

Paweł Stochaj  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Zastosowanie korozymetrii rezystancyjnej w odniesieniu do kryteriów ochrony katodowej gazociągów

### Wstęp

Podstawowym celem ochrony katodowej jest zabezpieczenie przeciwkorozyjne podziemnych lub podwodnych konstrukcji stalowych.

W praktyce pomiarowej wykorzystywane są różnego rodzaju kryteria ochrony katodowej, oparte na technikach pomiarów elektrycznych, które zostały upowszechnione

ze względu na brak możliwości bezpośredniego śledzenia postępu procesu korozji. Stopniowo techniki te są wypierane przez metody korozymetryczne, których zadaniem jest bezpośrednio i precyzyjnie monitorowanie skuteczności ochrony katodowej w zróżnicowanych warunkach środowiskowych.

### Mechanizm korozji elektrochemicznej metali

Korozją nazywa się stopniowe niszczenie metali pod wpływem chemicznego oddziaływania środowiska. W przypadku metali rozróżnia się korozję chemiczną i elektrochemiczną. Korozja chemiczna jest spowodowana oddziaływaniem na metal suchych gazów lub cieczy nieprzewodzących prądu elektrycznego, zaś korozja elektrochemiczna – oddziaływaniem na metal roztworów przewodzących, zwanych elektrolitami.

Oddziaływanie mikroogniwi na styku metalu z elektrolitem jest przyczyną powstania korozji elektrochemicznej. Ogniwa te powstają wskutek niejednorodności chemicznej lub fizycznej metalu lub na skutek różnic stężeniowych elektrolitu. Powierzchnia metalu, nawet najbardziej czysta, nie jest jednorodna w skali mikroskopowej. Metale mają mikrostrukturę ziarnisto-krystaliczną, granice ziaren w stosunku do ich wnętrza charakteryzują się strukturą mniej uporządkowaną. Energia granic ziaren jest wyższa niż samego ziarna, toteż w zetknięciu z elektrolitem granice ziaren stają się obszarem anodowym, a obszar ziarna mający niższą energię staje się obszarem katodowym. Mikroogniwa korozyjne pracują jako krótko zwarte na-

tychmiast po zetknięciu z elektrolitem. Zniszczenie metalu następuje zawsze w obszarze anodowym.

Proces korozji elektrochemicznej można przedstawić jako proces anodowego utleniania i katodowej redukcji. Metal, oddając elektrony walencyjne, przechodzi do roztworu w postaci jonów (utlenianie). Elektrony metalu migrują do obszaru katodowego.

Elektrony migrujące z obszaru anodowego łączą się z depolaryzatorem, czyli z jonem (atomem) mającym zdolność do przyłączenia elektronów (redukcja).

W pracującym ogniwie korozyjnym nie ma równowagi: prąd płynie w określonym kierunku, odbywają się procesy depolaryzacyjne na katodzie i roztwarzanie metalu na anodzie.

W znacznej ilości przypadków korozji elektrochemicznej mamy do czynienia z depolaryzacją obu rodzajów. Produkty powstałe w procesie katodowym i anodowym reagują ze sobą. Zahamowanie procesu korozji nastąpi wtedy, gdy powstaną trudno rozpuszczalne produkty korozji.

Przepływ prądu elektrycznego w ogniwach korozyjnych jest następujący: elektrony w metalu przemieszczają się

z obszarów anodowych do katodowych, a w tym samym czasie jony przenoszą ładunki elektryczne w elektrolicie. Procesy anodowe i katodowe są ze sobą sprzężone. Odbiór elektronów na katodzie ułatwia przebieg reakcji anodowej, brak odbioru elektronów od katody hamuje reakcję anodową.

Aby zapobiec korozji metalu należy dostarczyć prąd z zewnętrznego źródła (polaryzacja). To zjawisko nazywamy ochroną elektrochemiczną metalu. Polaryzacja metalu może być anodowa lub katodowa. W praktyce najczęściej stosuje się ochronę katodową.

### Ochrona katodowa stalowych konstrukcji podziemnych

Stalowe konstrukcje podziemne są narażone na oddziaływanie korozyjne na swoich powierzchniach. Makroogniwa korozyjne powstają wskutek różnic potencjałów w skali makro oraz zróżnicowania elektrolitu glebowego pod względem nasycenia tlenem. Aby zapobiec korozji, konstrukcje należy objąć ochroną. Ochronę przed korozją możemy podzielić na bierną oraz czynną.

Ochrona bierna odbywa się przy pomocy powłok ochronnych, których zadaniem jest szczelne pokrycie powierzchni chronionej, niedopuszczające do kontaktu powierzchni metalu z elektrolitem glebowym.

Ochrona czynna odbywa się poprzez dostarczenie do konstrukcji chronionej prądu ochrony katodowej w taki sposób, aby wymusić jej odpowiednią katodową polaryzację. Wskutek polaryzacji katodowej na powierzchni metalu w miejscach defektów powłoki izolacyjnej prąd ochrony katodowej będzie chronił powierzchnię konstrukcji przed korozją.

#### Kryteria ochrony katodowej gazociągów stalowych

Brak bezpośredniej możliwości oceny skuteczności ochrony katodowej, wynikający z braku dostępu do niezabezpieczonej powierzchni gazociągów, spowodował, że efekty ochrony ocenia się na podstawie tzw. kryterium ochrony. W charakterze kryterium najczęściej występuje wartość lub zmiana potencjału chronionej powierzchni albo gęstość prądu ochrony katodowej.

Według kryteriów zawartych w normie [2] potencjał gazociągu  $E$ , przy którym postęp korozji wynosi  $< 0,01$  mm na rok, jest potencjałem ochrony  $E_p$ . Taki postęp jest na tyle mały, że nie dochodzi do uszkodzeń korozyjnych. Kryterium ochrony katodowej przedstawia się następująco:

$$E \leq E_p \text{ [V]} \quad (1)$$

Miarą korozji jest płynący prąd, wywołany przez równocześnie zachodzące na tej samej powierzchni metalu reakcje: utlenianie metalu i redukcję składników elektrolitu. Jeżeli zakłócimy równowagę pomiędzy prądem anodowym i katodowym w ten sposób, że dostarczymy prąd katodowy z zewnątrz, to prąd anodowy znacznie zmaleje, nawet o rzędy wielkości. Szybkość korozji spadnie do zera wtedy, gdy spolaryzujemy metal do odwracalnej reakcji anodowej, czyli do potencjału, w którym liczba atomów metalu przechodzących w stan jonowy jest równa liczbie jonów powracających do stanu metalicznego.

gdzie:

$E$  – potencjał gazociągu [V],

$E_p$  – potencjał ochrony [V].

Potencjałowe kryterium ochrony w dużym stopniu zależy od środowiska, w jakim się znajduje gazociąg, charakteryzowanego rezystywnością gruntu (tablica 1).

Tablica 1. Potencjałowe kryterium ochrony katodowej w zależności od wartości rezystywności gruntu

Rezystywność gruntu	Kryterium potencjałowe
$\rho < 100 \Omega\text{m}$	-850 mV
$100 \Omega\text{m} < \rho < 1000 \Omega\text{m}$	-750 mV
$\rho < 1000 \Omega\text{m}$	-650 mV

Powyższe potencjałowe kryterium ochrony katodowej dotyczy granicy faz metal–elektrolit, tzn. potencjał nie zawiera składowej omowej  $IR$  w środowisku korozyjnym.

Dla bardzo cienkich bezdefektowych powłok ochronnych, o jednostkowej rezystancji powłoki  $< 10^8 \Omega\text{m}^2$ , potencjały o wartościach bardziej ujemnych mogą powodować pęcherzenie powłoki. Dlatego też potencjały wolne od składowej  $IR$ , mierzone względem elektrody siarczano-miedziowej nie powinny być bardziej ujemne niż potencjał krytyczny  $EI = -1100$  mV. Bardziej ujemne potencjały mogą powodować stopniowe odpajanie katodowe w defektach zarówno cienkiej, jak i grubej powłoki.

Potencjał załączeniowy  $E_{on}$  jest sumą potencjału ochrony  $E_p$  i składowej omowej  $IR$ .

$$E_{on} = E_p + IR \quad (2)$$

gdzie:

$E_{on}$  – potencjał załączeniowy gazociągu [V],

$E_p$  – potencjał ochrony [V],

$IR$  – składowa omowa [V] (napięcie pomiędzy defektem powłoki a elektrodą odniesienia).

Kryteria zawarte w normie [3] można podzielić na potencjałowe, prądowe i depolaryzacji.

Kryterium potencjałowe mówi, że:

- potencjał załączeniowy  $E_{on}$  powinien być równy lub niższy niż  $-1200$  mV dla rurociągów ułożonych w gruncie bez pobliskiej obecności dużych katod (konstrukcji żelbetowej, innych konstrukcji stalowych) i rezystywności gruntu niższej niż  $100 \Omega\text{m}$ .
- potencjał załączeniowy  $E_{on}$  powinien być równy lub niższy od  $-800$  mV dla rurociągów ułożonych przy bezpośredniej bliskości dużych katod.

Kryterium prądowe mówi o tym, że prąd wpływa do gazociągu, gdy następuje ujemne przesunięcie potencjału korozyjnego konstrukcji  $E_n$  w miejscu krytycznym o przynajmniej  $300$  mV, przy wyłączonym prądzie ochrony katodowej, oraz gdy prąd wpływa do elektrody symulującej i następuje zmiana jej potencjału.

Kryterium depolaryzacji mówi o depolaryzacji elektrody symulującej od potencjału wyłączeniowego  $E_{off}$  przynajmniej o  $100$  mV przed upływem  $1$  godziny. To kryterium wskazuje na spolaryzowanie chronionego katodowo gazociągu.

Powyższe kryteria ochrony katodowej dotyczą konstrukcji złożonych, które ze względów bezpieczeństwa lub ze względów technicznych nie mogą być w pełni odizolowane elektrycznie od innych konstrukcji metalowych znajdujących się w tym samym elektrolicie co chroniona konstrukcja.

W przypadku, gdy na gazociąg oddziałują prądy błądzące, potencjały lub spadki napięć ulegają wahaniom [4]. Źródłem tego zjawiska są zakłócenia pochodzące z pobliskiej trakcji elektrycznej.

W takim wypadku stosuje się rejestracje długotrwałe, a czas wypływu prądu, rejestrowany na elektrodzie symulującej przez okres  $1$  godziny, nie powinien być większy niż  $3,6$  sekundy. Jeśli czas wypływu prądu jest większy, może to świadczyć o zagrożeniu korozyjnym ze strony prądów błądzących.

Innym istotnym problemem jest oddziaływanie na rurociąg prądów przemiennych pochodzących z linii wysokiego napięcia. Kryteria zawarte w normie [1] stanowią, że gęstość prądu wyższa niż  $30 \text{ A/m}^2$  zmierzona na elektrodzie symulującej o powierzchni  $1 \text{ cm}^2$  stwarza zagrożenie dla gazociągów, które są ułożone w gruntach o niskiej rezystywności, przy działającej ochronie katodowej w dobrej jakości powłoce. To kryterium w niektórych opracowaniach

jest obniżone do  $20 \text{ A/m}^2$  i obecnie do obliczeń oraz analiz przyjmuje się tę właśnie jego wartość graniczną.

### Zagrożenie korozyjne gazociągów podziemnych

Gazociągi ułożone w ziemi o zmiennej rezystywności gruntu i różnym stopniu nawodnienia oraz utlenienia są podatne na korozję elektrochemiczną wywołaną makroogniwami. Spełnienie kryteriów ochrony zawartych w normie [2] wymusza stosowanie pomiarów potencjałów wolnych od składowej  $IR$  (omowej). Takie pomiary można wykonać za pomocą sond symulujących. Sondę symulującą tworzy układ pomiarowy składający się z elektrody symulującej sztuczny defekt w powłoce izolującej gazociąg, oraz elektrody odniesienia, ustawionej nad defektem.

Sondę symulującą umieszcza się w pobliżu chronionego katodowo gazociągu i łączy się z nim elektrycznie w punkcie pomiarowym. Zakłada się, że potencjał elektrody symulującej wyrównuje się po pewnym czasie z potencjałem konstrukcji. Po rozłączeniu obwodu można poprawnie zmierzyć potencjał wyłączeniowy elektrody symulującej z wyeliminowaniem omowego spadku napięcia  $IR$ .

Pomiary z wykorzystaniem elektrody symulującej mają również zastosowanie w pomiarach skuteczności ochrony katodowej konstrukcji złożonych, takich jak: tłocznie gazu, magazyny paliw, podziemne zbiorniki paliwowe. Tego typu obiekty są objęte ochroną odgromową i przeciwporażeniową, co oznacza, że naziemne części technologiczne oraz dostępne części przewodzące są bezpośrednio uziemione. Sieć uziemiająca jest wykonana z ocynkowanej taśmy stalowej. Liczna armatura odcinająca spoczywa na żelbetonowych konstrukcjach i jest prawdopodobne, że istnieją połączenia urządzeń technologicznych ze zbrojeniami żelbetu. Taka ilość konstrukcji na obiekcie wymusza konieczność pomiarów pozwalających wyeliminować omowy spadek napięcia  $IR$  [2]. Jest on spowodowany prądem ochrony katodowej oraz prądami wyrównawczymi płynącymi pomiędzy gazociągami, kolektorami, taśmą uziemiającą i zbrojeniami żelbetu, a także – w przypadku braku odizolowania monoblokami obiektu od gazociągów przesyłowych – ochroną katodową tych gazociągów. W trakcie oceny skuteczności ochrony katodowej obiektu złożonego może się okazać, że z różnych powodów nie możemy spełnić kryteriów zawartych w normie [2], wtedy zastosowanie mają kryteria zawarte w normie [3]. Kryteria [2] są bardziej ostre i spełnienie ich na obiekcie złożonym może okazać się trudne lub niemożliwe.

Często się zdarza, że gazociągi krzyżują się z trakcją linii kolejowej, która stanowi dla gazociągu źródło za-

grożenia w postaci oddziaływania prądów błądzących. Oddziaływanie na gazociąg może mieć zasięg wielokilometrowy, a skutki oddziaływania mogą być widoczne w postaci korozji nawet wiele kilometrów od źródła zagrożenia. Oddziaływanie trakcji linii kolejowej objawia się silnym zakłóceniem potencjału gazociągu, a w przypadkach skrajnych – doprowadza do wypływu prądu z defektów powłoki izolacyjnej gazociągu. Niekontrolowany wypływ prądu może doprowadzić do wystąpienia korozji wżerowej i znacznego przyspieszenia procesów korozyjnych mimo prawidłowej pracy ochrony katodowej na gazociągu. W praktyce, według kryteriów zawartych w normie [4], dłuższy niż 3,6 s wypływ prądu mierzony na elektrodzie symulującej jest argumentem potwierdzającym, że gazociąg może być zagrożony korozją.

### Trudności interpretacyjne wyników pomiaru potencjałów konstrukcji i prądów elektrod symulujących

Stalowe rurociągi, pomimo coraz bardziej doskonałych izolacji przeciwkorozyjnych, są narażone na wiele zagrożeń wynikających z działania środowiska oraz czynników zewnętrznych. Do najważniejszych przyczyn korozji rurociągów podziemnych należy zaliczyć:

- różny skład chemiczny i strukturalny gleby,
- zróżnicowane natlenienie gleby w różnych miejscach przy gazociągu,
- modernizację starych instalacji rurociągowych poprzez montaż odcinków nowych rur,
- obecność bakterii, pleśni i grzybów,
- stosowanie różnych metali połączonych ze sobą galwanicznie,
- obecność zakłóceń prądowych pochodzących od prądów błądzących, stałych i tellurycznych,
- wady materiałowe rur i izolacji,
- błędy projektowe, wykonawstwa i remontów,
- naprężenia obwodowe rurociągu.

Z powodu występowania powyższych czynników, jednocześnie z powłokami izolacyjnymi stosuje się system ochrony katodowej. Efektywne i ekonomiczne zabezpieczenie przeciwkorozyjne gazociągu uzyskuje się poprzez równoczesne stosowanie odpowiednio dobranych powłok izolacyjnych i ochrony katodowej.

Poziom zagrożeń korozyjnych i skuteczność zabezpieczenia gazociągu przed korozją kontroluje się i monitoruje przy pomocy szeregu metod pomiarowych. Najczęściej stosowanym kryterium oceny skuteczności ochrony katodowej jest kryterium potencjałowe. Na wartość potencjału polaryzowanej konstrukcji wpływa natężenie prądu ochrony, rezystywność gleby oraz rozmiar i kształt defektu

Również skrzyżowanie oraz przebiegi równoległe trasy gazociągu z liniami wysokiego napięcia mogą być przyczyną występowania zagrożenia korozyjnego. Według kryteriów zawartych w normie [1], zagrożenie korozją spowodowane oddziaływaniem na gazociąg linii wysokiego napięcia występuje wtedy, gdy gęstość prądu na powierzchni defektu  $1 \text{ cm}^2$  wynosi więcej niż  $20 \text{ A/m}^2$ . Największe zagrożenie pojawia się, gdy na gazociąg oddziałuje linia lub linie, które mają bliski równoległy przebieg do gazociągu znajdującego się w gruncie niskoomowym i posiadającego dobrej jakości powłokę izolacyjną lub powłokę izolacyjną o niewielkich defektach. W praktyce maksymalny kąt skrzyżowania, przy którym występuje zagrożenie oddziaływaniem prądów przemiennych pochodzących od linii wysokiego napięcia wynosi ok.  $60^\circ\text{C}$ .

powłoki. W metodzie wyłączeniowej pomiaru potencjału wykorzystywany jest fakt, że czas zaniku polaryzacji elektrochemicznej po wyłączeniu prądu polaryzującego jest znacznie dłuższy od czasu zaniku omowego spadku napięcia. Mierzony potencjał wyłączeniowy  $E_{off}$  może być obciążony błędem wynikającym z obecności prądów błądzących lub wyrównawczych. Błąd jest tym większy, im dalej od konstrukcji umieszczona jest elektroda odniesienia. W instalowanych stałych punktach pomiarowych elektroda znajduje się w sąsiedztwie konstrukcji, co sprawia, że potencjał wyłączeniowy z najlepszym przybliżeniem określa rzeczywisty potencjał polaryzowanej konstrukcji, lecz na bardzo ograniczonej powierzchni.

Prawidłowa ocena stopnia spolaryzowania konstrukcji wymaga wyeliminowania lub przynajmniej ograniczenia wpływu polaryzacji omowej na mierzoną wartość potencjału. Można to zrealizować kilkoma znanymi metodami. Jedną z nich jest technika chwilowego wyłączenia źródła prądu ochrony katodowej. Jeżeli gazociąg podlega oddziaływaniu obcych prądów, np. wyrównawczych lub błądzących, to wyłączenie źródeł prądu ochrony katodowej nie eliminuje wszystkich spadków napięcia w obwodzie pomiarowym. Interpretacja uzyskanych wyników jest wówczas niejednoznaczna i utrudniona.

Aby zapobiec trudnościom związanym z interpretacją wyników pomiarów, należy zastosować sztuczny defekt, zwany elektrodą symulującą. Elektroda symulująca ma za zadanie imitować rzeczywisty defekt znajdujący się na gazociągu. Wykonana jest ona z płytki stalowej – takiego samego materiału, co gazociąg i umieszczona w ochronnym tworzywie sztucznym – izolacji. Z jednej strony

plytki wykonany jest otwór w izolacji w taki sposób, aby była eksponowana odpowiednia powierzchnia metalu. Powierzchnia ta styka się z elektrolitem w pobliżu chronionej konstrukcji, z którą jest połączona przewodem elektrycznym, dzięki czemu podlega oddziaływaniom zewnętrznych prądów zarówno ochrony katodowej, jak i prądów błądzących, które oddziałują na konstrukcję.

Elektrody symulujące o powierzchniach najczęściej 1, 10 i 100 cm<sup>2</sup> stosuje się bądź jako przenośne, które umieszcza się celem wykonania pomiarów na powierzchni ziemi, bądź jako stałe – zainstalowane pod ziemią w wybranych miejscach, w pobliżu chronionego gazociągu. Pomiary na elektrodach symulujących wykonuje się w stanie podłączenia płytek z gazociągiem lub też w czasie ich chwilowego odłączenia od gazociągu.

Pomiary potencjałów gazociągu wykonuje się przeważnie w związku z badaniem skuteczności ochrony katodowej. Jednakże w czasie pomiarów potencjałów gazociągu niechronionego katodowo, narażonego na korozyjne skutki oddziaływania prądów błądzących, może zajść potrzeba oceny zagrożenia korozyjnego. Eliminacja składowej omywki w takim przypadku byłaby bardzo istotnym elementem pomiarów. Istniejący rzeczywisty stan zagrożenia korozyjnego gazociągu byłby bowiem poziomem odniesienia dla ewentualnej przyszłej ochrony katodowej, czyli stanem wywołanym prądami błądzącymi. Prąd wpływający lub wypływający z gazociągu będzie pośrednią informacją w odniesieniu do mierzonej wartości potencjału, jaką

uzyskamy, lokalizując strefy anodowe i katodowe na gazociągu. Aby nie pomylić się w czasie identyfikacji stref, należy przyjąć, że strefę anodową można przyporządkować potencjałom mniej ujemnym od  $-350$  mV względem elektrody Cu/CuSO<sub>4</sub>, a strefę katodową potencjałom bardziej ujemnym od  $-750$  mV. Potencjały gazociągu znajdujące się w zakresie od  $-350$  mV do  $-750$  mV nie mogą być wystarczającą podstawą do jednoznacznej interpretacji oceny zagrożenia korozyjnego gazociągu prądami błądzącymi. Do pomiarów prądów błądzących wpływających lub wypływających z gazociągu można wykorzystać elektrody symulujące stałe lub przenośne.

Korozja powodowana przez prąd elektryczny przemienny jest również poważnym zagrożeniem korozyjnym dla gazociągów zabezpieczonych ochroną katodową. Mechanizm powstawania korozji przemiennoprądowej nie jest jeszcze do końca rozpoznany. Obecnie uznaje się, że prąd przemienny przepływający pomiędzy stalowym gazociągiem a ziemią może powodować istotne uszkodzenie korozyjne.

Skala zagrożenia zależy od gęstości tego prądu. Prawdopodobieństwa zagrożenia korozją ze strony prądów przemiennych można nie uwzględniać, jeśli gęstość prądu przemiennego na eksponowanej powierzchni 1 cm<sup>2</sup> jest mniejsza niż 20 A/m<sup>2</sup>. Podczas polaryzacji katodowej gazociągu dochodzi do wytworzenia się w defektach powłoki izolacyjnej zwartych osadów katodowych. Wówczas korozja przemiennoprądowa ulega istotnemu spowolnieniu, a nawet zostaje powstrzymana.

### Pomiar szybkości korozji

Istotą ochrony katodowej powierzchni stalowych jest spowalnianie procesów korozyjnych konstrukcji stalowej znajdującej się w środowisku korozyjnym [6]. Spowolnienie odbywa się poprzez odpowiednie obniżenie potencjałów elektrochemicznych konstrukcji chronionej katodowo i zostaje uzyskane w wyniku wymuszonego, ukierunkowanego przepływu prądu stałego od środowiska elektrolitycznego do stykających się z nim powierzchni stalowych. Jeżeli wartości potencjałów elektrochemicznych zostaną sprowadzone do potencjałów tzw. ochrony, wówczas szybkość korozji tych powierzchni zostanie zmniejszona do 0,01 mm/rok [2].

Szybkość korozji można sprawdzić przy pomocy technik korozymetrycznych. W ochronie katodowej konstrukcji stalowych mogą być wykorzystywane dwie techniki monitoringu szybkości korozji:

- korozymetria kuponowa,
- korozymetria rezystancyjna.

Zasada monitorowania skuteczności ochrony katodowej polega na ekspozycji w środowisku korozyjnym elektrody stalowej połączonej galwanicznie z konstrukcją, która jest chroniona katodowo. Czujnik korozymetryczny umieszcza się możliwie jak najbliżej chronionej katodowo konstrukcji. Po określonym czasie kontroluje się ubytek masy danej próbki.

Aby wyniki były miarodajne należy:

- wykonać próbki z tego samego (lub zbliżonego) materiału, z którego zbudowana jest zabezpieczona katodowo konstrukcja,
- umieścić próbki w taki sposób, aby nie zmienić warunków polaryzacji katodowej konstrukcji,
- powierzchnie próbek wykonać w formie prostych geometrycznych kształtów, co ułatwi równomierną polaryzację,
- wykończyć powierzchnię próbki w taki sam sposób jak chronioną katodowo konstrukcję,

- spolaryzować próbkę do takiego samego stopnia, co chronioną katodowo konstrukcję.

Spełnienie tych warunków dla gazociągów chronionych katodowo umieszczonych w gruncie jest łatwe do wykonania i nie powinno sprawiać większych trudności.

### **Korozymetria kuponowa**

Monitorowanie szybkości korozji za pomocą korozymetrii kuponowej polega na umieszczeniu odpowiednich próbek metalowych (kuponów) w środowisku korozyjnym, które poddaje się okresowemu ważeniu w celu określenia ubytków masy. Razem z próbkami – kuponami – umieszcza się też próbki niepodłączone do konstrukcji, które mają za zadanie swobodnie korodować. Znając dokładnie wielkość ubytku masy, pole powierzchni próbki i czas ekspozycji, można określić ilościowo i jakościowo szybkość korozji. Wadą tego rozwiązania jest każdorazowa konieczność kosztownego wykopywania kuponów w celu ustalenia ubytków masy. Jest to główny powód całkowitego wycofania tej techniki oceny skuteczności ochrony katodowej konstrukcji.

### **Korozymetria rezystancyjna**

Technika korozymetrii rezystancyjnej jest podobna do korozymetrii kuponowej, z tym, że zamiast ważenia próbek w celu określenia ubytków korozyjnych ocenia się też zmianę – na podstawie wyznaczonych w czasie – przyrostów rezystancji elektrycznej. Pomiary te można prowadzić dowolną ilość razy, co zapewnia możliwość monitorowania korozji w sposób ciągły.

W wyniku postępowania procesu korozji następuje stopniowe zmniejszanie przekroju próbki, natomiast jej długość nie ulega zmianie. Powoduje to wzrost rezystancji próbki w miarę upływu czasu ekspozycji w środowisku korozyjnym.

Według zależności (3) można wyznaczyć rezystancję korodującej próbki.

$$R = \frac{r \cdot L}{S} \quad (3)$$

gdzie:

$R$  – mierzona rezystancja elektryczna czujnika [ $\Omega$ ],

$r$  – rezystywność metalu – wartość stała dla określonego czujnika [ $\Omega\text{m}$ ],

$L$  – długość elementu pomiarowego – wartość niezmienna [m],

$S$  – pole przekroju poprzecznego czujnika – wartość zależna od stopnia korozji [ $\text{m}^2$ ].

Śledzenie wielkości zmian rezystancji w czasie umożliwia dokonanie analizy szybkości korozji badanej konstrukcji.

Technika ta nadaje się zarówno do pomiaru szybkości korozji konstrukcji chronionych, jak i niechronionych katodowo. Pojedynczy pomiar rezystancji czujnika korozymetrycznego nie określa jednoznacznie szybkości korozji. Aby określić szybkość korozji w danym okresie czasowym należy wykonać pomiar na początku i na końcu tego okresu.

Ze względu na pomiar bardzo małych rezystancji, biorąc pod uwagę rezystancję kabli pomiarowych, zauważa się, że technika ta wymaga stosowania czułych metod pomiarowych. Najczęściej stosuje się metody mostkowe z wykorzystaniem prądu przemiennego.

Do zalet korozymetrii rezystancyjnej należą:

- wysoka czułość metody, pozwalająca na kontrolę szybkości korozji stali w warunkach ochrony katodowej,
- nieczułość na chwilowe zmiany warunków korozyjnych, w tym polaryzacji zewnętrznym prądem,
- względność wykonanego pomiaru; odniesieniem jest taki sam czujnik umieszczony w miejscu badanego czujnika, a więc pozostający w tych samych warunkach termicznych, lecz bez kontaktu ze środowiskiem korozyjnym,
- małe wymiary czujników rezystancyjnych, a co za tym idzie – łatwość ich instalacji na konstrukcji chronionej,
- prostota i krótki czas wykonywania pomiarów,
- brak wpływu na wynik pomiaru oddziaływań prądów błędzących stałych i przemiennych oraz indukowanych prądów z napowietrznych linii WN,
- uzyskana wartość na poziomie czułości techniki laboratoryjnej,
- stabilność i niezmienność wartości w czasie pomiaru,
- metoda ta świetnie nadaje się do pomiarów szybkości korozji w szerokiej gamie środowisk korozyjnych,
- możliwość wykonywania wielokrotnego pomiaru na czujniku, bez jakiegokolwiek wpływu na jego funkcjonowanie,
- stosowanie mierników pomiarowych – korozymetrów – przystosowanych do określonego rodzaju czujników korozymetrycznych, które są podłączane przez standardowe złącze i wyskalowane w jednostkach ubytków korozyjnych  $\mu\text{m}$ , co przy pamięci poprzednich wartości pomiarowych pozwala na wyliczenie od razu szybkości korozji w danym miejscu pomiarowym, w okresie ostatnio wykonywanego pomiaru  $\mu\text{m}/\text{rok}$ .

Do wad i ograniczeń pomiarów metodą korozymetrii rezystancyjnej należą:

- ograniczenia stosowalności metody w przypadku korozji równomiernej,
- jednorazowość i wysoki koszt sond, które po zużyciu nie nadają się do regeneracji.

### Warunki stosowania czujników korozymetrycznych na gazociągach

Ochrona katodowa na gazociągu jest skuteczna, jeśli odpowiednio obniżone zostaną potencjały wszystkich odsłoniętych powierzchni gazociągu, stykających się z elektrolitem glebowym. Takie spełnienie wymagań poszczególnych kryteriów zawartych w normach [1–4] wymaga od ochrony katodowej dostarczenia do każdego defektu izolacji gazociągu prądu polaryzacji katodowej o odpowiedniej gęstości. Naturalna zdolność podziemnych gazociągów do nierównomiernej polaryzacji defektów powłoki izolacyjnej utrudnia wykonanie pomiarów potencjałów, co czyni trudności także przy użytkowaniu ochrony katodowej. Jak dotąd nie opracowano skutecznego sposobu pomiarów polaryzacji katodowej w poszczególnych defektach izolacji za pomocą pomiarów z powierzchni ziemi. Wyniki otrzymywane metodą załączeniową, wyłączeniową czy za pomocą elektrod symulujących mogą zawierać lub też zawierają określone dla danej metody błędy. Nadal są to jednak sposoby pomiarów, dzięki którym otrzymuje się bardzo pomocne przy interpretowaniu wyników informacje.

W przypadku oddziaływania na gazociąg np. prądów przemiennych, pomimo zadowalającego określenia potencjału polaryzacji tradycyjnymi metodami pomiarowymi i stwierdzenia, że osiągnięty potencjał ochrony jest dobry, nadal trudno jest ocenić, czy ochrona katodowa skutecznie zabezpiecza dany defekt (defekty) gazociągu. Innym przypadkiem jest wypływający okresowo prąd z gazociągu do ziemi w rejonach oddziaływań prądów błędzących, pochodzących z pobliskiej trakcji kolejowej, pomimo osiągnięcia zadowalającego potencjału ochrony katodowej gazociągu. Potencjał ochrony katodowej nie daje w tym przypadku pewności co do skuteczności zabezpieczenia przed korozją. W przypadku defektów izolacji znajdujących się w wysokoomowych gruntach, trudno jest osiągnąć wymagany poziom potencjału ochrony katodowej. Jednak, z uwagi na zwykle znikomą agresywność korozyjną takich gruntów, sytuacja nie jest wówczas jednoznaczna w odniesieniu do zagrożenia korozyjnego gazociągu.

Miejscami, w których trudno jest określić skuteczność zabezpieczenia korozyjnego gazociągu są:

- odcinki rur ułożonych w stalowych rurach ochronnych, z którymi są metalicznie zwarte. Do takich odcinków gazociągów prąd ochrony nie dopływa. Natomiast, jeśli przestrzeń międzyrurowa jest wypełniona elektrolitem, a w powłoce izolacyjnej danego odcinka gazociągu występują defekty, które stykają się z elektrolitem, to może zachodzić korozja gazociągu w tych defektach; korozja może występować również wtedy, gdy wyżej wymienione warunki nie występują;
- odcinki gazociągów zabezpieczone ochroną katodową, usytuowane w obszarach oddziaływań prądów błędzących, na których dochodzi do okresowego wypływu prądu z gazociągu do ziemi poprzez defekty powłoki izolacyjnej. W praktyce stwierdza się, że mimo wypływu prądu przez okres 3,6 sekundy (występuje wtedy duże zagrożenie korozyjne [4]) stwierdza się brak korozji przy znacznie dłuższych czasach wypływu prądu;
- gazociągi na obiektach złożonych zabezpieczone ochroną katodową z defektami powłoki izolacyjnej, poddawanymi oddziaływaniu makroogniw korozyjnych;
- odcinki gazociągów zabezpieczonych ochroną katodową, które są poddawane oddziaływaniu prądów przemiennych przepływających przez defekty izolacji do ziemi, mimo osiągniętej dość dużej wartości potencjału, nie powodują one korozji o nieakceptowalnej szybkości;
- odcinki gazociągów ułożone w wysokooporowych gruntach, zabezpieczone ochroną katodową z defektami powłoki izolacyjnej;
- pokrycia elektrod symulujących osadami katodowymi o właściwościach izolacyjnych. W tych okolicznościach pomiary potencjałów nie są miarodajne i niewiele wnoszą do rozpoznania skuteczności ochrony przeciwkorozyjnej. Korozymetria rezystancyjna w ww. przypadkach może dostarczyć istotnych informacji o zagrożeniu korozyjnym lub skuteczności zabezpieczenia przeciwkorozyjnego. Ponadto, nieocenionych informacji korozymetria rezystancyjna może dostarczyć w przypadku gazociągów niezabezpieczonych ochroną katodową, w celu oszacowania i monitorowania zagrożenia korozyjnego.

### Wnioski

1. Technika korozymetrii rezystancyjnej wykazuje swoją przydatność do monitorowania skuteczności ochrony

katodowej konstrukcji stalowej, zarówno w wodzie, jak i w ziemi.

2. Korozymetria rezystancyjna stanowi dobre narzędzie do określenia oraz monitorowania szybkości korozji danej konstrukcji stalowej.
3. W warunkach zagrożenia korozyjnego oddziaływaniem prądów błędzących pochodzących od elektrycznej trójki kolejowej korozymetria rezystancyjna pomaga określić, czy mimo niedozwolonego wypływu prądu z defektów izolacji konstrukcji chronionej katodowo rzeczywisty wypływ prądu powoduje korozję konstrukcji.
4. W warunkach oddziaływania na chronioną katodowo konstrukcję stalową prądów przemiennych, indukowanych z napowietrznych linii WN, korozymetria rezystancyjna pozwala stwierdzić, czy niespełnienie kryterium dotyczącego maksymalnej gęstości prądu na powierzchni defektu izolowanej konstrukcji zagraża korozyjnie badanej konstrukcji.
5. W gruntach wysokoomowych, w których potencjałowe kryteria ochrony dla stalowej konstrukcji chronionej katodowo nie są spełnione, korozymetria rezystancyjna umożliwia ustalenie, że korozja w tych warunkach nie występuje.
6. W przypadkach obiektów złożonych, w których występują makroogniwa korozyjne pochodzące od żelbetu, taśmy uziemiającej i stali konstrukcji chronionej lub niechronionej katodowo, korozymetria umożliwia określenie i monitorowanie szybkości korozji.
7. Korozymetria rezystancyjna może być narzędziem do monitorowania szybkości korozji konstrukcji stalowych nie objętych ochroną katodową.
8. Korozymetria jest łatwą techniką pomiarową, którą może posługiwać się niewykwalifikowany personel pomiarowy.
9. Korozymetria rezystancyjna jest techniką pomiarową wielokrotnego użytku.

## Literatura

- [1] PKN-CEN/TS 15280:2008 *Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia korozji zakopanych rurociągów prądem przemiennym – Zastosowanie do rurociągów chronionych katodowo.*
- [2] PN-EN 12954:2004 *Ochrona katodowa konstrukcji stalowych w gruntach lub w wodach. Zasady ogólne i zastosowania dotyczące rurociągów.*
- [3] PN-EN 14505:2007 *Ochrona katodowa konstrukcji złożonych.*
- [4] PN-EN 50162:2005 *Ochrona przed korozją powodowaną przez prądy błędzące pochodzące z systemów prądu stałego.*
- [5] Radziejewski J.: *Ochrona elektrochemiczna przed korozją.* Praca zbiorowa. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1991.
- [6] Von Baeckmann W., Schwenk W., Prinz W.: *Handbook of Cathodic Corrosion Protection. Theory and Practice of Electrochemical Protection Processes,* 1997.



Mgr inż. Paweł STOCHAJ – absolwent AGH, Kierownik Laboratorium Techniki Eksploatacji Gazociągów w INiG w Krakowie. Główny przedmiot zainteresowań – przesył i dystrybucja paliw gazowych i ropy, ochrona katodowa oraz powłoki ochronne na rurociągach.