



KOROZYMETRIA REZYSTANCYJNA W BADANIACH KOROZJI PODZIEMNYCH RUROCIĄGÓW

RESISTANCE CORROSIMETRY TECHNIQUE IN PIPELINE CORROSION ASSESSMENT

Marek Fiedorowicz, Michał Jagiełło

Operator Gazociągów Przesyłowych Gaz-System S.A., Oddział w Gdańsku

Słowa kluczowe: korozja, ochrona katodowa, rura osłonowa, korozja a.c., korozja powodowana przez prądy błądzące, korozymetria rezystancyjna
Keywords: corrosion, cathodic protection, casing pipe, a.c. corrosion, stray current corrosion, electric resistance corrosimetry

Streszczenie

Korozymetria rezystancyjna jest wartościową techniką diagnostyczną wspomagającą tradycyjne metody badań zagrożeń korozyjnych i skuteczności ochrony przeciwkorozyjnej. W wielu zastosowaniach staje się podstawową techniką monitorowania procesów korozyjnych. W pracy przedstawiono zasady stosowania korozymetrii rezystancyjnej w badaniach korozji i skuteczności ochrony podziemnych rurociągów oraz zaprezentowano wyniki uzyskane za pomocą tej techniki w perspektywie wielu lat w szczególnych miejscach, takich jak odcinki rurociągów ułożone w rurach otaczających, odcinki zagrożone przez korozję powodowaną przez prąd przemienny, odcinki ułożone w gruntach wysokooporowych, konstrukcje złożone bez i z ochroną katodową, odcinki rurociągów poddane oddziaływaniom prądów błądzących.

Summary

Electric resistance corrosimetry is valuable diagnostic technique supporting traditional methods of research of corrosion risk and corrosion protection efficiency. In many applications it is becoming a fundamental technique for monitoring corrosion processes. The paper presents the principle of a resistance corrosimetry technique in tests of corrosion risk and the effectiveness of corrosion protection of underground pipelines. It shows the results obtained with the use of this technique in the perspective of many years in specific locations, such as sections of pipework in casing pipes, sections of pipeline prone to a.c. corrosion, sections laid in soil with high resistivity, sections exposed to impact of stray currents, structures made with and without cathodic protection.

Wstęp

Korozymetria rezystancyjna to technika pomiarowa pozwalająca pośrednio określić szybkość korozji konstrukcji poprzez określenie szybkości korozji elektrody symulującej, zakopanej przy konstrukcji i połączonej z nią zwykle poprzez punkt pomiarów elektrycznych – na podstawie pomiarów zmian rezystancji elektrycznej tej elektrody w przedziałach czasu, spowodowanych ubytkiem masy i zmianą wymiarów tej elektrody wskutek korozji. Pomiar rezystancji elektrody wykonuje się specjalnym miernikiem z powierzchni ziemi, odkopywanie elektrody nie jest konieczne. Inne używane nazwy rezystancyjnej elektrody korozymetrycznej to rezystancyjny kupon korozymetryczny, czujnik korozymetryczny, sonda korozymetryczna, elektroda rezystometryczna, ERCP (electrical resistance corrosion probe). Korozymetria rezystancyjna umożliwia (przy pewnych założeniach) monitorowanie zagrożeń korozyjnych, a w przypadku konstrukcji chronionych katodowo umożliwia sprawdzenie, czy spełnione jest kinetyczne kryterium ochrony – czy szybkość korozji jest akceptowalna.

Generalnie skuteczną i ekonomiczną ochronę przeciwkorozyjną podziemnych rurociągów uzyskuje się w wyniku jednoczesnego stosowania powłok izolacyjnych i ochrony katodowej. Krajowe prawo wymaga, aby stalowe gazociągi były zabezpieczone przed korozją w ten sposób [1].

Podstawową rolę w ochronie przeciwkorozyjnej podziemnego rurociągu pełni powłoka izolacyjna. „Skala działania” ochronnego powłoki izolacyjnej zależy od stopnia jej szczelności. Powłoka izolacyjna oczywiście zabezpiecza 100% powierzchni bocznej odcinków pokrytych całkowicie szczelnymi, pozbawionymi jakichkolwiek nieszczelności powłokami; dla takich odcinków inne (poza ochroną bierną) sposoby ochrony przeciwkorozyjnej nie są konieczne, jeśli szczelność powłoki będzie sprawdzana i utrzymywana w toku użytkowania rurociągu.

Ochrona katodowa zabezpiecza jedynie te fragmenty powierzchni rurociągu, które bezpośrednio stykają się z elektrolitem glebowym (poprzez pory, ubytki powłoki izolacyjnej i inne miejsca pozbawione izolacji).

Istotą ochrony katodowej powierzchni stalowych znajdujących się w elektrolitycznym środowisku korozyjnym jest spowolnienie, a z technicznego punktu widzenia – praktyczne powstrzymanie procesów korozyjnych w następstwie odpowiedniego obniżenia potencjałów elektrochemicznych tych powierzchni, uzyskanego w wyniku wymuszonego, ukierunkowanego przepływu prądu stałego o kierunku od środowiska elektrolitycznego do stykających się z nim zabezpieczanych powierzchni stalowych. Jeśli wskutek polaryzacji katodowej potencjały elektrochemiczne powierzchni stalowych zostaną obniżone co najmniej do tzw. potencjałów ochrony, wówczas szybkość korozji tych powierzchni zostanie zmniejszona do wartości mniejszej niż **0,01 mm/rok** (10 $\mu\text{m}/\text{rok}$) [2].

W polskim gazownictwie wprowadzono pojęcie tzw. akceptowalnej szybkości korozji. W przypadku nowych gazociągów zabezpieczonych ochroną katodową szybkość ta jest równa wyżej określonemu kinetycznemu kryterium skuteczności ochrony katodowej. Natomiast w przypadku gazociągów bez ochrony katodowej oraz gazociągów z ochroną wprowadzoną w okresie użytkowania gazociągu (w tym z ochroną niepełną), akceptowalną szybkość korozji określa operator sieci gazowej z uwzględnieniem dalszego, planowanego okresu użytkowania gazociągu [3]. Korozymetria rezystancyjna jest właściwą techniką pomiarową umożliwiającą sprawdzanie, czy szybkość korozji gazociągów stalowych jest akceptowalna.

Aby ochrona katodowa podziemnego rurociągu była skuteczna, należy odpowiednio obniżyć potencjały elektrochemiczne wszystkich odsłoniętych powierzchni rurociągu stykających się z elektrolitem glebowym. Wymaga to „dostarczenia” do poszczególnych defektów powłoki izolacyjnej poprzez ziemię prądów polaryzacji katodowej o odpowiednich gęstościach. Należy przeprowadzać pomiary pozwalające na wyznaczenie (oszacowanie) potencjałów polaryzacji katodowej w defektach powłoki izolacyjnej rurociągu. Naturalna skłonność podziemnych rurociągów pokrytych powłokami izolacyjnymi z licznymi i różnorodnymi defektami do nierównomiernej polaryzacji utrudnia wykonywanie takich pomiarów, utrudnia także użytkowanie ochrony katodowej.

Pomiary potencjałów są i będą podstawowymi pomiarami w praktyce ochrony katodowej konstrukcji metalowych. Jednakże jak dotąd nie opracowano metody pozwalającej zadowalająco określać potencjały polaryzacji katodowej w defektach izolacji za pomocą pomiarów wykonywanych na powierzchni ziemi. Wyniki uzyskiwane metodą załączeniową, wyłączeniową, pomiarowo-obliczeniową (ekstrapolacyjną stosowaną w technice pomiarów intensywnych), czy też za pomocą elektrod symulujących, mogą zawierać i z reguły zawierają specyficzne dla danej metody, istotne błędy. Jednakże każda z tych metod może dostarczyć cennych informacji, pod warunkiem, że wyniki pomiarów interpretować będą specjaliści. Na przykład potencjał załączeniowy z reguły obarczony jest największym błędem wnoszonym przez składową omową IR, dlatego też nie można wprost odnosić go do potencjałowych kryteriów ochrony, które podawane bez składowej IR. Jeśli jednak oceniający specjalista dysponować będzie dodatkowymi informacjami, na przykład takimi jak rozkład rezystywności gruntu oraz rezystancje przejścia odcinków rurociągu, wskazujące na wysoki poziom szczelności powłoki izolacyjnej, to możliwe jest wówczas oszacowanie, czy w defektach powłoki spełnione są kryteria ochrony. Szersze informacje dotyczące trudności w wyznaczaniu potencjałów w defektach powłok rurociągów przedstawiono w [4].

Występują także przypadki, w których pomimo zadowalającego określenia potencjału polaryzacji tradycyjnymi metodami pomiarowymi i stwierdzenia, że osiągnięto potencjały ochrony, trudno jest ocenić skuteczność zabezpieczenia odsłoniętej powierzchni stalowej podziemnego rurociągu. Takie sytuacje występują w przypadku odcinków zagrożonych korozją powodowaną przez prąd przemienny (a.c. corrosion), gdyż ochrona katodowa generalnie nie zabezpiecza przed korozją tego rodzaju. Również w obszarach znakoprzemiennych oddziaływań prądów błądzących, gdy osiągnięto potencjały ochrony, ale z odsłoniętej powierzchni okresowo wypływają prądy do ziemi, nie ma pewności w sprawie skuteczności zabezpieczenia.

Z kolei w przypadku defektów izolacji występujących w gruntach wysokooporowych trudno jest osiągnąć potencjały ochrony i bardzo często w takich defektach formalne potencjałowe kryteria skuteczności ochrony katodowej nie są spełnione, jednakże z uwagi na zwykle znikomą agresywność korozyjną takich gruntów sytuacja taka nie jest równoznaczna z zagrożeniem korozyjnym rurociągu.

Na rurociągach stalowych występują liczne miejsca, w których trudno jest określić skuteczność zabezpieczenia przeciwkorozyjnego bądź wielkość zagrożenia korozyjnego. Takimi miejscami są:

- odcinki rurociągów zabezpieczonych ochroną katodową, ułożone w stalowych rurach otaczających, z którymi są metalicznie zwarte; do takich odcinków prąd ochrony katodowej nie dopływa; jeśli rura wypełniona jest elektrolitem, w powłoce izolacyjnej odcinka rurociągu występują defekty powłoki izolacyjnej stykające się

z tym elektrolitem, a w elektrolicie występuje tzw. depolaryzator, to może zachodzić korozja rurociągu w tych defektach; jednakże nierzadko zdarza się, że podane warunki konieczne do przebiegu korozji nie występują i pomimo zwarcia pomiędzy rurami nieakceptowalna korozja rury przewodowej nie występuje [5];

- odcinki rurociągów zabezpieczonych ochroną katodową, poddane oddziaływaniom prądu przemiennego; jeśli gęstość prądu przemiennego przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią poprzez defekty powłoki izolacyjnej osiągnie zbyt dużą wartość, wówczas może dojść do korozyjnego uszkodzenia ścianki rurociągu pomimo działania ochrony katodowej; jednakże występują przypadki, w których pomimo dużej gęstości prądu przemiennego korozja o nieakceptowalnej szybkości nie zachodzi;
- odcinki rurociągów zabezpieczone ochroną katodową, na których wskutek znako-przemiennych oddziaływań prądów błędzących dochodzi do okresowego wypływu prądu z rurociągu do ziemi poprzez defekty powłoki izolacyjnej; wg PN-EN 50162 [6], jeśli prąd wypływa do ziemi przez okres powyżej 3,6 sekundy (0,1% najniekorzystniejszej godziny), to występuje wówczas duże zagrożenie korozyjne; tymczasem w praktyce stwierdza się brak korozji przy znacznie dłuższych czasach wypływu prądu;
- odcinki rurociągów zabezpieczonych ochroną katodową, ułożone w gruntach wysokooporowych, z defektami powłoki izolacyjnej;
- podziemne uzbrojenie obiektów, tzw. konstrukcji złożonych, niezabezpieczone ochroną katodową, z defektami powłok izolacyjnych, szczególnie poddane działaniom makroogniw korozyjnych „stal w ziemi – stal w betonie” (w gazownictwie dotyczy to stacji gazowych i tłoczni bez ochrony katodowej).

Korozymetria rezystancyjna może dostarczyć cennych informacji o zagrożeniu korozyjnym lub skuteczności zabezpieczenia przeciwkorozyjnego w ww. miejscach. Ponadto stosowanie korozymetrii rezystancyjnej jest wskazane na sieciach rurociągów niezabezpieczonych ochroną katodową w celu oszacowania i monitorowania zagrożenia korozyjnego, np. na gazowych sieciach rozdzielczych w miastach.

Podstawowe zasady stosowania korozymetrii rezystancyjnej

Szybkość korozji i wielkość ubytku korozyjnego elektrody korozymetrycznej ustala się przy założeniu, że elektroda ta koroduje w sposób równomierny. W rzeczywistości korozja może przebiegać w sposób nierównomierny, np. może prowadzić do powstania wżerów w elektrodzie. W zależności od powierzchni elektrody, grubości i kształtu, powstanie wżeru spowoduje jakiś wzrost rezystancji elektrody, jednakże obliczony wówczas ubytek liniowy wg przedstawionego założenia będzie mniejszy, niż rzeczywisty.

Korozymetria rezystancyjna może być stosowana do monitorowania korozji (i skuteczności ochrony przed taką korozją) powodującej wyraźne ubytki korozyjne. Techniki tej nie stosuje się do monitorowania korozji niepowodującej takich ubytków, np. naprężeniowej i międzykrystalicznej.

Z punktu widzenia czułości i dokładności metody korzystne jest, gdy elektrody korozymetryczne są cienkie (wówczas nawet niewielkie ubytki powodują zauważalny względny wzrost rezystancji elektrody). Jednakże ze względów praktycznych, w sytuacjach, gdy korozja jest spodziewana, grubość elektrody powinna być odpowiednia, aby jej „żywność” nie była zbyt

krótka. Do zastosowań „w ziemi”, w tym do monitorowania skuteczności ochrony katodowej rurociągów w wybranych miejscach, grubości elektrod winny wynosić $0,5 \div 1$ mm.

Innym istotnym parametrem, który należy każdorazowo rozważać, jest powierzchnia i kształt elektrody. Generalnie powierzchnie elektrod i miejsca ich montażu powinny być reprezentatywne i adekwatne do celów planowanych pomiarów korozymetrycznych. Jeśli np. celem jest monitorowanie zagrożenia korozją a.c., korozją galwaniczną lub korozją powodowaną przez prądy błędzące d.c., to powierzchnie elektrod rezystometrycznych powinny być małe.

Miejsca montażu powinny być wybrane na podstawie analizy wyników wcześniejszych pomiarów skuteczności ochrony lub zagrożenia korozyjnego, wykonanych innymi metodami. Jeśli np. z analizy wyników pomiarów oddziaływań prądów błędzących na rurociąg zabezpieczony ochroną katodową wynika, że na pewnym odcinku z defektów powłoki może wypływać okresowo prąd do ziemi, to celowe jest zamontowanie elektrody korozymetrycznej. (Takie ustalenia można wyprowadzić np. na podstawie analizy zmian potencjałów załączeniowych i/lub pomiarów prądów płynących pomiędzy rurociągiem a zwykłą elektrodą symulującą.) Powierzchnia rezystancyjnej elektrody korozymetrycznej zamontowanej w celu ustalenia, czy w tym rejonie występuje rzeczywiste korozyjne zagrożenie rurociągu przez prądy błędzące, powinna wynosić ok. 1 cm^2 . Elektroda powinna być zamontowana w miejscu, w którym czasy wypływu prądu są najdłuższe, a rezystywność gruntu najmniejsza.

Podobnie w przypadku stwierdzenia potencjalnego zagrożenia korozją a.c., powierzchnie montowanych elektrod rezystometrycznych powinny być małe, ok. 1 cm^2 . Elektrody powinny być montowane w miejscach, w których gęstości prądów przemiennych przepływających pomiędzy rurociągiem a ziemią są największe. Gęstość tego prądu zależy m.in. od wielkości napięcia a.c. pomiędzy rurociągiem a ziemią odniesienia oraz od rezystywności gruntu otaczającego rurociąg. Wydaje się jednak, iż sama gęstość prądu a.c. nie powinna być jedynym wyznacznikiem miejsca montażu elektrody, jako że stwierdza się przypadki braku korozji przy gęstościach dużych, powyżej 100 A/m^2 , jeśli napięcia a.c. są małe.

W przypadku monitorowania zagrożenia korozyjnego starych rurociągów pokrytych zdegradowanymi powłokami, ułożonych w gruntach wysokooporowych, w których trudno jest spełnić kryteria ochrony katodowej, powierzchnie elektrod korozymetrycznych powinny być duże, nie powinny być mniejsze niż 100 cm^2 . Zbudowanie elektrody korozymetrycznej symulującej taki duży defekt w powłoce izolacyjnej jest trudne, jednakże możliwe jest zastosowanie układu odwzorowującego w zasadzie dowolnie duży defekt, w postaci elektrody korozymetrycznej o małej powierzchni ($1-2 \text{ cm}^2$) centrycznie umieszczonej w większej elektrodzie symulującej o wymaganej powierzchni (rys. 1).

Praktyka dowodzi, iż miarodajne i cenne wyniki uzyskuje się po wieloletnich ekspozycjach elektrod korozymetrycznych. W przypadku elektrod instalowanych na konstrukcjach istniejących, np. w rurach otaczających zwartych z rurami przewodowymi starych rurociągów lub na obiektach/konstrukcjach złożonych bez ochrony katodowej, taki okres ekspozycji jest wręcz niezbędny. Niewątpliwą zaletą korozymetrii rezystancyjnej jest sumowanie/całkowanie narastających ubytków korozyjnych elektrod powstających w poszczególnych przedziałach czasu. Przy prawidłowo prowadzonej ochronie katodowej szybkość korozji ścianki w defektach izolacji jest mniejsza niż $10 \mu\text{m/rok}$. Jednym z warunków skuteczności ochrony katodowej jest ciągłość jej działania. Jeśli występować będą przerwy w działaniu ochrony katodowej, spowodowane przez awarie źródeł prądu polaryzacji, dewastacje, różne ingerencje stron trzecich lub zaniedbania personelu obsługującego instalacje, to wówczas może docho-

dzić do korozji ścianki rurociągu w defektach powłoki izolacyjnej, jak również elektrody korozymetrycznej przyłączonej do rurociągu. Korozymetria rezystancyjna umożliwia ocenę wpływu takich zdarzeń na stan ścianki rurociągu w długiej perspektywie czasu.



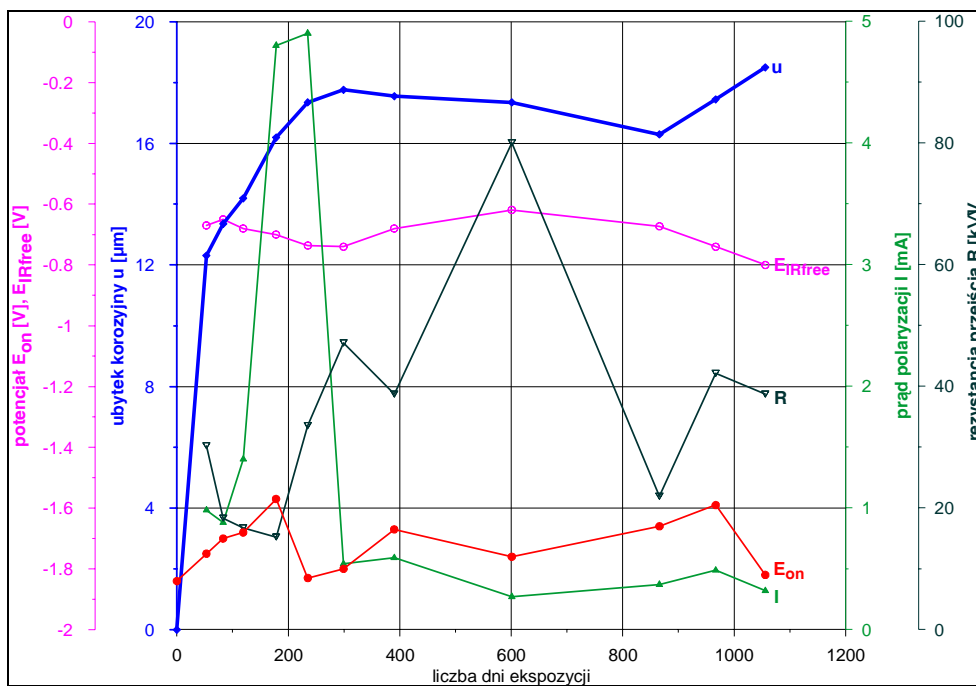
Rys. 1. Rezystancyjny czujnik korozymetryczny symulujący duży defekt powłoki izolacyjnej

Szczegółowe informacje dotyczące zasad korozymetrii rezystancyjnej, czujników korozymetrycznych i korozymetrów podano w [7].

Przykłady wyników uzyskanych za pomocą korozymetrii rezystancyjnej

W badaniach rezystometrycznych, oprócz właściwych pomiarów rezystancji elektrody aktywnej (korodującej) i stosunku rezystancji elektrody niekorodującej (odniesienia) do rezystancji elektrody aktywnej, na podstawie których wyznacza się wielkość ubytku korozyjnego u i szybkość korozji V_{kor} , zwykle wykonuje się pomiary szeregu innych wielkości, takich jak potencjał załączeniowy elektrody E_{on} , potencjał odłączeniowy E_{IRfree} , natężenie prądu d.c. I przepływającego w obwodzie elektrody (pomiędzy elektrodą a rurociągiem), natężenie prądu przemiennego $I_{a.c.}$ przepływającego pomiędzy elektrodą a ziemią, napięcie przemiennego $U_{a.c.}$ pomiędzy rurociągiem a ziemią odniesienia, rezystancja przejścia R elektrody korozymetrycznej. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe zmiany tych wielkości w czasie. Na rysunkach 3 ÷ 8 przedstawiono wyniki pomiarów na wybranych elektrodach korozymetrycznych

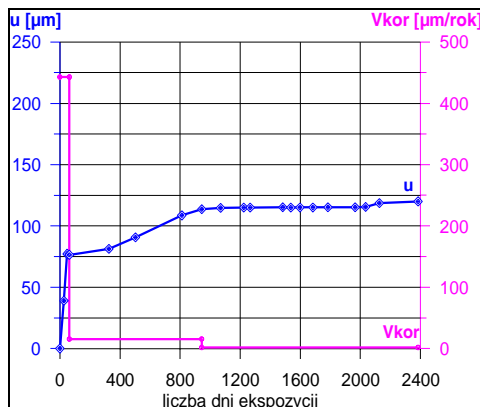
zamontowanych w celu monitorowania różnych zagrożeń korozyjnych. W tabelicy 1 zestawiono syntetyczne wyniki pomiarów.



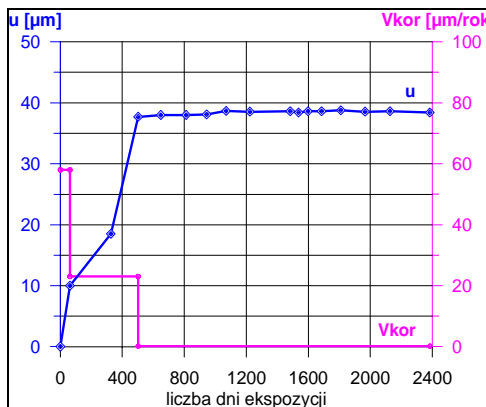
Rys. 2. Przykładowe wyniki pomiarów korozymetrycznych oraz wykonywanych równolegle pomiarów innych wielkości w okresie trzyletniej ekspozycji czujnika korozymetrycznego.

Monitorowanie zagrożenia korozją rurociągu w zwartych i połączonych niskoomowo z rurociągiem rurach otaczających

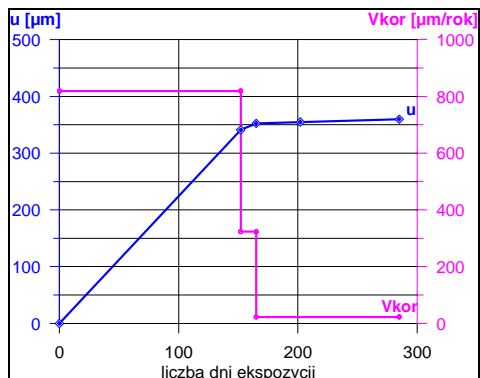
Na rys. 3a) ÷ 3d) przedstawiono wyniki pomiarów wykonanych na elektrodach rezystometrycznych, umieszczonych w rurach otaczających na starych rurociągach, które to rury są stale (rys. 3a), c) i d)) lub bywają okresowo (rys. 3b)) zwarte z rurami przewodowymi.



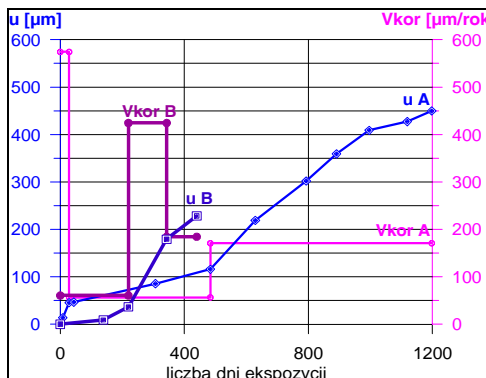
Rys. 3a) rura RO1 ZASZ



Rys. 3b) rura RO2 ZASA



Rys. 3c) rura RO3 CZAR



Rys. 3d) rura RO4 SZTW

Rys. 3a) ÷ 3d). Wyniki pomiarów wykonywanych na elektrodach rezystometrycznych umieszczonych w rurach otaczających rurociągów. Szczegóły w tekście

Do odcinków rurociągów umieszczonych w takich rurach otaczających prąd polaryzacji katodowej rurociągu nie ma możliwości dopłynięcia, w związku z tym nie jest możliwa ochrona katodowa tych odcinków.

Po przyłączeniu do rurociągu elektrody korozymetrycznej, w sytuacji gdy rura jest zwarta z rurą przewodową i wypełniona elektrolitem, wystąpi intensywna korozja galwaniczna elektrody w wyniku działania korozyjnego ogniwa galwanicznego pomiędzy tą elektrodą a skorodowaną powierzchnią wewnętrzną rury otaczającej. Działanie tego ogniwa i korozja

elektrody korozymetrycznej są potęgowane w wyniku ogromnej dysproporcji powierzchni elektrod tego ogniwa – mała powierzchnia korodującej anody, ogromna katody. Intensywną korozję stwierdzono w każdym spośród czterech zaprezentowanych przypadków; szybkość ponad 800 $\mu\text{m}/\text{rok}$ odnotowano w przypadku elektrody wg rys. 3c). Dlatego konieczne było odłączenie elektrod korozymetrycznych od rurociągu. Po odłączeniu „wyrównywanie się” potencjałów elektrod rezystometrycznych oraz skorodowanych powierzchni rury otaczającej i rurociągu trwa ok. 2÷2,5 roku. Po tym okresie przyłączanie i odłączanie elektrod od rurociągu nie wpływało na szybkość ich korozji.

W przypadku elektrod wg rys. 3a), 3b) i 3c), po początkowym okresie intensywnej korozji galwanicznej (przed odłączeniem elektrody) i ogólnej (po odłączeniu elektrody) szybkość korozji ustabilizowała się na poziomie kilku $\mu\text{m}/\text{rok}$ (praktycznie ustała). Zapewne jest to spowodowane pokryciem się powierzchni elektrod produktami wtórnych reakcji korozyjnych oraz zmniejszeniem zawartości depolaryzatora (tlenu) w środowisku wypełniającym rury. Natomiast w przypadku zobrazowanym na rys. 3d) korozja postępowała cały czas. Początkowo elektroda korodowała z szybkością ponad 500 (do momentu odłączenia od rury przewodowej), potem kilkudziesięciu, a następnie ok. 200 $\mu\text{m}/\text{rok}$. Ubytek korozyjny stale narastał. Już po trzech latach ekspozycji czujnik przestał działać z powodu korozji sięgającej ok. 450 μm (ok. 90% początkowej grubości czujnika). Po upływie 6 lat ekspozycji czujnik wyjęty z rury otaczającej; jego elektroda czynna, której powierzchnia pierwotnie wynosiła 5 cm^2 , a grubość 0,5 mm, była całkowicie wykorzystana (rys. 3e)). Nowy zamontowany czujnik w tej rurze otaczającej koroduje równie intensywnie. Niezbędne jest podjęcie poważnych i kosztownych działań w celu zabezpieczenia odcinka rurociągu ułożonego w tej rurze; prawdopodobnie przeprowadzona zostanie wymiana tego odcinka.

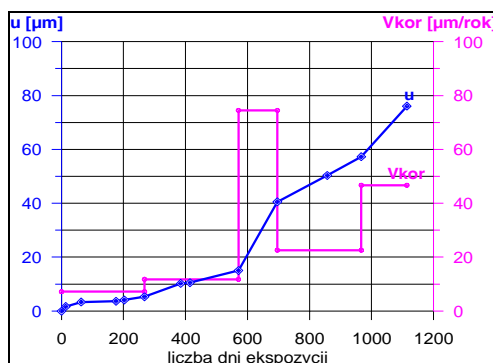


Rys. 3e). Czujnik korozymetryczny o powierzchni 5 cm^2 i grubości 0,5 mm:
- na górze - nowy, przed montażem, - na dole - wyjęty po sześciu latach ekspozycji z rury otaczającej zwartej z rurą przewodową

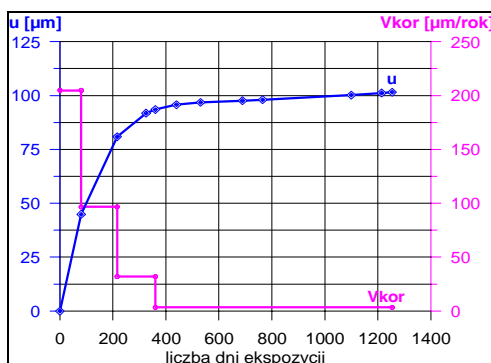
Monitorowanie zagrożenia korozją układów rurowych małych obiektów złożonych, niechronionych katodowo

Na rysunkach 4a) ÷ 4c) przedstawiono wyniki uzyskane za pomocą korozymetrii rezystancyjnej na typowych, gazowych stacjach redukcyjnych. Podziemne uzbrojenie tych stacji to niewielkie tzw. obiekty złożone bez ochrony katodowej; występują na nich z reguły podziemne, pokryte nieuszczelnionymi powłokami izolacyjnymi rurociągi o łącznej długości kilku dziesięciu metrów, które są połączone z zabetonowaną stałą, z uziomem odgromowym wykonanym ze stalowego płaskownika ocynkowanego oraz z przewodem neutralnym/ochronnym sieci elektroenergetycznej n.n. Uzbrojenie technologiczne jest oddzielone elektrycznie od zewnętrznych rurociągów za pomocą złączy izolujących, zatem nie jest ono poddane istotnym oddziaływaniom prądów przemiennych i błędzących d.c.

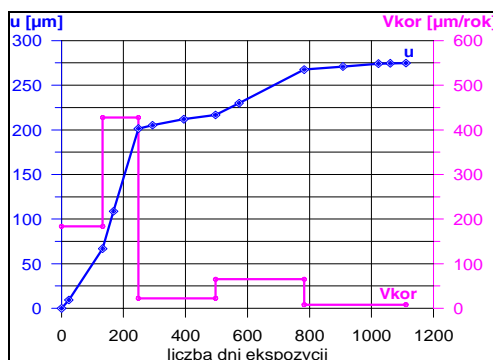
W każdym prezentowanym przypadku rezystywność gruntu wynosiła kilkadziesiąt omometrów, a powierzchnie zamontowanych czujników korozymetrycznych – 5 cm². Czujniki zamontowano w miejscach o największym nasyceniu zabetonowaną stałą.



Rys. 4a) SRP1 LUBL



Rys. 4b) SRP2 RUBN



Rys. 4c) SRP3 RACZ

Rys. 4a) ÷ 4c). Wyniki pomiarów wykonywanych na elektrodach rezystometrycznych, zamontowanych na gazowych stacjach redukcyjnych, niezabezpieczonych ochroną katodową. Szczegóły w tekście

Czujnik wg rys. 4b) jest przyłączony do układu technologicznego przez cały czas ekspozycji, od momentu montażu. Z uwagi na początkową różnicę potencjałów korozyjnych, w okresie pierwszych trzech miesięcy wystąpiła korozja galwaniczna czujnika osiągająca

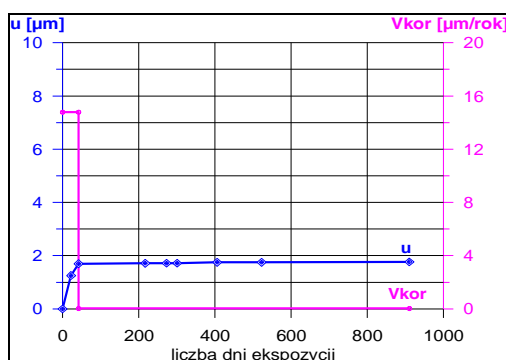
szybkość ponad 200 $\mu\text{m}/\text{rok}$. Po upływie roku potencjały korozyjne czujnika i układu technologicznego mniej więcej wyrównały się, a szybkość korozji zmniejszyła się do kilku $\mu\text{m}/\text{rok}$. Łączny ubytek korozyjny w ciągu dotychczasowej, prawie czteroletniej ekspozycji czujnika wyniósł ok. 100 μm .

Czujnik wg rys. 4a) również jest przyłączony do układu technologicznego przez cały czas ekspozycji, od momentu montażu. W przypadku tego czujnika nie stwierdza się ustabilizowania szybkości korozji na poziomie kilku $\mu\text{m}/\text{rok}$; czujnik cały czas koroduje z szybkością od kilku do ponad 70 $\mu\text{m}/\text{rok}$, a ubytek korozyjny cały czas narasta i po dotychczasowej, trzyletniej ekspozycji, wynosi ok 80 μm .

W przypadku czujnika wg rys. 4c) początkowo występowała bardzo silna korozja galwaniczna, osiągająca szybkość prawie 450 $\mu\text{m}/\text{rok}$, dlatego konieczne było odłączenie tego czujnika od układu technologicznego. „Wyrównywanie się” potencjałów korozyjnych czujnika i układu technologicznego trwało prawie dwa lata, po tym czasie czujnik ponownie przyłączono. Obecnie koroduje on z szybkością poniżej 10 $\mu\text{m}/\text{rok}$, a łączny ubytek korozyjny wynosi po trzech latach ekspozycji ok. 280 μm .

Monitorowanie skuteczności ochrony katodowej dużej konstrukcji złożonej

Na rys. 5 przedstawiono wyniki pomiarów korozymetrycznych wykonanych przy użyciu czujnika korozymetrycznego o powierzchni 5 cm^2 i grubości 0,5 mm, zamontowanego na terenie dużego węzła gazowego, który jest tzw. konstrukcją złożoną. Podziemne uzbrojenie technologiczne tego węzła (wraz z przyłączonym doń systemem uziemień oraz zabetonowanymi elementami konstrukcji wsporczych i fundamentów, a także uziomami i obcymi, metalowymi konstrukcjami przyłączonymi do przewodu ochronnego sieci elektroenergetycznej) poddane jest polaryzacji katodowej. Czujnik zamontowany jest w miejscu, w którym występuje dużo zabetonowanej stali. Średnia szybkość korozji czujnika w okresie 2,5 roku ekspozycji wynosi poniżej 1 $\mu\text{m}/\text{rok}$. W pełni spełnione jest kinetyczne kryterium skuteczności ochrony katodowej.



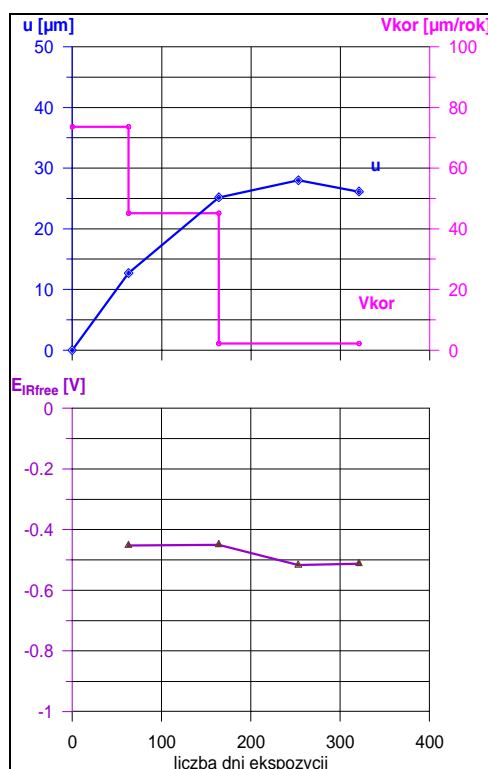
Rys. 5. Wyniki pomiarów wykonywanych na czujniku rezystometrycznym zamontowanym na terenie węzła gazowego zabezpieczonego ochroną katodową. Szczegóły w tekście

O ile praktycznie brak korozji czujnika przyłączonego do konstrukcji poddanej polaryzacji katodowej (wg rys. 5) nie zaskakuje, o tyle ustabilizowanie się szybkości korozji na poziomie kilku $\mu\text{m}/\text{rok}$ w przypadku czujników wg 4b) i 4c), które nie są objęte ochroną katodową, jest zaskakujące.

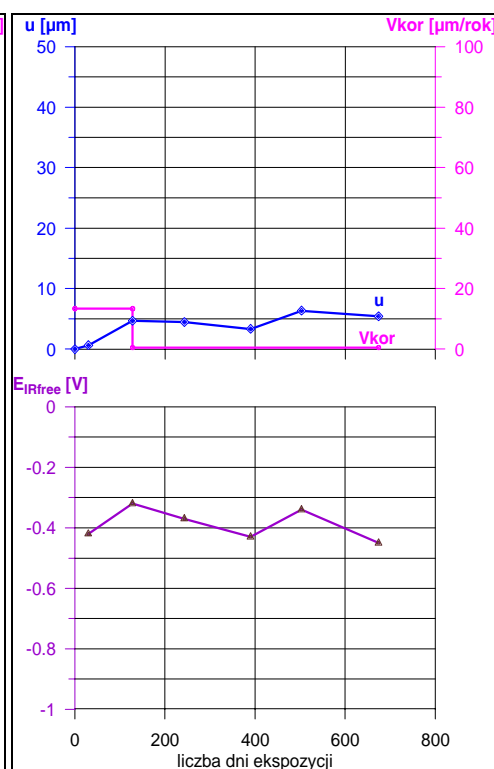
Monitorowanie szybkości korozji odcinków rurociągów z ochroną katodową, ułożonych w gruntach wysokooporowych

We wszystkich prezentowanych przykładach (rys. 6a) ÷ 6d)) zamontowane czujniki korozymetryczne odwzorowywały defekty izolacji o powierzchniach 100 cm² oraz były one bez zwłoki po montażu przyłączane do chronionych katodowo rurociągów. Rurociągi pokryte są zdegradowanymi powłokami bitumicznymi o złej jakości. W przypadku czujników wg 6a) oraz 6b) kryterium ochrony katodowej dla konstrukcji stalowych w gruntach wysokooporowych ($E_{IRfree} \leq -0,65$ V) stale nie jest spełnione, natomiast w przypadku czujnika wg 6c) bywało niespełnione, a w przypadku 6d) praktycznie było stale spełnione.

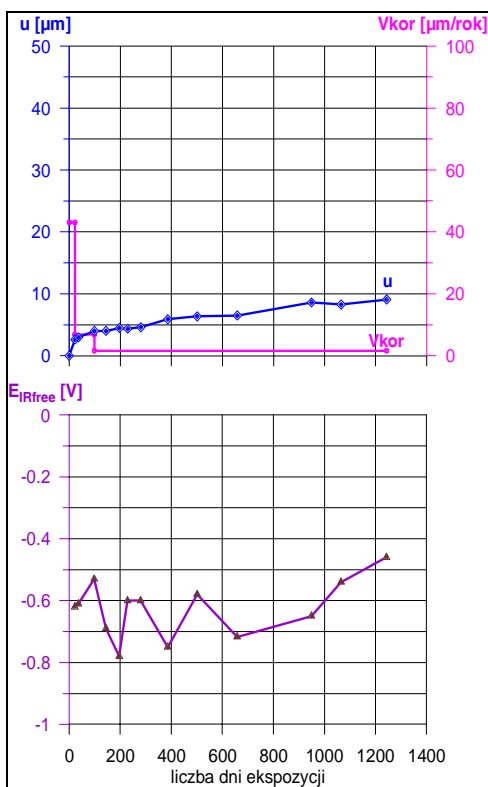
Intrygujące jest, iż w przypadku tego czujnika (a także innych, nie omawianych w tej pracy), mimo iż potencjałowe kryterium ochrony po montażu było spełnione, przez okres ponad sześciu miesięcy stwierdzano szybkość korozji większą niż kinetyczne kryterium ochrony katodowej, w tym powyżej 80 μm/rok. Również w przypadku czujnika wg 6a), dla którego potencjałowe kryterium ochrony, jak dotąd, nigdy nie zostało osiągnięte, przez okres pierwszych sześciu miesięcy odnotowywano zauważalną korozję, której szybkość była większa niż kinetyczne kryterium ochrony katodowej (w tym ponad 70 μm/rok). Jednakże w każdym spośród przedstawionych przykładów, po okresie ok. 200 dni ekspozycji szybkość korozji ustabilizowała się na poziomie kilku μm/rok. Zatem zagrożenie korozyjne rurociągów w przedstawionych przykładach nie występuje.



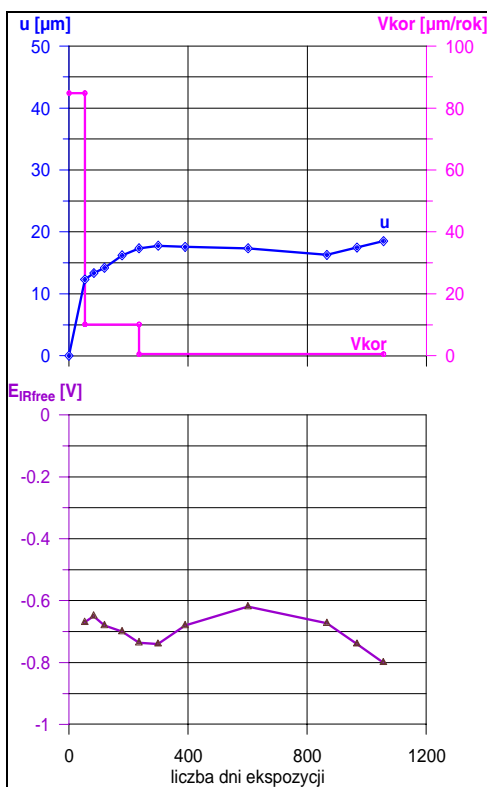
Rys. 6a) miejsce GWO SOP



Rys. 6b) miejsce GWO CZERN



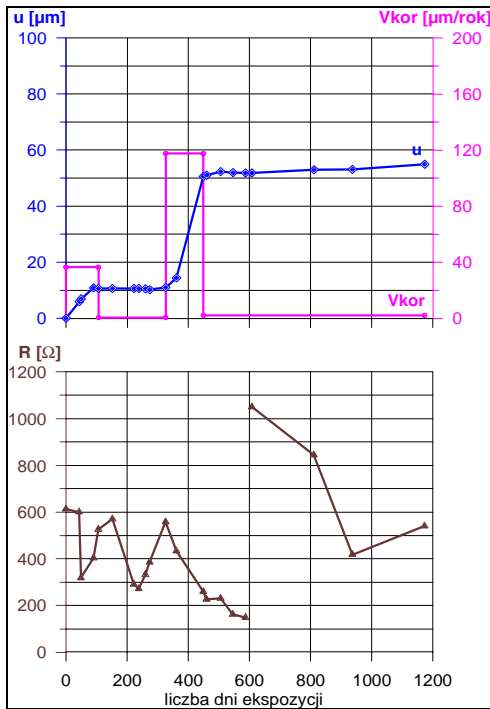
Rys. 6c) miejsce GWO BRZEZ



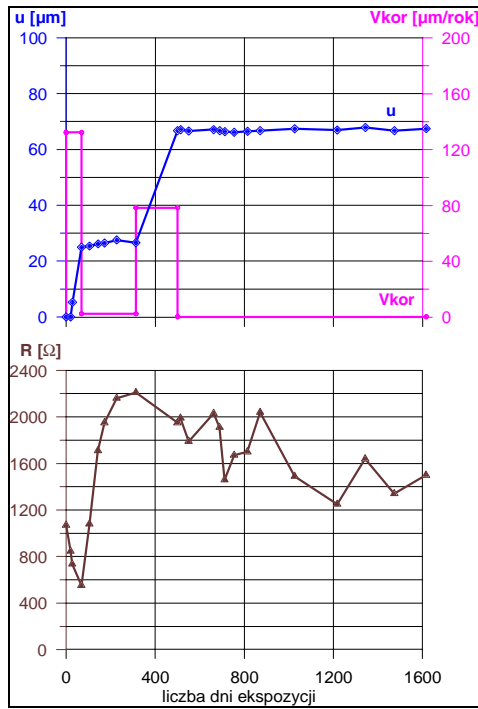
Rys. 6d) miejsce GWO WEJH

Rys. 6a) ÷ 6d). Wyniki pomiarów wykonywanych na elektrodach rezystometrycznych zamontowanych w miejscach występowania gruntów wysokooporowych. Szczegóły w tekście

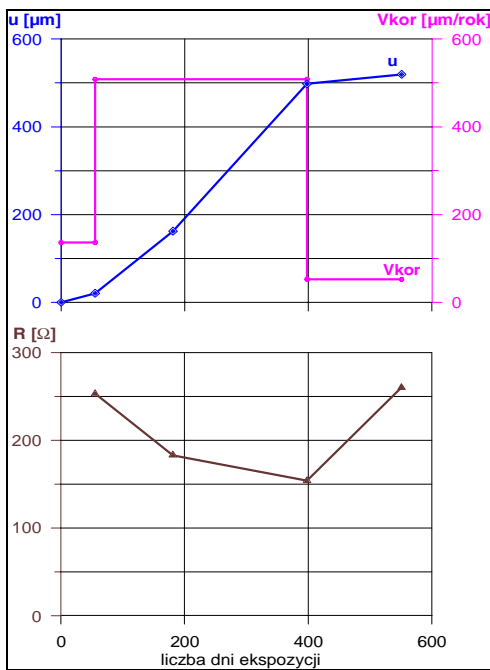
Monitorowanie zagrożenia korozją powodowaną przez prąd przemienny



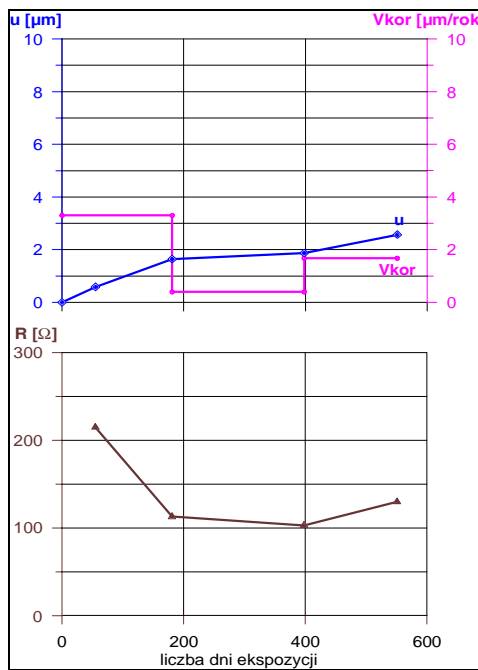
Rys. 7a) miejsce GAC KLÓD



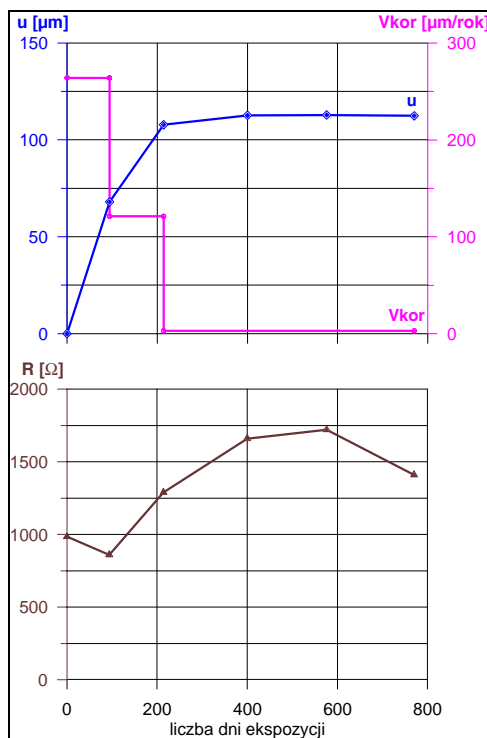
Rys. 7b) miejsce GAC SULM



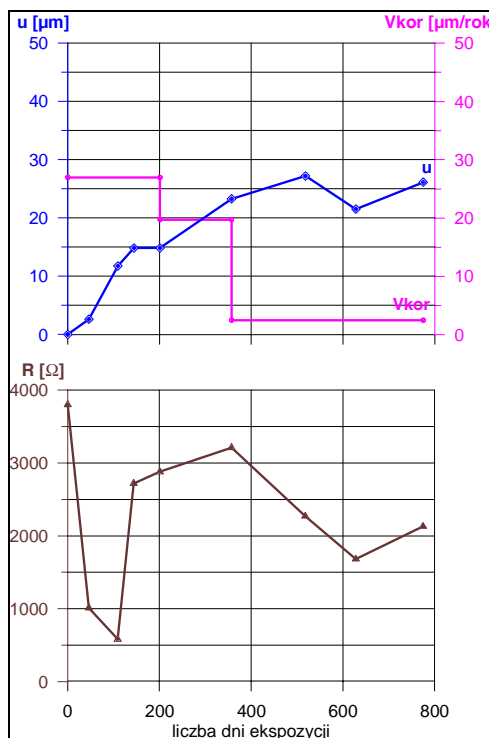
Rys. 7c) miejsce GAC JAND



Rys. 7d) miejsce GAC JANO



Rys. 7e) miejsce GAC CHROS



Rys. 7f) miejsce GAC LUBL

Rys. 7a) ÷ 7f). Wyniki pomiarów wykonywanych na elektrodach rezystometrycznych zamontowanych w rejonach oddziaływania prądu przemiennego w celu monitorowania zagrożenia korozją a.c. Szczegóły w tekście

We wszystkich prezentowanych przykładach (rys. 7a) ÷ 7f)) powierzchnie zamontowanych elektrod korozymetrycznych wynoszą 1 cm^2 , a elektrody były od razu po montażu przyłączane do chronionych katodowo rurociągów. Rurociągi zabezpieczone są przed korozją a.c. poprzez pośrednie doziemianie, które zmniejsza napięcie $U_{a.c.}$ pomiędzy rurociągiem a ziemią. Ponadto w niektórych przypadkach, w celu zmniejszenia szybkości korozji a.c., celowo osłabiono polaryzację katodową.

W przypadku czujników wg 7a) i 7b), których okresy ekspozycji wynoszą odpowiednio ponad trzy i ponad cztery lata, szybkości korozji ustabilizowały się na poziomie kilku $\mu\text{m/rok}$. W miejscu 7a) gęstość prądu przemiennego dochodziła do 160 A/m^2 . W miejscu 7b) gęstości a.c. są mniejsze (ok. 37 bezpośrednio po montażu, do 65 A/m^2 w toku ekspozycji), jednakże w przeszłości, przed zamontowaniem pośrednio doziemniających urządzeń zabezpieczających, na rurze przewodowej stwierdzano wyraźne, aczkolwiek niegłębokie wżery w ścianie. Szczególnie w przypadku czujnika wg 7b), a także 7e) i 7f) widoczny jest związek pomiędzy szybkością korozji a rezystancją przejścia czujnika (szybkość korozji zmniejsza się, gdy rośnie rezystancja przejścia wskutek pokrywania się powierzchni czujnika izolacyjnymi osadami katodowymi). W okresie stabilnej, małej szybkości korozji rezystancja przejścia jest większa, niż po montażu.

W przypadku 7d), mimo iż gęstość prądu przemiennego osiąga 200 A/m^2 , szybkość korozji czujnika wynosi zaledwie kilka $\mu\text{m/rok}$, co jest zaskakujące. Z kolei w przypadku czujnika 7c) zamontowanego na tym samym rurociągu w innym miejscu, gęstość prądu a.c. przekraczała nawet 300 A/m^2 , a szybkość korozji osiągała ponad $500 \mu\text{m/rok}$. Zastosowanie bezpośrednich uzemień rurociągu i zmniejszenie polaryzacji katodowej sprowadziły tę szybkość do poziomu ok. $50 \mu\text{m/rok}$. Nadal jest to zbyt duża szybkość korozji.

W przypadku czujnika 7e), w celu zmniejszenia szybkości korozji z poziomu ponad $100 \mu\text{m/rok}$, rozbudowano urządzenia zabezpieczające pośrednio doziemiaczące oraz nieznacznie zmniejszono polaryzację katodową rurociągu. Szybkość korozji czujnika sprowadzono do poziomu praktycznie zerowego.

Monitorowanie zagrożenia korozją powodowaną przez prądy błądzące d.c.

Czujnik korozymetryczny wg rys. 8 o powierzchni 1 cm^2 i grubości 1 mm został zamontowany na rurociągu pokrytym powłoką izolacyjną o wysokim stopniu szczelności w miejscu, gdzie praktycznie stale występuje strefa anodowych oddziaływań prądów błądzących. Skutkiem tych oddziaływań (a raczej w wyniku oddziaływań katodowego stożka potencjałowego pobliskiego torowiska) potencjał załączeniowy rurociągu stale jest mało ujemny, często mniej ujemny niż -1 V . W rezultacie z czujnika korozymetrycznego często wypływa prąd do ziemi. Stwierdzano np., iż w ciągu doby prąd wypływał łącznie przez ponad 3,5 godz. (15% czasu), osiągając okresowo natężenie 100 mA/m^2 . Zatem wg [5] w miejscu tym występuje duże zagrożenie korozją. Tymczasem w całym okresie dwuletniej ekspozycji ubytek korozyjny czujnika wynosi 0 mm , a szybkość korozji oczywiście $0 \mu\text{m/rok}$.



Rys. 8. Czujnik korozymetryczny o powierzchni 1 cm^2 stosowany m.in. w monitorowaniu zagrożenia korozją przemiennoprądową oraz korozją powodowaną przez prądy błądzące

Podsumowanie

1. Korozymetria rezystancyjna jest pożyteczną techniką pomiarową nie tylko wspomagającą tradycyjne metody badań zagrożeń korozyjnych i skuteczności ochrony przeciwkorozyjnej. W wielu zastosowaniach jest podstawową techniką pomiarową dostarczającą cennych informacji.
2. Zaprezentowane wyniki pomiarów zagrożenia korozyjnego odcinków rurociągów umieszczonych w stalowych rurach otaczających, z którymi są zwarte, wskazują, iż pomimo tego zwarcia i braku możliwości dopłynięcia prądu ochrony katodowej do tych odcinków – często nieakceptowalna korozja rury przewodowej nie zachodzi. Jednakże zdarzają się przypadki, gdy szybkość korozji rury przewodowej jest nieakceptowalnie duża.
3. We wszystkich badanych dotąd przypadkach zagrożenia korozyjnego odcinków rurociągów umieszczonych w gruntach wysokooporowych, w których potencjałowe kryteria ochrony katodowej nie są spełnione, szybkość korozji okazała się minimalna, akceptowalna.
4. W badanym przypadku zagrożenia korozyjnego rurociągu powodowanego przez prądy błędzące, czasy wypływania prądu do ziemi były na tyle długie, że wg PN-EN 50162 : 2006 zagrożenie korozyjne należałoby określić jako bardzo duże. Jednakże korozja zamontowanego czujnika praktycznie nie występuje.
5. Za pomocą korozymetrii rezystancyjnej można także lokalnie określać rzeczywiste zagrożenie korozją a.c. i skuteczność działania zabezpieczeń przed korozją tego rodzaju. Uzyskane wyniki pomiarów wskazują, iż występują przypadki, gdy pomimo dużej gęstości prądu a.c. przepływającego pomiędzy rurociągiem a ziemią, przekraczającej 100 A/m^2 , wskazującej na bardzo duże zagrożenie korozyjne – nieakceptowana korozja nie zachodzi.
6. W dwóch przypadkach spośród trzech badanych niewielkich konstrukcji złożonych bez ochrony katodowej – podziemnego uzbrojenia typowych stacji redukcyjnych gazów – czujniki korozymetryczne w perspektywie kilkuletniej nie odnotowały nieakceptowanej korozji, mimo że były one zamontowane w miejscach o największym potencjalnym zagrożeniu korozją galwaniczną w wyniku działania makroogniw korozyjnych typu „stal w betonie”.
7. Przyłączając rezystancyjne elektrody korozymetryczne do istniejących, starych, skorodowanych konstrukcji, należy brać pod uwagę intensywną korozję galwaniczną elektrody.

Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 lipca 2001 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe (Dz. U. nr 97, poz. 1055).
- [2] PN-EN 12954:2004 Ochrona katodowa konstrukcji metalowych w gruntach lub w wodach. Zasady ogólne i zastosowania dotyczące rurociągów.
- [3] ST-IGG-0601:2008 Ochrona przed korozją stalowych gazociągów lądowych – Wymagania funkcjonalne i zalecenia.
- [4] M. Fiedorowicz, M. Jagiełło, „Ochrona przed Korozją”, 47, 8 (2004), 195.
- [5] PN-EN 50162 : 2006 Ochrona przed korozją powodowaną przez prądy błędzące z układów prądu stałego.
- [6] M. Fiedorowicz, „Gaz, Woda i Technika Sanitarna” 4 (2010), 2.
- [7] J. Jankowski, Materiały III Dorocznej Konferencji Naukowo-Technicznej Współczesne Technologie Przeciwkorozyjne, Jurata 2009.