



**TRUDNOŚCI Z OCENĄ SKUTECZNOŚCI OCHRONY KATODOWEJ
RUROCIĄGÓW W DOBREJ POWŁOCE PRZECIWKOROZYJNEJ**

**DIFFICULTIES IN EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF CATHODIC
PROTECTION OF PIPELINES WITH GOOD ANTICORROSION COATINGS**

Wojciech Sokółski

Katedra Technologii Zabezpieczeń Przeciwkorozyjnych
Politechnika Gdańska

Słowa kluczowe: ochrona katodowa, rurociągi, skuteczność ochrony, defekty w powłoce
Keywords: cathodic protection, pipelines, effectiveness, coating holidays

Streszczenie

Stosowanie na nowych rurociągach stalowych bardzo dobrej jakości powłok ochronnych pociąga za sobą oprócz korzyści także szereg niedogodności związanych z eksploatacją instalacji ochrony katodowej. O skuteczności ochrony przeciwkorozyjnej całego rurociągu mogą zadecydować warunki jakie tworzą się w pojedynczym defekcie izolacji. W takich warunkach klasyczne podejście do ochrony katodowej jest zawodne. W pracy wskazano na niektóre problemy z analizą efektywności polaryzacji katodowej w defektach, poprawnością pomiaru potencjałów, kryteriami ochrony oraz związaną z nimi rolę omowego spadku napięcia. Istnieje potrzeba opracowania i zastosowania nowych metod oceny skuteczności ochrony katodowej.

Summary

Application of protective coatings of very good quality on new pipelines, apart from advantages, leads to several disadvantages connected with the exploitation of cathodic protection installations. Conditions formed in a single insulation defect can have a decisive effect on the effectiveness of anticorrosion protection of the whole pipeline. In such conditions the classical approach to cathodic protection is deceptive. Some problems have been indicated in the paper connected with the analysis of the effectiveness of cathodic polarisation in defects, the correctness of potential measurements, protection criteria and the role of the voltage ohmic drop connected with the criteria. There is a need for elaboration and application of new methods of evaluation of the effectiveness of cathodic protection.

Wprowadzenie

Technologia ochrony katodowej jest prosta jedynie w swoich założeniach teoretycznych. W warunkach praktycznych stosowanie jej wymaga dużego doświadczenia we wszystkich fazach: w projektowaniu, budowie instalacji i jej późniejszej eksploatacji. Kwestią podstawową jest utrzymanie na całej chronionej powierzchni obiektu wymaganych parametrów ochrony, co w rzeczywistości sprowadza się do zapewnienia odpowiedniego na tej powierzchni rozkładu potencjału. Jego wartość powszechnie uznawana jest jako kryterium i od dawna służy do określenia skuteczności ochrony katodowej [1,2].

Ta z pozoru prosta czynność, jaką jest pomiar potencjału konstrukcji poddawanej ochronie katodowej, stanowi od dawna źródło licznych błędów [3]. Popęlić je można zarówno podczas wykonywania pomiarów w terenie, jak również podczas interpretacji wyników, zaś ich skutkiem zazwyczaj jest nieefektywnie funkcjonująca instalacja ochrony katodowej, a w skrajnym przypadku awaria korozyjna. Pomimo tego, że literatura specjalistyczna w okresie ostatnich 30 lat przynosiła w tym zakresie szereg nowatorskich rozwiązań, do dnia dzisiejszego nie ma wypracowanych jednolitych metod pomiaru tej wielkości.

Stosowanie w ostatnim okresie nowej generacji powłok przeciwkorozyjnych na rurociągach w postaci grubych warstw polietylenowych, ze względu na ich bardzo dobre właściwości izolacyjne, spowodował występowanie szeregu niedogodności, między innymi związanych z eksploatacją ochrony katodowej. Jedną z nich jest potrzeba lokalizacji nieciągłości powłoki oraz oceny skuteczności ochrony katodowej w pojedynczych defektach izolacji. Do tego celu opracowane zostały specjalne techniki pomiarowe, m.in. tzw. pomiary intensywne [4-12]. Ich koszt jest znaczny, zaś przydatność ciągle dyskutowana w gronie specjalistów [13,14].

Te i inne trudności z zabezpieczeniem przeciwkorozyjnym rurociągów, rozumianym jako ochrona wspólna – za pomocą nowoczesnych powłok przeciwkorozyjnych i ochrony katodowej, jak również trudności z zapewnieniem bezpieczeństwa elektrycznego obsługi, były przedmiotem kilku wcześniejszych doniesień autora niniejszej pracy [15-21]. Dotyczyły one głównie problematyki ochrony katodowej w dnie defektów powłok. Poniżej zwrócono uwagę na potrzebę poszukiwania nowego podejścia do kryteriów oceny skuteczności ochrony katodowej rurociągów dobrze izolowanych, ponieważ stosowanie tradycyjnych rozwiązań staje się nie tylko bardzo trudne technicznie i kłopotliwe, ale również kosztowne.

Ochrona katodowa w dnach uszkodzeń przeciwkorozyjnych powłok izolacyjnych

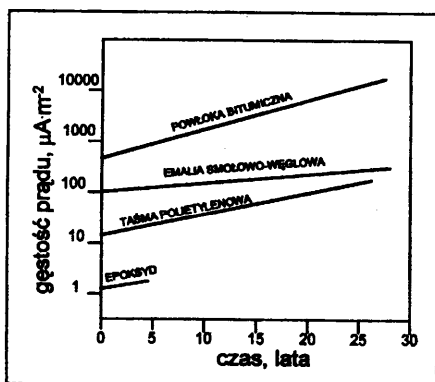
Współcześnie do budowy rurociągów stalowych wykorzystuje się wyłącznie rury fabrycznie wyposażone w odpowiedniej jakości powłokę ochronną. Na placu budowy zabezpiecza się jedynie miejsca połączeń spawanych poszczególnych odcinków. Obecnie powszechnie stosowana jest w tej roli izolacja polietylenowa trójwarstwowa (3LPE). Składa się z warstwy podkładowej z duroplastycznego epoksydu wtapianego w podłoże w podwyższonej temperaturze (Fusion Bonded Epoksyd - FBE), który spełnia zasadniczą rolę ochronnej powłoki przeciwkorozyjnej, ekstrudowanego wokół rury polietylenowego kopolimeru (kleju) oraz grubej (2 + 4 mm) zewnętrznej, ochronnej warstwy twardego polietylenu. Pomimo wyjątkowo dobrych właściwości ochronnych również w powłokach omawianego typu występują różnego rodzaju uszkodzenia, które powstają w czasie produkcji, składowania, transportu, łączenia rur w rurociąg, układania w wykopie, zasypywania oraz podczas eksploatacji rurociągu (korzenie drzew, uszkodzenia mechaniczne, starzenie powłoki). Pomimo starannej kontroli jakości w całym procesie budowy rurociągu, po jego

ułożeniu w ziemi powierzchnia stalowa kontaktuje się z otaczającym środowiskiem elektrolitycznym poprzez defekty w izolacji przeciwkorozyjnej. Ilość i wielkość tych defektów musi być kontrolowana, ponieważ ma decydujący wpływ na parametry ochrony katodowej. Do tego stopnia, że jeśli mają zbyt dużą powierzchnię, konieczne jest odkopanie rurociągu i wykonanie naprawy powłoki [9].

Gęstość prądu ochrony katodowej w odniesieniu do całego rurociągu zależy od szeregu czynników, jednak w typowych warunkach zasadniczą rolę odgrywają średnia rezystancja izolacji (przejścia) rurociągu. Analizując zatem wartość gęstości prądu ochrony katodowej, a także jej zmiany w czasie, można wyciągać wnioski o ogólnym stanie technicznym przeciwkorozyjnej powłoki izolacyjnej. Znikomą rolę w tworzeniu rezystancji przejścia prądu ochrony katodowej odgrywa wartość rezystancji jednostkowej samej izolacji w porównaniu z liczbą i wielkością występujących w niej defektów. Z tego wynika, że przy stosowaniu nowoczesnych materiałów na powłoki (o odpowiednio wysokich właściwościach elektrycznych i mechanicznych) ich walory przeciwkorozyjne, a tym samym także niezbędne parametry instalacji ochrony katodowej, zależą przede wszystkim od sumarycznej powierzchni defektów w izolacji, tj. w efekcie głównie od jakości i kultury technicznej prowadzonych prac podczas montażu rur i odbioru jakościowego izolacji poszczególnych fragmentów oraz całego rurociągu.

Wyroby poszczególnych producentów i dostawców wyrobów powłokowych różnią się czasami jedynie sposobem przygotowania powierzchni stalowej i aplikacji tworzyw, które jednak mogą decydować o łatwym lub trudnym osiągnięciu w warunkach polowych wymaganych właściwości końcowych powłoki, a tym samym i o jakości ostatecznego zabezpieczenia przeciwkorozyjnego całego obiektu.

W przypadku rurociągu posiadającego bardzo dobrą izolację przeciwkorozyjną, której przewodnictwo prądu może być całkowicie zaniedbane, obwód ochrony katodowej zamyka się wyłącznie poprzez powierzchnię metalu w uszkodzeniach (defektach) powłoki. Dzięki odpowiedniemu reżimowi postępowania podczas wykonawstwa prac izolacyjnych można obecnie postawić wymaganie uzyskania średniej jednostkowej rezystancji rurociągu pokrytego trójwarstwową powłoką polietylenową co najmniej na poziomie $10^6 \Omega \cdot m^2$ [22]. Można osiągnąć wtedy wartości prądu ochrony katodowej rzędu $\mu A \cdot m^{-2}$ i mniejszych. Na Rys. 1 przedstawiona jest ogólna zależność gęstości prądu ochrony katodowej (określona w odniesieniu do całej powierzchni chronionego obiektu) w funkcji czasu dla kilku typowych stosowanych systemów izolacji przeciwkorozyjnej rurociągów stalowych [23].

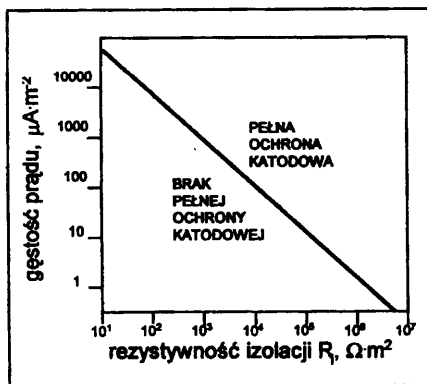


Rys. 1. Wymagana gęstość prądu pełnej ochrony katodowej w czasie eksploatacji dla wybranych powłok ochronnych na rurociągach.

Natężenie prądu polaryzacji katodowej stali w określonym miejscu uszkodzenia powłoki na rurociągu – w dnie defektu izolacji – będzie zależała od jego kształtu, odległości od układu anodowego oraz właściwości elektrycznych środowiska elektrolitycznego zarówno we wnętrzu defektu, jak również w jego otoczeniu.

Towarzysząca przepływowi prądu w defekcie zmiana potencjału zależy ponadto jeszcze od parametrów kinetycznych reakcji korozyjnych; na te zaś mają wpływ właściwości fizyko-chemiczne środowiska elektrolitycznego oraz stan powierzchni na granicy faz metal - środowisko. Tę współzależność pomiędzy gęstością prądu polaryzującego i potencjałem odzwierciedla krzywa polaryzacji. Niestety określanie jej postaci dla poszczególnych defektów w powłoce nie jest w praktyce możliwe. W terenie można oszacować na podstawie dość złożonych pomiarów potencjał w dnie defektu powłoki i/lub odpowiadającą mu gęstość prądu polaryzującego. Dane te mogą posłużyć do oceny skuteczności ochrony katodowej rurociągu.

Gęstość prądu ochrony katodowej uzależniona jest od jednostkowej rezystancji powłoki ochronnej na rurociągu R_i (rezystywność powierzchniowa izolacji). Wartość tę określa się po zakopaniu rurociągu i może ona posłużyć do oceny jakości wykonanych prac oraz prognozowania funkcjonowania ochrony katodowej. Dla rurociągu pozbawionego powłoki ochronnej wartość R_i jest rzędu $10 \Omega \cdot m^2$ [2,24], zaś gęstość niezbędnego prądu ochrony katodowej $25-50 mA \cdot m^{-2}$ [2,25,26]. W miarę wzrostu zakrytej powierzchni metalu przez powłokę maleje wymagana gęstość prądu ochronnego. Gdy wielkość powierzchni defektów zbliża się do rzędu milimetrów kwadratowych przypadającej na metr kwadratowy powierzchni rurociągu, wymagane dla niej natężenie prądu ochrony katodowej jest rzędu mikroampera. Zależność obu tych wielkości przedstawiono na Rys. 2.



Rys. 2. Orientacyjna zależność gęstości prądu ochrony katodowej od właściwości elektrycznych powłoki izolacyjnej na rurociągu.

Dla większości normalnych sytuacji terenowych zaprezentowany wykres może być wykorzystywany do orientacyjnej oceny parametrów pracy ochrony katodowej. Po wykonaniu pomiarów jakości izolacji przeciwnokorozyjnej i wyznaczeniu wartości R_i , prąd ochrony katodowej instalacji powinien odpowiadać określonej z wykresu wielkości gęstości prądu. Jest to oczywiście podejście znacznie uproszczone, ponieważ nie jest określona dopuszczalna wielkość defektów w izolacji, rezystywność środowiska i warunki polaryzacji katodowej.

Polaryzacja rurociągu z defektami izolacji

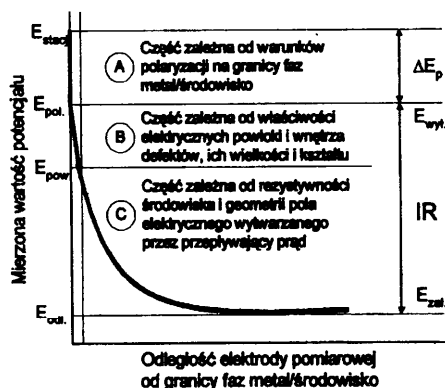
Dla chronionego katodowo rurociągu wartość potencjału w miejscu uszkodzenia powłoki zależna jest od wielkości powierzchni stali kontaktującej się ze środowiskiem elektrolitycznym: im powierzchnia większa, tym mniejsza polaryzacja katodowa, a tym samym i efekt ochronny. Uzależnienie skuteczności ochrony katodowej rurociągu od wielkości i ilości defektów występujących w jego ochronnej warstwie izolacyjnej ostro zarysował się jako problem dopiero po wprowadzeniu nowej generacji powłok trójwarstwowych. Sytuacja ta wywołała sporo problemów technicznych, ponieważ efektywność zabezpieczenia całego rurociągu może zależeć od parametrów ochrony katodowej w pojedynczym uszkodzeniu izolacji.

Wymusza ona odmienne - niestety znacznie bardziej kosztowne - podejście do eksploatacji nowych systemów ochrony przeciwkorozyjnej rurociągów [15,18,21], które związane jest z okresową kontrolą warunków polaryzacji katodowej wzdłuż całej trasy rurociągu. Jest on spowodowany przede wszystkim brakiem wyraźnej zależności wielkości polaryzacji od lokalizacji defektów wzdłuż rurociągu. Polaryzacji wywołana natomiast przez prądy błądzące będzie zależała od lokalizacji defektów względem źródła tych prądów i zazwyczaj jest większa niż wywoływana przez instalację ochrony katodowej. Każdorazowo wielkość polaryzacji zależy wyraźnie od powierzchni defektów. W defektach oraz w otaczającym środowisku elektrolitycznym wskutek przepływu prądów błądzących mogą ponadto wystąpić spadki napięć porównywalne lub nawet większe od wywoływanych ochroną katodową. Istotnym czynnikiem jest tu także fakt, że prądy błądzące mogą przepływać, i zazwyczaj przepływają, w obu kierunkach, podczas gdy ochrona katodowa wywołuje wyłącznie polaryzację katodową. Bardzo dobre właściwości izolacyjne powłoki przeciwkorozyjnej na rurociągu powodują, że rozprzestrzenianie się prądów błądzących może następować na znaczne odległości, utrudniając eksploatację ochrony katodowej oraz ocenę jej skuteczności.

Kryteria ochrony katodowej - rola pomiaru potencjału

Skuteczność ochrony katodowej, jak również stopień oddziaływania prądów błądzących, szacuje się przede wszystkim na podstawie pomiarów potencjału (zarówno całego rurociągu, jak i pojedynczego defektu powłoki), które przeprowadza się za pomocą elektrody pomiarowej umieszczonej zazwyczaj w polu oddziaływania prądu polaryzującego z instalacji ochrony katodowej czy innego źródła prądów błądzących. Powszechnie stosuje się tzw. potencjałowe kryteria ochrony [1,2,25-28]. Konsekwencją jest potrzeba mierzenia potencjału konstrukcji podziemnych poddawanych polaryzacji katodowej. Pomiar ten zawsze obarczony jest błędem wynikającym z obecności omowego spadku napięcia IR. Oznacza to, że każdorazowo zmierzona wartość potencjału zależy od wielkości spadku napięcia pomiędzy powierzchnią roboczą elektrody pomiarowej a granicą faz metal - środowisko w dnie defektu(ów) powłoki, a w praktyce - od położenia elektrody pomiarowej w ziemi. Jest zrozumiałe, że sytuacja taka, w której ocena stopnia zabezpieczenia przeciwkorozyjnego rurociągu zależy od przypadkowego zlokalizowania elektrody pomiarowej przez ekipę pomiarową, jest niedopuszczalna. Konieczne są zatem jednoznaczne metody pomiarowe i procedury postępowania, które w maksymalny sposób wyeliminują taką możliwość.

Orientacyjna zależność pomiędzy mierzoną wielkością potencjału od odległości elektrody względem granicy faz metal/środowisko przedstawiona jest na Rys. 3. Nie uwzględnia ona różnicy potencjałów, która występuje pomiędzy powierzchnią powłoki rurociągu a powierzchnią ziemi nad osią polaryzowanego rurociągu.



Rys.3. Schematyczny obraz zależności mierzonej wartości potencjału od położenia elektrody odniesienia względem rurociągu; $E_{stacj.}$ – potencjał stacjonarny, $E_{pol.}$ – potencjał podczas polaryzacji, $E_{pow.}$ – potencjał na powierzchni powłoki rurociągu, $E_{odl.}$ – potencjał w miejscu oddalonym tzw. ziemi oddległej, E_p – polaryzacja elektrochemiczna, IR – omowy spadek napięcia, $E_{wyt.}$ – potencjał tzw. wyłączeniowy, $E_{zst.}$ – tzw. potencjał załączeniowy.

W wyniku działania polaryzacji katodowej następuje oczekiwane przesunięcie potencjału rurociągu od potencjału stacjonarnego $E_{stacj.}$ do potencjału $E_{pol.}$ (zwykle potencjału ochronnego zgodnego z kryterium ochrony katodowej), czyli o wartość ΔE_p . Wytworzenie tej różnicy potencjałów wymaga określonego czasu, ponieważ polaryzacja elektrochemiczna jest procesem stosunkowo wolnym, znacznie wolniejszym od powstawania i zaniku omowego spadku napięcia IR . Właściwość tę wykorzystuje się w celu eliminowania spadku IR metodą wyłączeniową – po zaniku prądu polaryzującego w krótkim czasie wartość potencjału ($E_{wyt.}$) osiąga wartość bliską potencjału polaryzacji ($E_{pol.}$). Po wyłączeniu prądu polaryzującego występuje przepływ prądów wyrównawczych i ich obecność uwzględnia się poprzez pomiar spadków napięć na powierzchni ziemi (gradientów) i skorygowanie wyniku w drodze obliczeniowej. Tak wyznaczona wartość wykorzystywana jest do oceny skuteczności ochrony katodowej w tzw. pomiarach intensywnych. Należy jednak zwracać uwagę na lokalizację elektrody pomiarowej i umieszczać ją w zależności od rodzaju pomiaru nad osią rurociągu lub w miejscu dostatecznie oddalonym, gdyż jak to ilustruje odcinek C krzywej na Rys. 3, w pozostałych miejscach mierzona wielkość nie jest jednoznacznie określona.

Oddziaływanie prądów błądzących sumuje się z prądem polaryzującym ochrony katodowej. Wzajemne ich oddziaływanie w rzeczywistości jest znacznie bardziej złożone, tym niemniej nie ulega wątpliwości, że największym zmianom pod wpływem oddziaływania prądów błądzących będą podlegały części B i C przedstawionej wyżej krzywej (Rys. 3). Przy szybkiej zmianie kierunku polaryzacji prądu błądzącego obie te części krzywej mogą również zmienić kierunek, i to do tego stopnia, że wartość potencjału na powierzchni powłoki może być bardziej dodatnia od potencjału w dnie defektu, a nawet od potencjału stacjonarnego rurociągu.

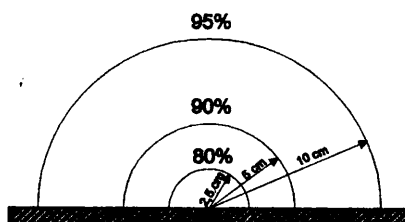
Omowy spadek napięcia IR – nowe spojrzenie

Potrzeba wyznaczania rzeczywistej wartości potencjału konstrukcji poddawanej ochronie katodowej $E_{pol.}$ – wymagana przez kryteria potencjałowe – narzucała konieczność eliminowania z mierzonych wartości potencjału omowego spadku napięcia IR . Począwszy od

końca lat sześćdziesiątych opracowano szereg różnorodnych metod pomiarowych – niestety do dnia dzisiejszego żadna z nich nie okazała się do końca wiarygodna. Szeroko stosowana obecnie technika wyłączeniowa znalazła zastosowanie w metodach intensywnych, gdzie występującą różnicę pomiędzy potencjałami $E_{wyt.}$ a $E_{pot.}$, powstającą wskutek przepływu prądów wyrównawczych po wyłączeniu prądu ochrony katodowej, koryguje się w sposób obliczeniowy na podstawie dodatkowych pomiarów spadków napięcia (gradientów) na powierzchni ziemi.

Pomiar potencjału dla rurociągów posiadających bardzo dobrą izolację przeciwkorozyjną ma sens jedynie wtedy, gdy odbywa się w rzeczywistym defekcie powłoki. Przy przepływie przez defekt prądu ochrony katodowej pomiar potencjału powierzchni dna defektu jest zawsze obciążony błędem wynikającym ze omowego spadku napięcia IR pomiędzy elektrodą odniesienia a odsłoniętą powierzchnią metalu.

Jeśli założyć pełną ochronę katodową w dnie okrągłego defektu, to spadek napięcia IR wokół niego wyrażony w procentach przedstawia Rys. 4 [29,30].



Rys. 4. Całkowity spadek napięcia IR względem odległej ziemi wyrażony w % jako funkcja odległości od środka defektu.

Wynika z niego, że około 95 % rezystancji defektu w powłoce określonej względem ziemi występuje w odległości odpowiadającej 10-cio krotnej średnicy tego defektu. Oznacza to, że nieomal całkowita wartość omowego spadku napięcia IR dla defektu o średnicy 1 cm wystąpi w odległości zaledwie 10 cm od rurociagu. Ponieważ elektrody odniesienia umieszcza się nad osią rurociagu na powierzchni ziemi, a jeśli korzysta się z elektrod stałych zakopanych w pobliżu rurociagu, to i tak jej odległość od powierzchni rurociagu jest rzędu 50 cm a od defektu zapewne dużo większa, zatem można z bardzo dużym prawdopodobieństwem założyć, że zawsze pomiar potencjału defektu odbywa się względem tzw. ziemi odległej, tj. nieomal ze 100 % udziałem omowego spadku napięcia IR, wynikającym z wielkości defektu, rezystywności elektrolitu w defekcie oraz otaczającym gruncie. Jeśli defekt znajduje się w większej odległości – np. kilkuset metrów – efekt będzie ten sam. Fakty te podważają sens klasycznie rozumianego pomiaru potencjału rurociagu, ponieważ dla nowoczesnych izolacji przeciwkorozyjnych dotyczy w zasadzie pojedynczego defektu lub jeśli jest ich więcej – wartości średniej kilku z nich.

Z powyższego rozważania jednoznacznie wynika, że w najogólniejszym przypadku przy bardzo dobrej izolacji przeciwkorozyjnej rurociagu i obecności pojedynczych defektów w powłoce pomiar potencjału w czasie polaryzacji katodowej dotyczy zawsze potencjału $E_{pot.}$ z pełnym omowym spadkiem napięcia IR (por. Rys. 3). Pomiar w takiej sytuacji potencjału $E_{wyt.}$ – po wyłączeniu ochrony katodowej – ma sens jedynie w przypadku umiejscowienia elektrody pomiarowej możliwie blisko defektu w izolacji.

Z punktu widzenia oceny skuteczności ochrony katodowej za najistotniejsze należy uznać poprawne wyznaczenie potencjału $E_{pot.}$ lub różnicy potencjałów $E_{pot.} - E_{stac.}$, czyli

określenie wielkości części A na wykresie przedstawionym na Rys. 2, co jak wykazano powyżej dla współczesnych powłok ochronnych jest niezwykle trudne. Polaryzacja powierzchni metalu w dnie defektu w powłoce (wspomniana część A) wywołana jest przez prąd ochrony katodowej wpływający z ziemi, dokładnie taki sam (dla pojedynczego defektu), który wywołuje spadki napięcia w środowisku, czyli części B i C wykresu. Przy takim prostym rozumowaniu nieoczekiwanie okazuje się, że omowy spadek napięcia IR może być wykorzystany do oceny wielkości polaryzacji katodowej w defekcie. Nie jest on zatem zbędnym błędem pomiarowym, a przeciwnie, przy takim podejściu stanowi bardzo cenną informację i wyłania się potrzeba określenia go możliwie dokładnie ($E_{odl} - E_{pol}$ na Rys. 3). Gdyby więc dla danych warunków można było określić niezbędną wielkość IR, to wtedy – przy założeniu, że wartość potencjału E_{pol} równa jest kryterium potencjałowemu ochrony katodowej w tych warunkach oraz znana jest odpowiadająca temu kryterium gęstość prądu ochronnego – ocenę skuteczności ochrony katodowej można byłoby dokonać na podstawie pomiaru potencjału załączeniowego E_{za} . Oczywiście zaletą takiego rozwiązania jest bardzo prosty i w miarę jednoznaczny pomiar potencjału rurociągu (defektu) względem tzw. ziemi odległej – E_{odl} .

Praktyczne wykorzystanie takiej koncepcji oceny skuteczności ochrony katodowej wymaga jednak dodatkowej znajomości właściwości elektrycznych środowiska i rzeczywistych wymiarów defektu w powłoce. Najkorzystniej, jeśli wielkości te określone byłyby w drodze pomiarów.

Wielkość defektów a skuteczność ochrony

Proporcje pomiędzy poszczególnymi elementami krzywej na Rys. 3. ustalają się w zależności od wartości prądu polaryzującego. W ogólnym zarysie zależą one od rezystancji na granicy faz metal/środowisko, rezystancji środowiska (woda, osady) wewnątrz defektu oraz rezystancji rozptywu prądu w ziemi [25,30,31]. Rezystancje te można opisać następującymi zależnościami (dla defektu o przekroju kołowym):

$$R_p = \frac{4r_p}{\pi d^2}; \quad R_s = \frac{4l\rho_s}{\pi d^2}; \quad R_r = \frac{\rho_g}{2d}$$

gdzie:

R_p, r_p rezystancja i rezystywność w odniesieniu do polaryzacji metalu w dnie defektu izolacji – zwykle rezystancja przeniesienia ładunku (pojemność warstwy podwójnej została pominięta),

R_s, ρ_s rezystancja i rezystywność elektrolitu wewnątrz defektu powłoki,

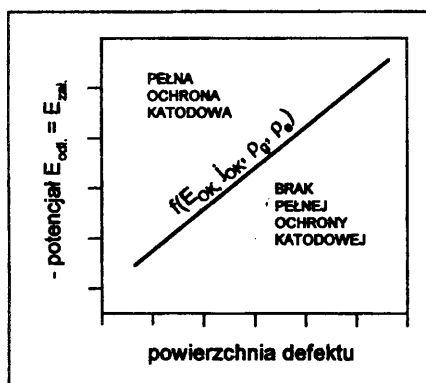
R_r, ρ_g rezystancja rozptywu i rezystywność gruntu,

d, l średnica i głębokość defektu (grubość powłoki przeciwkorozyjnej).

Zjawiska zachodzące na granicy faz metal/środowisko elektrolityczne nie są liniowe, zaś wartość r_p zależy od gęstości prądu polaryzującego i zmienia się w warunkach polaryzacji katodowej. Do powierzchni metalu (w porach i defektach) dociera wodny roztwór elektrolitu glebowego, którego właściwości elektryczne są zazwyczaj inne niż w większej odległości od rurociągu. Ulegają one ponadto zmianie podczas polaryzacji katodowej.

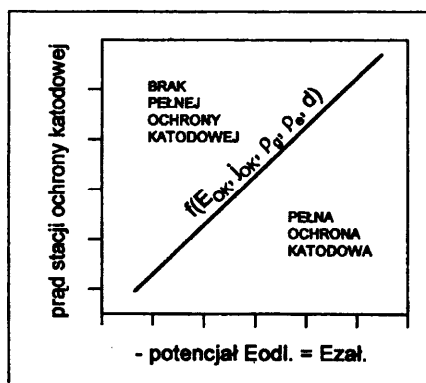
Chcąc zatem oszacować zapisane wyżej rezystancje konieczne są znaczne uproszczenia, ponieważ poza znaną grubością powłoki i zmierzoną rezystywnością gruntu pozostałe wielkości muszą być jedynie oszacowane. Na przykład przy założeniu, że grubość powłoki wynosi 4 mm, średnica pojedynczego defektu wynosi 1 cm², rezystywność gruntu 50 Ω·m, rezystywność elektrolitu w dnie wżeru 5 Ω·m, zaś rezystywność związana z polaryzacją katodową 290 kΩ·cm² [32] to poszczególne składowe będą wynosić odpowiednio: $R_p = 290$ kΩ, $R_s = 200$ Ω, $R_r = 2,2$ kΩ. Wartość omowego spadku napięcia IR można oszacować przy

założeniu określonego natężenia prądu ochrony katodowej w defekcie, co jest możliwe przy znajomości powierzchni defektu i przyjętej gęstości prądu (j_{OK}) niezbędnej do uzyskania pożądanego efektu ochrony katodowej. Konieczność posługiwania się gęstością prądu ochronnego stanowi pewną trudność, ponieważ nie ma ugruntowanych poglądów co do jej wartości w różnych warunkach terenowych, a ponadto w istotny sposób może się zmieniać w czasie [33,34]. Zatem przyjmując, że omowy spadek napięcia IR jest równy różnicy pomiędzy potencjałem pełnej ochrony katodowej stali ($E_{pol.} = E_{OK}$) a potencjałem $E_{odl.}$ podczas pracy stacji ochrony katodowej (równy zazwyczaj $E_{zad.}$), można określić krytyczną zależność tego potencjału od powierzchni defektów. Będą miały na nią wpływ indywidualne warunki pomiaru, ale w najogólniejszym zarysie przyjmuje ona postać jak na Rys. 5.



Rys. 5. Zależność potencjału $E_{odl.}$ od wielkości defektów w powłoce dla określonych: rezystywności gruntu oraz kryterium ochrony (potencjału i gęstości prądu ochrony katodowej).

Z przedstawionego wykresu wynika, że dla określonych warunków potencjał załączeniowy może być z powodzeniem wykorzystywany do oceny skuteczności ochrony katodowej, zaś jego wielkość uzależniona jest między innymi od powierzchni defektu(ów), a więc od jakości powłoki przeciwkorozyjnej. Przy współczesnych technikach badania uszkodzeń izolacji na eksploatowanych rurociągach podziemnych, które umożliwiają detekcję defektów o wymiarach liczonych zaledwie w milimetrach kwadratowych, sposób powyższy wydaje się racjonalny. Również eksploatacja instalacji ochrony katodowej nie wymaga stosowania specjalnych technik pomiarowych, mających na celu ustalenie stopnia polaryzacji katodowej w poszczególnych punktach wzdłuż trasy rurociągu. Na Rys. 6. przedstawiona została orientacyjna zależność pomiędzy prądem instalacji ochrony katodowej a potencjałem załączeniowym.



Rys. 6. Zależność prądu instalacji ochrony katodowej od potencjału $E_{odl.}$ (w miejscu drenazu) dla określonych: rezystywności gruntu oraz kryterium ochrony (potencjału i gęstości prądu ochrony katodowej).

Ponieważ potencjał załączeniowy zależy od wielkości defektów w powłoce i również sumaryczny prąd instalacji ochrony katodowej zależy od nich, zatem powierzchnia istniejących defektów może zadecydować o możliwości osiągnięcia pożądanego efektu ochrony katodowej (zapewnienie ochrony w defektach o największych wymiarach) – jeśli będzie ta powierzchnia zbyt duża, jedynym sposobem może okazać się odkopanie rurociągu i naprawa tych uszkodzeń.

Przedstawione zależności mogą być wykorzystywane do szacowania pracy systemu ochrony katodowej w zależności od jakości pokrycia powierzchni rurociągu izolującą powłoką przeciwkorozyjną. I odwrotnie – osiągane parametry ochrony katodowej mogą posłużyć do oceny jakości powłok przeciwkorozyjnych.

Na uwagę zasługuje fakt, że parametry pracy stacji ochrony katodowej, tzn. jej prąd wyjściowy i napięcie, w mały sposób zależą od wielkości zabezpieczanego obiektu. Niezależnie od średnicy i długości rurociągu o parametrach tych decyduje przede wszystkim ilość i sumaryczna powierzchnia defektów w powłoce przeciwkorozyjnej rurociągu.

Monitorowanie ochrony

Jak z przedstawionych wyżej rozważań wynika, dla nowoczesnych rurociągów stalowych zaopatrzonych w izolację przeciwkorozyjną najnowszej generacji, ocena skuteczności działania ochrony katodowej może dalece odbiegać od sposobów tradycyjnych. Związana jest przede wszystkim z koniecznością wykrywania defektów w izolacji i badania efektu ochronnego w każdym z nich. Jest to konsekwencja stosowania izolacji przeciwkorozyjnych o bardzo dobrych właściwościach elektrycznych. Są one w wielu przypadkach „nadmiarowe” i ograniczają kontrolną funkcję ochrony katodowej, bez której nie jest możliwa bezpieczna eksploatacja obecnie żadnego podziemnego lub podwodnego rurociągu stalowego. Należy koniecznie podkreślić, że narzucona technologia wykonawstwa wysokiej jakości powłok, pociąga za sobą konieczność wykonania złożonych i kosztownych prac pomiarowych, których celem jest zagwarantowanie skutecznego funkcjonowania ochrony przeciwkorozyjnej całego rurociągu.

Wobec omówionych wyżej trudności z określeniem rzeczywistej polaryzacji konstrukcji podziemnej tradycyjnie poprzez pomiar jej potencjału, monitorowanie poprawności pracy instalacji musi być prowadzone w sposób pośredni. Wymaga także znacznie większej wiedzy i umiejętności od ekipy eksploatującej zabezpieczenia przeciwkorozyjne.

Jednym z możliwych sposobów monitorowania skuteczności ochrony katodowej jest posługiwanie się elektrodami symulacyjnymi. Ich zadaniem jest odwzorowanie uszkodzonej powierzchni powłoki izolacyjnej z odsłoniętą (o ustalonych wymiarach) granicą faz metal/środowisko. Umieszczenie w ziemi tego rodzaju elektrod razem z rurociągiem podczas jego budowy zapewnia później możliwość wykonywania za ich pomocą różnego rodzaju pomiarów gwarantujących skuteczną ocenę efektywności ochrony katodowej całego rurociągu. W szczególności, jak to już dawno stwierdzono, możliwe jest dokonanie pomiarów rezystancji elektrody symulacyjnej oraz jej charakterystyki elektrochemicznej [35]. W połączeniu z omówionym wcześniej sposobem oceny skuteczności ochrony katodowej na podstawie wielkości potencjału załączeniowego elektroda symulacyjna może być wykorzystana do monitorowania pracy instalacji ochrony katodowej zarówno w punkcie drenazu jak również na trasie rurociągu. Technika ta jest obecnie coraz szerzej stosowana – głównie do wyznaczania rzeczywistej wartości potencjału rurociągu podczas polaryzacji katodowej [36] – i może także znaleźć wykorzystanie do bezpośredniego monitorowania skuteczności ochrony katodowej [37].

Podsumowanie

Przedstawiona pokrótce dyskusja nad niektórymi zagadnieniami oceny skuteczności ochrony katodowej rurociągów stalowych wyposażonych w bardzo dobrej jakości powłoki przeciwkorozyjne wyraźnie wskazują na powstające nowe problemy techniczne i ekonomiczne związane z bezpieczną eksploatacją tego rodzaju obiektów. Posługiwanie się klasycznymi metodami pomiarowymi, kryteriami i zasadami eksploatacji instalacji ochrony katodowej może okazać się niewystarczające i niezbędne jest nowe podejście do tych zagadnień. Niestety, olbrzymie nakłady na powłoki izolacyjne rurociągów ponoszone podczas ich budowy pociągają za sobą podczas ich użytkowania również bardziej kosztowne techniki badania i eksploatacji systemu ochrony katodowej.

Lokalizacja defektów w powłokach oraz potrzeba określania w nich – zgodnie z klasycznymi kryteriami – skuteczności ochrony katodowej są dość kosztowne i dlatego poszukiwane są prostsze oraz równie funkcjonalne techniki umożliwiające właściwy dobór parametrów ochrony katodowej podczas eksploatacji. Niewątpliwie badania w tym kierunku dopiero się rozwijają. Niniejsza praca zawiera przykłady możliwych dróg zmierzających do rozwiązania tych problemów.

Literatura

- [1]. R.J. Kuhn: *API Proceedings*, 14, 157 (1933).
- [2]. A.W. Peabody: *Control Of Pipeline Corrosion*, NACE, Houston, Texas, 1967.
- [3]. B. Husock: Use of Pipe-to-Soil Potential In Analysing Underground Corrosion Problems, *Corrosion*, 17, 391t (1961).
- [4]. W.G.v. Baeckmann, W.W. Prinz: Kathodischer Korrosionsschutz. Intensivmessungen bei kathodisch geschuetzten Rohrleitungen, *GWF*, 126, 618 (1985).
- [5]. W.W. Prinz: Close-interval Potential Surveys of Buried Pipelines: Methods and Experience, *U.K. CORROSION'86*, p.67, Birmingham 1986.
- [6]. W.W. Prinz, H. Schillo: Over-the-Line Potential Survey Experience, *NACE CORROSION'87*, Paper no 313, 1987.
- [7]. H.Borek, J.M. Leeds: A Practical Comparison of Above Ground Techniques for Coating Defect Delineation, *26 Conference Australasian Corrosion Assoc.*, 17-21, 1986.
- [8]. I. Solomon, G. Cope: The Application of DC Voltage Gradient Surveys for the Maintenance of Buried Pipelines, *Corrosion Australasia*, 15, 9 (1988),
- [9]. I. Solomon: Cost Effective Maintenance Using Modern Coatings Surveys, *NACE CORROSION'89*, Paper no. 416, 1989.
- [10]. J.D. Slatter, M.C. Davidson, J.P. Grapigla, W.T. Wong: DC Voltage Gradient Technique to Assess Coating Defects on Buried Pipelines, *Mater. Perform.* no. 2, p. 35, 1993.
- [11]. J.M. Leeds: Interaction between coatings and CP deserves basic review, *PipeLine&Gas Ind.* no.3, p. 21, 1995.
- [12]. R.L. Pawson: Close Interval potential Surveys – Planing, Execution, results., *NACE CORROSION'97*, Paper no. 575, 1997.
- [13]. J. Polak: Experience with monitoring of the coating quality and efficiency of cathodic protection. *Workshop Corrosion Protection of Pipeline Systems*, Praha 1997.
- [14]. J.C. Marec: Principles Underlying the Method of Determining the True Potentials on Cathodically Protected Underground Steel Pipelines, *NACE CORROSION'98*, Paper no. 675, 1998.

- [15]. W. Sokółski: Izolacje przeciwkorozyjne a ochrona katodowa rurociągów, II Międzynarodowe Sympozjum nt. "Nowoczesne materiały i technologie do zabezpieczania antykorozyjnego rurociągów", Zakopane, 1994.
- [16]. W. Sokółski: Niektóre problemy współpracy izolacji przeciwkorozyjnych z ochroną katodową rurociągów, *PROMOCJE'95, IV Konferencja Naukowo-Techniczna ANTYKOROZJA "Systemy-materiały-powłoki"*, Ustroń-Janaszowiec, 1995.
- [17]. R. Juchniewicz, W. Sokółski: Krytyczna analiza współczesnych technik monitorowania zagrożenia korozyjnego rurociągów, *IV Krajowa Konferencja „Pomiary korozyjne w ochronie elektrochemicznej*, Jurata 1996.
- [18]. W. Sokółski: Model ochrony katodowej dobrze izolowanych rurociągów, *IV Ogólnopolskie Sympozjum Naukowo-Techniczne „Nowe osiągnięcia w badaniach i inżynierii korozyjnej”*, Poraj 1997.
- [19]. W. Sokółski: Niektóre współczesne problemy ochrony katodowej rurociągów, *Konferencja naukowo-techniczna z cyklu nauka i praktyka w walce z korozją*, Kulek/Wąsosz 1998.
- [20]. W. Sokółski: Ochrona katodowa dna defektu w izolacji przeciwkorozyjnej rurociągu, *VI Ogólnopolska Konferencja „KOROZJA '99”*, Częstochowa, 1999, s. 235.
- [21]. W. Sokółski: Ochrona katodowa rurociągów podziemnych. Nowe problemy w strefach oddziaływania prądów błądzących. *Konferencja Naukowo-Techniczna ANTYKOROZJA "Promocje"*, Ustroń-Janaszowiec, 2000.
- [22]. EuRoPolGAZ Warszawa, informacje własne.
- [23]. J.A. Beavers, N.G. Thomson: Corrosion Beneath Disbonded Coatings: A Review., *NACE CORROSION'96*, Paper no. 208, 1996.
- [24]. M. Markiewicz: *Ochrona przed korozją*, 25, 158 (1982).
- [25]. J. Polak: *Katodická protikorozi ochrana a způsoby snižování koroze bludnými proudy*, Chemoprojekt, Praha 1992.
- [26]. W. v. Baeckman, W. Schwenk: *Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes*. Weinheim, Verlag Chemie GmbH 1980.
- [27]. R. Juchniewicz, J. Jankowski, W. Sokółski, J. Walaszkowski: *Ochrona przed Korozją*, 36, 121, (1993).
- [28]. R. Juchniewicz, W. Sokółski, J. Jankowski: Assessment of cathodic protection criteria. *4. Workshop Corrosion Protection of Pipeline Systems*. Praha, 1995.
- [29]. R.A. Gummow: *Mater. Perform.* 8 (1998).
- [30]. J. McCoy: *Mater. Perform.* 2 (1989), p.19.
- [31]. D.A. Diakow, G.J. Van Boven, M.J. Wilmott: *Mater. Perform.* 5 (1998) p.17.
- [32]. R. Juchniewicz, J. Jankowski, S. Krakowiak: Terenowe pomiary impedancji elektrochemicznej stali w wodzie i glebie. *Ochrona przed korozją*, 37, 32 (1994).
- [33]. T.J. Barlo, W.E. Berry: An assessment of the current criteria for cathodic protection of buried steel pipelines. *Mater. Perform.* 8 (1984).
- [34]. C.O. Emenike: Mathematical modeling of cathodic protection systems for oil and gas facilities, *Anti-Corrosion Method and Materials*, 42 (4), 6 (1995).
- [35]. J. Polak: Określenie potencjału polaryzacyjnego rurociągów podziemnych chronionych katodowo. *Ochrona przed korozją*, 22, 309 (1979).
- [36]. T.J. Barlo: Cathodic protection parameters measured on corrosion coupons and pipes buried in the field, *NACE CORROSION'98*, Paper no 661 (1998).
- [37]. K.M. Lawson, N.G. Thompson: The use of coupons for monitoring the cathodic protection of buried structures, *NACE CORROSION'98*, Paper no. 672 (1998).