

Wykorzystanie czujników korozymetrycznych w ocenie skuteczności ochrony katodowej

The use of corosimetric sensors in the assessment of the effectiveness of cathodic protection

Tomasz Minor

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Prawidłowa ocena skuteczności ochrony katodowej konstrukcji ułożonych w gruntach jest trudna, a jej skomplikowanie uzależnione jest od badanego obiektu. Jednymi z najbardziej trudnych do oceny obiektów są obiekty złożone, do których można zaliczyć między innymi: magazyny gazu wraz z orurowaniem, tłocznie gazu, stacje rozdziału gazu, zespoły przyłączeniowe tłoczni, kopalnie gazu itp. Chroniona infrastruktura podziemna obiektów złożonych często połączona jest z dużą ilością taśm uziemiających (kilka kilometrów), dużą ilością żelbetu oraz inną infrastrukturą podziemną, czego efektem są pojawiające się w ziemi prądy wyrównawcze, ogniwa korozyjne. W takich przypadkach dla poprawnej oceny skuteczności ochrony katodowej należy zastosować kilka technik pomiarowych, wykorzystując dodatkowo urządzenia pomiarowe. W artykule opisano metody wykonywania pomiarów skuteczności ochrony katodowej oraz korozymetrii rezystancyjnej, jako uzupełnienie podstawowej diagnostyki. Na podstawie badań terenowych wykonywanych w okresie około 5 lat przedstawiono przypadki, w których wyniki uzyskane za pomocą czujników korozymetrycznych uzupełniły podstawową diagnostykę, potwierdzając zasadność ich stosowania w ocenie skuteczności działania systemu ochrony katodowej.

Słowa kluczowe: korozymetria rezystancyjna, czujniki korozymetryczne, ochrona katodowa.

ABSTRACT: Correct assessment of the effectiveness of cathodic protection of structures laid in soil is difficult, and its complexity depends on the tested object. Complex facilities such as gas storage facilities with well piping, gas compressor stations, gas distribution stations, compressor station connection units, gas mines, etc. are among the most difficult to assess. The protected underground infrastructure of complex facilities is often connected to a large number of earthing tapes (several kilometers), a large amount of reinforced concrete, and other foreign infrastructure underground, which results in equalizing currents and corrosion cells appearing in the ground. In such cases, to correctly assess the cathodic protection efficiency, several measurement techniques should be used, using additional measuring devices. The article describes the methods of measuring the effectiveness of cathodic protection and the use of resistive corosimetry as a supplement to the basic diagnostics used to assess the effectiveness of cathodic protection. On the basis of field tests carried out over a period of about 5 years, cases were presented in which the results obtained with the use of corosimetric sensors supplemented the basic diagnostics, confirming the legitimacy of their use in the assessment of the effectiveness of the cathodic protection system.

Key words: resistance corosimetry, corrosion sensors, cathodic protection.

Wstęp

Konstrukcje stalowe ułożone w ziemi narażone są na korozję, powodowaną m.in. zróżnicowanym natlenieniem gruntu, jego agresywnością, korozją mikrobiologiczną oraz prądami błędzającymi.

Czynniki te mogą wywoływać różne rodzaje korozji, m.in.:

- korozję ogólną;
- korozję wżerową;
- korozję naprężeniową.

W celu zabezpieczenia rurociągów przed korozją pokrywa się je powłokami ochronnymi. O ich jakości i skuteczności świadczą m.in.: ich szczelność, odporność na uszkodzenia mechaniczne, odporność na agresywne czynniki chemiczne, przyczepność do stali.

Wykonanie szczelnej, pozbawionej defektów powłoki jest zadaniem trudnym i dość kosztownym, dlatego dopuszcza się stosowanie powłok mających swego rodzaju nieszczelności, którymi są mikropory. W celu zabezpieczenia miejsc nieszczelności powłoki lub defektów, jakie mogą na niej powstać, stosuje

Autor do korespondencji: T. Minor, e-mail: tomasz.minor@inig.pl

Artykuł nadesłano do Redakcji: 31.05.2021 r. Zatwierdzono do druku: 20.08.2021 r.

się dodatkowo ochronę elektrochemiczną. Hamowanie procesu korozyjnego w technologii ochrony elektrochemicznej osiąga się, wykorzystując zjawisko polaryzacji elektrochemicznej, którą wywołuje prąd stały przepływający pomiędzy środowiskiem elektrolitycznym a chronioną konstrukcją.

Dzięki ochronie elektrochemicznej na powierzchni metalu powstają warunki, w których nie ma bezpośredniej wymiany jonów metalu ze środowiskiem elektrolitycznym, a na powierzchni defektu przy prawidłowo działającej ochronie elektrochemicznej osadzają się produkty katodowe.

Ochronę katodową można podzielić na:

- ochronę za pomocą anod galwanicznych (protektorów);
- ochronę za pomocą zewnętrznego źródła prądu stałego;
- drenaże elektryczne (polaryzowany, wzmocniony).

W każdym z układów ochrony katodowej konstrukcja chroniona jest katodą, a rolę anody pełni protektor (anoda galwaniczna), elektroda lub grupa elektrod połączonych z dodatnim biegunem źródła prądu stałego, nazywanych często uziumem anodowym (Baeckmann et al., 1997).

Kryteria ochrony katodowej

Podstawowym kryterium ochrony katodowej metalowej konstrukcji jest wartość potencjału tej konstrukcji, mierzonego względem elektrody odniesienia $\text{Cu}_{\text{nas.}}/\text{CuSO}_4$ umieszczonej w tym samym środowisku elektrolitycznym, blisko badanej

konstrukcji. Wartość potencjału, przy którym uzyskana zostanie ochrona, jest zależna od rodzaju metalu. W wyniku przeprowadzonych badań ustalono kryteria ochrony katodowej, po których spełnieniu następuje zmniejszenie szybkości procesu korozyjnego do nieznacznych wartości. Jeśli potencjał stali na granicy faz metal–elektrolit jest równy $-0,85$ V względem elektrody odniesienia miedź/nasycony siarczan miedzi $\text{Cu}_{\text{nas.}}/\text{CuSO}_4$, to szybkość korozji osiąga poziom $10 \mu\text{m}/\text{rok}$ (zgodnie z PN-EN 12954:2019) i jest praktycznie akceptowalna (CEOCOR, 2010). Ochrona elektrochemiczna, zwana również ochroną katodową, jest skuteczna, gdy parametry ochrony są prawidłowo dobrane. Dobór parametrów zależy od chronionej konstrukcji, warunków, w jakich jest ułożona, jej stanu technicznego.

Zgodnie z normą PN-EN 12954:2019 kryteria ochrony katodowej dla wybranych konstrukcji przedstawiają się jak w tabeli 1 (PN-EN 12954:2019).

Nie jest to jedyne kryterium stosowane w ochronie katodowej. Zalecane jest również kryterium przesunięcia potencjału konstrukcji od wartości potencjału spoczynkowego w stronę ujemną, przynajmniej o $0,3$ V.

Zgodnie z normą PN-EN 12954:2019 p. 6.3.1, Annex B, dopuszcza się również spolaryzowanie konstrukcji o 100 mV w kierunku elektroujemnym względem potencjału korozyjnego (swobodnego), jednak to może nie zapewnić zahamowania procesu korozyjnego do wartości $10 \mu\text{m}/\text{rok}$. Kryterium tego należy unikać w przypadku: występowania temperatury

Tabela 1. Kryteria ochrony katodowej zgodnie z normą PN-EN 12954:2019

Table 1. Cathodic protection criteria in accordance with PN-EN 12954: 2019

Metale lub stopy	Warunki środowiska	Wolny potencjał korozyjny E_{cor} [V] wartości orientacyjne	Potencjał ochrony E_p [V] (IR Free)
Stale węglowe, stale niskostopowe i odlewy żelaza	gleby i wody we wszystkich warunkach z wyjątkiem opisanych poniżej	$-0,65$ do $-0,40$	$-0,85$
	gleby i wody w temperaturze $40^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$	–	dla temperatur $40^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$ potencjał ochrony można interpolować liniowo pomiędzy wartością potencjału określoną dla 40°C ($-0,65$ V, $-0,75$ V, $-0,85$ V lub $-0,95$ V) i wartością potencjału dla 60°C ($-0,95$ V) ryzyko korozji naprężeniowej przy wysokim pH wzrasta wraz ze wzrostem temperatury
	gleby i wody w temperaturze $T > 60^\circ\text{C}$	$-0,80$ do $-0,50$	$-0,95$
	gleby i wody w warunkach tlenowych przy $T < 40^\circ\text{C}$ $100 \Omega\text{m} < \rho < 1000 \Omega\text{m}$	$-0,50$ do $-0,30$	$-0,75$
	gleby i wody w warunkach tlenowych przy $T < 40^\circ\text{C}$, przy $\rho > 1000 \Omega\text{m}$	$-0,40$ do $-0,20$	$-0,65$
	gleby i wody w warunkach beztlenowych i z ryzykiem aktywności bakterii redukujących siarczany	$-0,80$ do $-0,65$	$-0,95$

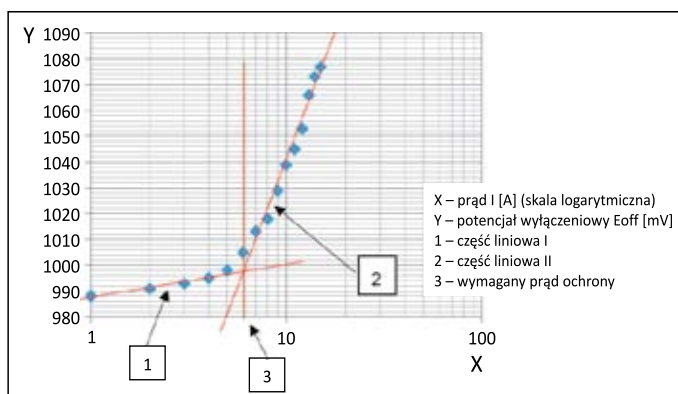
roboczej powyżej 40°C; gdy konstrukcja jest ułożona w gruntach zawierających bakterie redukujące siarczany; w przypadku występowania prądów błędzących. Ponadto kryterium tego nie należy stosować, gdy rurociągi są połączone z innymi konstrukcjami podziemnymi.

Spełnienie wymagań przedstawionych w normach może być niemożliwe, szczególnie na obiektach złożonych, na których odizolowanie konstrukcji chronionej od obcej konstrukcji jest utrudnione lub niemożliwe. W takim przypadku należy zastosować dodatkowe metody oceny skuteczności ochrony, np. kryterium depolaryzacji, tj. minimum 100 mV depolaryzacji konstrukcji w czasie do 1 godziny, mierzonej na elektrodach symulujących zgodnie z PN-EN 14505:2007 p. 4.c, (PN-EN 14505:2007). Należy pamiętać, że w przypadku dokonywania oceny skuteczności ochrony katodowej na podstawie pomiarów elektrod symulujących zakłada się, że skuteczna ochrona stali w defektach powłoki izolacyjnej dotyczy powierzchni defektów równych lub mniejszych od powierzchni elektrod symulujących.

Zastosowanie elektrod symulujących w ocenie skuteczności ochrony katodowej zostało opisane w publikacji Stochaja i Minora (2016), a różne techniki badania stanu technicznego gazociągów oraz metody pomiarowe – w opracowaniu Minora (2015).

Inaczej jest w przypadku, gdy do oceny skuteczności ochrony katodowej stosujemy metodę depolaryzacji, tj. maksymalnie 100 mV depolaryzacji konstrukcji chronionej w czasie min. 1 h od wyłączenia ochrony katodowej (PN-EN 15112:2007).

Te kryteria odnosimy do granicy faz stal–grunt lub stal–woda. Innym kryterium jest kryterium zapotrzebowania prądu. To kryterium jest głównie stosowane w miejscach, gdzie nie ma możliwości przeprowadzenia bezpośrednich pomiarów potencjału (np. głębokie orurowania odwiertów). Zapotrzebowanie na prąd danej konstrukcji można określić, wyznaczając zależność potencjału od prądu. Chronioną konstrukcję zasilamy prądem ochrony katodowej i wyznaczamy potencjał jako funkcję logarytmu prądu. W półlogarytmicznym układzie współrzędnych otrzymuje się dwie proste (rys. 1).



Rys. 1. Krzywa E(log I)

Fig. 1. Curve E(log I)

Prąd ochrony wyznaczany tą metodą jest większy niż rzeczywiste zapotrzebowanie prądu. Spowodowane jest to pokrywaniem się chronionych defektów warstwą osadów po dłuższym okresie polaryzacji, jak również ograniczonym dostępem tlenu do głęboko położonych części orurowania. Prosta 2 obrazuje zależność $E = f(\log I)$ w zakresie reakcji redukcji w obszarze wydzielania wodoru, w którym metal jest chroniony katodowo. Minimalny prąd ochrony katodowej jest równy odciętej punktu przecięcia prostych 1 i 2 (PN-EN 15112:2007).

Korozymetria rezystancyjna

W przypadku gdy wyniki pomiarów skuteczności ochrony katodowej nie spełniają założonych kryteriów, nie zawsze świadczy to o nieskutecznej ochronie.

Ocena skuteczności ochrony przed korozją może być utrudniona lub niemiernodajna z uwagi np. na brak zainstalowanych elektrod symulujących lub ich niesprawność, pokrycie się produktami katodowymi lub korozji. Bliskość obcych konstrukcji, żelbetów, bednarek również może zakłócić wyniki pomiarów wykonywanych na konstrukcjach chronionych. Niedostateczna polaryzacja konstrukcji chronionej może również występować w przypadku słabego zasięgu działania stacji ochrony katodowej. We wszystkich tych sytuacjach, gdy ocena zebranych wyników jest trudna lub rozbudowa systemu ochrony katodowej jest niemożliwa, do oceny szybkości korozji konstrukcji zainstalowanych w gruncie można użyć rezystancyjnych czujników szybkości korozji (czujników korozymetrycznych).

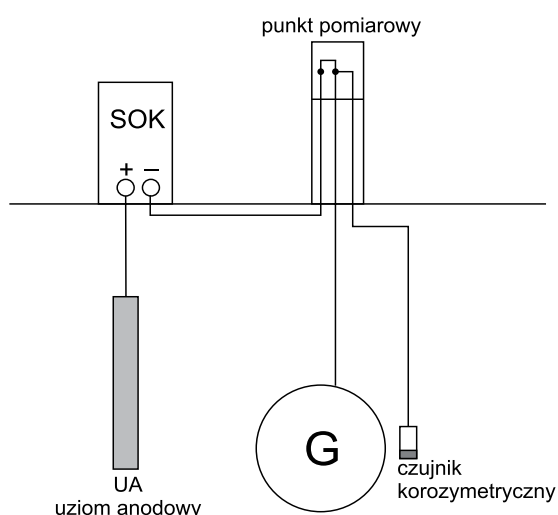
Problematyka związana z oceną skuteczności ochrony katodowej i wykorzystaniem czujników korozymetrycznych poruszona została w publikacji Stochaja (2012). Z kolei Fiedorowicz i Jagiełło (2010) poruszyli zagadnienia związane z przydatnością stosowania czujników korozymetrycznych w różnych warunkach posadowienia gazociągów, m.in. w miejscach, gdzie odcinki rurociągów ułożone są w rurach otaczających, w miejscach narażonych na korozję powodowaną przez prąd przemienny, w gruntach wysokooporowych, tam gdzie odcinki rurociągów poddane są oddziaływaniom prądów błędzących oraz w miejscach, gdzie brak jest zainstalowanej czynnej ochrony przed korozją.

Yahaya i współautorzy (2011) opisują w swojej publikacji badania, jakie wykonali w celu opracowania metodyki modelowania wzrostu korozji podziemnych gazociągów przy różnych właściwościach glebowych. Przedstawiono nową technikę prowadzenia prac eksperymentalnych na miejscu w celu pomiaru ubytku metalu zakopanego odcinka w czasie rzeczywistym pod wpływem czynników korozyjnych gruntu. Potencjalny model szybkości wzrostu korozji zewnętrznej z uwzględnieniem czynników glebowych oparty na tej technice,

specjalnie opracowany do podziemnych rurociągów stalowych, można wykorzystać do oceny najlepszego sposobu ochrony przed korozją, jaki należałoby zastosować na rurociągach przed instalacją w zależności od konkretnego miejsca/lokalizacji.

Z kolei Sean Brossia (2014) opisuje metody wykorzystywania czujników korozymetrycznych do oceny szybkości korozji konstrukcji stalowych ułożonych w ziemi. Przedstawia zasady ich wykorzystywania, jak również inne metody oceny szybkości korozji.

Rysunek 2 przedstawia schemat podłączenia czujnika korozymetrycznego do konstrukcji chronionej.



Rys. 2. Schemat podłączenia czujnika do konstrukcji chronionej
Fig. 2. Diagram of sensor connection to the protected structure

Inne przykłady wykorzystania czujników korozymetrycznych oraz doświadczenia związane z ich zastosowaniem w ocenie szybkości korozji i skuteczności ochrony katodowej poruszone zostały w oddzielnych publikacjach (Jankowski i Sokólski, 2008, 2015).

Wyniki pomiarów szybkości korozji z zastosowaniem czujników korozymetrycznych uzyskiwane są na podstawie zmian rezystancji eksponowanej powierzchni czujnika, obliczanej przez przyrząd pomiarowy. Szybkość korozji czujnika podawana jest w wybranych jednostkach, zazwyczaj $\mu\text{ m/rok}$.

Wybrane badania terenowe

W tabeli 2 ujęto wybrane punkty pomiarowe, w których wykonywano pomiary na przestrzeni kilku lat. Przedstawione są wyniki potencjałów wyłączeniowych E_{off} , odłączeniowych mierzonych na elektrodach symulujących E_{soff} oraz szybkości korozji na czujnikach zamontowanych w wybranych punktach.

W kolumnie *Podjęte czynności* opisano czynność, jaką wykonano w danym punkcie w celu poprawienia miarodajności wyników.

Pomiary skuteczności ochrony katodowej prowadzone za pomocą elektrod symulujących, szczególnie na obiektach złożonych, są najbardziej miarodajne pod warunkiem umieszczenia bezpośrednio w bliskości tych elektrod – elektrod odniesienia lub zamontowania nad nimi rur, umożliwiających wykonywanie pomiarów za pomocą przenośnych elektrod odniesienia. Umieszczenie przenośnej lub stałej elektrody odniesienia w bezpośredniej bliskości elektrod symulujących pozwala z dużym prawdopodobieństwem wyeliminować obce potencjały mierzone pomiędzy elektrodami.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów, w celu weryfikacji otrzymywanych wyników, czujniki korozymetryczne zamontowano w punktach A, B, C, D, E, gdzie wyniki pomiarów potencjałów odłączeniowych i wyłączeniowych nie spełniały założonego kryterium. Wyniki pomiarów szybkości korozji pokazały jej zerową wartość, co pozwoliło na odsunięcie nieco w czasie czynności związanych z modernizacją systemu ochrony katodowej. W punktach, gdzie wyniki pomiarów wydawały się mało miarodajne, mianowicie uzyskiwano zbyt mało ujemne potencjały odłączeniowe mierzone na elektrodach symulujących, znajdujących się w niewielkiej odległości od uziomów anodowych, zdecydowano się na wymianę elektrod symulujących na nowe.

Pomiary w kolejnych latach wykazały skuteczne działanie systemu ochrony katodowej. Dowodem na skuteczne działanie ochrony katodowej jest stan zdemontowanych czujników korozymetrycznych i elektrod symulujących po kilku latach pracy stwierdzony w czasie oględzin.

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono elektrodę symulującą zintegrowaną z elektrodą odniesienia $\text{Cu}_{\text{nas.}}/\text{CuSO}_4$, a na rysunku 5 – dodatkową elektrodę symulującą, zainstalowaną w pobliżu konstrukcji chronionej około 2002 roku.

Po deinstalacji elektrod pomiaru elektrody odniesienia względem elektrody wzorcowej świadczyły o jej niesprawności, a elektroda symulująca o powierzchni 10 cm^2 była pokryta produktami katodowymi, co utrudniało uzyskanie wiarygodnych wyników.

Rysunki 6 i 7 przedstawiają czujnik korozymetryczny zdemontowany w punkcie D, natomiast rysunek 8 pokazuje czujnik zdemontowany w punkcie B. W obu przypadkach wygląd powierzchni czujnika potwierdza skuteczne działanie ochrony katodowej – po oczyszczeniu czujnika jego powierzchnia nie nosi śladów korozji.

Rysunki 9 i 10 pokazują elektrodę symulującą pokrytą osadami katodowymi oraz po oczyszczeniu, zdemontowaną w jednym z punktów pomiarowych, co również świadczy o skutecznie prowadzonej ochronie katodowej. W tym przypadku rezystancja przejścia elektrody wynosiła powyżej $20\text{ k}\Omega$, a prąd elektrody – zaledwie $1\text{ }\mu\text{A}$. Powierzchnia eksponowana elektrody to 10 cm^2 .

Tabela 2. Zestawienie punktów pomiarowych z parametrami mierzonymi na przestrzeni kilku lat

Table 2. List of measuring points with parameters measured over several years

Punkt pomiarowy	Rok wykonania pomiarów	Eon	Eoff	Esoff	Szybkość korozji	Średnia rezystywność gruntu	Podjęte czynności
		[V]	[V]	[V]	[$\mu\text{m}/\text{rok}$]	[Ωm]	
A	2015	-0,80	-0,78	-0,53	0,00	164	montaż czujnika Xr
	2016	-0,85	-0,80	-0,624	0,00		
	2017	-0,951	-0,87	-0,675	0,00		
	2018	-0,950	-0,890	-0,745	0,00		wymieniono na nowe elektrody symulujące Es
	2019	-1,38	-1,05	-0,80	0,00		
	2020	-1,33	-1,07	-0,746	0,00		
B	2016	-0,85	-0,83	-0,734	0,00	170	montaż czujnika Xr
	2017	-1,08	-0,99	-0,682	0,00		
	2018	-1,08	-0,953	-0,653	0,00		
	2019	-1,16	-1,12	-0,70	0,00		
	2020	-1,90	-1,15	-1,03	0,00		wymieniono na nowe elektrody symulujące Es
C	2016	-1,22	-1,08	-0,80	0,00	263	montaż czujnika Xr
	2019	-1,23	-1,21	-0,69	0,00		
	2020	-1,29	-1,22	-0,874	0,00		wymieniono na nowe elektrody symulujące Es
D	2015	-0,87	-0,78	-0,66	0,00	66	montaż czujnika Xr
	2016	-0,88	-0,81	-0,728	0,00		
	2017	-2,15	-1,03	-1,160	0,00		montaż dodatkowego lokalnego płytkiego uziomu anodowego, przeregulowanie parametrów, obniżenie prądu anody
E	2015	-1,25	-1,03	-0,73	0,00	517	montaż czujnika Xr
	2019	-1,42	-1,12	-0,81	0,00		


Rys. 3. Elektroda symulująca zintegrowana z elektrodą odniesienia pokryta produktami katodowymi, zdemontowana w punkcie D (fot. T. Minor)

Fig. 3. Simulating electrode integrated with the reference electrode, covered with cathode products, disassembled at point D (photo by T. Minor)


Rys. 4. Elektroda symulująca zintegrowana z elektrodą odniesienia po oczyszczeniu z produktów katodowych, zdemontowana w punkcie D (fot. T. Minor)

Fig. 4. Simulating electrode integrated with the reference electrode, after cleaning from cathode products, disassembled in point D (photo by T. Minor)



Rys. 5. Elektroda symulująca pokryta produktami katodowymi, zdemontowana w punkcie D (fot. T. Minor)

Fig. 5. Simulating electrode, covered with cathode products, disassembled in point D (photo by T. Minor)



Rys. 8. Czujnik korozymetryczny zdemontowany w punkcie B (fot. T. Minor)

Fig. 8. Corrosimetric sensor disassembled in point B (photo by T. Minor)



Rys. 6. Czujnik korozymetryczny zdemontowany w punkcie D (fot. T. Minor)

Fig. 6. Corrosimetric sensor disassembled at point D (photo by T. Minor)



Rys. 9. Elektroda symulująca pokryta osadami katodowymi (fot. T. Minor)

Fig. 9. Simulating electrode covered with cathode deposits (photo by T. Minor)



Rys. 7. Czujnik korozymetryczny po oczyszczeniu, zdemontowany w punkcie D (fot. T. Minor)

Fig. 7. Corrosimetric sensor, after cleaning, disassembled at point D (photo by T. Minor)



Rys. 10. Elektroda symulująca po oczyszczeniu (fot. T. Minor)

Fig. 10. Simulating electrode after cleaning (photo by T. Minor)

Podsumowanie

Prowadzenie skutecznej ochrony katodowej na obiektach złożonych, w obrębie występowania prądów błądzących i w innych szczególnych przypadkach jest trudne; do wykazania poprawności działania systemów ochrony katodowej należy stosować różne techniki pomiarowe, począwszy od standardowych potencjałowo-prądowych, po wykorzystanie korozymetrii rezystancyjnej.

Korozymetria rezystancyjna jest wartościową techniką diagnostyczną wspomagającą tradycyjne metody badań zagrożeń korozyjnych i skuteczności ochrony przeciwkorozyjnej (Fiedorowicz i Jagiełło, 2010).

Niewątpliwą zaletą wykorzystania korozymetrii rezystancyjnej jest – poza możliwością wykonywania na czujnikach o znacznej powierzchni pomiarów potencjałowo-prądowych – również dokonywanie pomiarów szybkości korozji. Doświadczenia zdobyte w badaniach terenowych potwierdzają zasadność stosowania czujników korozymetrycznych jako dodatkowego źródła informacji o warunkach panujących w pobliżu konstrukcji chronionej.

Literatura

- Baeckmann W., Schwenk W., Prinz W. (ed.), 1997. Handbook of Cathodic Corrosion Protection Theory and Practice of Electrochemical Protection Processes. Third Edition. *Elsevier Science, USA*.
- CEOCOR (Komitet do spraw studiów nad korozją i ochroną rurociągów przed korozją), 2010. Pomiary w ochronie przed korozją – poradnik. *Stowarzyszenie Elektryków Polskich Polski Komitet Elektrochemicznej Ochrony Przed Korozją, Warszawa*.
- Fiedorowicz M., Jagiełło M., 2010. Korozymetria rezystancyjna w badaniach korozji podziemnych rurociągów. *XI Krajowa Konferencja „Pomiary korozyjne w ochronie elektrochemicznej”*, *Jurata*: 33–50.
- Jankowski J., Sokólski W., 2008. Korozymetria rezystancyjna jako dogodny sposób oceny skuteczności ochrony katodowej. *X Krajowa Konferencja „Pomiary korozyjne w ochronie elektrochemicznej”*, *Jurata*: 71–78.

- Jankowski J., Sokólski W., 2015. Wyniki pomiarów szybkości korozji ziemnej stali w pobliżu konstrukcji chronionych katodowo. *Ochrona Przed Korozją*, 58(8): 286–291. DOI: 10.15199/40.2015.8.3.
- Minor T., 2015. Możliwości i sposoby kontrolowania stanu technicznego stalowych gazociągów na podstawie oceny technicznej powłok antykorozyjnych oraz skuteczności ochrony katodowej. *Nafta-Gaz*, 7: 472–480.
- Sean Brossia C., 2014. The use of probes for detecting corrosion in underground pipelines. [W:] Orazem M.E. (ed.). *Underground Pipeline Corrosion*: 286–303. DOI: 10.1533/9780857099266.2.286.
- Stochaj P., 2012. Zastosowanie korozymetrii rezystancyjnej w odniesieniu do kryteriów ochrony katodowej gazociągów. *Nafta-Gaz*, 5: 298–305.
- Stochaj P., Minor T., 2016. Elektrody symulujące jako narzędzie do badań skuteczności ochrony katodowej stalowych konstrukcji. *Nafta-Gaz*, 8: 638–644. DOI: 10.18668/NG.2016.08.08.
- Yahaya N., Noor N.M., Othman S.R., Sing L.K., Din M.M., 2011. New Technique for Studying Soil-Corrosion of Underground Pipeline. *Journal of Applied Sciences*, 11(9): 1510–1518. DOI: 10.3923/jas.2011.1510.1518.

Akty prawne i dokumenty normatywne

- PN-EN 12954:2019 Ogólne zasady ochrony katodowej zakopanych lub zanurzonych lądowych konstrukcji metalowych.
- PN-EN 14505:2007 Ochrona katodowa konstrukcji złożonych.
- PN-EN 15112:2007 Ochrona katodowa zewnętrznych powierzchni orurowań odwiertów



Mgr inż. Tomasz MINOR
Kierownik Laboratorium Badawczego
Akredytowanego przez PCA
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków
E-mail: tomasz.minor@inig.pl