



**KOROZYMETRIA JAKO WIARYGODNA TECHNIKA
POMIARU SKUTECZNOŚCI OCHRONY KATODOWEJ**

**CORROSIMETRY AS RELIABLE TECHNIQUE FOR MEASURE-
MENT OF CATHODIC PROTECTION EFFECTIVENESS**

Jezmar Jankowski

SPZP CORRPOL, 80-718 Gdańsk, ul. Elbląska 133A

Słowa kluczowe: korozja, korozymetria, efektywność ochrony katodowej
Keywords: corrosion, corrosimetry, cathodic protection effectiveness

Streszczenie

Wykazano na gruncie kinetyki procesów elektrodowych wyższość pomiarów szybkości korozji nad pomiarami potencjału przy ocenie skuteczności ochrony katodowej. Podano przesłanki wskazujące na celowość stosowania do tego celu korozymetrii rezystancyjnej. Przedstawiono warunki, jakie należy spełnić przy monitorowaniu ochrony katodowej techniką rezystancyjną. Zamieszczono wybrane wyniki wieloletnich badań nad techniką rezystancyjną w odniesieniu do rurociągów chronionych katodowo. Przedstawiono nowe opracowania czujników rezystancyjnych do monitorowania skuteczności ochrony katodowej produkcji SPZP CORRPOL. W końcowej części zamieszczono dane na temat powtarzalności wyników pomiarów rezystancyjnych.

Summary

On the basis of electrode kinetics, the superiority of corrosion rate measurements versus potential measurements has been proven for assessment of cathodic protection effectiveness. The circumstances pointing to the usefulness of the electric resistance (ER) corrosimetry have been given. The conditions required for cathodic protection monitoring by the ER technique have been described. The selected results of many years' examination on the ER technique applied to cathodically protected pipelines have been presented. The new resistance probes produced by SPZP CORRPOL for cathodic protection effectiveness monitoring have been demonstrated. In the end part of paper the data on the repeatability of resistance measurements have been enclosed.

Wprowadzenie

Na wstępie należy uzgodnić znaczenie pewnych pojęć, które zostały użyte w niniejszym referacie. Pod pojęciem *korozymetrii* przywołanej w tytule pracy rozumie się w szerszym znaczeniu różne techniki pomiaru postępu lub szybkości korozji. W węższym znaczeniu, użytym również w tym referacie, termin *korozymetria* oznacza technikę pomiarów szybkości korozji na podstawie przyrostów rezystancji elektrycznej. Ściśle biorąc, bardziej poprawne byłoby określenie *korozymetria rezystancyjna*. Przyrządy tego typu przyjęło się nazywać po prostu *korozymetrami* (z ang. *corrosometers* lub *corrosimeters*) w odróżnieniu od *korometrów* (z ang. *corrometers* lub *corrmmeters*), które wykorzystują do pomiarów korozyjnych techniki polaryzacyjne. Dużą zaletą korozymetrii rezystancyjnej jest możliwość jej stosowania do pomiaru szybkości korozji konstrukcji polaryzowanych, w tym również katodowo.

Pierwsze doniesienia na ten temat pojawiły się w literaturze zagranicznej w latach 70. [1] i 80. [2-4]. Niedawno Fitzgerald i in. [5] opisali zastosowanie czujników rezystancyjnych do pomiaru szybkości korozji chronionych katodowo den zbiorników od strony gruntu. Ostatnio, Khan [6] wykazał użyteczność czujników rezystancyjnych do określania skuteczności ochrony katodowej w gruntach o wysokiej rezystywności (suche, pustynne tereny w Arabii Saudyjskiej), gdzie słaby kontakt elektrody odniesienia z gruntem powoduje błędne wskazania potencjału.

W kraju, pierwsze i zarazem jedyne prace nad wdrożeniem korozymetrii do praktyki ochrony katodowej prowadzone są w ośrodku gdańskim skupionym obecnie w SPZP CORRPOL [7-10]. Ponieważ zdobywane dalsze doświadczenia potwierdzają wysoką przydatność korozymetrii rezystancyjnej uznano, że warto tę metodę upowszechnić i rekomendować, zwłaszcza że tego typu techniki pomiarowe nabierają coraz większego znaczenia w świetle nowych norm europejskich z zakresu ochrony katodowej.

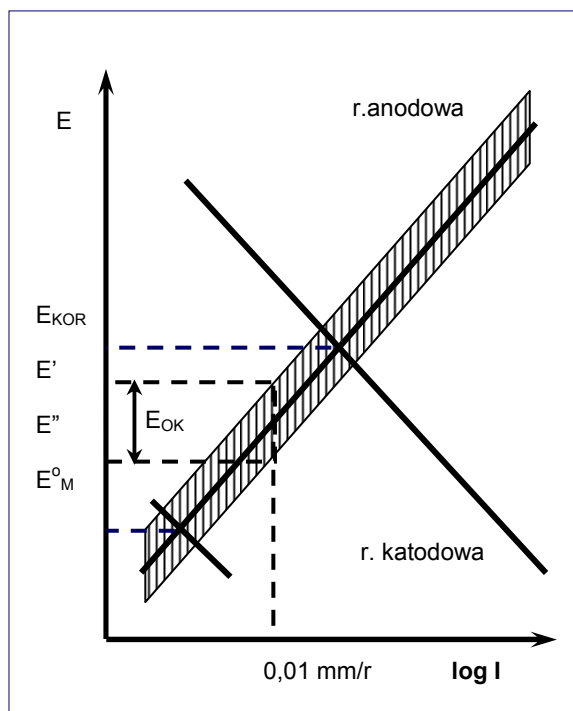
Celowość pomiaru szybkości korozji

Warto przypomnieć na wstępie nową definicję potencjału ochrony, zapisaną w normie europejskiej EN-12954 pt. *Ochrona katodowa zakopanych lub zanurzonych konstrukcji stalowych - ogólne zasady i zastosowania dotyczące rurociągów* (przyjętej również w kraju), która mówi: „*Potencjał ochrony jest to potencjał metalu, przy którym szybkość korozji jest mniejsza od 0,01 mm/rok*”.

Skoro tak zdefiniowany został potencjał ochrony, to powinny być do dyspozycji służb serwisowych również odpowiednie narzędzia, a więc techniki pomiarowe, aby móc sprawdzić, czy podane kryterium jest spełnione. Należy więc dysponować czuymi technikami wyznaczania szybkości korozji metalu polaryzowanego katodowo w zakresie 0,01 mm/rok. Takich technik jest jak na razie niewiele. Jedną z nielicznych, sprawdzonych w praktyce jest oprócz stosowania dość niewygodnych kuponów korozyjnych właśnie korozymetria rezystancyjna będąca przedmiotem niniejszego referatu.

Techniką rezystometryczną zainteresowano się w SPZP CORRPOL już dość dawno ze względu na napotykaną trudności w ocenie skuteczności ochrony katodowej na podstawie tradycyjnych pomiarów potencjału. Pomiary potencjału mogą być niepewne, obciążone składową omową, a ich interpretacja zbyt uproszczona w oparciu o umowne kryteria potencjałowe.

Niejednoznaczność pomiarów potencjału staje się bardziej oczywista na gruncie znajomości kinetyki procesów elektrodowych, której podstawową zależność ilustruje schematycznie wykres potencjał-prąd na rys. 1.



Rys. 1. Zależność potencjał-prąd dla elektrody metalowej polaryzowanej katodowo

Z analizy tej zależności wynikają trzy istotne wnioski:

1. Dla każdego układu metal-elektrolit charakterystyka polaryzacyjna potencjał-prąd jest z zasady różna, a więc pomiar potencjału nie określa jednoznacznie szybkości korozji. Nie znany jest bowiem dokładny przebieg tej charakterystyki, która mieści się ogólnie biorąc w jakimś bliżej nieokreślonym obszarze oznaczonym tutaj umownie polem kreskowanym. Po to, aby obniżyć szybkość korozji do poziomu 0,01 mm/rok trzeba, jak widać, polaryzować dany układ do określonej wartości potencjału w zakresie $E'-E''$, ale do jakiej konkretnie wartości – nie wiadomo, bo dokładny przebieg charakterystyki polaryzacyjnej nie jest znany.
2. Nie ma ostrej granicy ochrony katodowej określanej przez kryterium potencjałowe. Jak widać, cząstkowy prąd anodowy jonizacji metalu, a więc jego szybkość korozji jest ciągłą, a nie skokową funkcją potencjału i wobec tego każda polaryzacja katodowa zapewnia jakieś wymierne zmniejszenie szybkości korozji.
3. Wobec powyższego nasuwa się trzeci, najważniejszy wniosek, że najbardziej racjonalnym podejściem przy ocenie skuteczności ochrony katodowej jest poleganie na bezpośrednich pomiarach szybkości korozji chronionej konstrukcji zamiast pośrednich pomiarów potencjału. I tutaj właśnie może pomóc korozymetria rezystancyjna.

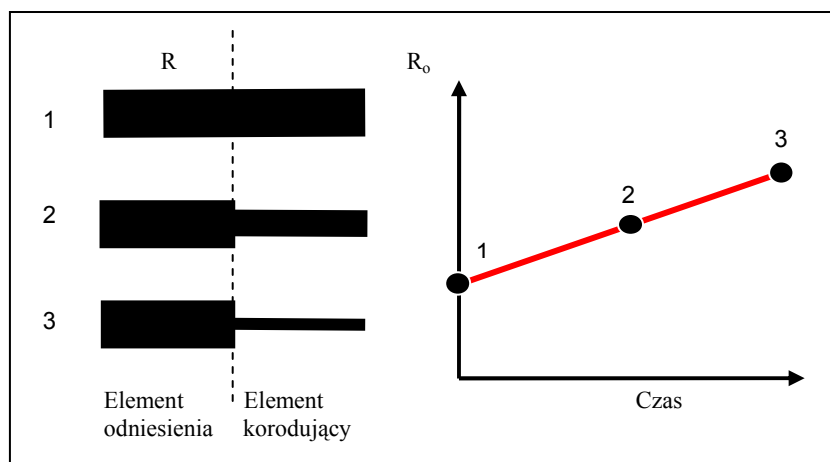
Możliwości korozymetrii rezystancyjnej

Technika rezystometryczna nie jest techniką nową. Początki jej stosowania do pomiaru szybkości korozji obiektów swobodnie korodujących sięgają lat 50. ubiegłego wieku w krajach przodujących technicznie (głównie USA) i nieco późniejszych (lat 70.) w kraju (pierwsze wdrożenia w Instytucie Chemii Przemysłowej w Warszawie).

Jak wiadomo, korozymetria rezystancyjna jest dzisiaj jedną z najszerzej stosowanych technik monitorowania korozji w przemyśle. Wynika to zapewne z jej przystępności i uniwersalności – może być stosowana w szerokiej gamie środowisk korozyjnych: wodnych i bezwodnych, gazowych (w tym również do monitorowania korozji atmosferycznej oraz konstrukcji podziemnych). Jest ona z powodzeniem stosowana w energetyce, przemyśle chemicznym, petrochemicznym i innych gałęziach przemysłu. Użytkowników ochrony katodowej szczególnie interesuje możliwość wykorzystania korozymetrii do oceny jej skuteczności, gdzie jak na razie wydaje się być techniką niedocenianą i znajduje stosunkowo niewielkie zastosowanie, chociaż jej potencjalne możliwości są 4 krótko zasadę pomiarów rezystometrycznych. Pomiar prowadzi się najczęściej metodą porównawczą prądem zmiennym w układzie mostkowym. Mierzy się wzrost rezystancji elementu pomiarowego czujnika ekspozowanego w środowisku korozyjnym w stosunku do takiego samego elementu chronionego przed dostępem czynników korozyjnych, a więc osłoniętego szczelnie w obudowie sondy.

Element pomiarowy w miarę postępu korozji zmniejsza swój przekrój (przy niezmięnionej długości) a zarazem zwiększa rezystancję zgodnie z II prawem Ohma. Wzrost rezystancji jest spowodowany ubytkiem korozyjnym dobrze przewodzącego metalu i jego przemianą w dużo słabiej przewodzące produkty korozji (tlenki, wodorotlenki).

Rys. 2 ilustruje stopniowe zmniejszanie grubości elementu pomiarowego i związany z tym wzrost jego rezystancji. Na wykresie pokazano schematycznie mierzone przyrosty rezystancji w czasie (jako stosunek rezystancji elementu korodującego do rezystancji elementu odniesienia – R/R_0), który przy znajomości kształtu i wymiarów czujnika można przeliczać na liniowy ubytek korozyjny metalu.



Rys. 2. Przyrosty rezystancji czujnika spowodowane procesem korozji

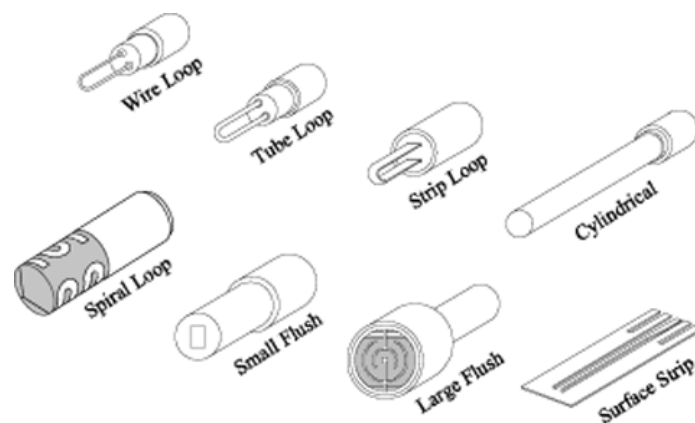
Monitorowanie skuteczności ochrony katodowej

Należy przestrzegać pewnych podstawowych zasad przy monitorowaniu skuteczności ochrony katodowej za pomocą czujników rezystancyjnych. Monitorowanie polega na ekspozycji w środowisku korozyjnym próbki metalowej (stanowiącej element czujnika) połączonej elektrycznie z chronioną katodowo konstrukcją, i określeniu w ustalonych odstępach czasu jej ubytków korozyjnych. Powinny być spełnione następujące warunki:

- próbki powinny być wykonane z tego samego lub zbliżonego materiału, co zabezpieczana konstrukcja (najczęściej stali węglowej);
- sposób wykończenia powierzchni próbki powinien odpowiadać monitorowanej konstrukcji;
- próbka powinna być spolaryzowana do takiego samego potencjału jak chroniona katodowo konstrukcja – w tym celu należy ją połączyć niskorezystancyjnym przewodem elektrycznym (ekwipotencjalnym) z konstrukcją;
- umieszczenie próbki powinno w jak najmniejszym stopniu zmieniać warunki polaryzacji katodowej konstrukcji (pobór prądu, rozkład prądu i potencjału na powierzchni chronionej), Ma to szczególne znaczenie w przypadku konstrukcji pokrytych powłokami izolacyjnymi wysokiej jakości;
- próbka powinna być eksponowana w tym samym środowisku korozyjnym, co chroniony obiekt – jej umieszczenie w gruncie nie powinno zmieniać istotnie warunków ekspozycji (struktury gruntu, wilgotności, natlenienia ...). Z tego względu miarodajne wyniki uzyskuje się na ogół dopiero po pewnym czasie od umieszczenia próbki w ziemi, wymagającym do przywrócenia zakłóconej równowagi;
- powierzchnia próbki powinna być spolaryzowana równomiernie; ogranicza to kształt próbek do prostych geometrycznie, w zasadzie płaskich powierzchni;
- czujnik rezystancyjny należy umieścić w środowisku korozyjnym (ziemia, woda, beton...) jak najbliżej kontrolowanej konstrukcji stalowej i skierować go stalowym elementem pomiarowym w kierunku anod polaryzujących (na zewnątrz konstrukcji);
- przewody elektryczne (ekwipotencjalny i pomiarowy zakończony gniazdem) doprowadzić do najbliższego punktu kontrolno-pomiarowego. W przypadku konstrukcji chronionej katodowo należy końcówkę przewodu ekwipotencjalnego połączyć z masą konstrukcji – patrz schemat aplikacyjny.

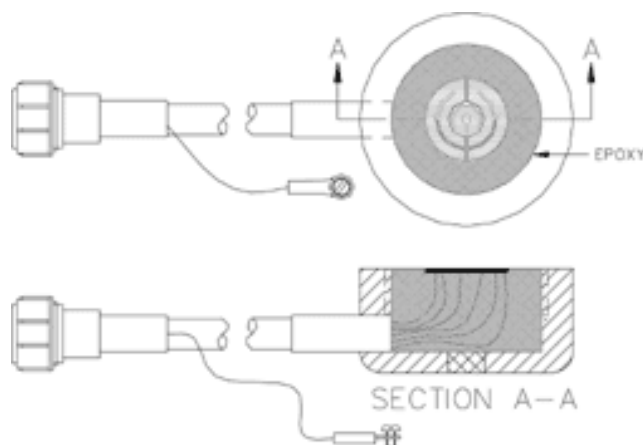
Jeżeli zostaną zmierzone ubytki korozyjne chronionego i niechronionego katodowo metalu, to bardzo prosto można określać ilościowo skuteczność ochrony katodowej. W tym celu należy zamontować na monitorowanej konstrukcji co najmniej dwa czujniki rezystometryczne, z których jeden jest włączony w obwód ochrony katodowej, zaś drugi pozostaje swobodnie korodujący.

Rys. 3 przedstawia schematycznie kilka typowych rozwiązań czujników rezystancyjnych stosowanych w przemyśle. Pokazane są czujniki pętlowe (drutowe i rurkowe), taśmowe, cylindryczne, spiralne i płaskie. Tego typu czujniki montuje się na ogół wewnątrz różnego typu konstrukcji metalowych, jak zbiorniki, rurociągi, wymienniki ciepła.



Rys.3. Różne rodzaje czujników rezystancyjnych

Czujniki do gruntu, a więc monitorowania korozji konstrukcji podziemnych są z reguły płaskie i o większej powierzchni, aby zapewnić lepszy, bardziej równomierny kontakt elementu pomiarowego ze środowiskiem korozyjnym. Rys. 4 przedstawia widok z góry oraz przekrój płaskiego czujnika produkcji zagranicznej w kształcie wycinka koła (rodzaj spirali).



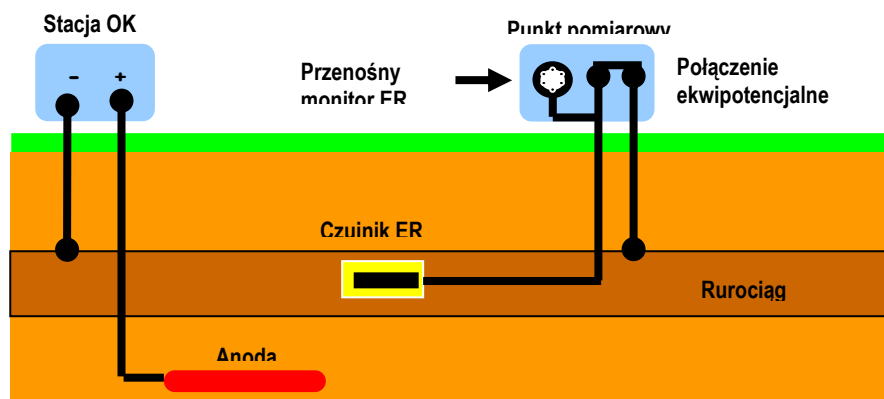
Rys. 4. Czujnik rezystancyjny do monitorowania korozji konstrukcji podziemnych

Takie rozwiązanie ma na celu wydłużenie ścieżki rezystancyjnej, aby zwiększyć dokładność pomiaru. Rys. 5 ilustruje schematycznie sposób monitorowania techniką rezystometryczną szybkości korozji podziemnego rurociągu z ochroną katodową.

Rurociąg polaryzowany jest z zewnętrznego źródła prądu. Na jego powierzchni umieszczony jest czujnik rezystometryczny, który w słupku pomiarowym zwarty jest elektrycznie z konstrukcją rurociągu. Do słupka doprowadzony jest także przewód z gniazdem pomiarowym czujnika, co umożliwia dokonywanie okresowych pomiarów ubytków korozyjnych za pomocą przenośnego korozymetru.

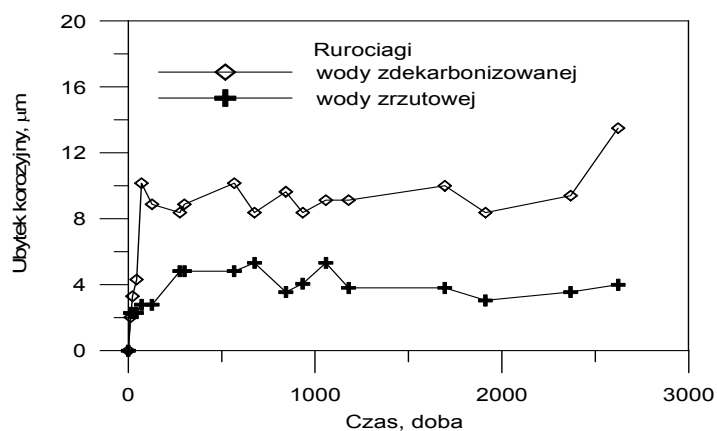
Wyniki badań eksploatacyjnych

W kraju mamy już stosunkowo bogate doświadczenia ze stosowaniem techniki rezystometrycznej do monitorowania skuteczności ochrony katodowej. Od 1995 r. przedsiębiorstwo CORRPOL wdrożyło kilka takich systemów w dużych zakładach przemysłowych, m.in. w Elektrowni „Opole”, Elektrowni „Łaziska”, Zakładach Chemicznych „Police”, International Paper S.A. w Kwidzynie, EuRoPol GAZ S.A. (na gazociągu tranzytowym) oraz Kopalni Ropy i Gazu w Dębnie.



Rys. 5. Sposób monitorowania ochrony katodowej rurociągu techniką rezystometryczną

Wykres na rys. 6 przedstawia przykładowe wyniki pomiarów rezystometrycznych na chronionych katodowo rurociągach podziemnych w jednej z krajowych elektrowni. Są to dane wieloletnie – za okres ok. 8 lat. Wykazują one bardzo wysoką skuteczność ochrony katodowej, bowiem ubytki korozyjne stali nie przekroczyły w tym czasie 20 mikrometrów, a więc spełniają z nadadkiem kryterium szybkości korozji 0,01 mm/rok.



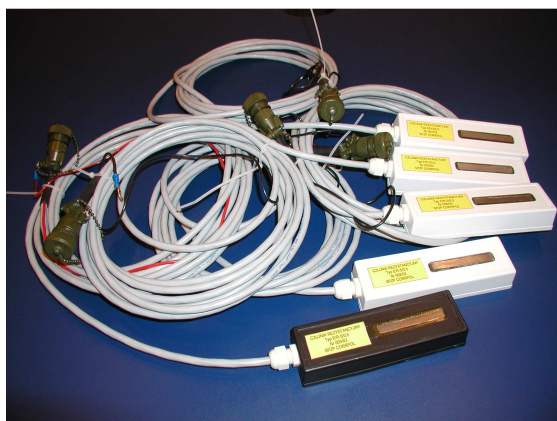
Rys. 6. Wyniki pomiarów rezystometrycznych dla chronionych katodowo stalowych rurociągów podziemnych

Potwierdziły to wyniki badań grawimetrycznych na równoległe eksponowanych kuponach korozyjnych. Największe ubytki korozyjne stali wystąpiły w okresie pierwszych 3-4 miesięcy, tj. podczas rozruchu instalacji ochrony katodowej. Po uzyskaniu potencjału ochronnego procesy korozyjne zostały praktycznie zahamowane – ubytki korozyjne utrzymują się od lat w granicach błędu pomiarowego na stałym poziomie.

Nowe opracowania czujników rezystancyjnych

W 2002 roku wdrożono do produkcji w SPZP CORRPOL własne opracowania czujników rezystancyjnych do monitorowania skuteczności ochrony katodowej. Czujniki posiadają płaski element pomiarowy i wypełniają dotychczasową lukę w sprzęcie krajowym.

Zamieszczona fotografia (rys. 7) ukazuje widok ogólny czujników przeznaczonych do ekspozycji w gruncie.



Rys. 7. Czujniki rezystancyjne do monitorowania skuteczności ochrony katodowej konstrukcji podziemnych

Na uwagę zasługuje niewielka powierzchnia eksponowanej stali – 5 cm². Zakres pomiarowy wynosi od 0 do 0,3 mm. Czujnik wyposażony jest w hermetyczne 6-palcowe gniazdo pomiarowe, które stanowi standard światowy w tego typu aparaturze i jest kompatybilne z korozymetrami wiodących firm zagranicznych.

Warto zaprezentować nieco bliżej nowatorskie opracowanie, jakim jest opisana wyżej sonda rezystometryczna wyposażona w elektrodę odniesienia, w tym przypadku nasyconą elektrodą kalomelową (NEK). Opracowany układ pomiarowy przeznaczony jest do jednoczesnego monitorowania szybkości korozji i potencjału konstrukcji podziemnych. Takiego rozwiązania nie spotkano dotychczas, ani w kraju, ani za granicą, a wydaje się ono posiadać szereg zalet. Umożliwia ono ścisłe powiązanie mierzonej szybkości korozji metalu z jego potencjałem polaryzacji. Tego typu dane umożliwiają ustalenie optymalnych warunków polaryzacji katodowej dla zapewnienia pożądanego obniżenia szybkości korozji konstrukcji chronionej. Wygląd i charakterystyka techniczna sondy są analogiczne do zaprezentowanego wcześniej czujnika rezystancyjnego

za wyjątkiem wyposażenia go w miniaturową elektrodę odniesienia. Typowo stosowana jest NEK, chociaż możliwe jest użycie innego rodzaju elektrody.

Fotografia na rys. 8 przedstawia odmianę cylindryczną czujników rezystancyjnych z płaskim elementem pomiarowym.



Rys. 8. Czujniki rezystancyjne do monitorowania skuteczności ochrony katodowej powierzchni wewnętrznych

Czujnik ten posiada mniejszy element pomiarowy w kształcie niedomkniętego pierścienia o powierzchni eksponowanej 1 cm^2 . Element pomiarowy jest grubszy (1-1,5 mm) zapewniając dłuższą żywotność czujnika – użyteczny zakres pomiarowy wynosi 0,5 do 0,8 mm. W przedstawionej wersji czujnik cylindryczny jest przeznaczony do szczelnego montażu (poprzez dławicę) w ściankach rurociągów, zbiorników, rur osłonowych itp. w celu monitorowania korozji wewnętrznej. W prostszej wersji, z korpusem z tworzywa sztucznego, czujnik ten może być stosowany do monitorowania korozji zewnętrznej konstrukcji metalowych. Doskonale nadaje się do pomiaru oddziaływań prądu zmiennego na konstrukcjach podziemnych, gdyż posiada zalecaną do tego celu powierzchnię 1 cm^2 .

Powtarzalność pomiarów

Można spotkać się niekiedy z zarzutem, że technika rezystometryczna nie zapewnia powtarzalnych, a więc precyzyjnych wyników pomiarów. Wiadomo z doniesień literaturowych [11] i własnych obserwacji [7-10], że istnieje pewien rozrzut wyników związany z pomiarem w warunkach przemysłowych bardzo niskich rezystancji rzędu kilku $\text{m}\Omega$.

Przeprowadzone zostały niedawno w laboratorium SPZP CORRPOL testy powtarzalności pomiarów rezystancyjnych, których przykładowe rezultaty są zestawione dla czujnika produkcji USA i krajowej. Niezależne pomiary prowadzono przez kilka kolejnych dni na obu czujnikach eksponowanych w atmosferze, a więc przy braku korozji, powtarzając każdy pomiar 5-ciokrotnie. Do pomiarów użyto korozymetr cyfrowy IN-8500 Data Logger prod. USA. Wyniki pomiarów zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Powtarzalność wyników pomiarów rezystancyjnych
Czujnik 620HD -1-S20 (USA)

Numer pomiaru	Przyrost rezystancji, [%]			
	1.06.04	2.06.04	3.06.04	4.06.04
1	143	143	143	141
2	144	144	142	142
3	143	144	143	142
4	143	144	143	142
5	144	143	143	141
Średnia	143,4	143,6	142,8	141,6
Odch. stand.	0,55	0,55	0,45	0,55

Czujnik ER-5/05 (CORRPOL)

Numer pomiaru	Przyrost rezystancji, [%]			
	1.06.04	2.06.04	3.06.04	4.06.04
1	32	28	33	30
2	26	30	35	30
3	30	30	31	30
4	28	30	33	26
5	30	32	30	28
Średnia	29,2	30,0	32,4	28,8
Odch. stand.	2,28	1,41	1,95	1,79

Zaobserwowano faktycznie pewne odchylenia wyników na obu rodzajach czujników, których błąd względny nie przekracza jednak kilku procent i nie dyskwalifikuje przydatności techniki rezystometrycznej. Większy rozrzut wykazały pomiary dokonane na czujniku krajowym, który charakteryzował się znacznie niższym ubytkiem korozyjnym i niższą rezystancją elementu pomiarowego. W tych warunkach, zgodnie z oczekiwaniami uzyskano niższą precyzję pomiarów. Otrzymane wyniki wskazują na potrzebę statystycznej obróbki danych dla wyciągnięcia poprawnych wniosków odnośnie oceny skuteczności ochrony katodowej.

Podsumowanie

Uzyskane dotychczas wyniki wieloletnich badań i doświadczeń zebranych w skali przemysłowej upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- Technika korozymetrii rezystancyjnej wykazała swoją wysoką przydatność i użyteczność do monitorowania skuteczności ochrony katodowej konstrukcji stalowych w kontakcie z gruntem lub wodą.
- Na tej podstawie SPZP CORRPOL zaleca jej stosowanie w kraju, jako metody uzupełniającej do klasycznych pomiarów potencjałowych, zwłaszcza tam, gdzie budzą one istotne wątpliwości.
- W celu zwiększenia dokładności pomiarów rezystancyjnych wskazane jest wykonanie każdorazowo kilku pomiarów i statystyczne opracowanie wyników.

Takie podejście odnośnie oceny skuteczności ochrony katodowej jest zgodne z aktualnymi trendami odnośnie kryteriów ochrony, które są już m.in. zasygnalizowane w nowej normie europejskiej EN-12954. Norma ta ustanawia dopuszczalną szybkość korozji konstrukcji stalowych chronionych katodowo na 0,01 mm/rok. Jej wcielenie w życie wymaga wprowadzenia do technologii ochrony katodowej nowej skutecznej metody pomiarowej, którą ma szansę stać się właśnie korozymetria rezystancyjna.

Literatura

- [1] H.J. Fromm: *Materials Performance*, **20** (No. 9), 21 (1977).
- [2] H. England, R. Heidersbach: *Proc. CORROSION'82*, Paper No. 173, NACE, Houston 1982.
- [3] G. Cooper, A.R. Soleimany: *Pipeline Gas J.*, **21**, 38 (1983).
- [4] B.A. Martin: *Corrosion*, **49**, 343 (1993).
- [5] J.H. Fitzgerald et al.: *CORROSION/99*, Paper No. 519, Houston, NACE 1999.
- [6] N.A. Khan: *Materials Performance*, **43** (6) 20 (2004).
- [7] J. Jankowski, J. Szukalski: *Mat. IV Krajowej Konferencji „Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej”*, Jurata, czerwiec 1996, s. 51-58.
- [8] J. Jankowski, J. Szukalski: *Mat. V Krajowej Konferencji Korozyjnej KOROZJA'96*, Gdańsk 1996.
- [9] J. Jankowski: *Mat. Sympozjum N-T „Ochrona katodowa wewnętrznych powierzchni wielkośrednicowych rurociągów wodnych”*, Łaziska Górne, czerwiec 2001, s. 25-32.
- [10] J. Jankowski, W. Sokólski: *Ochrona przed Korozją*, **46**, 218 (2003).
- [11] G.L. Cooper: *Proper Electrical Resistance Corrosion Probe Span Selection*, [w:] *Electrochemical Techniques for Corrosion Engineering*, R. Baboian (ed.), NACE, Houston 1986, s. 327-332