

**WYNIKI POMIARÓW SZYBKOŚCI KOROZJI ZIEMNEJ STALI
W POBLIŻU KONSTRUKCJI CHRONIONYCH KATODOWO**

**RESULTS OF CORROSION RATE MEASUREMENTS FOR STEEL IN SOIL
IN VICINITY OF CATHODICALLY PROTECTED STRUCTURES**

Jezmar Jankowski, Wojciech Sokólski

SPZP CORRPOL Sp. z o.o.

Słowa kluczowe: stal, korozja ziemna, pomiary szybkości korozji, czujniki korozymetryczne rezystancyjne, ochrona katodowa

Keywords: steel, corrosion in soil, corrosion rate measurements, electrical resistance probes, cathodic protection

Streszczenie

Zaprezentowano wybrane wyniki długoterminowych pomiarów szybkości korozji stali w ziemi w pobliżu zakopcowanych zbiorników chronionych katodowo. Pomiary dokonywano metodą korozymetrii rezystancyjnej za pomocą czujników o powierzchni ekspozycyjnej 10 cm² posadowionych w gruncie piaszczystym. Mierzono narastające ubytki korozyjne w okresie 3 lat przed zastosowaniem ochrony katodowej zbiorników oraz ok. 4 lat po jej załączeniu zarówno dla stali polaryzowanej katodowo jak i swobodnie korodującej. Zaobserwowano w niektórych przypadkach wyraźne oddziaływanie ochrony katodowej zbiorników na próbki stali swobodnie korodującej skutkujące obniżeniem ich szybkości korozji.

Abstract

The paper presents selected results of long-term measurements of the corrosion rate of steel in the ground near the mounded tanks with cathodic protection. Measurements were made using electrical resistance probes with an area of 10 cm² exposed in sandy soil. Increasing corrosion losses were measured during the three years prior to the application of cathodic protection of tanks and approx. 4 years after it for both cathodically polarized and freely corroding steel. It has been observed in some cases, a marked influence of cathodic protection of tanks on freely corroding steel samples resulting in reduction in their corrosion rate.

1. Wstęp

W ostatnich latach do monitorowania szybkości korozji konstrukcji podziemnych, zarówno w celu oceny wielkości ich zagrożenia korozyjnego jak i skuteczności ochrony katodowej, coraz szerzej wykorzystuje się technikę korozymetrii rezystancyjnej. Wskazuje na to rosnąca ilość doniesień w renomowanych czasopismach naukowo technicznych [1-3], oraz publikowane na ten temat opracowania i raporty [4, 5]. Technika ta posiada istotne zalety w stosunku do alternatywnie stosowanych kuponów korozyjnych. W przeciwieństwie do nich nie wymaga ona dokonywania odkrywek, oczyszczania i ważenia próbek, ponieważ ubytki korozyjne określane są w sposób elektroniczny z powierzchni ziemi. Stosowane w miejsce kuponów czujniki korozymetryczne (nazywane czujnikami ER) mogą pełnić ponadto funkcję elektrod symulujących umożliwiając dokonywanie innych istotnych w technologii ochrony katodowej pomiarów: potencjału, gęstości prądu (dc i ac) i rezystancji przejścia.

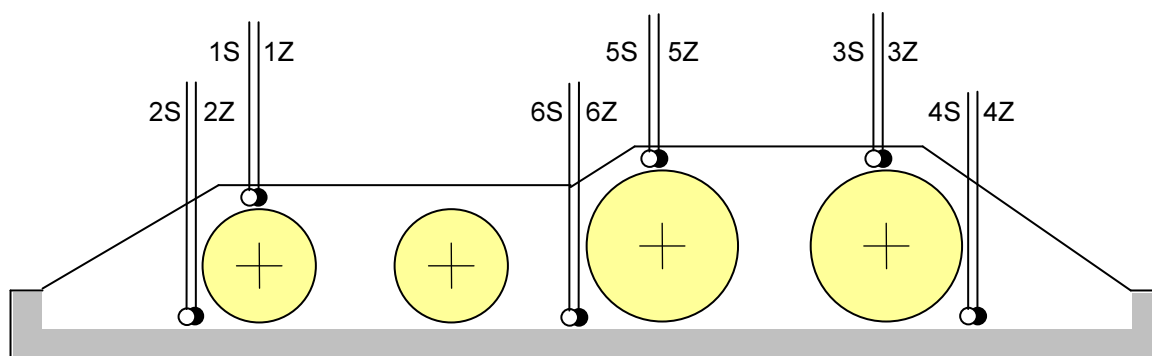
W kraju pierwsze prace nad wykorzystaniem korozymetrii rezystancyjnej do monitorowania zagrożenia korozyjnego konstrukcji podziemnych, jak również skuteczności ich ochrony katodowej podjęto w Politechnice Gdańskiej w latach 90-tych ubiegłego wieku [6-8]. W ciągu ok. 20 lat stosowania ta technika pomiarowa zyskała ugruntowaną pozycję szczególnie w polskim gazownictwie, gdzie uzupełnia z powodzeniem klasyczne pomiary potencjałowe i została ujęta w obowiązujących zaleceniach dot. ochrony przed korozją zewnętrzną stalowych gazociągów lądowych [9, 10]. Więcej informacji praktycznych na temat zastosowań korozymetrii rezystancyjnej w technologii ochrony katodowej można znaleźć w opublikowanych pracach SPZP CORRPOL [11-17].

W niniejszej pracy przedstawiono przykład wykorzystania tej techniki do rozwiązania problemu niewłaściwie zabezpieczonych przed korozją 4 zbiorników na węglowodory zakopowanych na tacy żelbetowej w jednej z krajowych elektrociepłowni. Ze „względów oszczędnościowych” dla obiektu tego nie przewidziano podczas projektowania ochrony katodowej. Dodatkowo okazało się, że podczas budowy konstrukcje zbiorników zostały nierozłącznie połączone ze zbrojeniem żelbetu tworząc niebezpieczne makroogniwa korozyjne, w których zbiorniki pełnią rolę anod. W pierwszym etapie badań za pomocą czujników korozymetrycznych zdiagnozowano zagrożenie korozyjne zbiorników, a następnie wykorzystano je do oceny skuteczności działania zaprojektowanej i wykonanej na tej podstawie instalacji ochrony katodowej.

2. Metodyka badań

Do badań wykorzystano czujniki korozymetryczne rezystancyjne typu ER-10/1,0-FC produkcji SPZP CORRPOL wyposażone w stalowe elementy pomiarowe o polu powierzchni 10 cm² i grubości 1,0 mm. Usytuowanie czujników w stosunku do zbiorników pokazano schematycznie na rys. 1. Obejmuje ono przekrojowo najbardziej charakterystyczne miejsca zagrożeń korozyjnych zbiorników związane z ich lokalizacją w kopcu ziemnym na tacy żelbetowej. Ogółem wytypowano do badań 6 takich miejsc ponumerowanych kolejno od 1 do 6 (połowa w dolnej części zbiorników, połowa w górnej). W każdym z nich umieszczono w gruncie obok siebie po dwa czujniki, z których jeden podłączony elektrycznie do najbliższego zbiornika (oznaczenie „Z”) odzwierciedlał lokalne zagrożenie powodowane przez makroogniwa korozyjne, zaś drugi pozostawał swobodnie korodujący (niepołączony elektrycznie ze zbiornikiem – oznaczenie „S”) umożliwiając określenie zagrożenia wywołanego przez samo środowisko korozyjne. Do pomiarów rezystometrycznych stosowano miernik MultiCorr MKII produkcji CORROCEAN (Norwegia) oraz przyrząd wg własnego opracowania ATLAS 1001 [18]. Pomiary korozymetryczne prowadzono od września 2007 r.

Pomiary ubytków korozyjnych stali przy pomocy zestawu 12 czujników prowadzono początkowo w odstępach 2-tygodniowych. W dalszym okresie, ze względu na obserwowane wolniejsze zmiany szybkości korozji wydłużono te odstępy do 3-4 tygodni.



Rys.1. Rozmieszczenie czujników ER przy zakopcowanych zbiornikach – widok w przekroju
Fig.1. The ER probes location near mounded tanks – a cross-sectional view.

Po ok. roku badania wykazały narastające zagrożenie korozyjne i potwierdziły potrzebę zastosowania ochrony katodowej. Po ok. 3 latach od rozpoczęcia pomiarów korozymetrycznych zbiorniki zostały objęte ochroną katodową (grudzień 2010 r.) i wznowiono wówczas monitorowanie ich szybkości korozji początkowo z częstością raz na kwartał a następnie raz na pół roku, którego celem była ocena skuteczności stosowanego zabezpieczenia przeciwkorozyjnego.

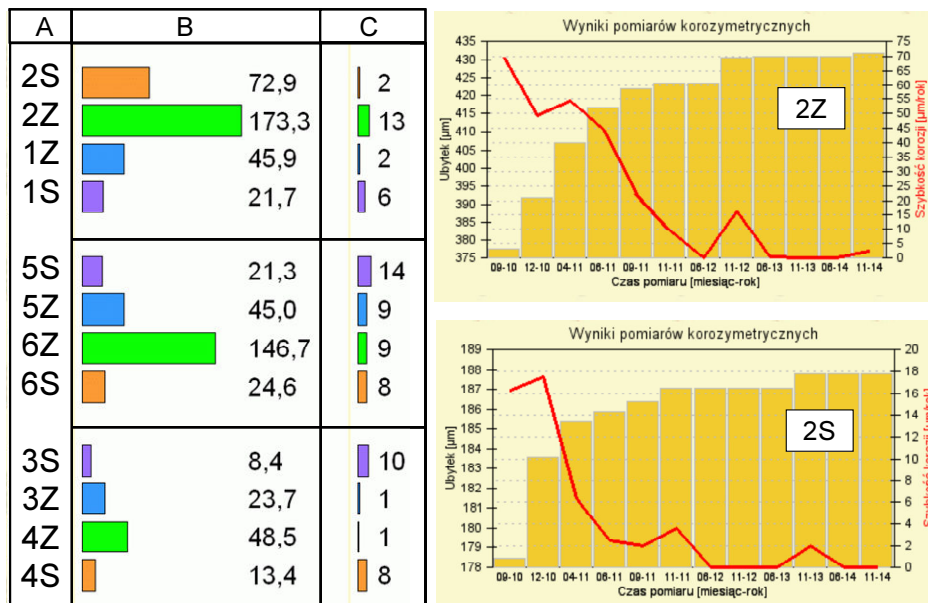
3. Wyniki pomiarów i ich dyskusja

Wyniki pomiarów korozymetrycznych wykonanych na badanym obiekcie gromadzone były w internetowej bazie danych rezystometrycznych oraz analizowane z wykorzystaniem kalkulatora ubytków korozyjnych. Opis zastosowanego systemu CORRPOL-ER przedstawiono wcześniej [13].

Na rys. 2. zaprezentowane zostały zbiorcze wyniki wykonanych pomiarów na wszystkich 12 czujnikach oraz przykład graficznej ilustracji gromadzonych danych w bazie dla wytypowanych dwóch czujników korozymetrycznych pracujących obok siebie w omawianej instalacji ochrony katodowej. Dla ułatwienia analizy wyniki pomiarów wykonane na czujnikach umieszczonych w taki sam sposób w stosunku do chronionych zbiorników zostały na prezentacji graficznej oznaczone tym samym kolorem.

Na zestawieniu zbiorczym porównywane są wartości średnie szybkości korozji zmierzone na wszystkich czujnikach korozymetrycznych (A) w okresie poprzedzającym zastosowanie ochrony katodowej (B) oraz wartości średnie szybkości korozji zmierzone w okresie od momentu włączenia ochrony katodowej do ostatniego pomiaru pod koniec ubiegłego roku (C). Wartości średnie nie odzwierciedlają tutaj wyników uzyskanych przed podjęciem decyzji o konieczności zastosowania ochrony katodowej, ponieważ w zależności od warunków atmosferycznych okresowo odnotowywano szybkości korozji od 0,1 do 0,4 mm/rok.

Przedstawiony sposób prezentacji wyników – w swoim założeniu – miał w jasny sposób wykazywać skuteczność działania zastosowanej ochrony katodowej zbiorników i stanowić dla właściciela obiektywną kontrolę efektywności zastosowanej ochrony przeciwkorozyjnej. Zaprezentowane wyniki pomiarów jednoznacznie na to wskazują – niemal na całym Obiekcie spełnione jest kryterium normy PN-EN 15257, tj. szybkość korozji zabezpieczanej powierzchni stalowej jest mniejsza niż 10 $\mu\text{m}/\text{rok}$.



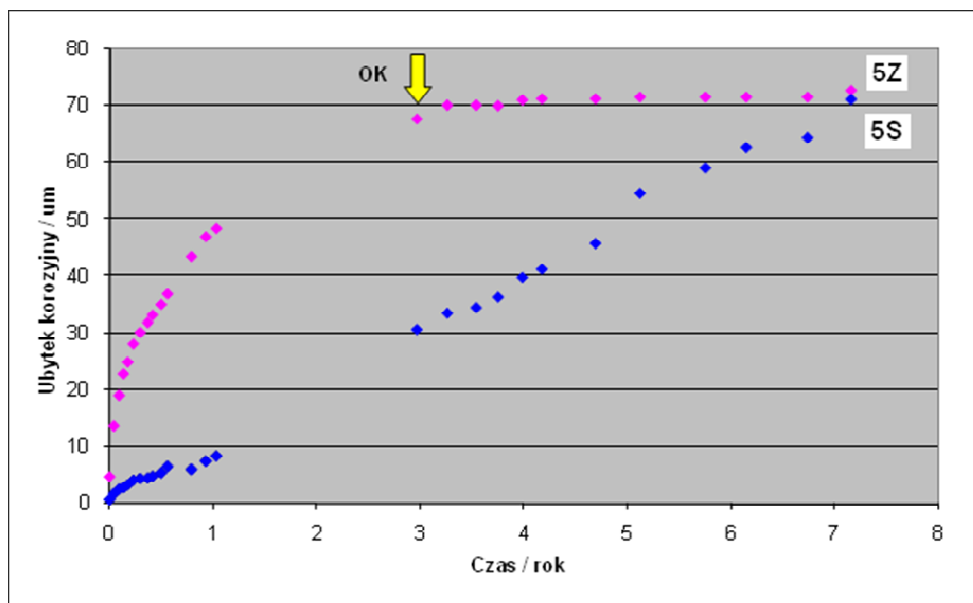
Rys. 2. Wyniki pomiarów korozymetrycznych: A - oznaczenie czujnika, B – średnia szybkość korozji przed zastosowaniem ochrony katodowej w $\mu\text{m}/\text{rok}$, C – średnia szybkość korozji liczona od momentu włączenia polaryzacji katodowej w $\mu\text{m}/\text{rok}$; oraz wykresy zmian ubytków i szybkości korozji czujników podłączonego (2Z) i niepodłączonego (2S) do chronionego zbiornika po włączeniu do eksploatacji ochrony katodowej.

Fig. 2. Results of ER measurements: A – ER probe marking, B - average corrosion rate before applying cathodic protection in $\mu\text{m}/\text{year}$, C - average corrosion rate calculated from the moment of turning on the cathodic polarization in $\mu\text{m}/\text{year}$; and the graphs of changes in the corrosion loss and corrosion rate for ER probes connected (2Z) and not connected (2S) to the protected tank after switching to the operation of cathodic protection.

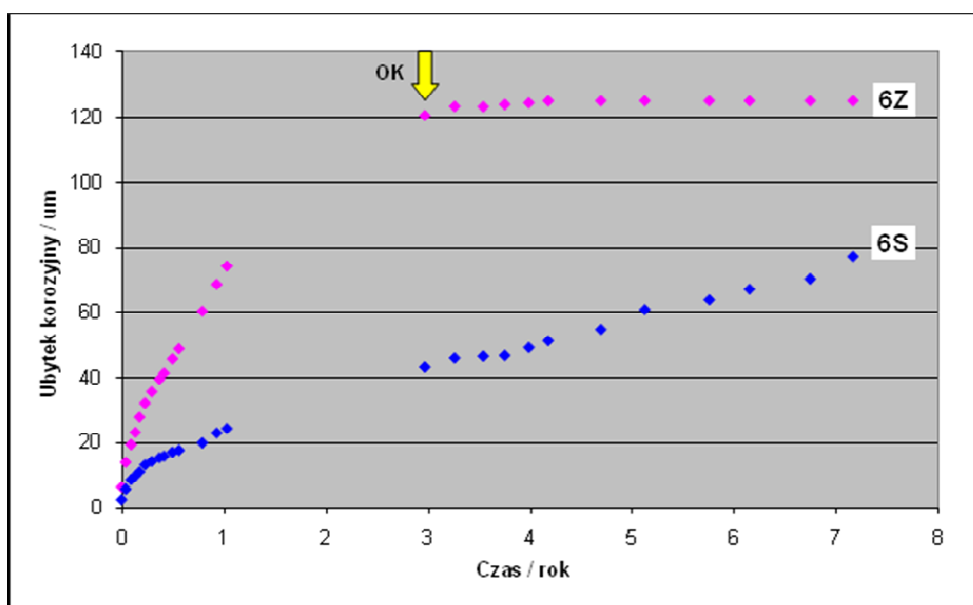
Wybrane wyniki pomiarów ubytków korozyjnych w funkcji czasu dla czujników umieszczonych w trzech lokalizacjach przedstawiono w formie graficznej na rys. 3-5.

Wykres na rys. 3 obrazuje jak narastały ubytki korozyjne stali w rejonie górnej tylnej części środkowego zbiornika. Żółtą strzałką zaznaczono moment włączenia instalacji ochrony katodowej zbiorników. Uzyskane wyniki okazały się zgodne z przewidywaniami. Czujnik korozymetryczny zwarty ze zbiornikiem (5Z) wykazał w pierwszym roku ekspozycji ok. 5-cio krotnie większe ubytki korozyjne, a zarazem i szybkość korozji od czujnika swobodnie korodującego (5S). Tak duże przyspieszenie korozji związane było przypuszczalnie z oddziaływaniem galwanicznym zwartych ze zbiornikami konstrukcji żelbetowych (taca i pale), które polaryzują zbiorniki anodowo. Po 3 latach szybkości korozji obu czujników w przybliżeniu wyrównały się. Po włączeniu instalacji ochrony katodowej szybkość korozji czujnika połączonego elektrycznie ze zbiornikiem obniżyła się do pomijalnie niskiej wartości 1,1 $\mu\text{m}/\text{rok}$ wskazując na bardzo skuteczne działanie ochrony katodowej w górnej strefie zbiornika, podczas gdy czujnik niepołączony nadal korodował ze stałą szybkością ok. 10 $\mu\text{m}/\text{rok}$.

Podobną sytuację stwierdzono w przypadku pary czujników korozymetrycznych (6Z i 6S) ulokowanych w dolnej tylnej części środkowego zbiornika – patrz rys. 4. Tutaj również ubytki korozyjne czujnika połączonego elektrycznie ze zbiornikiem były w pierwszym okresie kilkakrotnie wyższe od czujnika swobodnie korodującego. Po zastosowaniu ochrony katodowej proces korozji czujnika polaryzowanego wraz ze zbiornikiem uległ praktycznie zahamowaniu, natomiast czujnik niepolaryzowany korodował nadal z szybkością ok. 8 $\mu\text{m}/\text{rok}$.



Rys.3. Ubytki korozyjne stali w funkcji czasu wyznaczone dla czujnika ER zwartego elektrycznie ze zbiornikiem (5Z) i czujnika swobodnie korodującego (5S).
 Fig.3. Corrosion losses of steel in function of time determined for ER probe connected electrically to tank (5Z) and for freely corroding probe (5S).

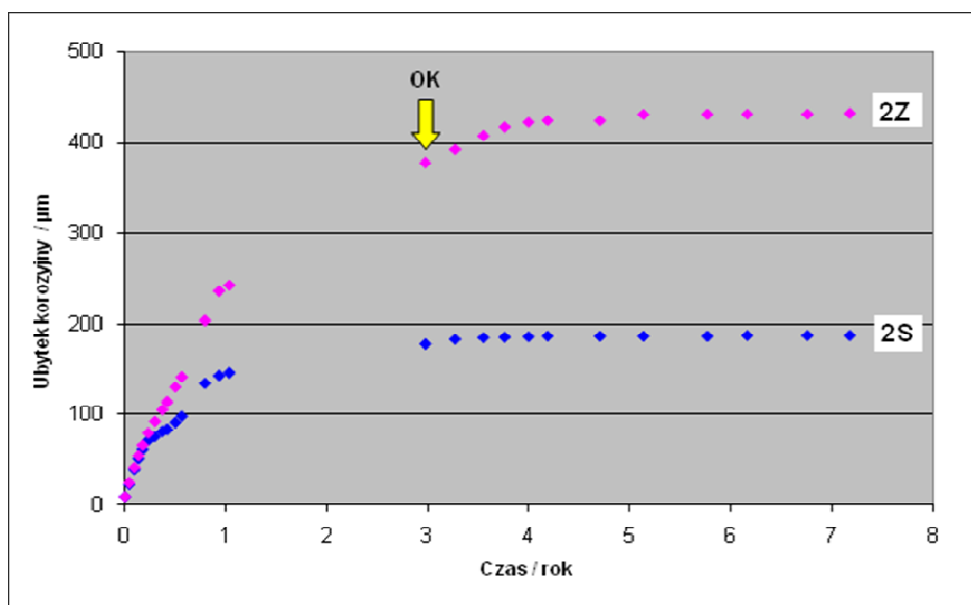


Rys.4. Ubytki korozyjne stali w funkcji czasu wyznaczone dla czujnika ER zwartego elektrycznie ze zbiornikiem (6Z) i czujnika swobodnie korodującego (6S).
 Fig.4. Corrosion losses of steel in function of time determined for ER probe connected electrically to tank (6Z) and for freely corroding probe (6S).

Odmianą sytuację stwierdzono dla pary czujników 2Z i 2S umieszczonych w rejonie dolnej przedniej części skrajnego zbiornika – patrz rys. 5. W tym przypadku wyznaczone ubytki korozyjne stali w początkowym okresie były dużo wyższe niż w innych lokalizacjach – odpowiednio ok. 380 μm dla czujnika połączonego ze zbiornikiem i 180 μm dla niepołączonego po 3 latach ekspozycji. Było to uwarunkowane przypuszczalnie silniejszym lokalnie

oddziaływaniem istniejących makroogniw galwanicznych (bliskość frontowej ściany żelbetowej) oraz większą koncentracją czynników korozyjnych w tej części kopca.

Po włączeniu instalacji ochrony katodowej okazało się dość nieoczekiwanie, że zahamowanie procesów korozyjnych nastąpiło na obu czujnikach (2Z i 2S), których szybkości korozji już w roku 2012 obniżyły się praktycznie do zera. Dla lepszej ilustracji tego zjawiska zaprezentowano wyniki pomiarów z bazy danych dla tych samych czujników na rys. 2. Podobne wyniki uzyskano na czujnikach 4Z i 4S, a więc w przypadku dwóch lokalizacji spośród sześciu wytypowanych do badań.



Rys.5. Ubytki korozyjne stali w funkcji czasu wyznaczone dla czujnika ER zwartego elektrycznie ze zbiornikiem (2Z) i czujnika swobodnie korodującego (2S).

Fig.5. Corrosion losses of steel in function of time determined for ER probe connected electrically to tank (2Z) and for freely corroding probe (2S).

Nie natrafiono w literaturze korozyjnej na doniesienia o podobnych przypadkach. Znane są od dawna i szeroko opisane oddziaływania instalacji ochrony katodowej na obiekty sąsiednie o większych gabarytach, w których obserwuje się hamowanie korozji w strefach wpływu prądu i jej przyspieszenie w strefach wypływu.

Można próbować wyjaśnić zaobserwowaną anomalię raczej na skutek wtórnych oddziaływań elektrochemicznych niż elektrycznych przyjmując, że na skutek polaryzacji katodowej zbiorników uległa lokalnie obniżeniu agresywność korozyjna środowiska w strefie przyległej do czujnika swobodnie korodującego, na przykład na skutek alkalizacji gruntu, redukcji obecnego tlenu lub migracji chlorków.

Nie podjęto dodatkowych badań celem wyjaśnienia tego zjawiska, gdyż nie były one ujęte w programie, a post factum byłoby to technicznie bardzo trudne lub wręcz niewykonalne. Należy mieć jednak świadomość, że takie oddziaływania instalacji ochrony katodowej na elementy metalowe znajdujące się w pobliżu polaryzowanych konstrukcji mogą mieć miejsce w praktyce. W tym przypadku obserwowano je zwłaszcza w dolnych strefach kopca przy dnach zbiorników, gdzie procesy dyfuzji są wolniejsze w stosunku stref górnych.

Dlatego też przy prowadzeniu badań porównawczych próbek chronionych i niechronionych katodowo na obiektach podziemnych należałoby te ostatnie odsuwać dalej od chronionych konstrukcji poza strefę ewentualnych zmian środowiskowych, aby uniknąć błędnej (zaniżonej) oceny ich szybkości korozji.

4. Wnioski

Zebrane na podstawie ponad siedmioletnich badań wyniki pomiarów rezystometrycznych dotyczące korozji ziemnej zakopcowanych zbiorników i ich analiza upoważniają do sformułowania następujących wniosków:

- Przyjęta metoda monitorowania korozji ziemnej zbiorników z wykorzystaniem korozymetrii rezystancyjnej pozwoliła na dokładne określenie w wytypowanych lokalizacjach ich zagrożenia korozyjnego przed zastosowaniem ochrony katodowej oraz wymierną ocenę skuteczności jej działania w okresie kilku lat po ich zabezpieczeniu.
- Zaobserwowano wyraźny wpływ funkcjonowania ochrony katodowej zbiorników na zachowanie korozyjne niektórych czujników ER swobodnie korodujących umieszczonych w gruncie w ich pobliżu. Z bliżej nieokreślonych przyczyn procesy korozji stalowych elementów pomiarowych tych czujników uległy zahamowaniu w stopniu zbliżonym do zbiorników.
- W przypadku stosowania czujników referencyjnych do oceny skuteczności ochrony katodowej konstrukcji podziemnych należy mieć świadomość, że mogą one w pewnych warunkach dawać zaniżone szybkości korozji. Należy sądzić, że można temu zapobiegać umieszczając czujniki ER w większej odległości od chronionych obiektów.

5. Literatura

1. N. A. Khan.: *Using Electrical Resistance Soil Corrosion Probes to Determine Cathodic Protection Effectiveness in High-Resistivity Soils*, Materials Performance, Vol. **43**, No. 6, 2004, pp. 20-25.
2. R. A. Welsh, J. Benefield: *Environmental Protection Through Automated Remote Monitoring of Fuel Storage Tank Bottoms Using Electrical Resistance Probes*, Materials Performance, Vol. **45**, No. 3, 2006, pp. 38-40.
3. N. A. Khan: *Using Coupons and ER Soil Corrosion Probes in Applying Pipeline CP Criteria*, Materials Performance, Vol. **46**, No. 4, 2007, pp. 26-30.
4. Report on Corrosion Probes in Soil or Concrete, NACE International Publication 05107, August 2007.
5. L. V. Nielsen: *Application of coupons and probes for cathodic protection monitoring purposes*, WG B, CEOCOR, April 2013.
6. R. Juchniewicz, J. Jankowski, W. Sokólski, J. Walaszkowski: *Kryteria ochrony katodowej konstrukcji stalowych. Cz. I*, Ochr. Przed. Koroz., 1993, **36**, 6, (121-125).
7. R. Juchniewicz, W. Sokólski, J. Jankowski: *Assesment of cathodic protection criteria*. a4. Workshop Corrosion Protection of Pipeline Systems, Praha, 1995.
8. J. Jankowski, J. Szukalski: *Zastosowanie korozymetrii rezystancyjnej do pomiarów skuteczności ochrony katodowej konstrukcji podziemnych*, Mat. IV Krajowej Konferencji „Pomiary korozyjne w ochronie elektrochemicznej”, Jurata, czerwiec 1996, s. 51-58.
9. ST-IGG-0601:2008, Ochrona przed korozją zewnętrzną stalowych gazociągów lądowych. Wymagania funkcjonalne i zalecenia.
10. ST-IGG-0602:2009 Ochrona przed korozją zewnętrzną stalowych gazociągów lądowych. Ochrona katodowa. Projektowanie, budowa, użytkowanie.
11. J. Jankowski, W. Sokólski: *Monitorowanie skuteczności ochrony katodowej techniką rezystometryczną*, Ochr. Przed Koroz., 2003, **46**, 8, (218-221).

12. J. Jankowski: *Korozymetria jako wiarygodna technika pomiaru skuteczności ochrony katodowej*, Materiały VIII Krajowej Konferencji „Pomiary Korozyjne w Ochronie Elektrochemicznej”, Jurata 2004, s. 29-39.
13. J. Jankowski, W. Sokólski: *System "CORRPOL-ER" - internetowa baza danych rezystometrycznych wraz z kalkulatorem ubytków korozyjnych*, Ochr. Przed. Koroz., 2006, 49, 8, (269 – 271).
14. J. Jankowski: *Dobór systemu korozymetrii rezystancyjnej do monitorowania skuteczności ochrony katodowej*, Materiały III Dorocznej Konferencji Naukowo-Technicznej “Współczesne Technologie Przeciwnokorozyjne”, Jurata 2009.
15. W. Sokólski, J. Jankowski: *Stara metoda w nowej odsłonie – zastosowanie korozymetrii w technologii ochrony katodowej*, 2009, **52**, 4-5, (20-24).
16. M. Fiedorowicz, M. Jagiełło: *Korozymetria rezystancyjna w badaniach korozji podziemnych rurociągów*, Ochr. Przed. Koroz., 2010, **53**, 8, (391-397).
17. J. Jankowski, W. Sokólski, A. Hoffmann: *Application of electrical resistance technique to monitoring of cathodic protection effectiveness*, 20th Workshop „Corrosion Protection of Buried Structures”, Praga 2011.
18. SPZP CORRPOL: <http://www.corrpole.pl/czujniki.htm>