

## Analiza szybkości korozji stali na podstawie badań korozji czujników korozymetrycznych zainstalowanych w ziemi

### Analysis of the corrosion rate on the basis of corrosion tests of corrosion sensors installed in the ground

Tomasz Minor

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Gazociągi i konstrukcje chronione katodowo mogą być zainstalowane na obiektach złożonych w miejscach, gdzie znajdują się obce konstrukcje, żelbet, bednarka, inne elementy podłączone do oddzielnego systemu ochrony katodowej. Konstrukcje te mogą na siebie oddziaływać w sposób negatywny, nadmiernie polaryzując chronioną konstrukcję lub pobierając z otoczenia większą część prądu dostarczanego z systemu ochrony katodowej. W wielu przypadkach instalacje są zbudowane wiele lat temu, choć zdarza się również, że obecnie projektowane i budowane instalacje ochrony katodowej nieskutecznie chronią konstrukcje. Nie zawsze istnieje możliwość rozbudowy systemu ochrony katodowej lub jego modernizacji. Zwiększenie parametrów stacji ochrony katodowej również może być niemożliwe z uwagi na fakt, że w jednym miejscu parametry z niedostatecznych ulegną poprawie, a w innym – może występować nadmierna polaryzacja. Trudno jest znaleźć wyjście z takiej sytuacji. Montaż elektrod symulujących wraz z elektrodami odniesienia umieszczonymi w ich bezpośredniej bliskości na obiektach złożonych jest najlepszym rozwiązaniem, eliminującym podczas pomiarów wpływ obcych konstrukcji na wartości mierzonego potencjału odłączeniowego, składową omową IR i inne potencjały mogące pojawiać się pomiędzy elektrodą odniesienia a mierzoną konstrukcją. Niestety na obiektach złożonych najczęściej instalacje zbudowane są z lokalnych płytkich uziomów anodowych lub anody kablowej. Elektrody symulujące często umieszczone są w bezpośredniej bliskości uziomów, co może powodować w szybkim tempie pokrywanie się elektrod osadami katodowymi. Elektrody pokryte osadami katodowymi zasklepiają się, co sprawia, że pomiary wykonywane przy ich użyciu stają się niemiernodajne. Innym przykładem może być gazociąg chroniony katodowo, posiadający powłokę izolacyjną niskiej jakości, gdzie poziom tłumienia prądu polaryzacji jest wysoki i zasięg stacji ochrony katodowej jest krótki, co może powodować efekt niskiej polaryzacji gazociągu lub jej braku w miejscach bardziej oddalonych od stacji SOK. W tym przypadku należałoby zainstalować dodatkowe stacje ochrony katodowej w mniejszej odległości od siebie lub – jeśli to możliwe – zwiększyć parametry stacji SOK pracującej na gazociągu. Kolejnym przypadkiem może być sytuacja, gdy do konstrukcji chronionej nie możemy dostarczyć wystarczającej ilości prądu – konstrukcja może nie polaryzować się do wymaganych wartości. We wszystkich powyższych przypadkach w celu uzupełnienia oceny skuteczności ochrony przed korozją można dodatkowo zainstalować rezystancyjne czujniki szybkości korozji, umożliwiające sprawdzenie szybkości korozji chronionych konstrukcji w tych punktach, w których co do wyniku pomiaru mamy wątpliwości, lub w miejscach, gdzie zapewnienie skutecznego poziomu ochrony katodowej jest niemożliwe. Wyniki uzyskane z odczytów czujników korozymetrycznych mogą wykazać, że wbrew wynikom uzyskanym podczas pomiarów skuteczności ochrony katodowej, korozja nie postępuje lub postępuje w bardzo małym stopniu, nie przekraczając dopuszczalnego poziomu. W celu wykonania analizy szybkości korozji stali przeprowadzono badania zależności szybkości korozji od rezystywności gruntu, w jakim stal jest umieszczona, i potencjału, jakim jest polaryzowana. Badania wykonano przy użyciu czujników korozymetrycznych, monitorując szybkość korozji.

**Słowa kluczowe:** szybkość korozji, czujniki korozymetryczne, ochrona katodowa, polaryzacja stali.

**ABSTRACT:** Gas pipelines and cathodically protected structures can be installed within complex objects in places with foreign structures, reinforced concrete, hoop iron, and other elements connected to a separate cathodic protection system. These structures can interact negatively with each other, excessively polarizing the structure to be protected, or drawing most of the current supplied from the cathodic protection system from the ambient environment. In many cases, the installations were built many years ago, although it also happens that currently designed and built cathodic protection installations are inefficient in protecting structures. It is not always possible to extend or modernize the cathodic protection system. Increasing the parameters of the cathodic protection station may also be impossible that as insufficient parameters will improve in one place, while an excessive polarization may occur elsewhere. This situation is difficult to solve. Installation of simulating electrodes with reference electrodes placed in their immediate vicinity within complex objects is

Autor do korespondencji: T. Minor, e-mail: [tomasz.minor@inig.pl](mailto:tomasz.minor@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 20.01.2022 r. Zatwierdzono do druku: 19.07.2022 r.

the best solution, as during measurements it eliminates the influence of foreign structures on the values of the measured disconnection potential, the IR ohmic component and other potentials that may appear between the reference electrode and the measured structure. Unfortunately, in complex facilities, installations are most often built of local shallow anode earth electrodes or a cable anodes. The simulating electrodes are often placed in the immediate vicinity of the earth electrodes, which can quickly cause the electrodes to be covered with cathode deposits. The electrodes covered with cathode deposits stick together, which makes the measurements performed with them unreliable. Another example may be a cathodically protected gas pipeline having a low-quality insulating coating, where the level of polarization current suppression is large and the range of the cathodic protection station is short, which may lead to the effect of low or no polarity of the gas pipeline in places more distant from the SOK station. In this case, additional cathodic protection stations should be installed at a greater spacing or, if possible, the parameters of the SOK station operating on the gas pipeline should be increased. Another case may be when structure may not be polarized to the required values due to lack of possibility to deliver enough current to the protected structure. For all of the above cases, in order to complete the assessment of the effectiveness of corrosion protection, resistance corrosion rate sensors may be additionally installed to check the corrosion rate of the protected structures at those points where the measurement result is questionable, or in places where ensuring an effective level of cathodic protection is impossible. The results obtained from the readings of the corrosion sensors may show that, contrary to the results obtained, corrosion does not progress, or it progresses to a very small extent, not exceeding the permissible level. In order to analyze the corrosion rate of steel, tests of the dependence of the corrosion rate on the resistivity of the soil in which the steel is placed and the potential of which it is polarized were carried out. The tests were carried out with the use of corrosion sensors, monitoring the corrosion rate.

Key words: corrosion rate, corrosion sensors, cathodic protection, steel polarization.

## Wstęp

Korozja metali jest to proces niszczenia metali w wyniku reakcji chemicznych zachodzących w ich strukturze. Reakcje te zachodzą ze składnikami otaczającymi je, lub w wyniku procesów elektrochemicznych. Stalowe elementy ułożone w ziemi narażone są na działanie różnych czynników powodujących korozję. Takimi czynnikami mogą być m.in.:

- agresywny grunt;
- zróżnicowane natlenienie;
- działanie makroogniw korozyjnych;
- korozja mikrobiologiczna;
- prądy błędzące.

## Podział ochrony elektrochemicznej

W zależności od kierunku polaryzacji ochronę elektrochemiczną dzielimy na:

- ochronę katodową – przesunięcia potencjału konstrukcji w kierunku elektroujemnym – stosowaną głównie w przypadku konstrukcji stalowych ułożonych w ziemi lub wodzie do ochrony zewnętrznych nieosłoniętych powierzchni stali, kabli i innych konstrukcji narażonych na korozję;
- ochronę anodową – przesunięcia potencjału konstrukcji w kierunku elektrododatnim – stosowaną do zabezpieczenia wewnętrznych powierzchni instalacji przemysłowych poprzez doprowadzenie tej powierzchni do stanu pasywacji.

W przypadku polaryzacji anodowej zmiana potencjału konstrukcji metalowej następuje w kierunku dodatnim, zaś w polaryzacji katodowej – w kierunku ujemnym (Skiba-Rogalska, 1991).

## Podział ochrony katodowej

Ochronę katodową możemy podzielić na:

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

Ochronę za pomocą anod galwanicznych realizujemy poprzez przyłączenie do chronionej konstrukcji elektrody wykonanej z metalu o bardzo elektroujemnym potencjale. Pomiędzy elektrodą (anodą) a konstrukcją powstaje ogniwo, którego siła elektromotoryczna jest źródłem prądu polaryzacji katodowej potrzebnego do zahamowania procesu korozyjnego.

Kolejnym sposobem jest ochrona katodowa z użyciem zewnętrznego źródła prądu stałego, służącego do polaryzacji chronionej konstrukcji.

Ochrona ta jest stosowana w gruntach o dowolnej rezystywności oraz do ochrony konstrukcji wymagających większych prądów ochrony. Wadą tego podejścia jest to, że wymaga ono zasilania z obcego źródła, co zwiększa koszty ochrony katodowej. System ochrony katodowej z zewnętrznym źródłem zasilania składa się z dwóch obwodów:

- polaryzującego – źródło prądu, chroniona konstrukcja, anoda pomocnicza umieszczona w odpowiedniej zasypce;
- kontrolnego – przyłącze potencjałowe, elektroda odniesienia.

Trzecią metodą jest ochrona katodowa z zastosowaniem drenaży elektrycznych. Metoda ta chroni konstrukcję przed prądami błędzącymi i polega na odprowadzeniu niepożądanych prądów błędzących z konstrukcji chronionej do źródła powstania tych prądów drogą przewodową. W obwód pomiędzy szynę trakcyjną a konstrukcję wmontowany jest często prostownik lub przełącznik spolaryzowany zabezpieczający przed ewentualną zmianą kierunku przepływu prądu.

**Kryteria ochrony katodowej**

Podstawowym kryterium ochrony katodowej metalowej konstrukcji jest wartość potencjału tej konstrukcji, mierzonego względem elektrody odniesienia Cu/nas. CuSO<sub>4</sub> umieszczonej w tym samym środowisku elektrolitycznym, blisko badanej konstrukcji. Wartość potencjału, przy którym uzyskamy ochronę, jest zależna od rodzaju metalu. Na podstawie badań ustalono kryteria ochrony katodowej, po których spełnieniu następuje zmniejszenie szybkości procesu korozyjnego do nieznacznych wartości. Jeżeli potencjał stali na granicy faz metal–elektrolit jest równy –0,85 V względem elektrody odniesienia miedź/nasycony siarczan miedzi (Cu/nas. CuSO<sub>4</sub>), to poziom szybkości korozji wynosi 10 μm/rok i jest ona 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 ona ułożona, a także jej stanu technicznego.

Zgodnie z normą PN-EN 12954:2019 kryteria ochrony katodowej są uzależnione od rezystywności gruntu w jakim gazociągi są umieszczone i od innych czynników takich jak temperatura pracy gazociągu i agresywność gruntu (PN-EN 12954:2019). W uproszczeniu można przyjąć wartości:

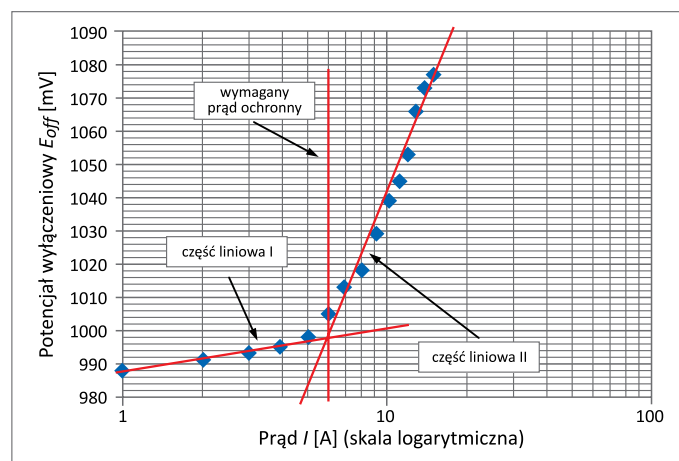
$$\begin{aligned} \rho < 30 \Omega\text{m} &\rightarrow E_p = -950 \text{ mV} \\ 30 < \rho < 100 \Omega\text{m} &\rightarrow E_p = -850 \text{ mV} \\ 100 < \rho < 1000 \Omega\text{m} &\rightarrow E_p = -750 \text{ mV} \\ \rho > 1000 \Omega\text{m} &\rightarrow E_p = -650 \text{ mV} \end{aligned}$$

Nie jest to jedyne kryterium stosowane w ochronie katodowej. Zaleca się również kryterium przesunięcia potencjału konstrukcji od wartości potencjału spoczynkowego w stronę ujemną przynajmniej o 0,3 V lub kryterium minimum 100 mV depolaryzacji konstrukcji w czasie do 1 godziny, mierzonej na elektrodach symulujących, a w przypadku orurowań odwiertów – maksymalnie 100 mV depolaryzacji konstrukcji chronionej w czasie minimum 1 godziny od wyłączenia ochrony katodowej.

Spełnienie wymagań przedstawionych w normie może nie być możliwe, 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 z normy PN-EN 14505:2007 dotyczącej obiektów złożonych. Metody pomiarowe w ochronie katodowej oraz wykorzystanie elektrod symulujących zostały opisane we wcześniejszych publikacjach (Minor, 2015; Stochaj i Minor, 2016). Te kryteria odnoszą się do granicy faz stal–grunt lub stal–woda. Jedną z alternatywnych metod w przypadku, kiedy nie ma możliwości uzyskania określonego potencjału ochrony  $E_p$  stali, jest przesunięcie potencjału  $E_p$  w kierunku elektroujemnym, czyli

spolaryzowanie stali o 100 mV w stosunku do potencjału  $E_{cor}$  spoczynkowego. Może to jednak nie zapewnić zmniejszenia szybkości korozji poniżej kryterium 10 μm/rok. Metoda ta nie jest również polecana w przypadku agresywnych gruntów i temperatury pracy gazociągu powyżej 40°C, zgodnie z normą PN-EN 12954:2019, p. 6.3.1.

Innym kryterium jest kryterium zapotrzebowania prądu. Jest ono stosowane głównie 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 (rysunek 1).



**Rysunek 1.** Krzywa  $E(\log I)$

**Figure 1.** Curve  $E(\log I)$

Prąd ochrony wyznaczany tą metodą jest większy niż rzeczywiste zapotrzebowanie prądu. Spowodowane jest to tym, że po dłuższym okresie polaryzacji chronione defekty pokrywają się warstwą osadów, jak również wynika z ograniczonego dostępu tlenu do głęboko położonych części orurowania. Prosta II 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 I i II (PN-EN 15112:2007).

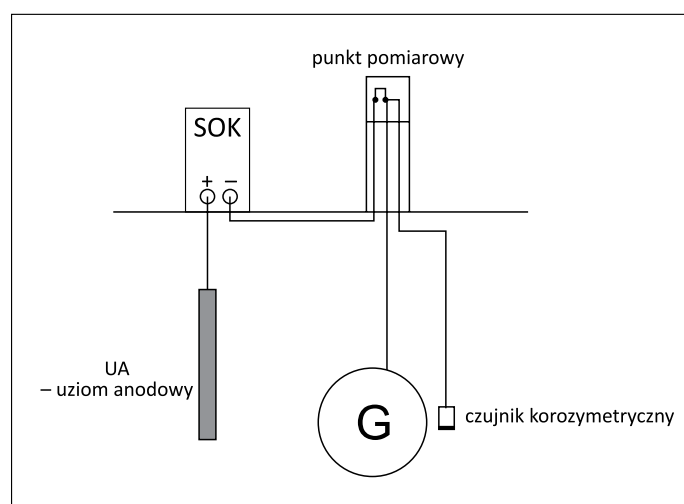
Brak spełnienia kryterium potencjałowego nie zawsze świadczy o nieskutecznej ochronie. Ocena skuteczności ochrony przed korozją może być utrudniona lub niemiarodajna z uwagi na brak zainstalowanych elektrod symulujących, szczególnie na obiektach złożonych w pobliżu obcych konstrukcji, w przypadku gdy elektrody te są niesprawne lub pokryły się produktami katodowymi czy też produktami korozji. W efekcie mierzony potencjał wyłączeniowy lub odłączeniowy może być zbyt mało elektroujemny. Niewystarczający zasięg ochrony katodowej może również przyczynić się do zbyt słabej polaryzacji stali.

We wszystkich tych przypadkach, kiedy ocena zebranych wyników jest trudna, a rozbudowa systemu ochrony katodowej niemożliwa, do oceny szybkości korozji zainstalowanych w gruncie konstrukcji można użyć czujników korozymetrycznych.

### Korozymetria rezystancyjna

Czujniki szybkości korozji są wykorzystywane w szerokim zakresie. Stosuje się je do oceny szybkości korozji konstrukcji stalowych umieszczonych w betonie, w wodzie oraz w podziemnych konstrukcjach stalowych. Montuje się je w strefach gdzie występują zagrożenia związane z prądami błędzającymi pochodzącymi od trakcji kolejowych, linii wysokiego napięcia, a także w miejscach gdzie spełnienie kryteriów skutecznej ochrony przed korozją jest utrudnione.

Czujniki te montuje się w pobliżu chronionej konstrukcji i łączy się z nią w punkcie pomiarowym (rysunek 2).



**Rysunek 2.** Schemat podłączenia czujnika do konstrukcji chronionej

**Figure 2.** Diagram of sensor connection to the protected structure

Na podstawie zmian rezystancji eksponowanej powierzchni czujnika przyrząd pomiarowy oblicza szybkość korozji czujnika podaną w wybranych jednostkach, zazwyczaj w  $\mu\text{m}/\text{rok}$ .

Problematyka oceny skuteczności ochrony katodowej, szczególnie wykorzystywanie korozymetrii rezystancyjnej, była opisywana przez kilku autorów.

W artykule Stochaja (2012) omówiono problemy związane z miarodajną oceną skuteczności ochrony katodowej konstrukcji umieszczonych w gruncie oraz problem monitoringu szybkości korozji. Opisano coraz częściej stosowaną metodę korozymetrii rezystancyjnej.

W innej pracy (Fiedorowicz i Jagiełło, 2010) autorzy podali zasady stosowania korozymetrii rezystancyjnej w badaniach korozji i skuteczności ochrony podziemnych rurociągów.

Przedstawili wyniki uzyskane za pomocą czujników korozymetrycznych przez okres wielu lat w 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 ochrony katodowej i z ochroną katodową, odcinki rurociągów poddane oddziaływaniom prądów błędzających.

W pracy z 2008 r. Jankowski i Sokólski opisali technikę korozymetrii rezystancyjnej i możliwości jej wykorzystania do monitorowania skuteczności ochrony katodowej. Przedstawiono przykładowe wyniki wykonanych przez okres 13 lat pomiarów rurociągów chronionych katodowo.

W kolejnej pracy (Jankowski i Sokólski, 2015) przedstawili wybrane wyniki długoterminowych pomiarów szybkości korozji stali w ziemi w pobliżu zakopcowanych zbiorników chronionych katodowo. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem korozymetrii rezystancyjnej przy użyciu czujników o powierzchni  $10\text{ cm}^2$  zainstalowanych w gruncie piaszczystym. Mierzono ubytki korozyjne w okresie 3 lat przed zastosowaniem ochrony katodowej zbiorników oraz około 4 lat po jej załączeniu zarówno dla stali polaryzowanej katodowo, jak i swobodnie korodującej.

Stachowicz (2011) w swoim artykule poruszyła problematykę korozji orurowań rur wydobywczych wraz z metodami jej zmniejszenia.

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

Natomiast Bazhenov et al. (2017) opisali problem oceny korozji wewnętrznych ścianek rurociągów. Autorzy skupili się głównie na metodyce, umożliwiającej zbadanie korozji wewnętrznej ścianek rurociągów bez konieczności przerywania ich pracy.

### Nadmierna polaryzacja – zjawiska niekorzystne

Podczas stosowania ochrony katodowej może wystąpić również mało pożądane zjawisko związane z polaryzacją stali. Tym zjawiskiem jest nadmierna polaryzacja stali, tj. przesunięcie potencjału stali w kierunku zbyt elektroujemnym.

Ochrona katodowa (elektrochemiczna ochrona) zabezpiecza przed korozją miejsca, w których powstał defekt w powłoce izolacyjnej, jednak zapewnienie bezpiecznych parametrów systemu ochrony katodowej może być w wielu przypadkach utrudnione. Jednym z takich przypadków jest spadek potencjału (wzrost w kierunku elektroujemnym) ponad bezpieczną granicę  $E_p = -1,20\text{ V}$  lub w niektórych źródłach:  $-1,15\text{ V}$ . Uważa się,



że przy tej wartości rozpoczyna się proces wodorowania oraz może występować odpajanie powłoki od stali. Nadmierne ujemne wartości potencjału  $E_p$  mogą pojawiać się w miejscach bezpośredniej bliskości uziomu anodowego. Sytuacja taka może występować szczególnie na terenach obiektów złożonych, takich jak np. tłocznie gazu, czy na starych gazociągach z powłoką o niskiej jakości, gdzie tłumienie potencjału jest duże, a wartość potencjału w miejscu podłączenia stacji do rurociągu jest bardzo elektroujemna. Obniżony potencjał może również wystąpić w miejscach wysokiego oddziaływania prądów błądzących pochodzących od elektrycznej trakcji kolejowej.

**Odspojenie katodowe**

Odspojenie powłoki od stali może powodować powstawanie korozji podpowłokowej na skutek braku przepływu prądu ochrony katodowej pod powierzchnią powłoki (rysunek 3).



**Rysunek 3.** Widoczny efekt wodorowania przy potencjale poniżej  $-1420$  mV (fot. T. Minor)

**Figure 3.** Visible hydrogenation effect at a potential below  $-1420$  mV (Photo by T. Minor)

**Kruchość wodorowa**

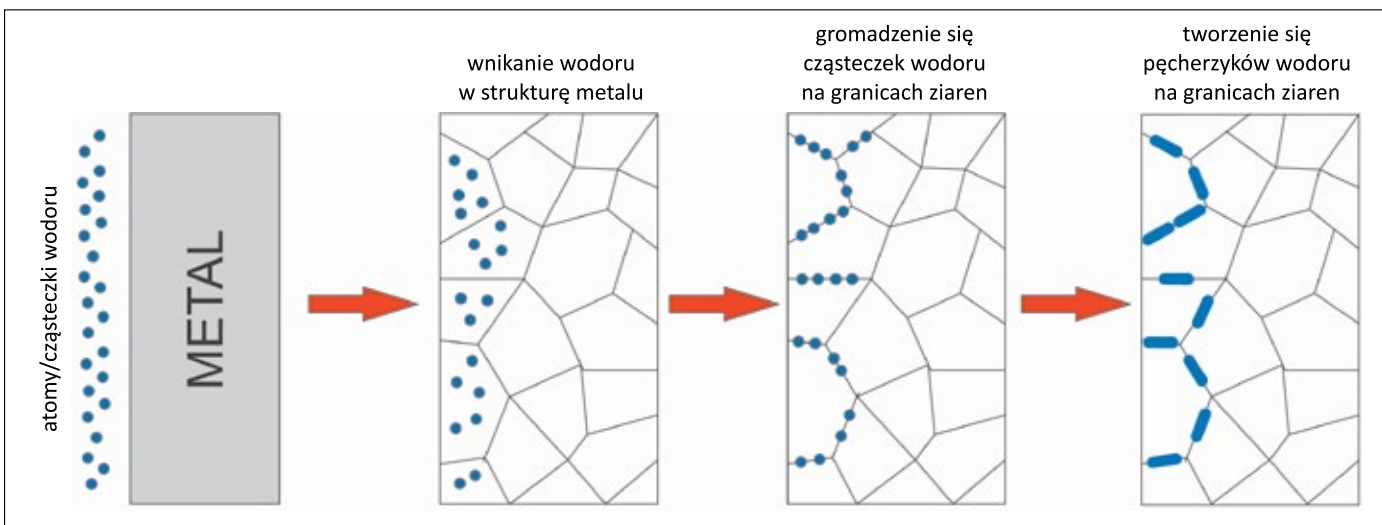
Pękanie wodorowe, zwane również kruchością wodorową, jest zjawiskiem związanym z dyfundowaniem wodoru w postaci atomowej. Aby to zjawisko wystąpiło spełnione musi zostać szereg warunków, m.in.:

- obecność i dyfuzja atomów lub jonów wodoru;
- podatny materiał;
- naprężenie.

Kruchość wodorowa to utrata plastyczności metalu i zmniejszenie zdolności do przenoszenia obciążeń z powodu absorpcji atomów lub cząsteczek wodoru przez metal. W wyniku kruchości wodorowej elementy pękają przy naprężeniach mniejszych niż granica plastyczności metalu. W temperaturze pokojowej atomy wodoru mogą być absorbowane przez stopy stali węglowej. Zaabsorbowany wódór może występować w postaci atomowej lub cząsteczkowej. Po odpowiednim czasie wódór dyfunduje do granic ziaren metalu i tworzy pęcherzyki na tych granicach, odwęglając stal. Pęcherzyki te wywierają nacisk na ziarna metalu. Ciśnienie może wzrosnąć do poziomów, w których metal ma zmniejszoną plastyczność i wytrzymałość.

Uważa się, że zjawisko wodorowania może być szczególnie niebezpieczne w przypadku zastosowania stali o wysokiej wytrzymałości i może prowadzić do pęknięcia wodorowego. Na pękanie wodorowe mogą być również narażone stalowe rurociągi transportujące wódór lub mieszaniny gazów zawierające wódór. Przyjęto, że najbardziej narażone na pękanie wodorowe są stale o wytrzymałości powyżej  $1000$  MPa (Hydrogen Embrittlement of Steel, 2016).

Na rysunku 4 przedstawiono mechanizm powodujący pękanie wodorowe. Szczegółowo proces kruchości wodorowej zachodzącej w stalach opisany został w wielu publikacjach (m.in.: Capelle et al., 2008; Pietkun-Greber i Janka, 2010, 2011; Jasiński, 2012).



**Rysunek 4.** Mechanizm pęknięcia wodorowego (opracowano na podstawie: Hydrogen Embrittlement of Steel, 2016)

**Figure 4.** Mechanism of hydrogen fracture (developed on the basis of: Hydrogen Embrittlement of Steel, 2016)

## Badania

Na potrzeby wykonania analizy szybkości korozji konstrukcji stalowych umieszczonych w gruntach o różnej rezystywności oraz polaryzowanych różnymi wartościami potencjałów przygotowano specjalne stanowiska badawcze – siedem osobnych instalacji, podzielonych na cztery części I–IV. W każdej części umieszczono glebę o różnej rezystywności uzyskaną poprzez zmieszanie gleby niskoomowej i piasku wysokoomowego. Rezystywności mieściły się w zakresach:

- I:  $r < 30 \Omega\text{m}$ ;
- II:  $30 < r < 100 \Omega\text{m}$ ;
- III:  $100 < r < 1000 \Omega\text{m}$ ;
- IV:  $r > 1000 \Omega\text{m}$ .

Sześć z siedmiu instalacji było polaryzowanych potencjałem o określonej wartości, który wynosił:

- $E = -650 \text{ mV}$ ;
- $E = -750 \text{ mV}$ ;
- $E = -850 \text{ mV}$ ;
- $E = -950 \text{ mV}$ ;
- $E = -1250 \text{ mV}$ ;
- $E = -2000 \text{ mV}$ ,

a jedna instalacja nie miała podłączonych urządzeń polaryzujących:

- $E_k$  – potencjał spoczynkowy.

W gruncie umieszczony został czujnik korozymetryczny (rysunek 5), podłączony do urządzenia polaryzującego. Pomiar szybkości korozji prowadzony był od lipca 2020 r. do października 2021 r. w odstępach czasowych około 3 miesiące.



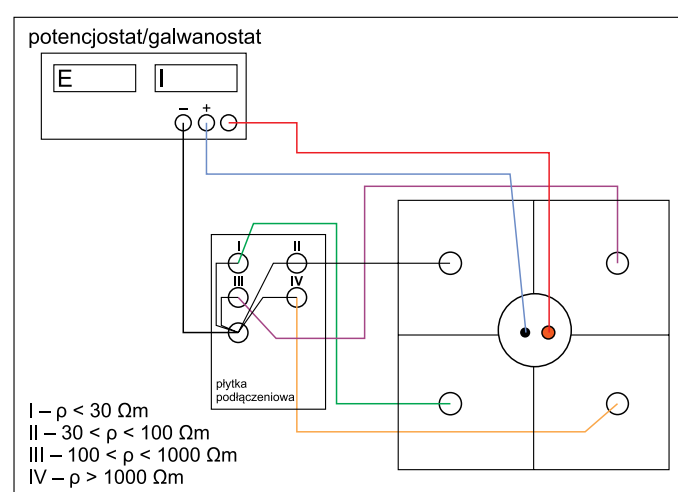
**Rysunek 5.** Widok powierzchni eksponowanej nowego czujnika korozymetrycznego (fot. T. Minor)

**Figure 5.** View of the exposed surface of the new corosimetric sensor (Photo by T. Minor)

Użyte czujniki mają powierzchnię pomiarową  $2 \text{ cm}^2$ , a grubość elementu pomiarowego wynosi  $0,8 \text{ mm}$  i  $1,0 \text{ mm}$ . Czujniki o grubości  $0,8 \text{ mm}$  zostały zamontowane na stanowiskach podłączonych do urządzeń polaryzujących (potencjostatów), natomiast czujniki o grubości  $1,0 \text{ mm}$  zostały zainstalowane na stanowisku bez podłączonej ochrony katodowej z uwagi na możliwość wystąpienia szybszej korozji.

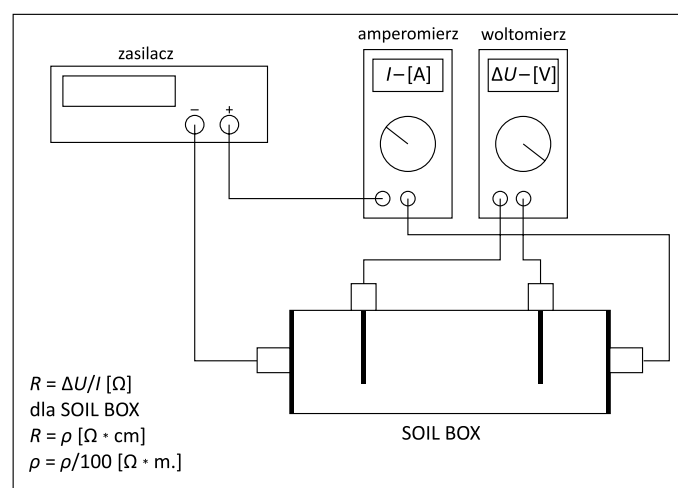
## Konstrukcja stanowisk badawczych

Rysunek 6 przedstawia schemat połączeń stanowiska badawczego.



**Rysunek 6.** Schemat stanowiska badawczego

**Figure 6.** Diagram of the test stand



**Rysunek 7.** Schemat połączeń SOILBOX przy pomiarze rezystywności gruntu;  $\Delta U$  – mierzony spadek napięcia pomiędzy elektrodami pomiarowymi [V],  $I$  – mierzony prąd [A],  $R$  – wyliczona rezystancja [Ω],  $\rho$  – wyliczona rezystywność gruntu [Ω · m]

**Figure 7.** Diagram of SOILBOX connections when measuring soil resistivity;  $\Delta U$  – measured voltage drop between the measuring electrodes [V],  $I$  – measured current [A],  $R$  – calculated resistivity [Ω],  $\rho$  – calculated soil resistivity [Ω · m]

**Przeprowadzenie badań**

Przed zamontowaniem czujników zmierzono zostało pH gruntu oraz jego rezystywność. pH zmierzono przy użyciu pehametru CP-104, umieszczając pehametr bezpośrednio w gruncie. Z uwagi na fakt, że grunt był mieszany w tych samych proporcjach, pH dla tych samych rezystywności nie różnił się. Pomiar rezystywności gruntu wykonywany był metodą techniczną laboratoryjną przy użyciu specjalnego pojemniczka SOILBOX. Konstrukcja pojemnika pozwalała na bezpośredni pomiar, w wyniku którego wyliczona rezystancja odpowiada rezystywności mierzonego gruntu w  $\Omega \cdot \text{cm}$ .

Na rysunku 7 przedstawiono schemat połączeń SOILBOX z zasilaczem, woltomierzem i amperomierzem.

Wyniki pH i zmierzonej rezystywności gruntu przedstawiono w tabeli 1.

Jak widać w tabeli 1, wyniki pomiarów pH świadczą o obojętnym odczynie gruntu, a rzeczywiste wartości rezystywności gruntu mieszczą się w określonych przedziałach, chociaż w niektórych przypadkach na ich granicy. Utrzymanie stałej wilgotności gruntu było utrudnione i nie zawsze udało się ją zachować.

**Pomiar prądu i potencjału polaryzacji**

Polaryzacja czujników odbywała się przy użyciu potencjostatów pracujących przy stałym zadanym potencjale. Zadany potencjał względem czterech czujników utrzymywany był w sposób automatyczny – poprzez automatyczną regulację prądu polaryzacji. Mogło to mieć jedną wadę, a mianowicie prąd polaryzujący czujniki mógł w niewystarczającym stopniu

**Tablica 1.** Wyniki pomiarów pH i rezystywności gruntu

**Table 1.** Results of soil pH and resistivity measurements

Nr czujnika	Założony potencjał polaryzacji, $E$ [mV]	Założona rezystywność gruntu [ $\Omega\text{m}$ ]	pH gruntu (07.2020 r.)	Rezystywność gruntu w dniu montażu (07.2020 r.) [ $\Omega\text{m}$ ]
1574/20	-650	$g < 30$	6,9	25
1575/20	-650	$30 < g < 100$	6,2	60
1576/20	-650	$100 < g < 1000$	6,7	300
1577/20	-650	$g > 1000$	4,9	1500
1578/20	-750	$g < 30$	6,9	25
1579/20	-750	$30 < g < 100$	6,2	60
1580/20	-750	$100 < g < 1000$	6,7	300
1581/20	-750	$g > 1000$	4,9	1500
1582/20	-850	$g < 30$	6,9	25
1583/20	-850	$30 < g < 100$	6,2	60
1584/20	-850	$100 < g < 1000$	6,7	300
1585/20	-850	$g > 1000$	4,9	1500
1586/20	-950	$g < 30$	6,9	25
1587/20	-950	$30 < g < 100$	6,2	60
1588/20	-950	$100 < g < 1000$	6,7	300
1589/20	-950	$g > 1000$	4,9	1500
1590/20	-1250	$g < 30$	6,9	25
1591/20	-1250	$30 < g < 100$	6,2	60
1592/20	-1250	$100 < g < 1000$	6,7	300
1593/20	-1250	$g > 1000$	4,9	1500
1594/20	-2000	$g < 30$	6,9	25
1595/20	-2000	$30 < g < 100$	6,2	60
1596/20	-2000	$100 < g < 1000$	6,7	300
1597/20	-2000	$g > 1000$	4,9	1500
1598/20	$E_k$	$g < 30$	6,9	25
1599/20	$E_k$	$30 < g < 100$	6,2	60
1600/20	$E_k$	$100 < g < 1000$	6,7	300
1601/20	$E_k$	$g > 1000$	4,9	1500

dopływać do czujników umieszczonych w gruntach o wyższej rezystywności. Pomiar potencjału odbywał się względem połączonych ze sobą czujników i w przypadku pracy automatycznej urządzenia jako potencjał referencyjny  $E_{on}$  brany był potencjał zmierzony względem wszystkich czterech czujników łącznie. Pomiar potencjałów odbywał się trzykrotnie w ciągu całego okresu.

Pomiar prądu i potencjału wykonano za pomocą multimetrów z funkcją rejestracji. Urządzenia polaryzujące pracowały w trybie pracy przerywanej z zastosowaniem przerywaczy bezstykowych. Mierzono potencjał załączeniowy  $E_{on}$  czujników oraz odłączeniowy  $E_{off}$  czujników. Zebrane wyniki pomiarów potencjałów  $E_{on}$ ,  $E_{off}$  i  $E_k$  przedstawia tabela 2. Zarejestrowane wyniki wartości potencjału wyraźnie pokazują, że im wyższa

rezystywność gruntu, tym wolniej następuje polaryzacja czujnika lub czujnik polaryzuje się w bardzo małym stopniu. Niskie wartości potencjału polaryzującego  $-650$  mV,  $-750$  mV polaryzują czujnik w zasadzie tylko w gruncie o rezystywności poniżej  $30 \Omega m$ , i to w bardzo małym stopniu. Potencjał polaryzujący o wartości  $-850$  mV oraz potencjał  $-950$  mV w gruncie  $<30 \Omega m$  nie były w stanie spolaryzować czujników do wartości kryterium potencjałowego.

Zauważalne jest również niekorzystne zjawisko w przypadku czujników polaryzowanych potencjałem  $-2000$  mV, mianowicie potencjał odłączeniowy wynosi aż od  $-1415$  mV do  $-1500$  mV. Wartość ta znacząco przekracza bezpieczny poziom  $-1200$  mV, co może w tym przypadku wywoływać efekt wodorowania stali i odspajania powłoki ochronnej w miejscach

**Tabela 2.** Wartości potencjałów  $E_{on}$  i  $E_{off}$  oraz wartości prądu polaryzacji każdego czujnika na końcu procesu polaryzacji

**Table 2.** The values of the  $E_{on}$  and  $E_{off}$  potentials as well as the values of the bias current of each sensor at the end of the polarization process

Nr czujnika	Potencjał polaryzacji, $E$ [mV]	10.2021 r.			Rezystywność gruntu [ $\Omega m$ ]	Średnia zmierzona rezystywność gruntu [ $\Omega m$ ]	Średnia obliczona szybkość korozji [ $\mu m/rok$ ]
		$I$ [ $\mu A$ ]	potencjał $E_{on}$ [mV]	potencjał $E_{off}$ [mV]			
1574/20	-650	3,93	-651	-645	$q < 30$	15,0	9,63
1575/20	-650	2,43	-652	-622	$30 < q < 100$	84,2	6,61
1576/20	-650	7,50	-649	-534	$100 < q < 1000$	748,1	2,48
1577/20	-650	7,05	-649	-517	$q > 1000$	5307,6	1,54
1578/20	-750	1,87	-749	-735	$q < 30$	17,1	0,22
1579/20	-750	4,44	-739	-600	$30 < q < 100$	82,7	0,22
1580/20	-750	3,55	-748	-627	$100 < q < 1000$	469,3	0,86
1581/20	-750	14,01	-742	-571	$q > 1000$	4630,6	0,12
1582/20	-850	13,60	-850	-820	$q < 30$	22,2	0,60
1583/20	-850	3,33	-855	-822	$30 < q < 100$	82,4	1,43
1584/20	-850	9,42	-852	-604	$100 < q < 1000$	511,1	0,23
1585/20	-850	7,016	-853	-624	$q > 1000$	2709,3	0,44
1586/20	-950	3,74	-949	-769	$q < 30$	18,1	0,98
1587/20	-950	1,33	-951	-860	$30 < q < 100$	83,1	0,61
1588/20	-950	6,55	-947	-877	$100 < q < 1000$	349,0	0,79
1589/20	-950	9,18	-945	-769	$q > 1000$	1189,3	0,53
1590/20	-1250	4,29	-1247	-1068	$q < 30$	16,8	0,56
1591/20	-1250	8,09	-1247	-1038	$30 < q < 100$	73,9	0,37
1592/20	-1250	16,30	-1242	-1058	$100 < q < 1000$	398,8	0,71
1593/20	-1250	41,73	-1229	-927	$q > 1000$	1868,1	0,50
1594/20	-2000	9828	-1944	-1435	$q < 30$	16,5	0,81
1595/20	-2000	4979	-1926	-1450	$30 < q < 100$	76,1	0,36
1596/20	-2000	3008	-1965	-1415	$100 < q < 1000$	256,6	1,08
1597/20	-2000	733	-1944	-1500	$q > 1000$	1403,5	0,63
1598/20	Ek	-	-573	-573	$q < 30$	13,9	128,80
1599/20	Ek	-	-492	-492	$30 < q < 100$	79,0	49,71
1600/20	Ek	-	-444	-444	$100 < q < 1000$	306,0	41,82
1601/20	Ek	-	-338	-338	$q > 1000$	1603,8	35,83

kolor czerwony: brak spełnienia kryterium potencjałowego  $E_{off}$ ; kolor niebieski: nadmierna polaryzacja próbki



defektów powłoki na gazociągu. Na rysunku 8 widać możliwe miejsca odspajania się materiału wokół elementu stalowego (zaznaczone kolorem czerwonym) w czujniku polaryzowanym potencjałem  $-2000$  mV.



**Rysunek 8.** Widok czujnika polaryzowanego potencjałem  $-2000$  mV

**Figure 8.** View of the sensor polarized with potential  $-2000$  mV

### Pomiar szybkości korozji

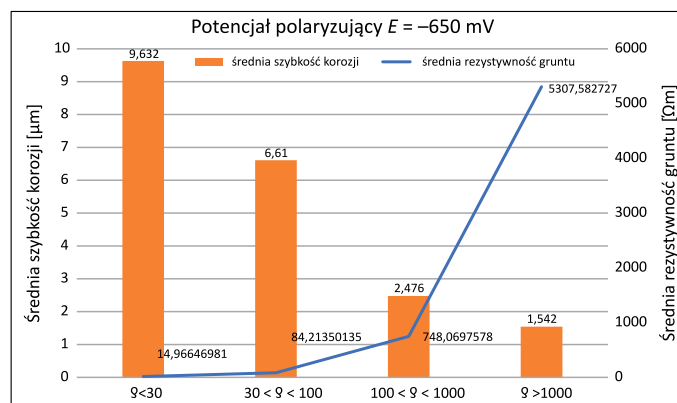
Pomiary szybkości korozji wykonane zostały przy użyciu dedykowanego miernika szybkości korozji ATLAS 1001 COR oraz oprogramowania PCcorrER, które umożliwia odczyt danych z miernika, wizualizację wyników oraz archiwizację wyników na komputerze.

Dopuszczalna szybkość korozji zgodnie z p. 6.2 normy PN-EN 12954:2019 nie powinna przekraczać  $10 \mu\text{m}/\text{rok}$ .

Na podstawie uzyskanych wyników, przedstawionych na wykresach (rysunki 9–15), największe procesy korozji zachodzą przy braku polaryzacji czujników oraz w przypadku czujników polaryzowanych potencjałem  $-650$  mV.

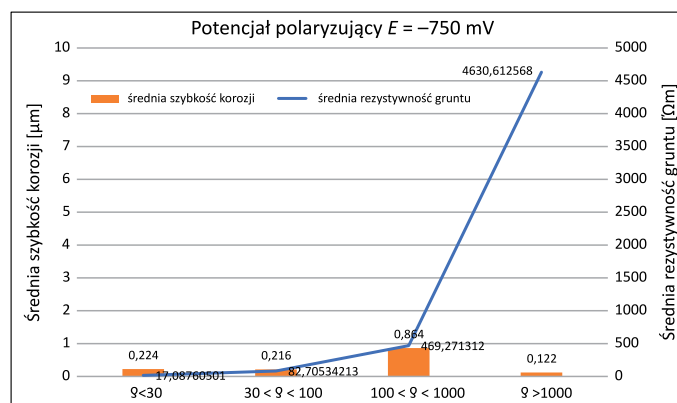
Rysunek 16 przedstawia zestawienie średniej szybkości korozji zarejestrowanej na wszystkich 28 czujnikach korozymetrycznych.

Czujniki, na których odczytano większą szybkość korozji niż dopuszczalna  $10 \mu\text{m}/\text{rok}$ , są zainstalowane w warunkach bez ochrony katodowej, niepolaryzowane. Czujnik polaryzowany potencjałem  $-650$  mV umieszczony w gruncie o niskiej rezystywności ( $<30 \Omega\text{m}$ ) wykazał szybkość korozji bardzo bliską dopuszczalnej granicy. W pozostałych przypadkach pojawiła się niewielka szybkość korozji, jednak nie przekraczała ona przyjętego kryterium.



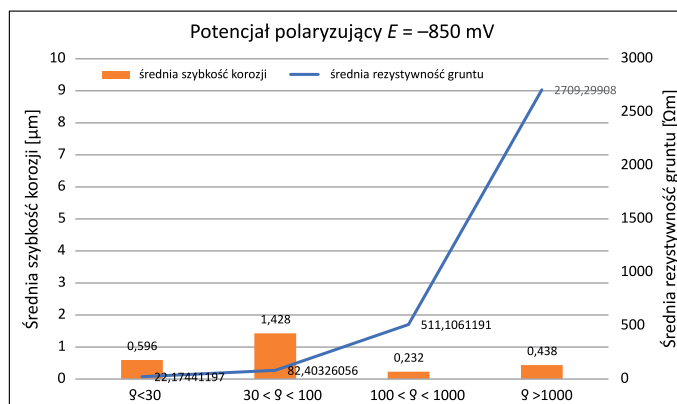
**Rysunek 9.** Wykres średniej szybkości korozji [ $\mu\text{m}$ ] czujników polaryzowanych potencjałem  $-650$  mV w odniesieniu do średniej rezystywności gruntu

**Figure 9.** Graph of the average corrosion rate [ $\mu\text{m}$ ] of sensors polarized with the potential  $-650$  mV in relation to the average soil resistivity



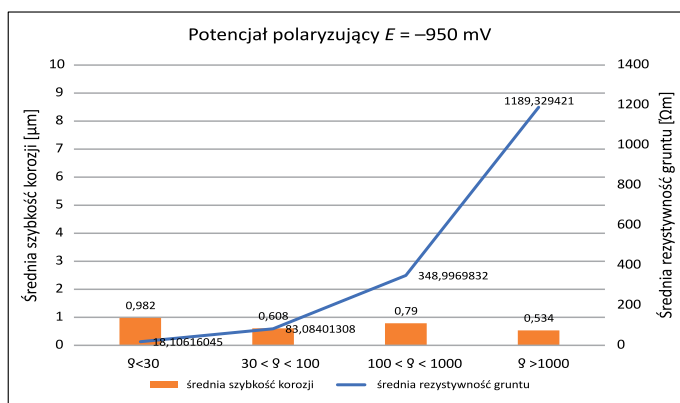
**Rysunek 10.** Wykres średniej szybkości korozji [ $\mu\text{m}$ ] czujników polaryzowanych potencjałem  $-750$  mV w odniesieniu do średniej rezystywności gruntu

**Figure 10.** Graph of the average corrosion rate [ $\mu\text{m}$ ] of sensors polarized with the potential  $-750$  mV in relation to the average soil resistivity



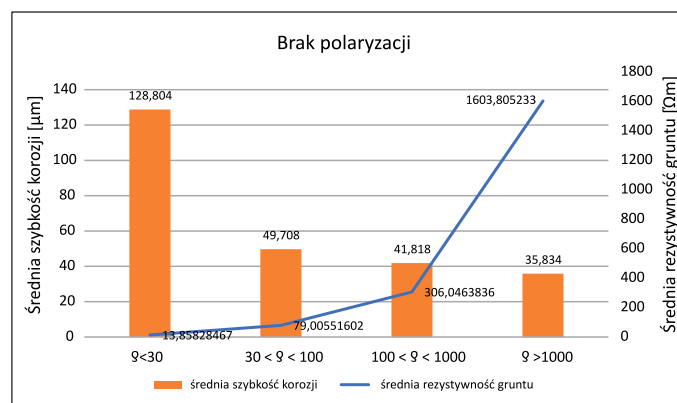
**Rysunek 11.** Wykres średniej szybkości korozji [ $\mu\text{m}$ ] czujników polaryzowanych potencjałem  $-850$  mV w odniesieniu do średniej rezystywności gruntu

**Figure 11.** Graph of the average corrosion rate [ $\mu\text{m}$ ] of sensors polarized with the potential  $-850$  mV in relation to the average soil resistivity



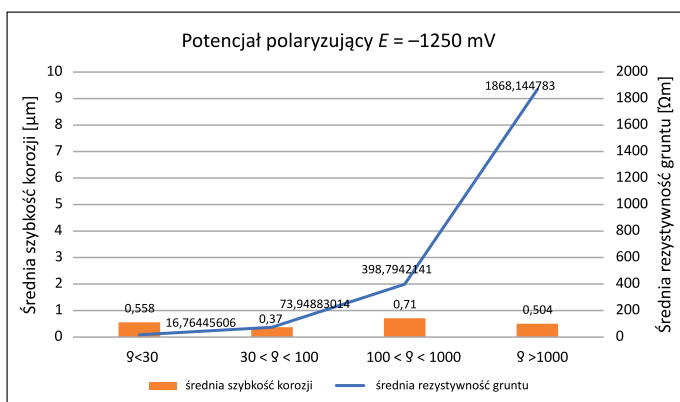
**Rysunek 12.** Wykres średniej szybkości korozji [µm] czujników polaryzowanych potencjałem  $-950$  mV w odniesieniu do średniej rezystywności gruntu

**Figure 12.** Graph of the average corrosion rate [µm] of sensors polarized with the potential  $-950$  mV in relation to the average soil resistivity



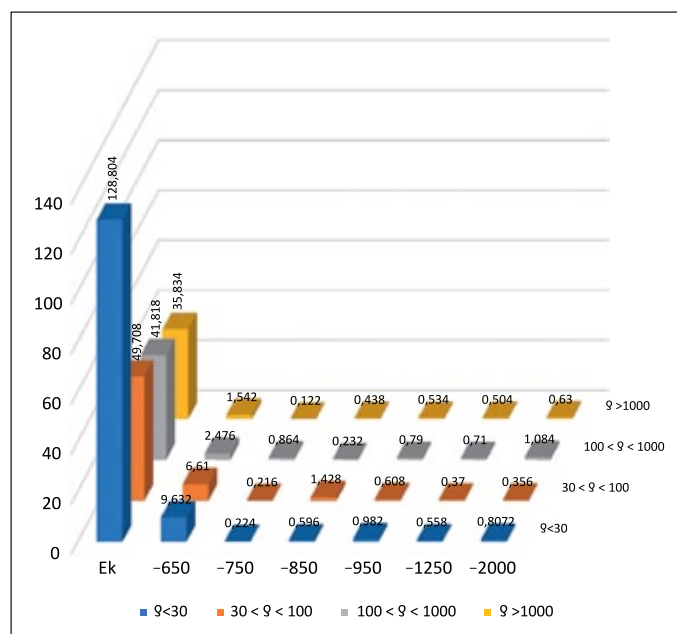
**Rysunek 15.** Wykres średniej szybkości korozji [µm] czujników niepolaryzowanych w odniesieniu do średniej rezystywności gruntu

**Figure 15.** Graph of the average corrosion rate [µm] of non-polarized sensors in relation to the average soil resistivity



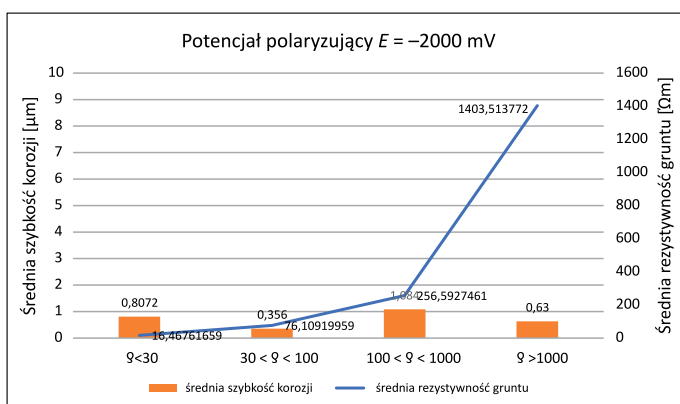
**Rysunek 13.** Wykres średniej szybkości korozji [µm] czujników polaryzowanych potencjałem  $-1250$  mV w odniesieniu do średniej rezystywności gruntu

**Figure 13.** Graph of the average corrosion rate [µm] of sensors polarized with the potential  $-1250$  mV in relation to the average soil resistivity



**Rysunek 16.** Zestawienie szybkości [µm] korozji z uwzględnieniem potencjału polaryzacji i rezystywności gruntu

**Figure 16.** Corrosion rate [µm], taking into account the polarization potential and soil resistivity



**Rysunek 14.** Wykres średniej szybkości korozji [µm] czujników polaryzowanych potencjałem  $-2000$  mV w odniesieniu do średniej rezystywności gruntu

**Figure 14.** Graph of the average corrosion rate [µm] of sensors polarized with the potential  $-2000$  mV in relation to the average soil resistivity

Rysunek 17 z lewej strony przedstawia widok czujnika polaryzowanego potencjałem zaledwie  $-650$  mV umieszczonego w gruncie o rezystywności poniżej  $30 \Omega\text{m}$ , a z prawej strony – czujnik niepolaryzowany zamontowany w gruncie również o rezystywności poniżej  $30 \Omega\text{m}$ . Na fotografii widać, że niewielka wartość potencjału polaryzującego jest w stanie spolaryzować stal do wartości potencjału  $E_{off}$  wynoszącej zaledwie  $-645$  mV i przesunięcia potencjału ochrony  $E_p$  w stosunku do potencjału korozyjnego  $E_{cor}$  zaledwie o około  $65$  mV. Pomimo tak niskiej wartości spolaryzowania się czujnika proces korozji został znacząco spowolniony – w jednym przypadku wartość wynosi  $9,63 \mu\text{m}/\text{rok}$ , a w drugim  $128,80 \mu\text{m}/\text{rok}$ .



**Rysunek 17.** Z lewej strony widok zdemontowanego czujnika nr 1574/20 polaryzowanego potencjałem  $-650$  mV w gruncie o rezystywności  $<30 \Omega\text{m}$ ; z prawej strony widok zdemontowanego oczyszczonego czujnika nr 1598/20 niepolaryzowanego umieszczonego w gruncie o rezystywności  $<30 \Omega\text{m}$

**Figure 17.** On the left, a view of the disassembled sensor no. 1574/20, polarized with the  $-650$  mV potential in the soil with a resistivity of  $<30 \Omega\text{m}$ , on the right, a view of the disassembled, cleaned, non-polar sensor no. 1598/20, placed in the ground with a resistivity of  $<30 \Omega\text{m}$



**Rysunek 18.** Widok zdemontowanego oczyszczonego czujnika nr 1601/20 niepolaryzowanego umieszczonego w gruncie o rezystywności  $>1000 \Omega\text{m}$

**Figure 18.** View of the disassembled, cleaned sensor no. 1601/20, non-polarized placed in the ground with a resistivity  $>1000 \Omega\text{m}$

### Wnioski

Czujniki, na których badano szybkość korozji, były zamontowane w gruntach o niedużej agresywności oraz nie działały na nie żadne inne prądy (prądy błądzące), mające negatywny wpływ na chronioną konstrukcję.

Bardzo niskie potencjały polaryzujące stal mogą pojawiać się na starych gazociągach, z dużym tłumieniem, przy ograniczonych możliwościach zwiększenia prądu ochrony. Również na obiektach złożonych bardzo rozbudowanych w przypadku niedziałającej poprawnie instalacji ochrony katodowej lub jej złego doboru mogą pojawić się obszary/strefy, gdzie prąd ochrony nie dopływa lub jego zwiększenie jest niemożliwe, np. przez możliwe lokalne przechronienie konstrukcji w bliskości uziomów anodowych.

Uzyskane wyniki badań oraz ich analiza potwierdziły wstępne przypuszczenia, że nawet najmniejsza polaryzacja chronionej konstrukcji daje pozytywne efekty, ograniczając postęp korozji. Niewielkie przesunięcie potencjału korozyjnego  $E_{cor}$  w kierunku bardziej elektrojennym, nawet już o  $60-70$  mV, spowolniło postęp korozji do wartości poniżej dopuszczalnego kryterium – pomimo niespełnienia kryterium potencjałowego. W zasadzie tylko czujniki niepoddane polaryzacji wykazały szybkość korozji przekraczającą dopuszczalne wartości. Widać również, że wyniki szybkości korozji uzyskiwane na czujnikach polaryzowanych nie zmieniały się zbyt wiele w zależności od rezystywności gruntów, w których te czujniki były zamontowane. Różnice te widoczne są tylko w przypadku czujników niepolaryzowanych, co było raczej oczywiste.

Można przypuszczać, że im dłużej trwa proces polaryzacji, tym lepszych efektów można by się spodziewać, nawet przy tak niskich wartościach potencjału polaryzującego. Widać również, że pozostawienie konstrukcji stalowej w gruncie nawet o bardzo wysokiej rezystywności może dość szybko prowadzić do jej perforacji i rozkładu.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza szybkości korozji na podstawie badań korozji czujników korozymetrycznych zainstalowanych w ziemi*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0061/GP/2021, nr archiwalny: DK-4100-49/2021.

### Literatura

- Bazhenov A., Bondareva G., Grivennaya N., Malygin S., Goryainov M., 2017. Main Pipelines Corrosion Monitoring Device. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*, 50: 012032. DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012032.
- Brossia S., 2014. The use of probes for detecting corrosion in underground pipelines. [W:] Orazem M.E. (ed.). *Underground Pipeline Corrosion. Detection, Analysis and Prevention*. Woodhead Publishing, 286–303. DOI: 10.1533/9780857099266.2.286.
- Capelle J., Gilgert J., Dmytrakh I., Pluvinage G., 2008. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(24): 7630–7641. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.09.020.
- CEOCOR (Komitet do spraw studiów nad korozją i ochroną rurociągów przed korozją), 2010. *Pomiary w ochronie przed korozją – poradnik*. Polski Komitet Elektrochemicznej Ochrony przed Korozją Stowarzyszenie Elektryków Polskich, Warszawa.
- Fiedorowicz M., Jagiełło M., 2010. *Korozymetria rezystancyjna w badaniach korozji podziemnych rurociągów*. XI Krajowa



- Konferencja „Pomiary korozyjne w ochronie elektrochemicznej”, Jurata: 33–50.*
- Hydrogen Embrittlement of Steel, 2016. <<https://www.imetllc.com/hydrogen-embrittlement-steel/>> (dostęp: 22.11.2021).
- 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.
- Jasiński A., 2012. Niszczenie wodorowe rur parownika. *Energetyka*, 2: 103–107.
- Minor T., 2015. Możliwości i sposoby kontrolowania stanu technicznego stalowych gazociągów na podstawie oceny technicznej powłok antykorozyjnych oraz skuteczności ochrony katodowej. *Nafta-Gaz*, 71(7): 472–480.
- Pietkun-Greber I., Janka R.M., 2010. Oddziaływanie wodoru na metale i stopy. *Proceedings of ECOpole*, 4(2): 1–6.
- Pietkun-Greber I., Janka R.M., 2011. Analiza skutków oddziaływania wodoru na metale i stopy. *Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*, 16(1–2): 75–78.
- Skiba-Rogalska O., 1991. Ochrona elektrochemiczna przed korozją. Teoria i praktyka. *WNT, Warszawa*.
- Stachowicz A., 2011. Korozja rur wydobywczych odwiertów gazowych z zawartością CO<sub>2</sub>. *Nafta-Gaz*, 67(6): 395–400.
- Stochaj P., 2012. Zastosowanie korozymetrii rezystancyjnej w odniesieniu do kryteriów ochrony katodowej gazociągów. *Nafta-Gaz*, 68(5): 298–305.
- Stochaj P., Minor T., 2016. Elektrody symulujące jako narzędzie do badań skuteczności ochrony katodowej stalowych konstrukcji. *Nafta-Gaz*, 72(8): 638–644. DOI: 10.18668/NG.2016.08.08.

### Akty prawne i 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.

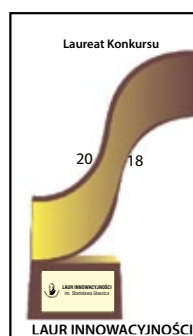


Mgr inż. Tomasz MINOR

Główny specjalista inżynierjno-techniczny w Zakładzie Przesyłu i Dystrybucji Gazu; kierownik Laboratorium Badań Armatury i Techniki Eksploatacji Gazociągów Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków  
E-mail: [tomasz.minor@inig.pl](mailto:tomasz.minor@inig.pl)

## OFERTA BADAWCZA ZAKŁADU NAWANIANIA PALIW GAZOWYCH

- kontrola analityczna procesu nawaniania gazu (w tym m.in. pomiary weryfikujące stężenie środka nawaniającego w gazie ziemnym i mieszaninach gazowych, kontrola pracy urządzeń nawaniających itp.);
- nadzór metrologiczny nad poprawnością wskazań analizatorów procesowych stężenia środka nawaniającego, działających w systemie on-line;
- kontrola stopnia nawonienia gazu, realizowana m.in.: poprzez pomiary kontrolne intensywności zapachu paliw gazowych, wyznaczanie minimalnego stężenia środka nawaniającego w gazie oraz weryfikację krzywych zapachowych paliw gazowych;
- wyznaczanie krzywych zapachowych gazów;
- badania jakości środków nawaniających;
- prace badawcze dotyczące wprowadzania nowych środków nawaniających do krajowego systemu gazowniczego oraz monitorowanie procesu;
- produkcja i serwisowanie automatycznych analizatorów chromatograficznych, przeznaczonych do pomiaru stężenia THT w gazie, typu ANAT-M;
- sporządzanie mieszanin wzorcowych THT;
- projektowanie nowoczesnych urządzeń do pomiaru stężenia środków nawaniających w gazie oraz jakości zapachowej gazów.



Kierownik: dr Anna Huszał Adres: ul. Kasprzaka 25, 01-224 Warszawa  
Telefon: 22 632 99 50 Faks: 22 632 63 13 E-mail: [anna.huszal@inig.pl](mailto:anna.huszal@inig.pl)



INSTYTUT NAFTY I GAZU  
– Państwowy Instytut Badawczy