная разность потенциалов (КРП).

**Введение.** Проблема сохранения существующей системы распределительных газопроводов актуальна для Беларуси в связи с большим объемом существующей сети тем, что значительная часть газопроводов имеет срок эксплуатации более 50 лет. В этом контексте стоит задача продолжения эксплуатации последних или их замены. Замена газопроводов весьма дорогостоящая, что обуславливает необходимость решения задачи оценки надежности существующей сети с тем, чтобы продлить сроки эксплуатации. В работе [1] рассматриваются почвенные факторы, влияющие на состояние подземных распределительных газопроводов в части коррозионного разрушения. Там же показано, что одной из задач является определение состояния газопроводов, зависящего от ряда факторов, среди которых наиболее важным является влияние грунтов. Решения указанной задачи, как правило, обобщенные, что ставит актуальной задачу конкретизации характеристик взаимодействия пары металл-грунт.

Современные исследователи, помимо оценки стандартных интегральных характеристик материала (таких как скорость коррозии, прочность, глубина межкристаллитной коррозии и др.), подробно изучают причины коррозионного разрушения на макро- и микроуровнях, чтобы раскрыть механизмы коррозии и оптимизировать коррозионную стойкость материалов. В этих исследованиях широко применяются методы оптической микроскопии, сканирующей электронной микроскопии, электрохимические методы. В части изучения коррозии широкое распространение в последнее время находит метод сканирующего зонда Кельвина (СЗК). Данный метод обеспечивает определение пространственного распределения работы выхода электрона (РВЭ) с поверхности материала. РВЭ представляет собой фундаментальную характеристику твердого тела, зависящую от множества факторов, включая коррозионные процессы [2; 3]. Даже атомарные изменения состояния поверхности, такие как начальные стадии адсорбции или окисления, влияют на положение уровня Ферми, что непосредственно отражается на величине РВЭ [2]. Благодаря этой зависимости метод СЗК обладает способностью детектировать ультрананые изменения поверхностных свойств, инициированные коррозией, до проявления макроскопических или визуально наблюдаемых признаков [4; 5]. Эта особенность делает метод СЗК высокоэффективным инструментом для детектирования и пространственной локализации зарождающихся очагов коррозии.

**Основная часть.** В основе метода СЗК лежит принцип вибрирующего конденсатора (зонда Кельвина) [2]. Эталонная поверхность чувствительного элемента (зонд), выполненного из материала с относительно стабильными свойствами (золото, никель), и исследуемая поверхность образуют обкладки плоского конденсатора, разделенные воздушным зазором. Между обкладками конденсатора возникает контактная разность потенциалов (КРП, электричество Вольта). Измеряемая КРП ( $U_{CPD}$ ) прямо пропорциональна разности РВЭ ( $\phi$ ) поверхности материалов зонда и образца [2]:

$$U_{CPD} = \frac{\phi_1 - \phi_2}{e},$$

где  $e$  – заряд электрона.

В методе СЗК чувствительный элемент (зонд) совершает колебательные движения с заданной частотой перпендикулярно поверхности образца. Это приводит к периодическому изменению расстояния между зондом и поверхностью, которое модулирует ёмкость образованного ими конденсатора. При наличии КРП между материалами зонда и образца, модуляция ёмкости индуцирует в измерительной цепи переменный ток, амплитуда и фаза которого пропорциональны величине КРП.

Для точного измерения КРП применяется компенсационная (нулевая) схема. Электронная система обратной связи подаёт на зонд внешнее постоянное смещающее напряжение (компенсирующее напряжение,  $U_{bias}$ ). Это напряжение автоматически регулируется до полного подавления переменной составляющей тока в цепи. В состоянии компенсации приложенное напряжение равно по величине и противоположно по знаку искомой КРП ( $U_{bias} = -U_{CPD}$ ).

Последовательное сканирование зондом поверхности с регистрацией  $U_{bias}$  в каждой точке позволяет построить двумерную карту распределения КРП. Метод СЗК является бесконтактным и неинвазивным. Его важным практическим преимуществом в сравнении с большинством методов анализа поверхности является возможность проведения измерений в атмосферных условиях, без необходимости создания вакуума, что критически важно для исследований технических поверхностей, например, сегментов основного металла реальных трубопроводов.

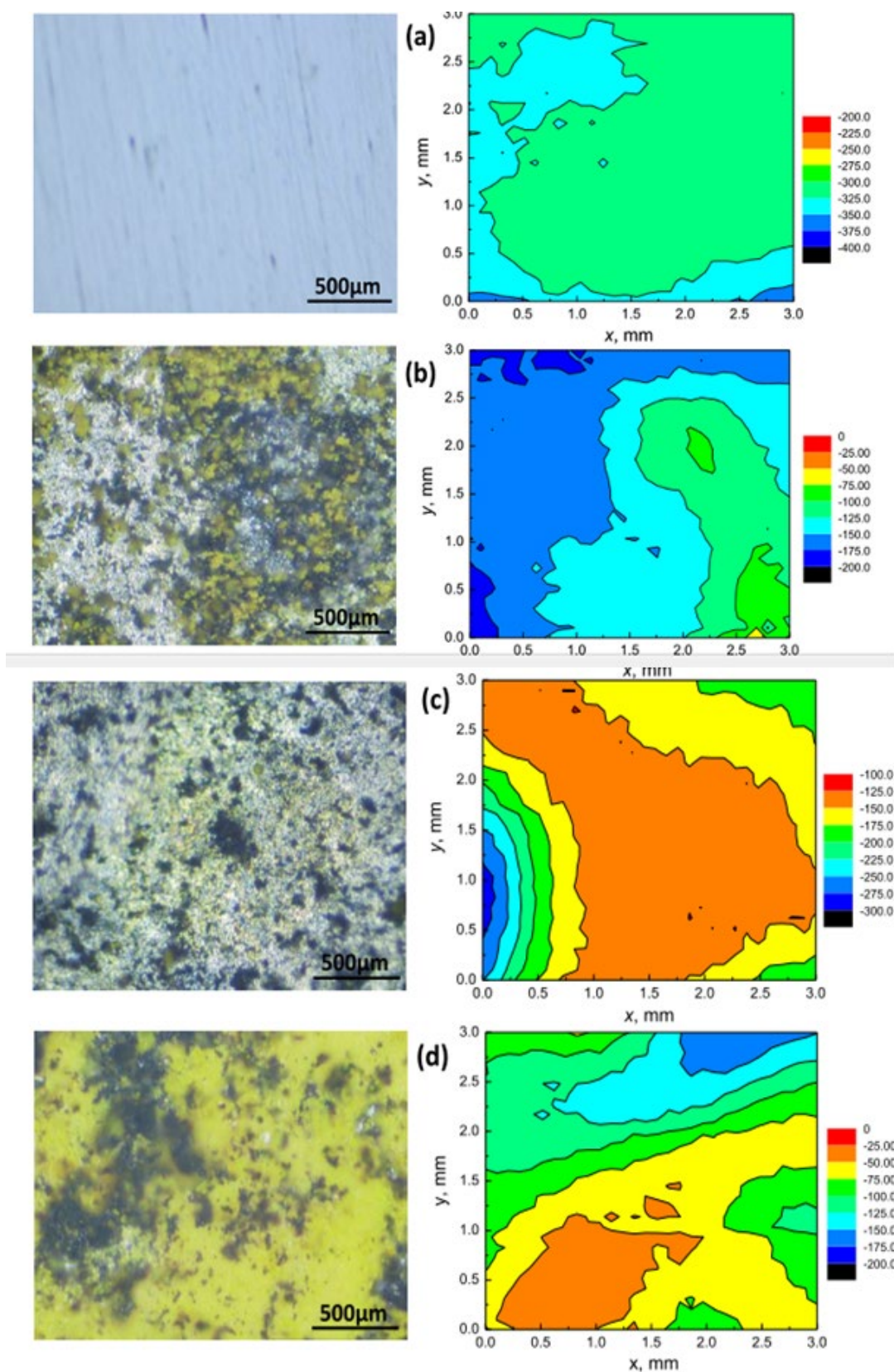
Метод СЗК в сканирующей модификации является одним из наиболее перспективных для исследования коррозионных процессов. Окисные пленки на металле вызывают соответствующие изменения физико-химического и механического состояния его поверхности. Такие изменения ведут к смещению электрохимического потенциала (уровень Ферми) внутри металла и образованию двойного электрического слоя на границе раздела металл-покрытие, что определяет значение РВЭ поверхности. Локальные изменения РВЭ прямо пропорциональны эффективному дипольному моменту и степени межмолекулярного взаимодействия материалов основания с покрытием. Нарушение межмолекулярных связей ведет к соответствующим изменениям РВЭ и, соответственно, неоднородности потенциального рельефа субстрата с покрытием, при этом в случае такого дефекта, как непрочный метод Кельвина регистрируется локальное изменение РВЭ относительно бездефектного участка [4].

В работе [6] методом СЗК изучается электрохимическое поведение и локальный механизм щелевой коррозии углеродистой стали 20 с отслоившимся покрытием, с акцентом на влияние размера дефектов (ширина 200 мкм и 800 мкм) после 10 дней погружения в имитирующий почвенный раствор. В результате максимальный потенциал дефекта 200 мкм (0,2500 В) был выше, чем у дефекта 800 мкм (0,0125 В). То есть с увеличением ширины дефекта общий потенциал смешался в отрицательную сторону. Визуализация области с аномальным потенциалом в месте дефекта с помощью метода СЗК позволяет отследить распространение подпленочной коррозии, поэтому данный метод может рассматриваться как эффективный метод диагностики целостности защитных покрытий.

СЗК используется для изучения влияния ионного состава грунта. Взаимосвязь между концентрацией растворенного кислорода (РК) (в диапазоне от 0,85 до 20,20 ppm) и электрохимической коррозией стали Х80 в моделирующем растворе кислой почвы методом СЗК исследуется в статье [7]. В результате измерений получено распределение потенциала по данным СЗК для стали Х80 в различном состоянии. Выяснилось, что поверхностный потенциал некорродированной стали Х80 был отрицательным, но его распределение было равномерным. Поверхность стали Х80 была покрыта продуктом коррозии после 48-часового воздействия в модельном растворе, независимо от уровня РК. Притом поверхностный потенциал сместился в положительную сторону, разность потенциалов увеличилась, и на карте СЗК появились явные катодные и анодные области. Кроме того, морфология поверхности корродированной стали Х80 и распределение потенциала СЗК показали хорошее соответствие, как видно на рисунке 1 (цитируется по [7]).

При РК 20,20 ppm поверхностный потенциал стали Х80 был более положительным, распределение было равномерным, а разница потенциалов составляла всего 98 мВ, что указывает на то, что на поверхности стали Х80 почти сформировался однородный слой продуктов коррозии. При РК 4,12 ppm поверхностный потенциал стали Х80 был более отрицательным и значительно колебался, максимальная разница потенциалов достигала 189 мВ, а активные области имели полосчатое распределение, что указывало на то, что на поверхности электрода мог образоваться слой рыхлого, пористого продукта коррозии, не изменяя активного состояния растворения стали.

В статье [8] с использованием метода СЗК изучается влияние диффузии ионов железа на коррозионное поведение углеродистой стали в трех различных средах, имитирующих почву: модельный раствор, каолин и агар-агель. Изменения потенциала на границе раздела «сталь-среда» четко отражают начало коррозии и состояние диффузии ионов металлов, а также рост диффузионной зоны и слоя ржавчины со временем. Диффузия ионов и продуктов коррозии в каолине была неравномерной и различалась в разных локальных областях. В почвенной среде, из-за сложности структуры почвы и различий в физико-химических свойствах, ионы металла и связанные с ними продукты коррозии также преимущественно диффундируют по пустотам с высокой пористостью или влажностью после растворения металла. Таким образом, метод СЗК способен визуализировать изменение распределения потенциала в зависимости от состава среды, а также отслеживать градиенты потенциала, вызванные диффузией ионов железа в модельный грунт.



- (a) – сталь X80, не подвергавшаяся коррозии;  
 (b) – сталь X80, выдержанная в растворе с содержанием 0,85 ppm РК;  
 (c) – сталь X80, выдержанная в растворе с содержанием 4,12 ppm РК;  
 (d) – сталь X80, выдержанная в растворе с содержанием 20,20 ppm РК

Рисунок 1. – Оптическое изображение (слева) и распределение потенциала, полученное методом сканирующего зонда Кельвина (СКЗ) (справа), для стали X80 [7]

Изучение влияния микроструктуры металла на развитие коррозии также возможно с использованием СЗК. Коррозионное поведение сварного соединения из сплава Al-Cu-RE (алюминий-медь-редкоземельные элементы RE=La, Ce) в щелочном почвенном экстракте исследуется в статье [9]. Изучены особенности коррозии в различных зонах сварного соединения: в зоне сварного шва (WZ), зоне термического влияния (HAZ) и основном металле (BM). СЗК использовался для измерения поверхностного потенциала. Поверхностный потенциал зоны сварного шва был значительно ниже, чем у основного металла и зоны термического влияния. Это создает микрогальваническую коррозионную пару, где зона сварного шва действует как анод и растворяется, зона термического влияния выступает как катод.

В статье [10] исследуется корреляция между микрогальванической коррозией и скоростью коррозии на начальной стадии коррозии двухфазной стали, полученной методом непрерывного отжига, в растворе NaCl. С применением метода СЗК выявлено, что оба типа мартенсита действуют как микрокатод и способствуют анодному растворению прилегающей ферритной матрицы.

Для выявления причины преждевременного выхода из строя трубы из низкоуглеродистой стали [11] в системе централизованного теплоснабжения после 6 лет эксплуатации произведен визуальный осмотр и лабораторные исследования с помощью оптической микроскопии. Отказ произошел из-за питтинговой коррозии как снаружи, так и внутри трубы, но более выраженной снаружи. Обнаружены включения алюминия (Al) (0,04% Al в составе) и локальная неоднородность в виде увеличенной объемной доли перлита в области питтинговой коррозии (13,68% перлита против 5,57% в зоне равномерной коррозии). Включения Al и разница в коэффициентах теплового расширения Fe/Al привели к образованию микрощелей вокруг включений, инициируя щелевую коррозию. Таким образом, применение метода СЗК при изучении влияния микроструктуры металла на коррозию позволило получить ряд значимых результатов, а именно: зарегистрировать разницу потенциалов между металлом сварного шва и основным металлом, доказывая наличие гальванических пар, установить разницу потенциалов между мартенситом (катод) и ферритом (анод) в двухфазной стали, а также выявить локальные минимумы потенциала вокруг включений Al, указывающих на анодную активность как предпосылку зарождение питтинга.

В последнее время внимание исследователей привлекает микробиологически индуцированная коррозия (МИК). В исследовании [12] изучалось влияние нитратредуцирующей бактерии (*Bacillus cereus*) на коррозионное растрескивание под напряжением стали X80. Исследователи акцентировали внимание на том, как различные микроструктуры стали влияют на начальную адгезию бактерий и последующую коррозию. Метод СЗК был использован для изучения связи между термодинамической стабильностью поверхности различных микроструктур стали и их склонностью к начальной адгезии бактерий. Крупнозернистая сталь показала более высокий потенциал Вольта (более высокую РВЭ) по сравнению с другими микроструктурами стали по результатам опытов. Высокий потенциал Вольта указывает на более значительную термодинамическую нестабильность поверхности образца. Это связано с крупным размером зерна, увеличением границ зерен и неравномерным расположением атомов, то есть с микроструктурой образца, которая приводит к формированию большого числа активных центров растворения и электронов. Эти активные центры растворения и электроны на поверхности облегчают прикрепление бактерий и получение ими электронов. Результаты с использованием метода СЗК согласуются с данными по начальной адгезии, которые показали, что крупнозернистая сталь имела наибольшее количество прикрепившихся клеток *Bacillus cereus* на ранних этапах погружения. Метод СЗК стал действенным инструментом для выявления повышенной восприимчивости крупнозернистой стали к адгезии *Bacillus cereus*, что затем привело к самой высокой скорости коррозии.

Методы сканирования зондом Кельвина и сканирующей Кельвин-зондовой силовой микроскопии (SKPFM) активно используются также для изучения проникновения водорода в металлы. Метод СЗК позволяет локально обнаруживать проникновение водорода в сталь [13]. Считается, что присутствие атомов водорода (H) на поверхности образца влияет на потенциал Вольта. Исследование, проведенное в [14] показало, что наличие атомов H в стали связано с повышенным потенциалом Вольта. Измерение потенциала Вольта с помощью SKPFM, таким образом, предоставляет возможный метод для обнаружения атомов H в сталях. Согласно спецификациям оборудования, более положительный (или менее отрицательный) потенциал Вольта указывает на более высокую концентрацию атомов H. В исследовании [13] указывается, что менее благородный потенциал пленки палладия (Pd), нанесенной на сторону обнаружения водорода, свидетельствует о том, что пленка Pd поглощает водород (связывание Pd/H).

Для выяснения связи между процессом коррозии и проницаемостью водорода Сугаэ и др. [13] разработали оборудование Double-Head Scanning Kelvin Probe (DHSKP) – сканирующий зонд Кельвина с двойной головкой. Каждым зондом можно одновременно измерять потенциал коррозии на корродирующей стороне (сторона, подверженная коррозионному раствору) и поверхностный потенциал на стороне обнаружения водорода. Это позволяет одновременно отслеживать, как коррозионный процесс влияет на проницаемость водорода в сталь, что не было полностью изучено ранее.

На основании анализа научной литературы можно сделать вывод, что метод сканирующего зонда Кельвина (СЗК) является перспективным инструментом для изучения коррозии стали, в том числе и при изучении коррозии подземных трубопроводов.

**Приборы и материалы экспериментальных исследований.** Экспериментальные исследования выполнены на специализированной установке бесконтактной сканирующей электрометрии «СКАН-19», разработанной и изготовленной в Белорусском национальном техническом университете по заказу ОАО «ИНТЕГРАЛ». Первоначальным назначением установки являлась диагностика параметров однородности полупроводниковых пластин (фото-ЭДС, диффузионная длина, удельное поверхностное сопротивление). Однако универсальность физического принципа метода вибрирующего зонда Кельвина позволяет применять данную установку для исследований и анализа поверхности металлов, сплавов и диэлектриков [15]. Основные технические характеристики, гарантирующие высокую точность и пространственное разрешение, приведены в таблице 1. Установка обеспечивает прямое картирование распределения РВЭ (коррелирующей с поверхностным электрохимическим потенциалом) с погрешностью не более 2,0 мЭВ в диапазоне от  $\pm 2$  до  $\pm 2500$  мЭВ. Пространственное разрешение сканирования составляет 0,5 мм, что достаточно для идентификации локальных очагов коррозии, таких как зарождающиеся питтинги.

Таблица 1. – Технические характеристики СКАН-19

Параметр	Показатель
Датчик определения электростатического потенциала	Цифровой зонд Кельвина
Диаметр чувствительного элемента зонда, мм	1
Диапазон измерений поверхностного потенциала, В	$\pm 2$
Погрешность определения потенциала поверхности, мВ	$\pm 2$
Система позиционирования	3-х координатная на базе шаговых двигателей
Точность позиционирования, мкм	$\pm 5$
Пространственная разрешающая способность, мкм	10
Область сканирования, мм	200×200

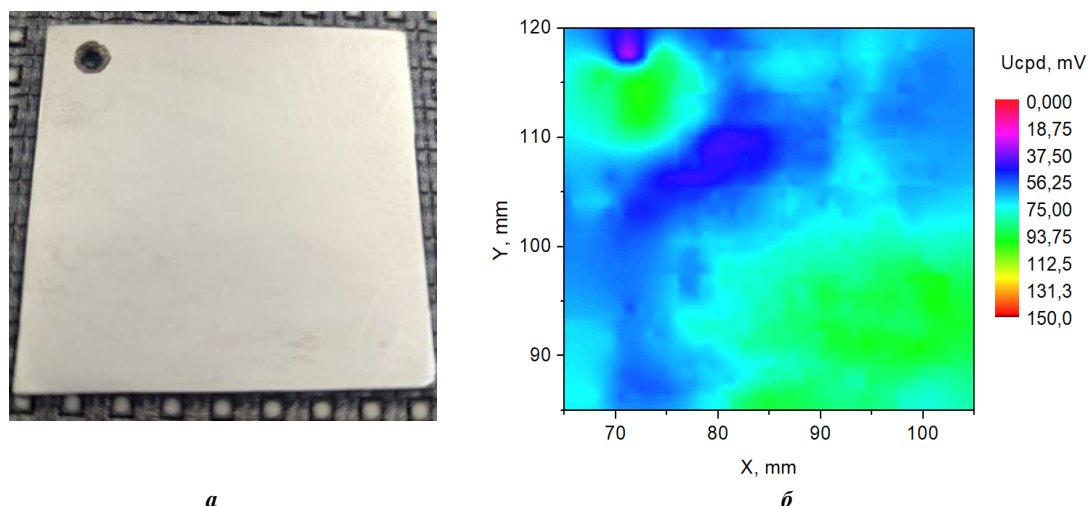
Ключевым измерительным модулем установки является уникальный цифровой измеритель КРП, также разработанный в БНТУ [16]. Применение цифровой обработки сигнала и косвенной компенсационной схемы измерения позволило достичь скорости единичного измерения до 50 раз выше по сравнению с традиционными аналоговыми измерителями КРП, использующими метод вибрирующего зонда.

Данное техническое преимущество делает установку применимой для сканирования относительно больших площадей поверхности. В стандартном режиме сканирования она обеспечивает картирование распределения потенциала на образце диаметром до 200 мм. Полное сканирование такой площади выполняется приблизительно за 2 часа, при этом время может варьироваться в зависимости от выбранного пространственного разрешения и режима усреднения сигнала.

Для перспективных исследований важной конструктивной особенностью СКАН-19 является наличие модуля программируемого оптического освещения исследуемой поверхности. Данный модуль позволяет создавать контролируемую фотостимуляцию в процессе сканирования, что открывает перспективные направления для углубленного изучения механизмов коррозии. Например, целенаправленная фотостимуляция локальных участков поверхности позволяет изучать фотоиндуцированные изменения электрохимического потенциала. Для исследования стали особенно актуальным является анализ окисных, пассивирующих или адсорбированных поверхностных слоёв, электрохимические свойства которых проявляют чувствительность к внешнему оптическому облучению. Измерение динамики КРП при фотостимуляции даёт информацию о скорости и характере фотоэлектронных переходов, влияющих на коррозионную стойкость.

Объектом исследования служила пластина из низкоуглеродистой конструкционной стали марки Ст3. Данная марка широко применяется при изготовлении элементов подземных распределительных газопроводов. Для обеспечения воспроизводимости результатов и устранения влияния загрязнений, поверхность образца была последовательно обработана путем механической зашлифовки абразивной бумагой с зернистостью Р1800 до визуального однородного состояния. Затем образцы были обезжирены и промыты дистиллированной водой. После подготовки образец выдерживали на воздухе в течение 1 часа для нормализации состояния поверхности и стабилизации естественной оксидной плёнки. В качестве вмещающей среды использовался 5% раствор хлорида натрия (NaCl). Образец погружался в раствор только наполовину. Данная конфигурация формирует на одном образце четко выраженную границу металл-электролит-воздух, в зоне которой локализуется наиболее интенсивный коррозионный процесс, обусловленный дифференциальной аэрацией. Исследования проводились при комнатной температуре ( $22 \pm 2$  °С).

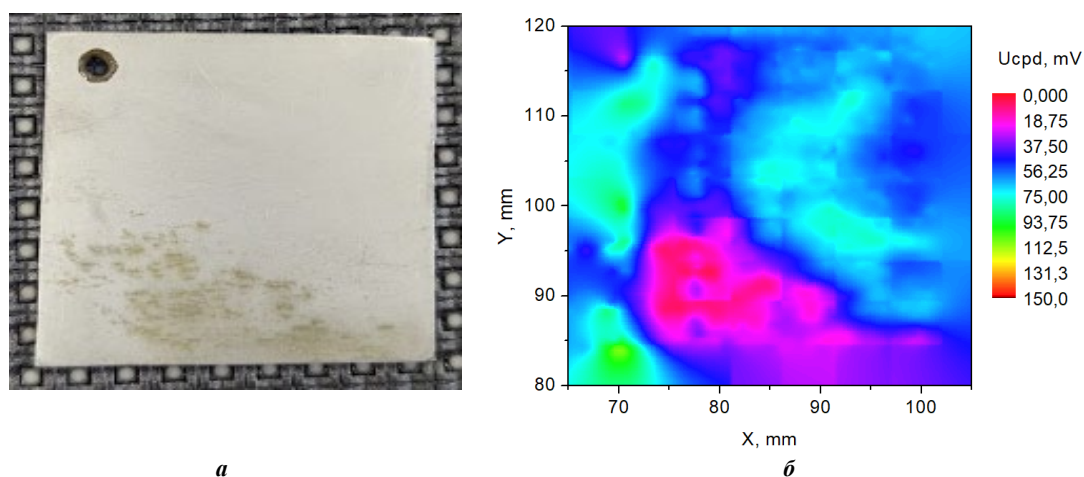
**Результаты исследований и их обсуждение.** На рисунке 2 представлены результаты анализа поверхности образца в исходном (невозмущенном) состоянии. Визуальный осмотр (см. рисунок 2, а) подтверждает отсутствие видимых дефектов, загрязнений и активных коррозионных очагов. Поверхность однородна и характеризуется наличием естественной оксидной плёнки, сформировавшейся в атмосферных условиях. Карта потенциала (см. рисунок 2, б) демонстрирует относительно равномерное распределение КРП (отражает распределение относительных значений РВЭ) по всей площади образца. Наблюдаемый градиент цвета, соответствующий диапазону значений от 45 до 90 мВ, является плавным и не имеет резких локальных аномалий. Такая картина соответствует термодинамически стабильному, пассивному состоянию поверхности металла, при котором скорость коррозионных процессов мала. Стабильный и узкий диапазон разброса значений потенциала служит контрольной точкой для последующей оценки изменений, вызванных воздействием агрессивной среды.



**Рисунок 2. – Исходное состояние образца (а) и карта распределения поверхностного потенциала исходного образца (б)**

После 15-минутного воздействия 5% раствора NaCl на поверхности образца зафиксированы первые признаки возникновения коррозионного процесса, согласованные как на макрофотографии, так и на карте КРП (рисунок 3). На макрофотографии (см. рисунок 3, а) наблюдаются слабые локальные потемнения, которые свидетельствуют о начальной стадии разрушения естественной оксидной плёнки на поверхности исследуемого образца.

На карте распределения КРП (см. рисунок 3, б) эти изменения можно проследить как выраженную область с аномально низким значением потенциала (ярко-розовая/фиолетовая зона соответствуют значениям КРП 10–30 мВ). Резкое падение потенциала на данном участке (на 20–30 мВ относительно фонового значения) свидетельствует о разрушении пассивного слоя и образовании активного анодного участка, где протекает реакция окисления железа ( $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ ). За счет разности потенциалов между анодным центром и соседними участками (зеленая зона на карте), сохранившими катодные свойства, возникают микрогальванические элементы. Такое взаимодействие создает условия для энергетической подпитки коррозии, что стимулирует дальнейшее углубление и рост питтинга.



**Рисунок 3. – Состояние образца (а) и карта распределения поверхностного потенциала образца (б) после 15 минут пребывания в растворе NaCl**

Наблюдается разрастание первичного очага коррозии после одного часа воздействия раствора NaCl (см. рисунок 3). Анодная область, которая определяется по низким значениям РВЭ (0–30 мВ на карте распределения (см. рисунок 3, б)), показывает существенное увеличение площади очага коррозии при сохранении первоначальной конфигурации. Это прямо указывает на прогрессирующее развитие питтинга.

После восьми часов воздействия раствором NaCl на испытуемый образец наблюдается качественное изменение картины коррозионного процесса (рисунок 4). Верхняя (не погруженная в раствор) часть образца на карте распределения КРП (см. рисунок 4, б) сохраняет условно-однородный характер, который соответствует катодной зоне (зелёная зона (70–100 мВ)). Одновременно на погружённой части формируется сложная гетерогенная электрохимическая структура, представленная мозаикой из областей с резко различными значениями потенциала (экстремумы: ~150 мВ и ~0 мВ).

В зонах со значением КРП 0–20 мВ (соответствует сиреневой области на изображении, см. рисунок 4, б) продолжается активное анодное растворение металла. Области с аномально высокими значениями (красные и жёлтые пятна) совпадают по расположению с видимыми скоплениями продуктов коррозии (см. рисунок 4, а). На фотографии чётко выражена граница между покрытой продуктами коррозии погруженной частью и относительно сохранившейся верхней частью образца. Это подтверждает локализацию процесса в зоне воздействия агрессивной среды.

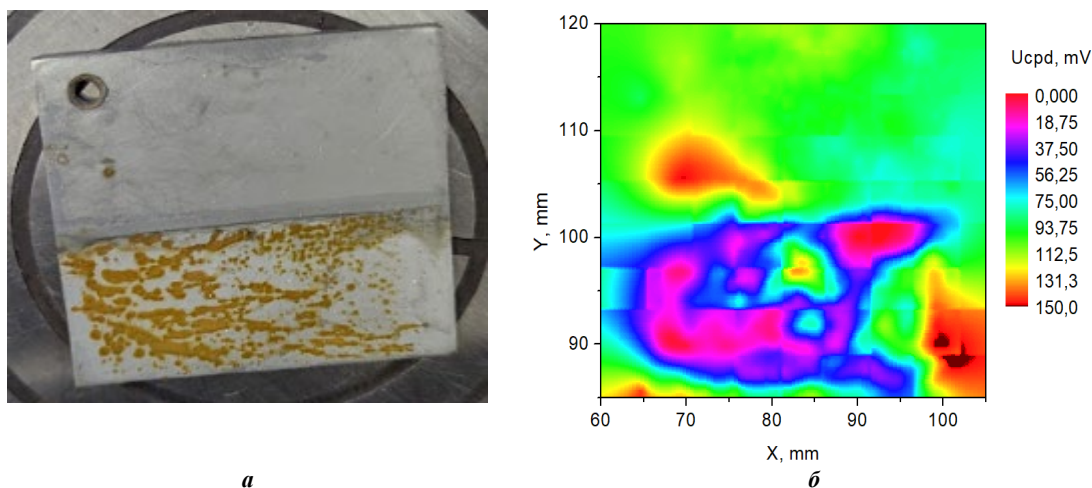


Рисунок 4. – Состояние образца (а) и карта распределения поверхностного потенциала образца (б) после 8 часов пребывания в растворе в NaCl

Повторное измерение через 6 часов после предыдущего сканирования (суммарное время экспозиции 12 часов) отражает стабилизацию общей картины при одновременном усложнении электрохимической структуры (рисунок 5, а).

Нижняя часть образца (погруженная в агрессивный раствор) характеризуется выраженной неоднородностью, представляя собой мозаику из обширных областей с низким положительным потенциалом (красные зоны) и локальных участков с высоким потенциалом (рисунок 5, б). Такая картина соответствует стадии обширной коррозии, при которой на поверхности образуется слой вторичных продуктов коррозии (оксидов и гидроксидов железа). Наблюдаемое перераспределение потенциалов свидетельствует о динамическом характере процесса: под слоем продуктов коррозии происходит непрерывная миграция и реполяризация локальных микрогальванических пар (анодных и катодных зон). Это характерно для коррозии, контролируемой диффузией реагентов через накопленные отложения.

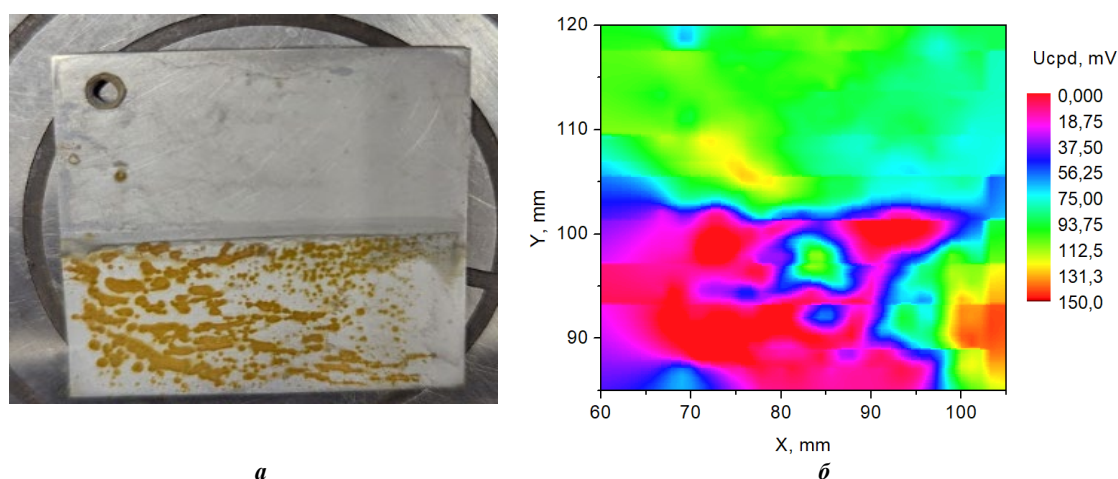


Рисунок 5. – Состояние образца (а) и карта распределения поверхностного потенциала образца (б) после 12 часов пребывания в растворе в NaCl

**Заключение.** В ходе эксперимента на образце из низкоуглеродистой стали Ст3 в 5% растворе NaCl продемонстрирована низкая коррозионная стойкость исследуемого материала в хлорид-содержащей среде. Метод СЗК позволил зафиксировать зарождение первого активного очага (локализованное изменение РВЭ на 40–50 мВ (величина равная, но обратная по знаку контактной разности потенциалов)) уже через 15 минут воздействия. Такой

результат значительно опережает появление макроскопических признаков разрушения. Последовательное сканирование выявило чёткую пространственно-временную динамику процесса: от единичного питтинга к разрастанию анодной зоны, а затем к формированию обширной гетерогенной области под слоем продуктов коррозии с мигрирующими анодными и катодными зонами. Метод СЗК обеспечил контрастную визуализацию границы раздела между погружённой (активно корродирующей) и надводной (относительно стабильной) частями образца, соответствующей условиям дифференциальной аэрации.

Результаты работы служат подтверждением эффективности методики сканирующей зондовой электрометрии для задач диагностики коррозии. Ключевое практическое преимущество метода СЗК заключается в его высокой чувствительности к докритическим изменениям поверхностного электрохимического потенциала. Такое преимущество позволяет выявлять очаги коррозии на стадии зарождения, задолго до появления макроскопических дефектов.

Прямым развитием представленного исследования является изучение кинетики коррозии основного металла газопровода в модельных и натуральных почвенных электролитах. Такие эксперименты позволят строить прогнозные модели коррозионного износа и разрабатывать карты коррозионной опасности для различных типов грунтов. Это может послужить основой для оптимизации ремонтных работ и продления срока безопасной эксплуатации инфраструктуры.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Почвенно-грунтовые факторы, влияющие на процесс коррозии стальных подземных трубопроводов, и их компьютерное моделирование / В.Н. Романиук, А.М. Нияковский, Н.В. Струцкий и др. // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2025. – Т. 68, № 3. – С. 230–244. DOI: 10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244.
2. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – P. 687–720.
3. Yasakau K. Application of AFM-Based Techniques in Studies of Corrosion and Corrosion Inhibition of Metallic Alloys // Corrosion and Materials Degradation. – 2020. – Vol. 1, № 3. – P. 345–372. DOI: 10.3390/cmd1030017.
4. Влияние высокодисперсного наполнителя на адгезионные и фрикционные свойства сополимера этилена с винилацетатом / А.И. Свириденко, А.Л. Жарин, А.В. Кравцевич и др. // Трение и износ. – 2014. – Т. 35, № 4. – С. 401–411.
5. Method of evaluating corrosion resistance of metal material, method of designing alloy of high corrosion resistance, method of diagnosing corroded state of metal material, and method of operating plant: pat. US 5901071 A; заявл. 04.05.1999; опубл. 04.05.1999.
6. Wang C., Li Y., Alvarado L. Study on Electrochemical Behavior of 20# Carbon Steel with Disbonded Coating by Scanning Kelvin Probe and Local Electrochemical Impedance Spectroscopy // International Journal of Electrochemical Science. – 2020. – Vol. 15, № 6. – P. 4988–5001. DOI: 10.20964/2020.06.17.
7. Relationship between Dissolved Oxygen and Corrosion Characterization of X80 Steel in Acidic Soil Simulated Solution / S. Wang, D. Liu, N. Du et al. // International Journal of Electrochemical Science. – 2015. – Vol. 10, № 5. – P. 4393–4404. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)06631-2.
8. Effect of iron ion diffusion on the corrosion behavior of carbon steels in soil environment / Z. Bai, K. Xiao, P. Dong et al. // RSC Advances. – 2018. – Vol. 8, № 71. – P. 40544–40553. DOI: 10.1039/C8RA08032A.
9. Corrosion Behavior of Al–Cu–RE (RE = La, Ce) Alloy Joints in Alkaline Soil Extract / F. Yan, X. Wang, X. Li et al. // International Journal of Electrochemical Science. – 2020. – Vol. 15, № 8. – P. 8012–8025. DOI: 10.20964/2020.08.07.
10. Correlation of micro-galvanic corrosion behavior with corrosion rate in the initial corrosion process of dual phase steel / H. Chen, Z. Lv, L. Lu et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2021. – Vol. 15. – P. 3310–3320. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.123.
11. Localized Corrosion Occurrence in Low-Carbon Steel Pipe Caused by Microstructural Inhomogeneity / Y.-H. Lee, G. Kim, K.-M. Kim et al. // Materials. – 2022. – Vol. 15, № 5. DOI: 10.3390/ma15051870.
12. Stress corrosion cracking of X80 steel heat-affected zone in a near-neutral pH solution containing *Bacillus cereus* / B. Liu, J. Yang, C. Du et al. // npj Materials Degradation. – 2023. – Vol. 7, № 1. DOI: 10.1038/s41529-023-00333-w.
13. Sugae K., Otsuka Y., Kamimura T. Simultaneous measurement of corrosion potential and hydrogen penetration using double-head scanning Kelvin probe // Electrochemistry Communications. – 2024. – Vol. 163. DOI: 10.1016/j.elecom.2024.107717.
14. Qin M., Hu Q., Cheng Y.F. Passivation of X80 pipeline steel in a carbonate/bicarbonate solution and the effect of oxide film on hydrogen atom permeation into the steel // International Journal of Hydrogen Energy. – 2024. – Vol. 70. – P. 1–9. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.115.
15. Effect of ultrasonic power applied to micro-arc oxidation on the morphology, chemistry, wettability and electrical properties of calcium phosphate coatings on titanium / E.G. Komarova, E.B. Akimova, E.A. Kazantseva et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2025. – Vol. 1039. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.183056.
16. Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин / А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, А.И. Свистун и др. // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 161–172. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172.

#### REFERENCES

1. Romaniuk, V.N., Niyakovskii, A.M., Strutsky, N.V., & Svistun, A.L. (2025). Pochvenno-gruntovye faktory, vliyayushchie na protsess korrozii stal'nykh podzemnykh truboprovodov, i ikh komp'yuternoe modelirovanie [Soil and ground factors affecting the steel underground pipelines corrosion process and their computer simulation]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG*, 68(3), 230–244. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.21122/1029-7448-2025-68-3-230-244.

2. Zharin, A.L. (2010). Contact Potential Difference Techniques as Probing Tools in Tribology and Surface Mapping // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. – Heidelberg: Springer-Verlag. – P. 687–720.
3. Yasakau, K. (2020). Application of AFM-based techniques in studies of corrosion and corrosion inhibition of metallic alloys. *Corrosion and Materials Degradation*, 1(3), 345–372. DOI: 10.3390/cmd1030017.
4. Sviridenok, A.I., Zharin, A.L., Kravtsevich, A.V., & Tyavlovsky, A.K. (2014). Vliyanie vysokodispersnogo napolnitelya na adgezionnyye i friktsionnyye svoystva sopolimera etilena s vinilatsetatom [Influence of highly dispersed filler on adhesive and tribological properties of ethylene-vinyl acetate copolymer]. *Trenie i iznos*, 35(4), 401–411. (In Russ.).
5. Fujimori, H., Ishikawa, Y., Isobe, Y., Ohnaka, N., Sakai, M., & Takahashi, T. (1999). *Method of evaluating corrosion resistance of metal material, method of designing alloy of high corrosion resistance, method of diagnosing corroded state of metal material, and method of operating plant* (U.S. Patent No. US 5901071 A).
6. Wang, C., Li, Y., & Alvarado, L. (2020). Study on electrochemical behavior of 20# carbon steel with disbonded coating by scanning Kelvin probe and local electrochemical impedance spectroscopy. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(6), 4988–5001. DOI: 10.20964/2020.06.17.
7. Wang, S., Liu, D., Du, N., Zhao, Q., Liu, S. & Xiao, J. (2015). Relationship between dissolved oxygen and corrosion characterization of X80 steel in acidic soil simulated solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 10(5), 4393–4404. DOI: 10.1016/S1452-3981(23)06631-2.
8. Bai, Z., Xiao, K., Dong, P., Dong, C., Wei, D., & Li, X. (2018). Effect of iron ion diffusion on the corrosion behavior of carbon steels in soil environment. *RSC Advances*, 8(71), 40544–40553. DOI: 10.1039/C8RA08032A.
9. Yan, F., Wang, X., Li, X., Wang, C., & Jiang, B. (2020). Corrosion behavior of Al–Cu–RE (RE = La, Ce) alloy joints in alkaline soil extract. *International Journal of Electrochemical Science*, 15(8), 8012–8025. DOI: 10.20964/2020.08.07.
10. Chen, H., Lv, Z., Lu, L., Huang, Y., & Li, X. (2021). Correlation of micro-galvanic corrosion behavior with corrosion rate in the initial corrosion process of dual phase steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 3310–3320. DOI: 10.1016/j.jmrt.2021.09.123.
11. Lee, Y.-H., Kim, G., Kim, K.-M., Ko, S.-J., Kim, W.-C., & Kim J.-G. (2022). Localized corrosion occurrence in low-carbon steel pipe caused by microstructural inhomogeneity. *Materials*, 15(5). DOI: 10.3390/ma15051870.
12. Liu, B., Yang, J., Du, C., Liu, Z., Wu, W., & Li, X. (2023). Stress corrosion cracking of X80 steel heat-affected zone in a near-neutral pH solution containing *Bacillus cereus*. *npj Materials Degradation*, 7(1). DOI: 10.1038/s41529-023-00333-w.
13. Sugae, K., Otsuka, Y., & Kamimura, T. (2024). Simultaneous measurement of corrosion potential and hydrogen penetration using double-head scanning Kelvin probe. *Electrochemistry Communications*, 163. DOI: 10.1016/j.elecom.2024.107717.
14. Qin, M., Hu, Q., & Cheng, Y.F. (2024). Passivation of X80 pipeline steel in a carbonate/bicarbonate solution and the effect of oxide film on hydrogen atom permeation into the steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 70, 1–9. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.05.115.
15. Komarova, E.G., Akimova, E.B., Kazantseva, E.A., Zharin, A.L., & Sharkeev, Y.P. (2025). Effect of ultrasonic power applied to micro-arc oxidation on the morphology, chemistry, wettability and electrical properties of calcium phosphate coatings on titanium. *Journal of Alloys and Compounds*, 1039. DOI: 10.1016/j.jallcom.2025.183056.
16. Zharin, A.L., Mikitevich, V.A., Svistun, A.I., & Pantsialeyeu, K.V. (2023). Universal'nyy tsifrovoy zondovyy elektrometr dlya kontrolya poluprovodnikovyykh plastin [Universal digital probe electrometer for monitoring semiconductor wafers]. *Pribyori i metody izmerenii*, 14(3), 161–172. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172.

Поступила 27.01.2026

## APPLICATION OF THE SCANNING KELVIN PROBE METHOD FOR EARLY-STAGE CORROSION DETECTION IN PIPELINE STEEL

A. SVISTUN, K. PANTSIALEYEU, V. ROMANIUK  
(Belarusian National Technical University, Minsk)

*Unveiling corrosion mechanisms and enhancing material durability require a shift from evaluating integral characteristics to analyzing processes at the micro-level. This study aims to establish a correlation between the spatial distribution of the electron work function (EWF) on the steel surface and the localization of corrosion damage sites using the Scanning Kelvin Probe (SKP) method. Experiments on a pipeline steel sample in a NaCl solution demonstrated that the SKP method can detect the onset of pitting corrosion by mapping the EWF distribution. As a result, a correlation was established between local variations in the EWF and the initiation of corrosion, enabling the diagnosis of material degradation at a pre-critical stage, long before visible defects appear. Thus, this work confirms that the SKP method serves as a highly informative tool for the micro-level analysis of corrosion mechanisms. A direct continuation of this research involves applying the SKP method to study the corrosion kinetics of pipeline steel in simulated and natural soil electrolytes to develop predictive models and corrosion hazard maps.*

**Keywords:** scanning Kelvin probe (SKP), underground gas pipelines, steel corrosion, Volta potential, work function (WF), pitting corrosion, surface potential distribution, structural steel, contact potential difference (CPD).