

INSTYTUT TECHNOLOGII NIEORGANICZNEJ I NAWOZÓW MINERALNYCH
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

**DOŚWIADCZALNE MODELOWANIE MAKROOGNIWA
KOROZYJNEGO W ŻELBECIE**

Praca doktorska
mgr Magdalena Klakočar - Ciepacz

Promotor
dr hab. inż. Adam Zybura
Profesor Politechniki Śląskiej

Wrocław 1998 rok

INSTYTUT TECHNOLOGII NIEORGANICZNEJ I NAWOZÓW MINERALNYCH
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

**DOŚWIADCZALNE MODELOWANIE MAKROOGNIWA
KOROZYJNEGO W ŻELBECIE**

Praca doktorska
mgr Magdalena Klakočar - Ciepacz

Promotor
dr hab. inż. Adam Zybura
Profesor Politechniki Śląskiej

Wrocław 1998 rok

Spis treści	strona
Spis zastosowanych symboli.....	4
Wprowadzenie.....	6
Część pierwsza - AGRESYWNY WPŁYW OTOCZENIA NA ZBROJENIE ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH - OPRACOWANIE LITERATUROWE	
Rozdział pierwszy - Otulenie betonowe jako środowisko korozyjne zbrojenia.....	10
1.1. Zagrożenie trwałości konstrukcji żelbetowych.....	10
1.2. Porowatość betonu.....	13
1.3. Wilgotność betonu.....	15
1.4. Analityczny opis wnikania substancji agresywnych do otulenia.....	16
1.5. Działanie dwutlenku węgla na beton konstrukcji żelbetowych.....	23
1.6. Zagrożenie zbrojenia korozją chlorkową.....	25
1.7. Wpływ naprężeń i rys w otulinie betonowej.....	28
1.8. Inicjacja i rozwój korozji zbrojenia.....	30
Rozdział drugi - Monitorowanie procesu korozji stali zbrojeniowej w elementach żelbetowych.....	35
2.1. Ogólna charakterystyka badań.....	35
2.2. Pomiary potencjału korozyjnego i rezystywności otulenia betonowego.....	37
2.3. Pomiar szybkości korozji metodą polaryzacji liniowej.....	40
2.4. Pomiar impulsem galwanostatycznym.....	41
2.5. Metoda spektroskopii impedancyjnej	43
2.6. Inne metody badawcze.....	44
Część druga - OKREŚLENIE INTENSYWNOŚCI PROCESU KOROZYJNEGO ZBROJENIA ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH - BADANIA WŁASNE	
Zakres badań własnych.....	50
Rozdział trzeci - Badanie ogniwa galwanicznego modelującego korozję zbrojenia.....	53

3.1. Założenia modelu ogniwa galwanicznego.....	53
3.2. Sposób przeprowadzenia badań.....	56
3.3. Wyniki badań modelowego ogniwa oraz ich omówienie.....	61
Rozdział czwarty - Badania potencjałowe i polaryzacyjne zbrojenia elementów próbnych z betonu.....	77
4.1. Elementy próbne.....	77
4.2. Badania materiałowe.....	78
4.3. Technika i przebieg obciążania elementów próbnych.....	80
4.3.1. Elementy próbne z jedną rysą w strefie rozciąganej.....	80
4.3.2. Elementy próbne z kilkoma rysami w strefie rozciąganej.....	84
4.4. Zakres i sposób przeprowadzenia pomiarów elektrochemicznych.....	87
4.5. Wyniki pomiarów badań potencjałowych i potencjodynamicznych.....	91
4.5.1. Wyniki badań elementu niezarysowanego.....	91
4.5.2. Wyniki badań elementów zarysowanych w jednym miejscu.....	93
4.5.3. Wyniki badań elementów zarysowanych w kilku miejscach.....	98
4.6. Omówienie wyników badań potencjałowych i polaryzacyjnych.....	112
4.6.1. Pomiary potencjału.....	112
4.6.2. Badania polaryzacyjne.....	114
Rozdział piąty - Badanie zbrojenia elementów próbnych z betonu metodą spektroskopii impedancyjnej.....	118
5.1. Ogólna charakterystyka badań impedancyjnych.....	118
5.2. Sposób wykonania badań impedancyjnych.....	121
5.3. Wyniki badań impedancyjnych i ich analiza.....	124
Rozdział szósty - Weryfikacja modelu ogniwa korozyjnego.....	133
6.1. Przygotowanie elementów do badań.....	133
6.2. Opis stanu zbrojenia badanych elementów po odkuciu.....	133
6.3. Analiza uzyskanych wyników badań modelu ogniwa korozyjnego i elementów próbnych.....	138
Podsumowanie i wnioski	143
Literatura.....	146

Spis zastosowanych symboli

A - pole powierzchni

A_a, A_k - odpowiednio: pole powierzchni anody i katody

B - współczynnik zależny od struktury porów

C_1, C_{10} - stężenie substancji rozpuszczanej i wymywanej z betonu

C_2, C_{20} - stężenie substancji agresywnej w betonie

C_{1g} - graniczne stężenie substancji wymywanej

C_c - pojemność niespenetrowanej części powłoki

C_{dl} - pojemność warstwy podwójnej na granicy metal-elektrolit

D - współczynnik dyfuzji

E - siła elektromotoryczna ogniwa

E_{corr}, E_a, E_k - odpowiednio: potencjał korozyjny, anodowy i katodowy,

F - stała Faradaya (96 500 A·s/równ.)

H_t - szybkość korozji,

I_G - natężenie prądu galwanicznego

I_{corr} - natężenie prądu korozyjnego

ΔI - impuls prądu,

M - moment siły

N - wartość siły określonej przy osiągnięciu przez rysy maksymalnego rozwarcia

N_m - wartość siły przed powstaniem rysy o określonej rozwarości

N_r - wartość siły rysującej,

P_i - siła odpowiadająca umownej granicy plastyczności,

R - stała gazowa, (8,3143 W·s/(K·mol))

R_b^G - wytrzymałość gwarantowana betonu

R_e - rezystancja roztworu

$\bar{R}_e$ - średnia wartość granicy plastyczności

R_f - wytrzymałość betonu na ściskanie

R_p - opór polaryzacji,

R_{por} - opór porów

R_t - rezystancja przeniesienia ładunku

R_Ω - rezystywność betonu

a - aktywność jonów

a_r - szerokość rozwarcia rys,

h - wilgotność względna

i_{corr} - gęstość prądu korozyjnego,

j - gradient koncentracji

k - współczynnik proporcjonalności

n_i - wektor normalny do powierzchni

t - czas

s_R - odchylenie standardowe

s_γ - wytrzymałość średnia na ściskanie

$\beta_a \beta_c$ - odpowiednio: nachylenie tafelowskie anodowe i katodowe,

$\Delta\varepsilon$ - spadek omowy,

ε_{tr} - odkształcenie trwałe

λ - zasięg strefy skorodowanej betonu

σ_a - naprężenie w zbrojeniu

σ - współczynnik Warburga

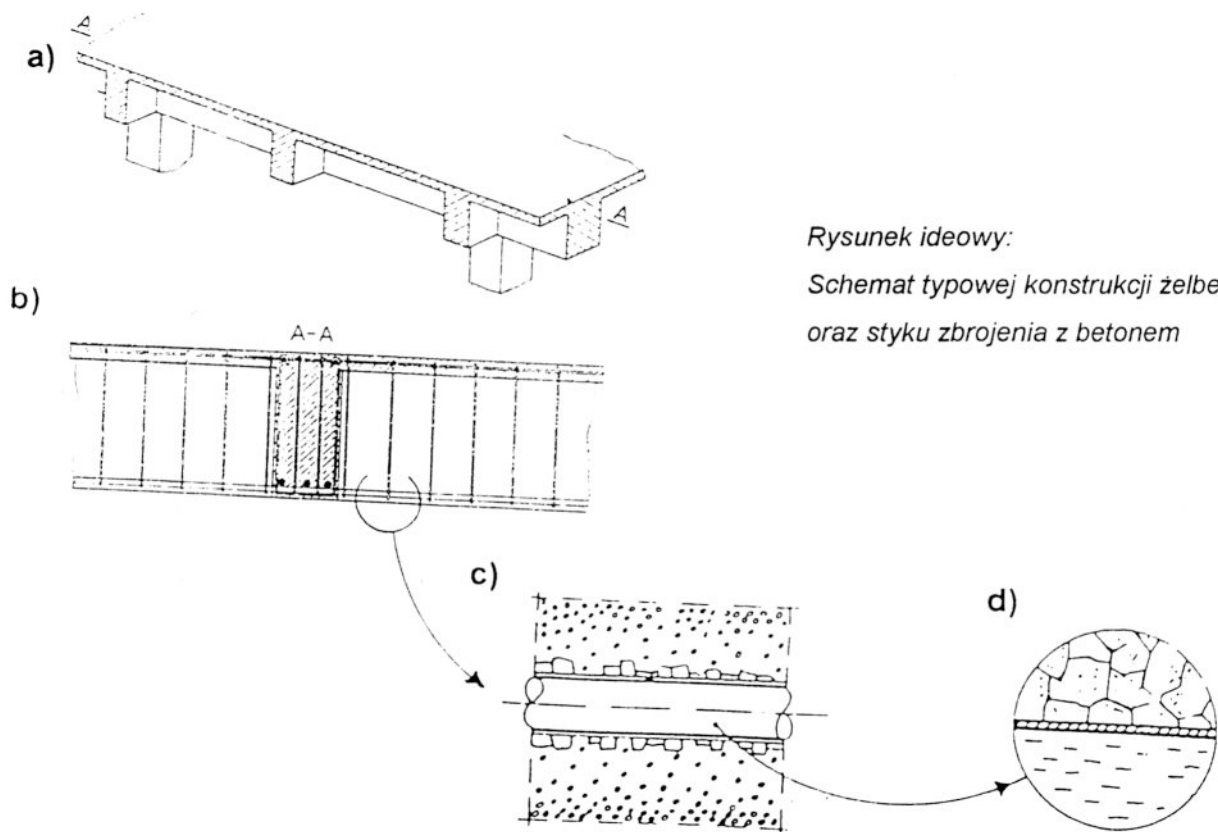
Niektóre inne, rzadziej stosowane symbole, objaśniono w tekście.

WPROWADZENIE

• Zarys problemu.

Korozja jest istotnym problemem społecznym, ekonomicznym, gospodarczym, technicznym i naukowym. Pomimo dużego zainteresowania i wielu opracowań wykonywanych w wymienionych dyscyplinach dotychczas nie rozwiązano zadowalająco zagadnienia i nie uzyskano skutecznych metod zabezpieczających przed tym niekorzystnym zjawiskiem. Podaje się, że w krajach uprzemysłowionych straty w wyniku występowania korozji wynoszą rocznie około 1 000 USD w przeliczeniu na jednego obywatela, natomiast w Polsce są one jeszcze większe i przekraczają obecnie poziom 6 - 10% dochodu narodowego brutto [1].

W budownictwie korozja zagraża także obiektom o masywnej konstrukcji żelbetowej. W konstrukcjach żelbetowych stosuje się beton dobrze przejmujący wewnętrzne naprężenia ściskające oraz stalowe zbrojenie wzmacniające strefy rozciągane [2]. Zbrojenie jest chronione przed wpływami środowiskowymi otuleniem betonowym. Na rysunku ideowym przedstawiono typową konstrukcję żelbetową stropu płytowo - żebrowego.



Rysunek ideowy:

*Schemat typowej konstrukcji żelbetowej
oraz styku zbrojenia z betonem*

Rysunek „a” ujmuje widok ogólny, natomiast rysunek „b” przekrój podłużny ukazujący zbrojenie główne (dolne) rozciągane dodatnim momentem siły oraz strzemiona. Na rysunku „c” zamieszczono według [3] schemat styku zbrojenia z otaczającym betonem. Beton stanowi dla zbrojenia naturalnie wilgotne środowisko. Środowisko to tworzy woda niezwiązana chemicznie w procesie hydratacji cementu oraz wilgoć zaabsorbowana z atmosfery. Ciecz porowa charakteryzująca się odczynem silnie alkalicznym ($\text{pH} \approx 12,5 + 13,5$) powoduje, że na powierzchni stali powstaje warstewka pasywna złożona z tlenków i wodorotlenków żelaza - rysunek „d”. Warstewka pasywna oddziela metal od roztworu wodnego i dobrze chroni zbrojenie przed korozją. Pod wpływem agresywnego środowiska beton, a w dalszej kolejności zbrojenie konstrukcji żelbetowych ulega korozji. Zagrożenie zbrojenia korozją zwiększają rysy w strefie rozciąganej elementów [4]. Ułatwiają one penetrację wilgoci, gazów i jonów agresywnych w otuleniu zbrojenia. Szczególnie groźne są procesy niszczące zbrojenie, gdyż przebiegają pod otuliną i przez długi okres są niezauważalne. Dopiero w fazie końcowej korozja zbrojenia stalowego objawia się pośrednio pęknięciami elementu, a nawet odspojeniem warstwy ochronnej betonu. Zbyt późne wykrycie destrukcji betonu, prowadzi do stanu awaryjnego i często wyklucza skuteczną jego naprawę. Problemy korozji mają szczególnie istotne znaczenie ze względów bezpieczeństwa użytkowania oraz zmniejszenia trwałości konstrukcji. Dotychczasowe badania przeważnie koncentrują się na ocenie objawów oraz opracowaniu środków, których stosowanie powinno zmniejszyć skutki agresji. Są to jednak działania niewystarczające i sprowadzają się one głównie do spełnienia warunków konstrukcyjnych. Znane są próby połączenia wyników badania rozkładów potencjałów ze stanem zbrojenia żelbetu [5, 6, 7]. Na tej podstawie podejmowane są starania oceny zniszczeń korozyjnych zbrojenia, a w następnej kolejności oszacowania przewidywanej trwałości konstrukcji budowlanych [8, 9]. Zadanie jest jednak dość skomplikowane, ponieważ połączenie prętów stalowych z betonem mającym budowę kapilarno-porowatą stwarza specyficzne warunki przebiegu procesu. Problem dodatkowo komplikują rysy w otulinie zbrojenia, wywołane naprężeniami mechanicznymi lub wpływami termicznymi i technologicznymi. Dotychczas nie zdołano precyzyjnie odwzorować zachodzących w zbrojeniu zjawisk korozyjnych, a istniejące informacje mają jedynie charakter poglądowy [10, 11].

Prezentowane w literaturze koncepcje modelu procesu korozyjnego stali zbrojeniowej w zarysowanym betonie, przyjmują że proces elektrochemiczny przebiega z utworzeniem lokalnych makroogniw korozyjnych [12, 13, 14, 15]. Rozważania termodynamiczne uwzględniające warunki lokalne obszarów anodowych i katodowych (pH, zachodzące reakcje, itd.) pozwoliły oszacować wartości potencjałów półogniwa anodowego i katodowego. Jednak na podstawie pomiarów siły elektromotorycznej ogniwa korozyjnego nie można ocenić kinetyki procesu korozyjnego, ponieważ brakuje danych dotyczących rodzajów polaryzacji oraz oporu wewnętrznego i oporu zewnętrznego ogniwa.

• Cel pracy

Celem pracy jest doświadczalne odwzorowanie ogniwa korozyjnego powstającego na prętach zbrojeniowych chronionych zarysowanym otuleniem betonowym. Do podjęcia tematu skłoniło przekonanie, że poznanie mechanizmu działania ogniwa oraz jego charakterystycznych parametrów umożliwi dokładniejszy opis procesów korozyjnych zbrojenia. Natomiast uzyskane wyniki badań nie tylko rozszerzą wiedzę o zachowaniu się stali na styku z betonem zarysowanym w warunkach agresywnych, ale także dostarczą danych pozwalających w przyszłości na precyzyjniejsze prognozowanie trwałości konstrukcji żelbetowych narażonych na wpływy środowiskowe.

Zasadnicze badania wykonano w dwóch etapach. W pierwszej kolejności procesy korozyjne zbrojenia elementów żelbetowych odwzorowano działaniem typowego ogniwa galwanicznego, w którym zastosowano elektrody ze stali zbrojeniowej oraz elektrolit o składzie odpowiadającym cieczy porowej betonu w obrębie rysy i poza rysą. Następnie wyniki badań modelowego ogniwa skonfrontowano z rezultatami badań elektrochemicznych przeprowadzonych na kilkunastu obciążonych elementach próbnym z betonu zbrojonego. Badania własne poprzedzono opracowaniem literaturowym obejmującym analizę czynników wpływających na intensywność korozji zbrojenia w elementach żelbetowych oraz sposobów monitorowania tego procesu.

Część pierwsza

AGRESYWNY WPŁYW OTOCZENIA NA ZBROJENIE ELEMENTÓW
ŻELBETOWYCH

•

OPRACOWANIE LITERATUROWE

Rozdział pierwszy

OTULENIE BETONOWE JAKO ŚRODOWISKO KOROZYJNE STALI ZBROJENIOWEJ.

1.1. Zagrożenie trwałości konstrukcji żelbetowych.

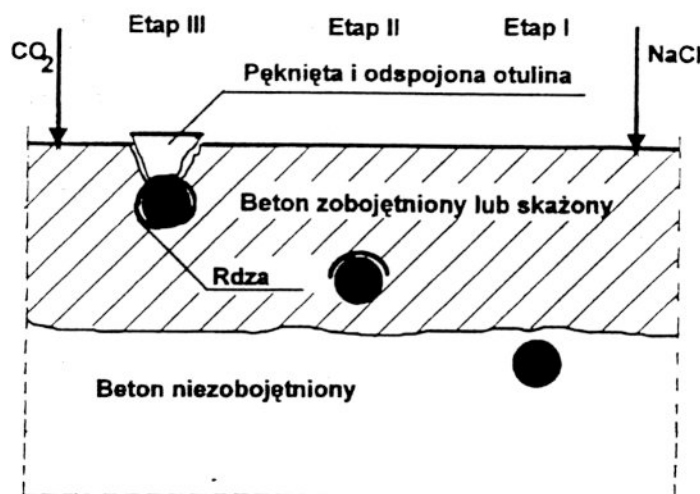
Niszczenie konstrukcji żelbetowych może być spowodowane korozją betonu, korozją stali zbrojeniowej lub występowaniem obu rodzajów korozji równocześnie. Korozja betonu występuje w wyniku oddziaływania na konstrukcję żelbetową otaczającego ją środowiska. Degradację betonu może wywołać środowisko atmosfery przemysłowej, gleby i wody gruntowej, atmosfery nadmorskiej, spalin samochodowych, środków do odladzania itp. Przykład uszkodzonej korozją konstrukcji żelbetowej przedstawiono na rys. 1.1.



Rys. 1.1 Widok uszkodzonej korozją konstrukcji żelbetowej.

Niszczenie konstrukcji w wyniku oddziaływania otaczającego środowiska przebiega etapowo. Ściślewski [14] rozróżnia 3 charakterystyczne etapy zilustrowane na przykładzie prętów zbrojeniowych usytuowanych w różnych odległościach od powierzchni betonu elementu - rys. 1.2.

W I etapie następuje zubożnienie betonu lub skażenie go agresywnymi substancjami. W momencie, gdy otulina traci właściwości ochronne w stosunku do zbrojenia, rozpoczyna się II etap niszczenia, w którym zbrojenie zaczyna korodować.



Rys. 1.2. Etapy niszczenia elementu żelbetowego w wyniku oddziaływania środowiska.

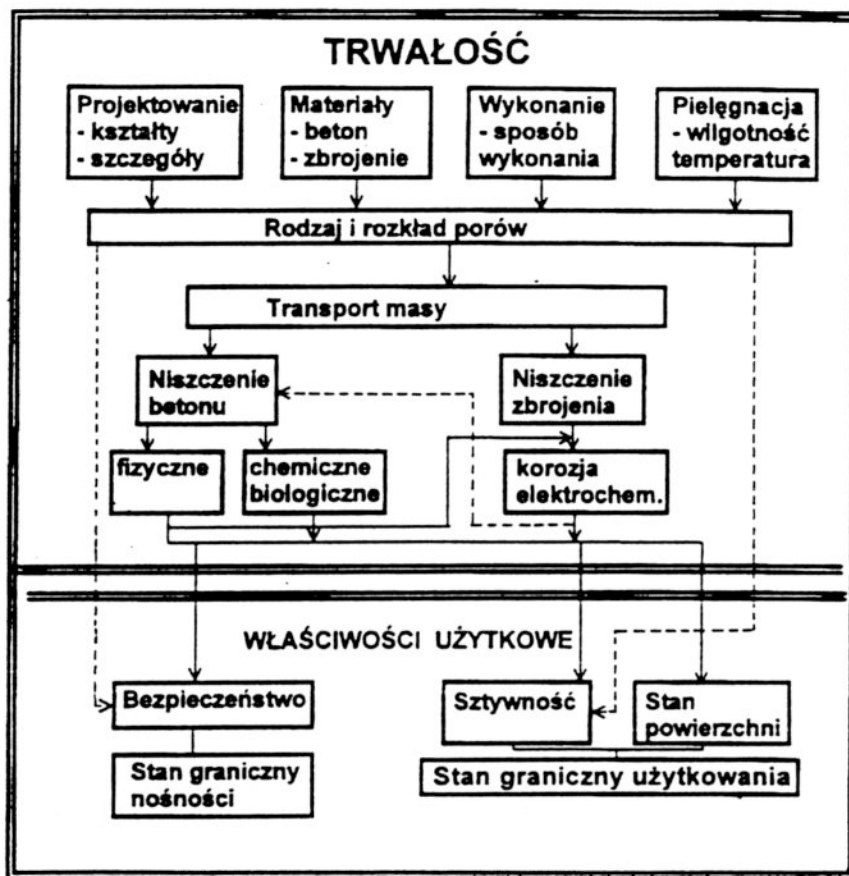
W miarę rozwoju procesu, na powierzchni stali zbrojeniowej tworzą się produkty korozji. Ponieważ, produkty korozji mają większą objętość od metalu z którego powstały, więc generują naprężenia. Jeżeli naprężenia przekroczą wytrzymałość betonu na rozciąganie, to dochodzi do pęknięcia otuliny, a następnie jej odpadnięcia i odsłonięcia zbrojenia. Jest to III etap niszczenia, w którym zbrojenie koroduje już bez otulenia, aż do wyczerpania nośności konstrukcji. Czas do osiągnięcia stanu granicznego nośności określa się okresem istnienia konstrukcji. Okres ten jest trudny do ustalenia, ponieważ występuje duża ilość czynników, które mogą oddziaływać na przebieg procesów korozyjnych - por [14].

Ostatnio Norma Europejska ENN-1992-1-1.EC 2-1-1 [15], zdefiniowała trwałość konstrukcji która obejmuje okres krótszy od czasu jej istnienia. Trwałość konstrukcji jest utożsamiona z czasem eksploatacji, w którym konstrukcja spełnia warunki użytkowania, nośności i stateczności bez wyraźnego obniżenia właściwości użytkowych lub konieczności nadmiernych albo występowania nieprzewidzianych nakładów finansowych na utrzymanie i remonty.

W miarę upływu czasu, oddziaływanie czynników środowiskowych powoduje zmianę właściwości użytkowych konstrukcji. Schemat blokowy wpływu środowiska na procesy zachodzące w elementach żelbetowych oraz zmiany ich właściwości użytkowych przedstawiono na rys. 1.3 [16].

Na długość czasu użytkowania konstrukcji mają istotny wpływ następujące czynniki: szczelność betonu, grubość otuliny zbrojenia i średnie stężenie chlorków w otaczającym środowisku. Podstawowymi procesami powodującymi niszczenie

konstrukcji jest wnikanie wody wraz z rozpuszczonymi w niej związkami chemicznymi pochodzącymi z wymiany ze środowiskiem lub zawartymi w betonie. Jak wspomniano, żelbet może ulegać zniszczeniu na wskutek korozji betonu lub korozji



Rys. 1.3. Schemat blokowy wpływu środowiska na trwałość i przydatność użytkową konstrukcji [14]

zbrojenia, jednak o trwałości konstrukcji żelbetowych najczęściej decyduje korozja zbrojenia. Na podstawie analiz ekonomicznych stwierdzono, że od chwili rozpoczęcia korozji zbrojenia następuje istotny wzrost kosztów utrzymania konstrukcji spowodowany koniecznością napraw - por. [14]. Przyczyną wystąpienia korozji stali zbrojeniowej jest zniszczenie lub uszkodzenie warstewki pasywnej na jej powierzchni. Problem depasywacji dopiero od niedawna stał się przedmiotem badań i dlatego nie ma zbyt wielu kompleksowych opracowań na ten temat por. [3, 17, 18].

W monografiach [17, 18] Aleksejev i Moskvin ze współpracownikami przedstawili zakres uszkodzeń konstrukcji żelbetowych wywołanych korozją stali zbrojeniowej i próbowali opisać korozję stali zbrojeniowej w betonie, pod wpływem substancji agresywnych pochodzących ze środowiska, lub zawartych w betonie. Natomiast Wieczorek [3] opisał proces korozji stali zbrojeniowej, chronionej betonem, spowodowanej oddziaływaniem chlorków.

1.2. Porowatość betonu.

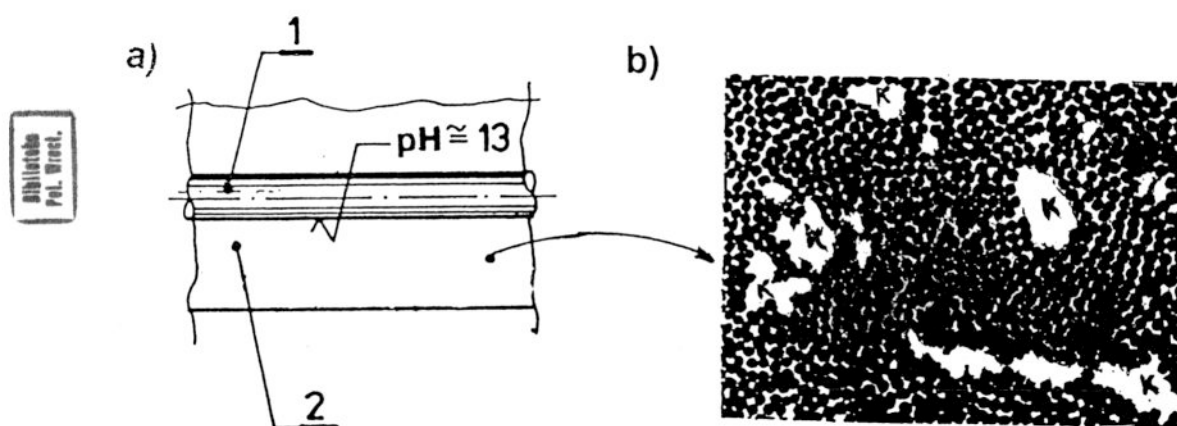
Stalowe wkładki zbrojeniowe elementów żelbetowych są chronione przed bezpośrednimi wpływami otoczenia otuleniem betonowym - rys. 1.4 a. Otulenie jest dla zbrojenia bezpośrednim środowiskiem charakteryzującym się znaczną porowatością i niejednorodnością oraz stanowiącym skomplikowany układ wieloskładnikowy i wielofazowy. Beton ma budowę kapilarno-porowatą. Struktura betonu umożliwia dostęp do zbrojenia związków agresywnych wnikających do wnętrza z otaczającego środowiska. Procesy transportu są zasadniczym powodem zmian własności fizyko-chemicznych betonu w czasie.

Porowatości betonu zależy od:

- mikro- i makroporów zaczynu cementowego oraz uszkodzenia jego struktury,
- porów tworzących się na styku kamienia cementowego z ziarnem kruszywa lub zbrojeniem,
- porów kruszywa i uszkodzenia jego struktury,
- rys skurczowych oraz rys powstałych w wyniku działania obciążeń mechanicznych i termicznych.

Wielkość porów jest zróżnicowana w zależności od pochodzenia. Największy wpływ na porowatość betonu wywiera porowatość stwardniałego zaczynu cementowego.

W zaczynie cementowym pory zajmują nie mniej niż 28% objętości [14], natomiast promienie tych porów mieszczą się w granicach od 10^{-5} do 10^{-1} mm. Rozróżnia się pory żelowe o promieniach w granicach $1,0 \cdot 10^{-3} \div 1,0 \cdot 10^{-5}$ mm, pory kapilarne o promieniach $1,0 \cdot 10^{-3}$ do $50 \cdot 10^{-1}$ mm. Strukturę stwardniałego zaczynu cementowego według Nevillea [19] przedstawiono schematycznie na rys 1.4. b.

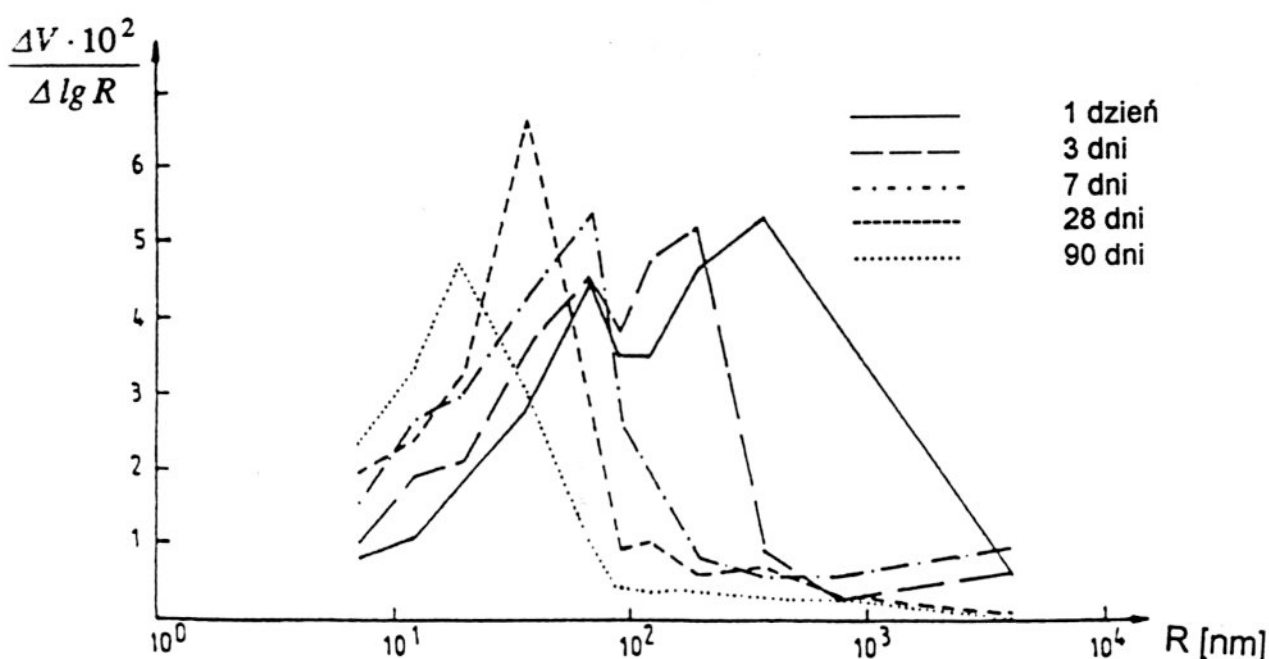


Rys. 1.4. Zbrojenie elementów żelbetowych: a) wkładka chroniona przed wpływem otoczenia otuleniem betonowym, b) mikrostruktura zaczynu cementowego według [19]; 1 - pręt zbrojeniowy, 2 - otulenie betonowe.

Czarne kropki oznaczają cząstki żelu, niewypełnione szczeliny między nimi - pory żelowe, natomiast przestrzenie z literą K są porami kapilarnymi. Pory żelowe na tym rysunku zostały ujęte w przesadnym powiększeniu [19]. Pory kapilarne stanowią pustki po wodzie związanej w procesie hydratacji cementu. Pory kontrakcyjne powstają w wyniku zmniejszania się absolutnej objętości mieszaniny cement-woda przy oddziaływaniach chemicznych [20]. Natomiast pory żelowe są pustkami wewnętrznymi między cząstkami żelu [19].

W elementach żelbetowych poza porami zaczynu cementowego występują pory powstające w wyniku sedymentacji składników świeżej mieszanki. Rozmiary tych porów są zawarte w granicach $0,5 - 1,0 \cdot 10^{-1}$ mm. Na porowatość betonu powinna mieć także wpływ porowatość kruszywa. Jednak tradycyjnie uważa się, że porowatość kruszywa naturalnego nie jest istotna.

Porowatość zaczynu cementowego ulega zmianie przez okres 90 dni od wykonania. Zmiany porowatości ilustruje rys. 1.5 zaczerpnięty z monografii Wieczorka [3]. Wykresy przedstawiają względne zmiany objętości porów $\Delta V \cdot 10^2 / \log R$, jako funkcję średniego promienia R porów w zaczynie cementowym zaprawy normowej wykonanej z cementu portlandzkiego 45 Chełm [3].



Rys. 1.5 Zmiany różniczkowego rozkładu porów w czasie dla zaprawy normowej c.p. 45 Chełm [3]

Szczególnie dużym zmianom ulega porowatość zaczynu cementowego, którego faza stała składa się z produktów hydratacji i niewodnionych ziaren cementu. Układ taki

jest bazą dla przebiegu złożonych reakcji chemicznych i fizykochemicznych. Do innych czynników powodujących zmianę porowatości betonu zalicza się przemieszczanie rozpuszczalnych składników betonu wraz z wodą, krystalizację węglanu wapnia, rodzaj cementu, współczynnik wodno-cementowy (w/c) oraz sposób pielęgnacji betonu [12]. Wieczorek [3] zaznacza, że późniejsze zmiany mikrostruktury zaczynu cementowego (np. po 90 dniach od wykonania) mogą być wywołane oddziaływaniem zewnętrznego środowiska gazowego lub ciekłego.

1.3. Wilgotność betonu.

Stal zbrojeniowa bezpośrednio styka się z betonem, w którego porach znajduje się woda pozostająca po procesie hydratacji cementu lub zaabsorbowana z otoczenia zewnętrznego. Woda może występować w postaci pary wodnej, cienkiej warstewki zaadsorbowanej na powierzchni porów lub może wypełniać całkowicie kapilary. Wilgotność betonu zależy od jego struktury oraz wilgotności środowiska zewnętrznego i może osiągać wartość w granicach zwykle od 1 do 5%. W betonie zanurzone w wodzie wszystkie otwarte pory zostają wypełnione wodą [3].

Uwzględniając zjawiska związane z obecnością i przemieszczaniem się wody w stwardniałym zaczynie cementowym pory dzieli się na trzy grupy [3]:

- mikropory o średnicy do 2 nm (przeważają pory żelowe o średnicy 1,5-2,0 nm)
- mezopory o średnicy 2-200 nm (pory kontrakcyjne, drobne rysy, część porów kapilarnych)
- makropory o średnicy powyżej 200 nm (pory kapilarne, pory sedymentacyjne, pory związane z zatrzymywaniem się wody w pułapkach, pory powietrzne, rysy o większej rozwarości).

W mikroporach (porach żelowych) woda jest silnie związana z powierzchnią porów. Woda ta nie odparowuje i najprawdopodobniej znajduje się tam od momentu wytworzenia żelu. Z makroporów (pory kapilarne) woda może wyparować swobodnie, natomiast z mezoporów wyparowanie wody jest w pewnym stopniu utrudnione. W betonie woda może być związana: chemicznie, fizykochemicznie, fizyczne i mechanicznie. Woda związana chemicznie występuje w siatce krystalicznej lub uwodnionych minerałach. Można ją usunąć w wyniku prażenia w wysokiej temperaturze. Woda związana fizykochemicznie występuje na powierzchni porów w postaci cienkiej warstewki utworzonej w wyniku występowania sił oddziaływania międzycząsteczkowego. Woda związana fizycomechanicznie utrzymywana jest siłami napięcia powierzchniowego.

Woda zawarta w mezo- i makroporach betonu łączy rozpuszczalne składniki stwardniałego zaczynu cementowego, głównie wodorotlenki NaOH, KOH i Ca(OH)_2 ,

stając się roztworem (elektrolitem). Alkaliczny odczyn cieczy w porach betonu sprawia, że materiał ten reaguje z bezwodnikami kwasów CO_2 , SO_2 , oraz kwasami: H_2S , HCl , itp. W wyniku oddziaływania środowiska zewnętrznego beton otulenia staje się niekiedy środowiskiem agresywnym dla stali zbrojeniowej. Zmiany w czasie składu chemicznego fazy ciekłej w porach betonu są przedmiotem zainteresowania wielu specjalistów z zakresu chemii cementu i betonu oraz korozjonistów [14, 21-26]. Lepsze poznanie procesów zachodzących w betonie oraz w cieczy porowej stwardniałego zaczynu cementowego umożliwia ocenę przebiegu procesu korozyjnego zbrojenia oraz prognozowanie degradacji żelbetu - por [27, 28].

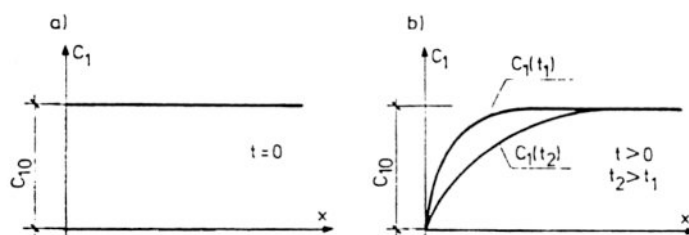
1.4. Analityczny opis wnikania substancji agresywnych do betonu.

Pod wpływem zewnętrznych czynników pochodzących z otoczenia konstrukcji następuje niszczenie betonu otulenia chroniącego zbrojenie. Prędkość wnikania medium agresywnego w znacznym stopniu zależy od wolnego przepływu przez mikrokapilary. Przepływ substancji przez makrokapilary następuje szybko nie zmieniając istotnie sumarycznej prędkości transportu. Z tego powodu transport masy w betonie można analitycznie opisać równaniami dyfuzji uśredniającymi rzeczywisty przepływ przez system porów żelowych i kapilarnych. W pracy [29] określono postęp zniszczeń betonu na podstawie równań dyfuzji, nawiązując do podanej przez Moskvina [30] klasyfikacji procesów korozyjnych betonu. Moskvin [30] wszystkie przypadki korozji betonu sprowadził do trzech zasadniczych grup. Grupa I obejmuje procesy polegające na rozpuszczaniu i wylugowywaniu składników spoiwa cementowego. Szybkość korozji w tym przypadku jest określona prędkością wnikania i odprowadzania wody z betonu. Do grupy II należą zjawiska, podczas których zachodzi wymiana jonów wapniowych w spoiwie na inne jony. Tworzą się wówczas związki nie wykazujące właściwości wiążących lub związki łatwo ulegające wymyciu. W grupie III procesy, powodujące powstanie krystalicznych, trudnorozpuszczalnych soli. Sole gromadzą się w porach i rysach betonu powodując niszczenie jego struktury przez rozsadzanie podczas zwiększania swej objętości. Szybkość postępu korozji w tym przypadku zależy od ilości i szybkości osadzania się soli w porach.

Dla dwóch pierwszych grup przedstawionego podziału można było bezpośrednio zastosować równania dyfuzji, natomiast dla grupy trzeciej należy dodatkowo eksperymentalnie określić źródła masy oraz sposób powiązania ich z polem naprężeń w betonie [29].

•Procesy ługujące beton (grupa I)

W grupie pierwszej, proces dyfuzji polega na transporcie substancji na zewnątrz betonu. Zgodnie z definicją podaną przez Moskvina [30] przyjęto, że na początku procesu ($t=0$) stężenie substancji rozpuszczanej i wymywanej z betonu jest stałe ($C_1=C_{10}=\text{const}$). W miarę upływu czasu ($t>0$) następuje zmiana rozkładu stężeń, przy czym przez cały czas na licu betonu wymywanych związków nie ma. Zmianę stężenia składników wylugowanych z betonu przedstawiono na rys. 1.6.

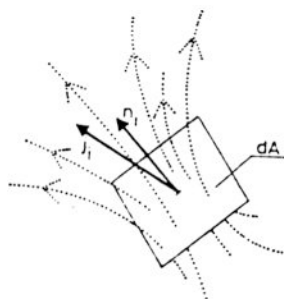


Rys. 1.6. Zmiana stężenia składników wymywanych z betonu (grupa I korozji betonu):
a) początek procesu, b) rozwój w czasie, według [29].

Zgodnie z pierwszym prawem Ficka strumień masy wymywanych z betonu składników j_i jest proporcjonalny do gradientu stężenia C_1 i wyraża się zależnością

$$j_i = -D_i \frac{\partial C_1}{\partial x_i}, \quad i=1, 2, 3. \quad (1.1)$$

gdzie D_i jest współczynnikiem dyfuzji określającym ilość masy przepływającej w jednostce czasu przez jednostkową powierzchnię, na skutek jednostkowego gradientu stężenia, x_i oznacza współrzędną punktu w układzie przestrzennym. Przepływ strumienia masy j_i przez wydzieloną myślowo z betonu powierzchnię dA o wektorze normalnym n_i ilustruje rys. 1.7.



Rys. 1.7

Przepływ strumienia masy przez wydzieloną myślowo powierzchnię wewnętrzną dA w betonie [29].

Podstawiając wzór (1.1) do równania bilansu masy otrzymano równanie dyfuzji dla przepływów niestacjonarnych.

$$\frac{\partial C_1}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C_1}{\partial x_1^2}. \quad (1.2)$$

Rozwiązanie tego równania przy założeniu przepływu jednokierunkowego ($x=X_1$) przeprowadzono metodą Boltzmana podstawiając nową zmienną $z = x / \sqrt{t}$. Równanie różniczkowe cząstkowe (1.2) sprowadzono do układu dwóch równań różniczkowych zwyczajnych

$$y = \frac{dC_1}{dz}, \quad \frac{1}{y} \frac{dy}{dz} + \frac{z}{2D_1} = 0, \quad (1.3)$$

których całka ogólna wynosi

$$C_1(x, t) = A_1 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t}}\right) + A_2, \quad (1.4)$$

gdzie erf u oznacza funkcję błędu określoną wzorem

$$\operatorname{erf} u = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-u^2} du. \quad (1.5)$$

Zgodnie z rozkładami stężeń przedstawionymi na rys. 1.6. przyjęto warunki początkowo - brzegowe

$$C_1(x, t) \big|_{t=0} = C_{10} \quad (1.6)$$

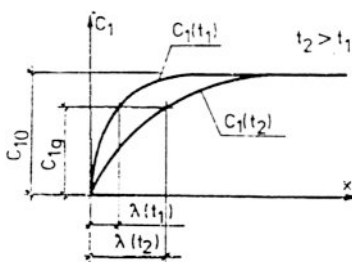
$$C_1(x, t) \big|_{x=0} = 0, \quad C_1(x, t) \big|_{x \rightarrow \infty} = C_{10}, \quad (1.7)$$

a następnie po wyznaczeniu stałych całkowania A_1 i A_2 uzyskano całkę szczególną

$$C_1(x, t) = C_{10} \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_1 t}}\right). \quad (1.8)$$

W powyższych związkach C_1 oznacza stężenie składnika wmywanego z betonu, x -współrzedną punktu, natomiast t -czas.

W dalszym opisie uwzględniono, że zniszczenie betonu nastąpi zawsze w punkcie $x=\lambda$, w którym stężenie substancji wmywanej $C_1(x,t)$ uzyska wartość graniczną C_{1g} ($C_1(x=\lambda,t)=C_{1g}=\text{const}$). Wtedy zasięg strefy skorodowanej określa brzeg betonu oraz punkty leżące wewnątrz, w których stężenie wynosi C_{1g} . Zmiany stężenia C_1 oraz zmiany zasięgu strefy skorodowanej λ , w zależności od położenia punktu x i czasu t ilustruje rys. 1.8.



Rys. 1.8 Określenie zasięgu uszkodzenia betonu $\lambda(t)$ na podstawie zmian rozkładu stężenia składników wylugowywanych z betonu (grupa I) [29].

Po podstawieniu koncentracji C_{1g} w punktach o współrzędnych $x=\lambda$ zależność (1.8) sprowadzono do postaci

$$C_{1g} = C_{10} \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{D_1 t}}\right), \quad (1.9)$$

która uzasadnia równość

$$\frac{\lambda}{2\sqrt{D_1 t}} = \text{const.} \quad (1.10)$$

Z powyższej równości wyznaczono zasięg strefy skorodowanej

$$\lambda = \text{const} \cdot 2\sqrt{D_1 t}, \quad \text{lub ogólnie } \lambda = k\sqrt{t}, \quad (1.11)$$

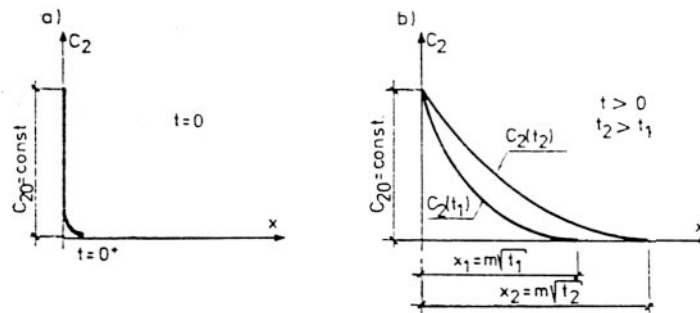
gdzie k oznacza stałą wyznaczaną doświadczalnie. Z zależności (1.11) wynika, że procesy zaliczane do grupy I klasyfikacji Moskvina [30] powodują zniszczenia korozyjne o głębokości zniszczenia proporcjonalnej do pierwiastka kwadratowego z czasu.

• Procesy wymiany jonów (grupa II)

Określając zmienny w czasie zasięg skorodowanego betonu dla przypadku II grupy według klasyfikacji Moskwin [30], przyjęto następujące założenia [29]:

- o zniszczeniu struktury betonu decyduje stała wartość graniczna wnikażącego do betonu środka agresywnego C_{2g} ,
- na początku procesu ($t=0$) w betonie nie ma związku agresywnego (rys. 1.9a)
- na brzegu betonu występuje stałe stężenie substancji agresywnej C_2 ($C_{20}=\text{const}$),
- zasięg x substancji wnikażącej, w betonie jest zmienny i proporcjonalny do pierwiastka kwadratowego z czasu (rys. 1.9b).

Ostatnie założenie wynika z rozwiązań równania dyfuzji dla przepływów jednowymiarowych.



Rys. 1.9 Zmianę rozkładów stężenia substancji wnikającej z otoczenia do betonu (grupa II korozji betonu): a) początek procesu, b) rozwój w czasie, według [29].

Wyodrębniono dwa niezależne strumienie wnikającego środka agresywnego do betonu j_{2i} , oraz przepływających na zewnątrz produktów reakcji chemicznej j_{1i} zgodnie z prawem Ficka strumienie parcyjne określono zależnościami:

$$j_{2i} = -D_2 \frac{\partial C_2}{\partial x_i}, \quad j_{1i} = -D_1 \frac{\partial C_1}{\partial x_i}, \quad i=1,2,3. \quad (1.12)$$

gdzie D_2 oznacza współczynnik dyfuzji substancji agresywnej w betonie, C_2 - stężenie tej substancji, natomiast D_1 i C_1 odpowiednio współczynnik dyfuzji produktów reakcji w warstwie skorodowanej oraz ich stężenie.

Układając globalne bilanse mas dla obydwu przepływów, odejmując otrzymane równania stronami oraz przechodząc z zapisu lokalnego do globalnego, otrzymano wyrażenie [29]

$$\frac{d}{dt} \int_V (C_2 - C_1) dV = \int_V \frac{\partial j_{1i}}{\partial x_i} dV - \int_V \frac{\partial j_{2i}}{\partial x_i} dV, \quad (1.13)$$

gdzie V jest objętością betonu, w której występują przepływy dyfuzyjne. Podstawiając do wzoru (1.13) wyrażenia (1.12) otrzymano równanie

$$\frac{d}{dt} \int_V (C_2 - C_1) dV = D_2 \int_V \frac{\partial^2 C_2}{\partial x_i^2} dV - D_1 \int_V \frac{\partial^2 C_1}{\partial x_i^2} dV \quad (1.14)$$

Po przyjęciu, że między stężeniami substancji agresywnej w betonie (C_2) a związku powstałego wskutek reakcji (C_1) istnieje zależność liniowa

$$C_1 = \xi C_2, \quad (1.15)$$

równanie (1.14) sprowadzono do klasycznej postaci równania dyfuzji Ficka

$$\frac{\partial C_2}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_2}{\partial x_i^2}, \quad (1.16)$$

w którym występuje efektywny współczynnik dyfuzji

$$D = \frac{D_2 - D_1 \xi}{1 - \xi}, \quad (2.14)$$

stanowiący kombinację współczynników dyfuzji substancji wnikałej do betonu D_2 oraz produktów reakcji wymywanych na zewnątrz D_1 . Zakładając jednowymiarowy przepływ w półprzestrzeni ($x \equiv x_1$) oraz uwzględniając zgodnie z wykresami na rys. 1.9 warunki początkowo-brzegowe

$$C_2(x, t) \big|_{t=0} = 0 \quad (1.18)$$

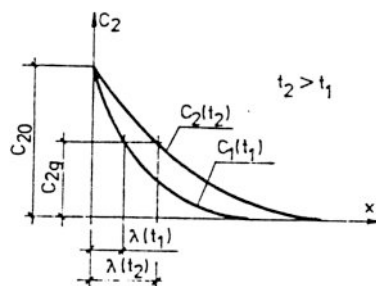
$$C_2(x, t) \big|_{x=0} = C_{20}, \quad C_2(x, t) \big|_{x=m\sqrt{t}} = 0 \quad (1.19)$$

otrzymano następujące rozwiązanie równania (1.16) [29]

$$C_2(x,t) = C_{20} \left[1 - \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{m}{2\sqrt{D}}\right)} \right] \quad (1.20)$$

gdzie m oznacza stały współczynnik, natomiast t - czas.

Następnie przyjęto, że zniszczenie struktury betonu nastąpi w punkcie $x=\lambda$, w którym stężenie substancji agresywnej $C_2(x,t)$ uzyska wartość graniczną C_{20} ($C_2(x=\lambda,t)=C_{2g}=\text{const}$). Ilustrację zmiany stężenia C_2 oraz zmiany zasięgu strefy skorodowanej w zależności od położenia punktu x i czasu t przedstawiono na rys. 1.10.



Rys. 1.10 Określenie zasięgu uszkodzenia betonu $\lambda(t)$ na podstawie zmian rozkładu stężenia substancji agresywnej wnikałej do betonu (grupa II) [29].

W szczególnym przypadku, gdy w punktach o współrzędnych $x=\lambda$ stężenie osiągnie wartość C_{2g} zależność (1.20) przyjmie postać

$$C_{2g} = C_{20} \left[1 - \frac{\operatorname{erf}\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{Dt}}\right)}{\operatorname{erf}\left(\frac{m}{2\sqrt{D}}\right)} \right] \quad (1.21)$$

Przekształcając powyższy związek otrzymano równość

$$\left[1 - \frac{C_{2g}}{C_{20}} \right] \operatorname{erf}\left(\frac{m}{2\sqrt{D}}\right) = \operatorname{erf}\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (1.22)$$

w której lewa strona jest wartością stałą. Otrzymamy związek

$$\operatorname{erf}\left(\frac{\lambda}{2\sqrt{Dt}}\right) = \text{const} , \quad (1.23)$$

uzasadnia wyrażenie określające zasięg λ strefy skorodowanej betonu

$$\lambda = k\sqrt{t} , \quad (1.24)$$

gdzie k jest stałym współczynnikiem doświadczalnym.

Otrzymane zależności uwzględniające specyfikę transportu w przypadku procesów korozyjnych zaliczanych do I i II grupy klasyfikacji Moskvina [30] są konsekwencją struktury formalnej równania dyfuzji. Rozwiązania, chociaż dotyczą tylko półprzestrzeni, modelującej przepływy dyfuzyjne w betonie, są również przydatne do określenia zmian zasięgu stref skorodowanych dla innych kształtów brzegu elementu. W artykule [28] analizowano zadanie początkowo - brzegowe równania dyfuzji sformułowane dla prostokątnego przekroju poprzecznego elementu żelbetowego.

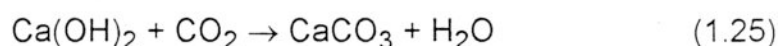
W celu zweryfikowania słuszności przyjętych równań dyfuzji do opisu korozji betonu podjęto próbę porównania wyników uzyskanych na drodze teoretycznej z rezultatami znanych z literatury badań doświadczalnych. Rozważania ograniczono do najczęściej występujących zniszczeń spowodowanych dwutlenkiem węgla z atmosfery i chlorkami zawartymi w środowisku.

1.5. Działanie dwutlenku węgla na beton konstrukcji żelbetowych

Przeważnie degradacja elementów żelbetowych następuje przeważnie w wyniku działania na beton dwutlenku węgla. Stężenie dwutlenku węgla w powietrzu atmosferycznym wynosi od 0,03 do 0,1%. Górna wartość podanego zakresu odnosi się do środowisk wielkomiejskich i przemysłowych. Norma PN-80/B-01800 [31] zalicza środowisko gazowe do słabo agresywnych dla żelbetu, gdy zawiera dwutlenek węgla o stężeniu nie przekraczającym 2000 mg/m^3 a stężenie dwutlenku węgla większe od tej wartości jest kwalifikowane jako środowisko średnio agresywne. Natomiast według tej normy, środowisko wodne jest uznawane za średnio agresywne, jeżeli dwutlenek węgla występuje w nim o stężeniu większym od 40 mg/l . Przy mniejszym stężeniu CO_2 woda jest traktowana, jako środowisko słabo agresywne.

Dyfuzja CO_2 do betonu odbywa się zarówno w mokrym, jak i w lekko wilgotnym betonie. Jednak najszybciej dyfuzja postępuje w betonie suchym, w którym otwarte pory pozwalają na łatwą penetrację gazów [14]. Dwutlenek węgla wnikając przez

pory w głąb betonu, reaguje ze składnikami stwardniałego zaczynu cementowego, a zwłaszcza z wodorotlenkiem wapnia według reakcji:



Znacznie wolniej przebiegają reakcje dwutlenku węgla z wapniem zawartym w glinianach i krzemianach. Uważa się za mało prawdopodobne, aby reakcje te obejmowały całość glinianów i krzemianów.

Działanie CO_2 zwane karbonatyzacją betonu powoduje zobojętnienie otuliny. W wyniku procesu karbonatyzacji trudnorozpuszczalny CaCO_3 krystalizuje w porach, w których zachodzi reakcja pomiędzy CO_2 i Ca(OH)_2 . Jak wynika z przeprowadzonych badań [32] krystalizacja węglanu powoduje zmniejszenie liczby porów o promieniach od 10^{-5} do 10^{-3} mm. Jednocześnie przy pełnej karbonatyzacji betonu wartość pH roztworu w porach betonu może obniżyć się z wartości $12,6 \div 13,5$ (charakterystyczny dla świeżego betonu) do 8,3. Znaczne obniżenie pH roztworu porów umożliwia rozwój korozji zbrojenia.

Ustalając trwałość konstrukcji żelbetowych ważna jest możliwość oszacowania przybliżonego czasu, po którym warstwa betonu stykająca się ze zbrojeniem utraci właściwości ochronne. Powszechnie zasięg karbonatyzacji betonu określa się na podstawie wzoru [33]:

$$\lambda = k\sqrt{t} \quad k = \sqrt{\frac{2D \cdot t}{a}} \quad (1.25)$$

gdzie: k jest stałą zależną od D - współczynnika dyfuzji CO_2 , przez warstwę zobojętnionego betonu, a - parametru charakteryzującego część objętości CO_2 związanej w jednostce objętości betonu, t - czasu.

Wzór (1.25) jest identyczny jak wyprowadzone teoretycznie zależności (1.11) i (1.24).

Wyniki niektórych badań laboratoryjnych dokładniej opisuje zmodyfikowany wzór - por [14]

$$\lambda = k\sqrt{t} + B \quad (1.26)$$

w którym B oznacza współczynnik zależny od struktury porów. Zwiększenie porów otwartych w nieszczelnych betonach, powoduje wzrost wartości tego współczynnika.

Pomimo licznych prób opisanie procesu dyfuzji CO_2 w porowatym betonie, nie ma dotychczas modelu obejmującego wszystkie procesy zachodzące w czasie karbonatyzacji [20, 21]. Szybkość procesu karbonatyzacji nie zależy jedynie od

dyfuzji CO_2 do betonu. Karbonatyzacja jest procesem bardzo złożonym, na który ma wpływ wiele czynników. Do najważniejszych z nich można zaliczyć [14]:

- powstanie w wyniku hydratacji cementu związków mogących reagować z CO_2 i ich ilość,
- dyfuzję gazowego CO_2 z powietrza przez pory betonu,
- rozpuszczanie $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w cieczy porowej betonu i dyfuzja roztworu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ w porach,
- rozpuszczanie CO_2 w cieczy porowej betonu i reakcja z $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH i KOH oraz innymi stałymi składnikami betonu mogącymi reagować z CO_2 , np. uwodnionymi krzemianami wapnia,
- zmniejszenie objętości porów przez produkty hydratacji i karbonatyzacji.

1.6. Zagrożenie zbrojenia korozją chlorkową.

Chlorki przenikające ze środowiska zewnętrznego przez otulinę betonową są jedną z ważniejszych przyczyn depasywacji powierzchni zbrojenia. Na powierzchnię konstrukcji betonowej mogą oddziaływać chlorki pochodzące z wody morskiej (budowle morskie), mgły solnej (konstrukcje w strefie nadbrzeżnej), a także z środków do odladzania jezdni (mosty, wiadukty, garaże podziemne).

Chlorki w przeciwieństwie do CO_2 , łatwiej przenikają przez wypełnione wodą pory betonu w wyniku dyfuzji. Natomiast, w częściowo zawilgoconym betonie migracja chlorków może zachodzić w wyniku absorpcji i sił podciągania kapilarnego. W całkowicie wysuszonym betonie proces migracji chlorków ulega zahamowaniu.

Pochodzące ze środowiska chlorki w betonie mogą występować w kilku postaciach [36]:

- jako rozpuszczone w cieczy porowej (wolne)
- związane chemicznie z minerałami powstałymi w wyniku hydratacji cementu, np. w postaci soli Friedla,
- związane fizycznie z powierzchnią betonu w porach siłami Van der Waalsa,
- związane przez adsorpcję chemiczną.

W czasie przenikania chlorków przez beton część z nich zostaje związana z zaczynem cementowym tworząc np. $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. Pozostałą ilość znajdującą się w roztworze uważa się za chlorki wolne lub rozpuszczalne. Na całkowitą zawartość chlorków w betonie składają się łącznie chlorki rozpuszczalne i związane z zaczynem cementowym.

W momencie, gdy stężenie chlorków rozpuszczonych w cieczy porowej osiągnie wartość krytyczną następuje uszkodzenie warstewek pasywnych na powierzchni stali i rozpoczyna się korozja zbrojenia. Po uszkodzeniu warstewki

pasywnej rozwój procesów niszczących zbrojenie w środowiskach chlorkowych jest bardzo szybki.

Dotychczas nie udało się określić jednoznacznie krytycznej zawartości chlorków. W literaturze [37] podawane są bardzo zróżnicowane wartości.

Na podstawie pracy Hausmanna [38] przyjmuje się kryterium ustalające krytyczne stężenia chlorków w postaci stosunku zawartości jonów chlorkowych $[Cl^-]$ do wodorotlenkowych $[OH^-]$. Uważa się, że depasywacja powierzchni stali następuje gdy:

$$\frac{[Cl^-]}{[OH^-]} \geq 0,6. \quad (1.27)$$

W monografii [40] podkreśla się duży wpływ wartości pH roztworu porowego na zagrożenie korozji stali zbrojeniowej przy działaniu chlorków. W przypadku, gdy beton będzie podlegał dodatkowo karbonatyzacji, to proces korozji zbrojenia zostaje istotnie przyspieszony. W innych pracach stężenie krytyczne chlorków określa się wartością 0,4% masy cementu w konstrukcjach żelbetowych oraz 0,3% masy cementu w konstrukcjach sprężonych por. [41, 42]. Natomiast Wieczorek [43] twierdzi, że zagrożenie zbrojenia przez korozję chlorkową powinno być każdorazowo określone na podstawie badań danego betonu.

Obliczane na podstawie równania dyfuzji stężenia chlorków w betonie zależą od współczynnika dyfuzji. Współczynnik dyfuzji nie ma wartości stałej, lecz zmieniającą się w zależności od szeregu parametrów fizycznych. Wartość współczynnika dyfuzji zależy przede wszystkim od stopnia hydratacji cementu, który wpływa na szczelność betonu. Na wartość współczynnika dyfuzji wpływa temperatura zgodnie ze wzorem [44]

$$D = D_0 \cdot e^{\frac{-\Delta G_a}{RT}}, \quad (1.28)$$

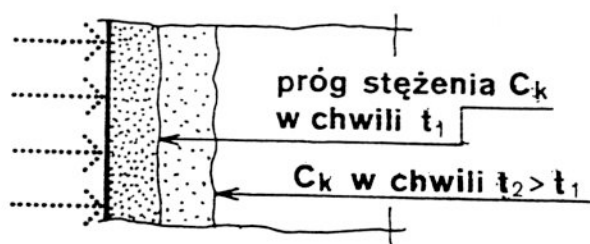
gdzie T oznacza temperaturę bezwzględną; D - współczynnik dyfuzji w temperaturze T ; D_0 - współczynnik dyfuzji e temperaturze T_0 , R - stałą gazową, ΔG_a - energię aktywacji procesu dyfuzji. Zależność współczynnika dyfuzji od wilgotności względnej h betonu - najlepiej opisuje zależność podana przez Mangat'a i Gurusamy'ego [45] oraz Bamforth [46]

$$D_i = D_{i,0} \cdot \left[1 + \frac{(1-h)^4}{(1-h_e)^4} \right] - 1 \quad (1.29)$$

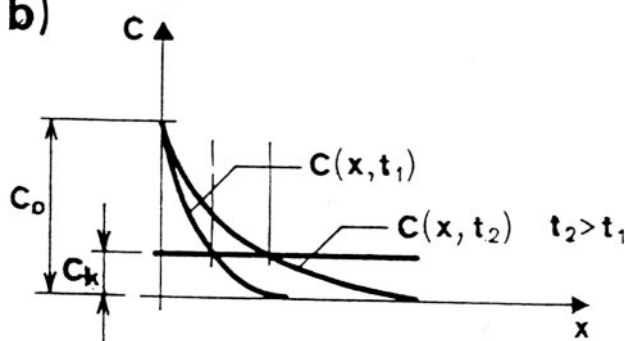
gdzie $D_{i,0}$ jest współczynnikiem dyfuzji przy wilgotności betonu równej 100%, natomiast h_e - wilgotnością względną, przy której współczynnik D_i osiąga połowę wartości pomiędzy maksymalną a minimalną. Oczywiście współczynnik dyfuzji zależy także od sposobu oddziaływania środowiska na konstrukcję, w tym usytuowania powierzchni zewnętrznej, osłonięcia przed bezpośrednim oddziaływaniem deszczu, wiatru, itp.

Dysponując rozkładem stężenia chlorków w betonie $C_{Cl}=C_2(x,t)$ wyznaczonym według wzoru (1.20) oraz stałym poziomem stężenia granicznego C_{2g} wyznacza się zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 1.10 zasięg skażonej chlorkami strefy przypowierzchniowej. Ewolucję w czasie, zasięgu strefy betonu, w której stężenie chlorków jest wyższe od krytycznego a powierzchnia stali jest w stanie aktywnym przedstawiono na rys. 1.11. Osiągnięcie przez stężenie krytyczne chlorków powierzchni wkładki określa czas $t=T$ rozpoczęcia się korozji zbrojenia -por. [39].

a)



b)



Rys. 1.11. Migracja chlorków w betonie opisana równaniem dyfuzji: a) zasięg progów stężenia krytycznego, b) rozkład stężenia, według [39].

Do oszacowania zasięgu strefy betonu skażonej chlorkami stosuje się także uzasadniony rozwiązaniem zadania początkowo - brzegowego równania dyfuzji wzór - por [14]

$$\lambda = \sqrt{A \cdot t} + B \quad (1.30)$$

gdzie: λ oznacza odległość od powierzchni miejsca w którym zbrojenie może ulec aktywacji, A - współczynnik proporcjonalności (zależy od stężenia jonów chlorkowych), t - czas trwania dyfuzji, B - stała, uwzględniająca stan powierzchni betonu.

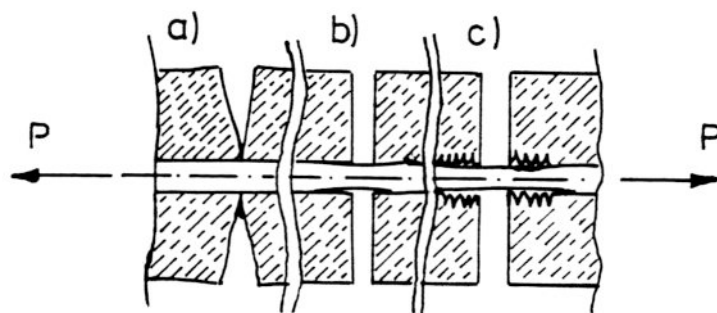
1.7. Wpływ naprężeń i rys w otulinie betonowej na korozję zbrojenia.

Do końca lat dwudziestych bieżącego wieku uważano, że tylko niezarysowany beton stanowi skuteczną ochronę antykorozyjną [4]. W wyniku badań i obserwacji eksploatowanych konstrukcji uznano, że występowanie w otulinie betonowym rys o małej rozwartości nie stanowi zagrożenia pod względem korozyjnym. Według obowiązującej obecnie w kraju normy [47] dopuszcza się trzy szerokości rozwarcia rys:

- 0,1 mm - w środowisku silnie i średnio agresywnym,
- 0,2 mm - w środowisku słabo agresywnym,
- 0,3 mm - w środowisku nieagresywnym.

W żelbecie powstają rysy, gdy naprężenia rozciągające przekraczają wartości wytrzymałości betonu na rozciąganie. Występowanie rys w betonie powoduje rozszczelnienie otulenia, co w konsekwencji ułatwia wnikanie do jego wnętrza wilgoci i substancji agresywnych ze środowiska (tlen, para wodna, jony chlorkowe itd.). Z tego powodu w strefie rozciąganej jest obserwowana większa głębokość karbonatyzacji na powierzchni ziaren kruszywa, a także większe wnikanie chlorków w beton. Ułatwione wnikanie substancji agresywnych powoduje przyspieszenie procesów korozji stali zbrojeniowej. Obecnie uważa się, że szybkość korozji stali zbrojeniowej generalnie zależy od szerokości rozwarcia i typu rys.

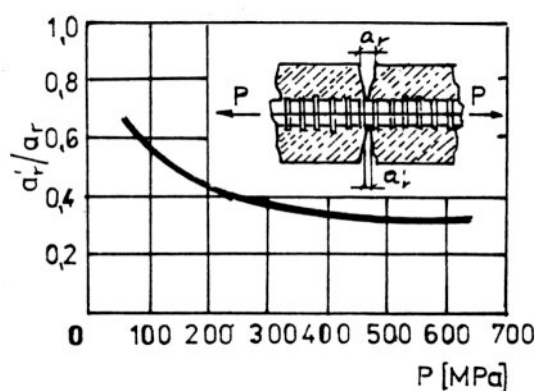
Wskutek rozciągania elementów żelbetowych tworzą się dwa rodzaje rys [12]. Pierwszy typ rys rozwija się od powierzchni elementu w kierunku zbrojenia, natomiast drugi typ powstaje przy powierzchni wkładki (na dnie pierwszych) i przebiega wzdłuż zbrojenia. Schemat rozwoju rys przedstawiono na rys. 1.12



Rys. 1.12 Fazy rozwoju rys w żelbetowych elementach rozciąganych: a) powstanie rysy pierwotnej, b) rozsuniecie krawędzi rysy w stosunku do zbrojenia, c) rozwój rys podłużnych; według [14]

Rysy powstające w elementach żelbetowych mogą mieć kształt zróżnicowany. Zazwyczaj rozwartości rys określa się na podstawie pomiarów na powierzchni

elementów. W badaniach korozyjnych przyjmuje się, w uproszczeniu, że rozwartość rys przy powierzchni zbrojenia z prętów gładkich w małym stopniu różni się od rozwartości rys mierzonych na powierzchni elementu. Pręty o profilu żebrowanym charakteryzuje większa przyczepność do betonu, co zapewnia lepszą współpracę zbrojenia z otuliną betonową. Na rys. 1.13 przedstawiono schematyczny kształt rysy powstałej w przypadku zastosowania w żelbecie pręta żebrowanego.



Rys. 1.13. Schematyczny kształt rysy powstałej w przypadku zastosowania w żelbecie pręta żebrowanego [14].

Uwzględniając ochronę zbrojenia przed korozją wszystkie rysy w elementach zginanych można podzielić na trzy grupy [12]:

- rysy otwarte (I rodzaju) utworzone na powierzchni elementu i nie osiagające powierzchni zbrojenia,
- rysy (II rodzaju), których rozwartość przy powierzchni zbrojenia jest równa lub nieco mniejsza niż na powierzchni elementu,
- rysy poprzeczne oraz z rysy podłużne powstałe w wyniku naruszenia przyczepności zbrojenia do betonu (III rodzaju).

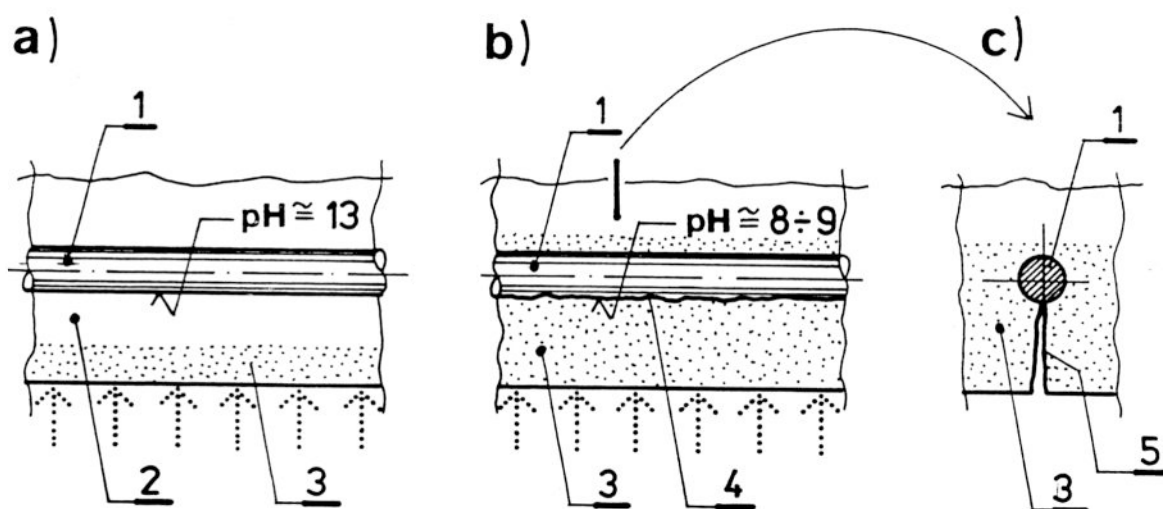
Rysy otwarte nie powodują bezpośredniego zagrożenia korozyjnego zbrojenia, jednak są przyczyną naruszenia szczelności otuliny betonowej i przyspieszenia w tym miejscu karbonatyzacji. Karbonatyzacja otuliny betonowej w strefie rysy wzmacnia się wraz ze wzrostem rozwartości rys. W przypadku dużego zawilgocenia betonu proces karbonatyzacji ulega zwolnieniu, co powoduje spowolnienie procesu korozji stali zbrojeniowej. W przypadku rys II i III rodzaju korozja może wystąpić prawie bezpośrednio po zarysowaniu [12]. Przyczyną tego zjawiska jest ułatwiona dyfuzja ze środowiska do powierzchni zbrojenia: tlenu, pary wodnej i jonów chlorkowych. W przypadku, kiedy konstrukcja żelbetowa znajduje się w środowisku zawierającym chlorki, występowanie rys powoduje w pobliżu zbrojenia bardzo szybki wzrost

stężenia chlorków i osiągnięcie wartości krytycznej, powodującej aktywację powierzchni stali.

1.8. Inicjacja i rozwój korozji zbrojenia.

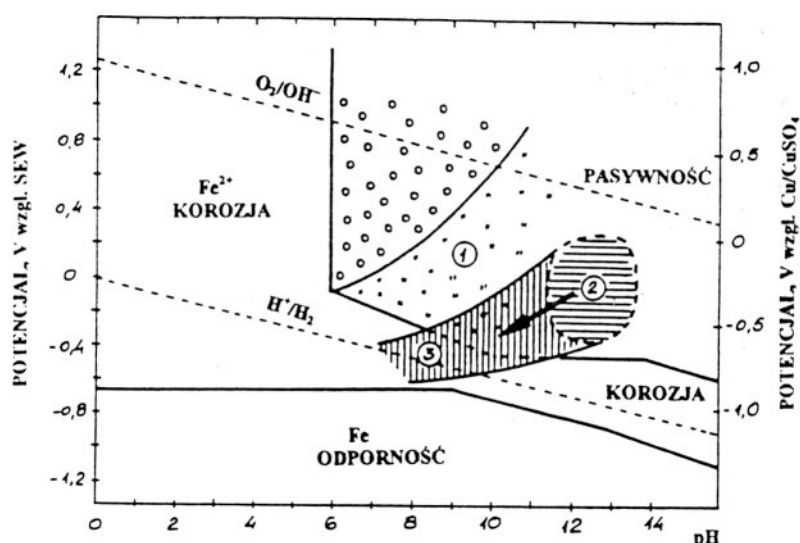
Stal zbrojeniową otrzymuje się z rud w procesie hutniczym wymagającym znacznego nakładu energii. Uzyskany w ten sposób materiał jest termodynamicznie nietrwały. Na skutek reagowania ze środowiskiem wykazuje on tendencję do tworzenia związków chemicznych (np. tlenków) z równoczesnym oddaniem energii. Zagrożające stali zbrojeniowej procesy korozyjne są zatem wynikiem dążności do przejścia materiału w naturalny dla niego stan utleniony [48].

Jeżeli procesy chemiczne wpływające niekorzystnie na beton zachodzą w porach i rysach odległych od powierzchni zbrojenia, to wkładki nie ulegają korozji - rys. 1.15a.



Rys. 1.15 Schemat oddziaływania otoczenia na element żelbetonowy: a) do chwili depasywacji powierzchni zbrojenia, b) w warunkach korozyjnych, c) przekrój poprzeczny zbrojenia dotkniętego korozją i; 1 - pręt zbrojeniowy, 2 - otulenie betonowe, 3 - skarbonatyzowana lub skażona chlorkami warstwa betonu, 4 - produkty korozji na prętach zbrojeniowych, 5 - rysa podłużna [39].

Zawarta w porach ciecz, będąca nasyconym roztworem wodnym $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o pH zbliżonym do 12,5 sprawia, że stalowe pręty zbrojeniowe są pokryte powierzchniowo ochronną warstewką $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Zgodnie z diagramem Pourbaix powierzchnia stali znajduje się w stanie pasywnym - obszar 2 na rys. 1.16.

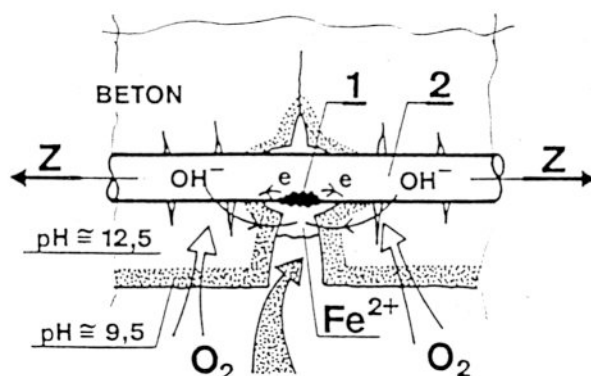


Rys. 1.16. Diagram potencjał - pH dla żelaza w 25°C: - 1 - pasywacja niedoskonała, 2 - stal w świeżym betonie, 3 - stal w betonie skażonym chlorkami. [49]

Według definicji podanej przez Uhliga [50] metal lub stop jest w stanie pasywnym, jeśli wykazuje on znaczną odporność na korozję w środowisku, w którym z termodynamicznego punktu widzenia obserwuje się znaczne obniżenie energii swobodnej wraz z przejściem metalu ze stanu metalicznego w odpowiednie produkty korozji.

Zachowanie stałości pH odczynu środowiska betonowego otulenia oraz potencjału stali w zakresie stanu pasywnego gwarantuje pełne zabezpieczenie zbrojenia przed korozją. Jednak w praktyce warunki są trudne do spełnienia. Eksploatowane konstrukcje żelbetowe są narażone na ciągłe oddziaływanie otoczenia. Wskutek wnikania substancji agresywnych z otoczenia przez miejscowe nieszczelności otulenia betonowego następuje lokalne obniżenie pH cieczy porowej do wartości $\text{pH}=8,0 - 8,5$. W miejscu obniżenia pH roztworu lub penetracji jonów agresywnych ochronna warstewka pasywna na powierzchni zbrojenia ulega uszkodzeniu. Uszkodzeniu warstewki pasywnej sprzyja duże rozwinięcie powierzchni na styku zbrojenia z betonem. W takich warunkach stal przechodzi ze stanu pasywnego (obszar 2) w stan aktywny (obszar 3 na rys. 1.16) i ulega korozji - rys. 1.15 b, c.

Procesy korozyjne w żelbecie charakteryzują się utworzeniem lokalnych makroogniw [4, 10, 13, 51-72]. W miejscu ułatwionego wnikania substancji agresywnej z otoczenia, np. przez rysę w otulinie betonowej następuje aktywacja powierzchni stali i powstanie obszarów anodowych. Schemat lokalnego ogniw korozyjnego przedstawiono na rys. 1.17.



Rys. 1.17 Schemat procesu korozyjnego zbrojenia chronionego zarysowanym otuleniem betonowym; 1 - odcinek anodowy, 2 - strefa katodowa według [73].

W wyniku reakcji anodowej następuje rozpuszczanie żelaza



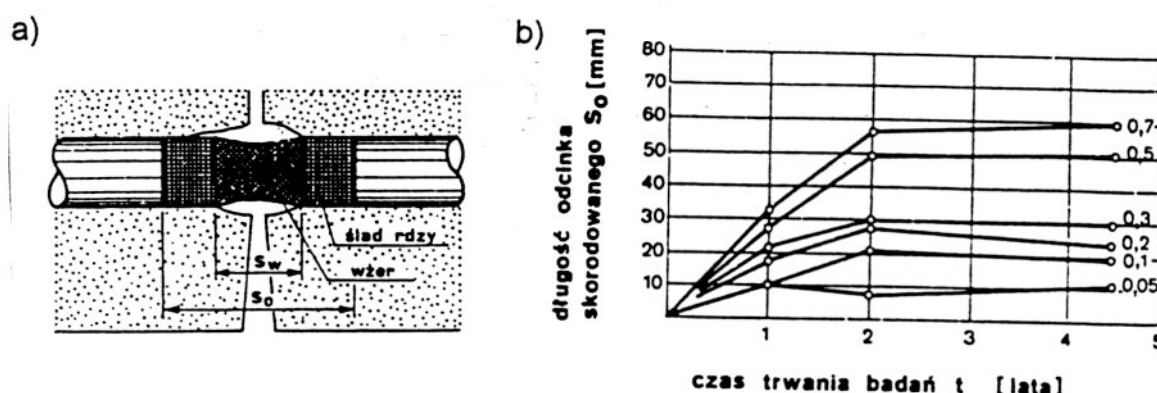
Ponieważ, w metalu zgodnie z prawem zachowania ładunku, nie może mieć miejsca wypadkowe gromadzenie ładunku elektrycznego, więc uwalniane w reakcji anodowej elektrony muszą zostać zużyte w równolegle przebiegającej reakcji katodowej. W środowisku betonu reakcją katodową jest redukcja tlenu



Procesowi korozji elektrochemicznej towarzyszy przepływ prądu korozyjnego. W metalu następuje ruch elektronów od obszarów anodowych do obszarów katodowych, natomiast w cieczy porowej betonu ruch kationów od obszarów anodowych do katodowych oraz anionów w kierunku przeciwnym. Przepływ prądu korozyjnego ułatwia wnikanie w głąb wilgotnego betonu związków nieorganicznych, które zmniejszają rezystywność i działają przyspieszająco na proces korozji.

W badaniach [4, 7, 52] stwierdzono, że na styku zbrojenia z rysą odcinki skorodowane mają w środku strefę z rozwiniętą korozją wżerową oraz części skrajne pokryte jedynie śladami produktów korozji. Obraz uszkodzeń sugeruje występowanie procesów anodowych w strefie wżeru, natomiast katodowych na pozostałych odcinkach zbrojenia. W latach sześćdziesiątych Verbeckij [10] określił doświadczalnie zasięg uszkodzeń zbrojenia chronionego otuleniem zarysowanym. Badania przeprowadzono na próbkach pierścieniowych rozciąganych obwodowo

przez wgniatanie rdzeni betonowych. Długość S_w części wżerowej w każdym przypadku nie przekraczała połowy długości całkowitej S_o odcinka uszkodzonego. Schemat uszkodzenia zbrojenia oraz uśrednione wyniki pomiarów długości całkowitej S_o odcinków skorodowanych przedstawiono na rys. 1.18.



Rys. 1.18. Wyniki badań Verbeckiego [10]: a) kształt uszkodzenia zbrojenia, b) uśrednione długości S_o odcinków skorodowanych.

Wyniki badań [10] wykazały, że po upływie dwóch lat zasięg lokalnego ogniwa korozyjnego praktycznie nie ulega zmianie - por. rys. 1.18b. Procesy anodowe zachodziły głównie w strefie wżeru o długości 0,5 całego odcinka uszkodzonego, a efektywna reakcja depolaryzacji tlenowej ograniczała się do pozostałej długości odcinka uszkodzonego.

W wyniku przeprowadzonych badań [53+56] stwierdzono, że intensywność działania ogniwa korozyjnego zależy od powierzchni elektrod. Jednak do chwili obecnej nie udało się dokładnie ustalić zasięgu obszarów elektrodowych utworzonych na zbrojeniu stykającym się z zarysowanym otuleniem betonowym.

W pracy [57] przedstawiono wpływ stosunku powierzchni katody do anody, potencjału oraz oporu elektrycznego na szybkość korozji. Stwierdzono, że nasilenie działania ogniwa zależy nie tylko od wielkości powierzchni geometrycznej elektrod, ale także od własności dyfuzyjnych betonu i jego przewodnictwa elektrycznego w sąsiedztwie stali. Dwa ostatnie czynniki w znacznym stopniu zależą od zawartości wody w porowatym materiale, gdyż w zmiennych warunkach nawilgocenia (okresowe suszenie i nawilżanie badanych próbek) występował znaczny wzrost szybkości korozji stali zbrojeniowej w porównaniu ze stałymi warunkami wilgotności.

Wyniki badań szybkości korozji w makro- i mikroogniwach w zależności od stosunku powierzchni anody do katody, ich kształtu, odległości między elektrodami, a także spadku potencjału między nimi zamieszczono w pracy [58]. Badania przeprowadzono na próbkach zbrojonego betonu oraz na modelach ogniw

przeprowadzono na próbkach zbrojonego betonu oraz na modelach ogniów korozyjnych. Modelowe ogniwo korozyjne składało się z dwóch oddzielnych butli polietylenowych zawierających roztwór odwzorowujący ciecz porową betonu. Zastosowano roztwór $\text{Ca}(\text{OH})_2 + 0,2 \text{ M KOH}$ nasycony dwutlenkiem węgla. Celem wywołania korozji lokalnej na powierzchni anody, do roztworu anodowego wprowadzono 1 M jonów Cl^- . Obie butle połączone zostały mostkiem solnym. Elektrody stanowił pręt zbrojeniowy o średnicy 6 mm i długości 8 cm . Próbkę o wymiarach $5 \times 40 \times 130 \text{ cm}$ wykonano z betonu o wskaźniku $w/c=0,5$ i zbrojono jednym prętem stalowym o średnicy 8 mm i powierzchni czynnej $6, 7, 22, 37$ i 278 cm^2 . Testowano wpływ stosunku powierzchni anody do katody: $0,02-0,08-0,13-1,0-7,5-12,6$ i $41,5$. Podczas badań próbki były okresowo nawilżane i suszone. Stwierdzono, że w napowietrzonym środowisku korozja stali w betonie przebiegała głównie z tworzeniem się na powierzchni prętów mikroogniw. W środowiskach odpowietrzonych miejsca o niższym potencjale zachowywały się jak czyste anody powodując wzrost lokalnej szybkości korozji. Wartości natężenia prądu galwanicznego (I_G) i korozyjnego (I_{corr}) były do siebie zbliżone tylko w warunkach zupełnie odpowietrzonego środowiska. Podobny efekt uzyskano, gdy stosunek powierzchni katody do anody (A_k/A_a) był bardzo duży. W próbkach betonowych z elektrodami ułożonymi równolegle względem siebie, przy stosunku $A_k/A_a > 1$, natężenie prądu galwanicznego nie wzrastało w sposób znaczący. W wyniku przeprowadzonych badań autorzy pracy [58] stwierdzili, że procesy korozyjne w betonie zbrojonym przebiegają pod kontrolą mieszaną, czyli anodowo-katodowo-opornościową. Natomiast nie zaobserwowano występowania tylko kontroli dyfuzyjnej O_2 .

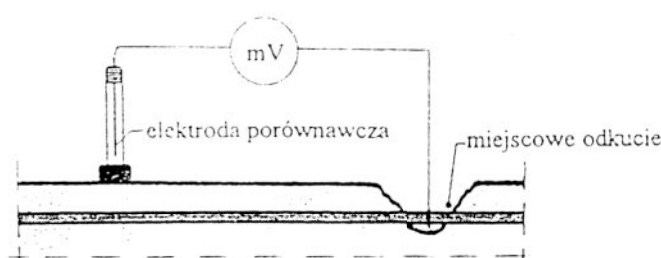
W referacie [59] przedstawiono wyniki badań wpływu działania chlorków i tlenu na szybkość korozji w makroogniwie korozyjnym powstającym w elementach betonowych zbrojonych, wykonanych z mieszanki o różnym wskaźniku w/c oraz mających różne grubości otuliny. Próbkę były poddawane okresowemu nawilżaniu i suszeniu. Zauważono, że większy wpływ na wzrost szybkości korozji stali w betonie wywierał wskaźnik w/c (przyjęto $w/c=0,40 - 0,70$) niż grubość otuliny betonowej (w granicach $20 - 50 \text{ mm}$).

Rozdział drugi

MONITOROWANIE PROCESU KOROZJI STALI ZBROJENIOWEJ W ELEMENTACH ŻELBETOWYCH.

2.1. Ogólna charakterystyka badań.

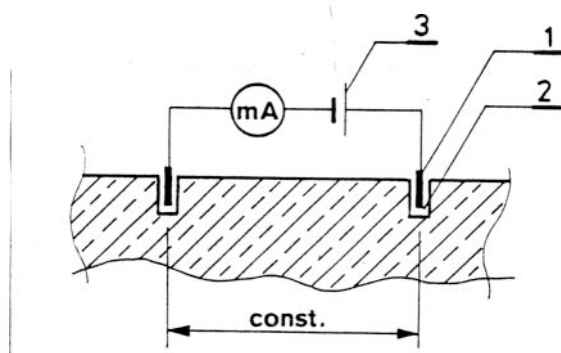
Jak już wspomniano, w początkowym etapie użytkowania elementów żelbetowych stal zbrojeniowa znajduje się w stanie pasywnym z powodu wysokiej alkaliczności cieczy porowej [14]. Stan pasywny może jednak ulec zaburzeniu w wyniku przeniknięcia do betonu agresywnych składników środowiska, pośród których najbardziej niebezpieczne są chlorki, dwutlenek węgla i składniki kwaśnego deszczu (tlenki siarki i azotu). Agresywne substancje powodują obniżenie pH cieczy porowej, co następnie prowadzi do uszkodzenia warstewki pasywnej na powierzchni stali [3]. Do nieniszczącej oceny stanu zagrożenia korozyjnego zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych, coraz częściej stosuje się metody stosowane w badaniach elektrochemicznych. Przeważnie, badania zagrożenia korozyjnego zbrojenia polegają na określeniu rozkładu potencjału stacjonarnego na jego powierzchni [42]. Badania te są zalecane przez amerykańską normę ASTM [5] przy diagnostyce stanu konstrukcji z betonu. Pomiary polegają na ustaleniu wartości potencjału elektrycznego generowanego przez ogniwo korozyjne utworzone na powierzchni zbrojenia pod otuleniem betonowym. Układ pomiarowy składa się z miliwoltomierza o dużym oporze wewnętrznym ($\geq 10 \text{ M}\Omega$) oraz elektrody porównawczej [42]. Schemat pomiarów przedstawiono na rys. 2.1.



Rys. 2.1 Schemat pomiaru potencjału korozyjnego zbrojenia w elemencie żelbetowym [74].

Zagrożenie korozyjne zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych szacuje się także na podstawie rezystywności otulenia betonowego. Schemat układu pomiarowego zamieszczono na rys. 2.2.

Badanie polega na pomiarze prądu przepływającego między dwiema elektrodami 1 umieszczonymi w gniazdach 2 wywierconych w otuleniu betonowym. Odległość między elektrodami jest stała, natomiast przepływający prąd generuje bateria 3. Umieszczenie elektrod w wywierconych gniazdach umożliwia włączenie do obwodu elektrycznego wewnętrznych stref betonu otulenia oraz zminimalizowanie wpływu skarbonatyzowanej lub zanieczyszczonej powierzchni zewnętrznej. Pomiar oporności określa w zasadzie stan wilgotności betonu otulenia, który ma istotny wpływ na przewodność jonową cieczy porowej betonu, a tym samym funkcjonowanie lokalnego ogniwa korozyjnego [74].

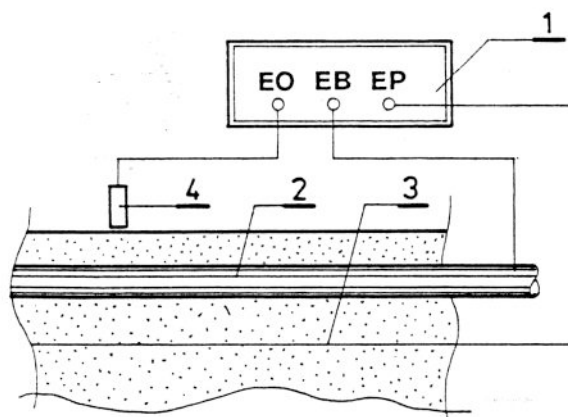


Rys. 2.2. Schemat pomiaru rezystywności betonu otulenia elementu żelbetowego, opis w tekście [74].

W ostatnich latach podjęto próby zastosowania badań polaryzacyjnych do oceny zagrożenia korozyjnego zbrojenia konstrukcji żelbetowych - por. [75]. Za elektrodę badaną przyjmuje się zbrojenie konstrukcji. Elektrodę odniesienia przykładą się do powierzchni betonu jak najbliższej osi prętów zbrojeniowych. Dużym utrudnieniem technicznym jest umieszczenie elektrody pomocniczej. W badaniach laboratoryjnych [76] przeprowadzonych w kraju, elektrodę pomocniczą z drutu palladowego umieszczano w elementach próbnych równolegle do zbrojenia, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 2.3.

Natomiast za granicą, do badań stosuje się już zintegrowaną głowicę zawierającą zarówno elektrodę odniesienia, jak i elektrodę pomocniczą - por. [77]

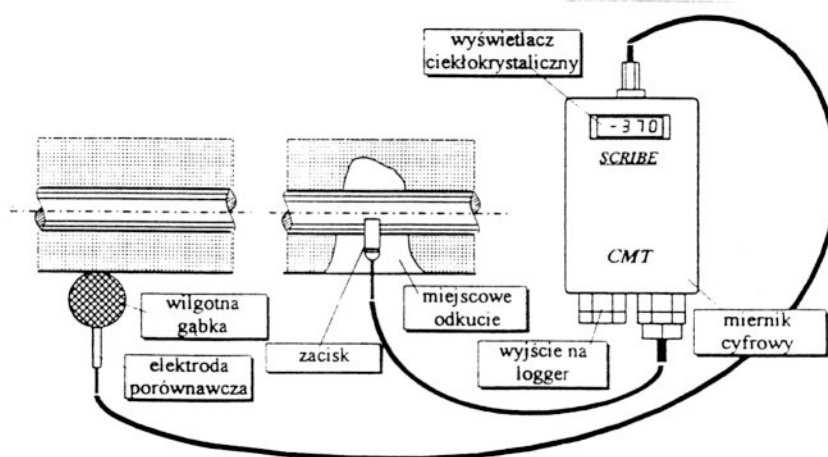
Oprócz wymienionych badań pomiary szybkości korozji zbrojenia w warunkach laboratoryjnych przeprowadzono także stosując impuls galwanostatyczny [5, 6, 75, 81] oraz spektroskopię impedancyjną [5, 6, 53-63, 78-89, 90, 91].



Rys. 2.3. Schemat badań polaryzacyjnych zbrojenia elementów próbnych: 1 - potencjostat, 2 - zbrojenie (elektroda badana), 3 - drut palladowy (elektroda pomocnicza), 4 - elektroda kalomelowa, według [76]

2.2. Pomiary potencjału korozyjnego i rezystancji otulenia betonowego.

W diagnostyce konstrukcji pomiary potencjału stacjonarnego zbrojenia wykonuje się urządzeniami przystosowanymi praktycznie do badania elementów żelbetowych. Schematyczny widok jednego z tych urządzeń przedstawiono na rys. 2.4.



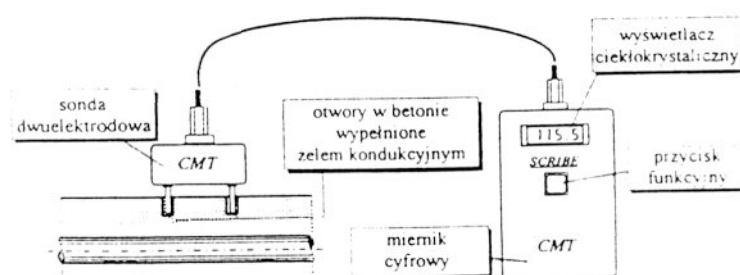
Rys. 2.4. Schemat pomiaru potencjału stacjonarnego przyrządem DHC 04 produkcji angielskiej [101].

Miernik łączy się z elektrodą porównawczą oraz po wcześniejszym miejscowym odkuciu ze zbrojeniem elementu. Elektrode przykładają się do powierzchni elementu żelbetowego w punkcie pomiarowym. Kontakt elektryczny zapewnia wilgotna gąbka między elektrodą i betonem. W urządzeniach tych najczęściej stosuje się elektrody miedziano-siarczanowe (Cu/CuSO_4). Nowsze przyrządy są zaopatrzone w elektrody chlorowo-srebrowe (Ag/AgCl), które są bardziej stabilne potencjałowo. Przyrządy są dodatkowo wyposażone w systemy elektroniczne do gromadzenia danych (np. [101]), a także ciekłokrystaliczne wyświetlacze umożliwiające na bezpośrednie analizowanie wyników w trakcie pomiarów (np. [102]). Istnieją przyrządy, do których przyłącza się zestaw elektrod kołowych usprawniających pomiary na dużych powierzchniach, np. przęsłach mostowych [74].

Oszacowanie zagrożenia korozyjnego zbrojenia w danym punkcie pomiarowym przeprowadza się na podstawie kryterium ujętego w normie ASTM [5] i przyjętego w wielu normatywach, także w wytycznych krajowych [103]. W zależności od wartości zmierzonego potencjału stacjonarnego E_0 względem elektrody miedziowo-siarczanowej ($E_{\text{Cu}/\text{CuSO}_4} = +0,316 \text{ V}_H$) stan korozyjny zbrojenia szacuje się następująco:

- $E_0 < -350 \text{ mV}$ - występowanie korozji z prawdopodobieństwem 95%,
- $-350 \text{ mV} \leq E_0 \leq -200 \text{ mV}$ - możliwość korozji z prawdopodobieństwem 50%,
- $E_0 > -200 \text{ mV}$ - małe 5% prawdopodobieństwo korozji.

Oporność elektryczną otulenia bada się przyrządami wykonanymi fabrycznie i oferowanymi do diagnostyki konstrukcji żelbetowych. Schematyczny widok takiego przyrządu przedstawiono na rys. 2.5.



Rys. 2.5. Schemat pomiaru rezystywności betonu otulenia przyrządem DRAM 02 produkcji angielskiej [103].

Przyrząd jest wyposażony w dwie identyczne stałe elektrody umieszczone w obudowie sondy. W planowanym punkcie pomiarowym wierci się dwa gniazda, natomiast styk elektrod z betonem uzyskuje się za pośrednictwem żelu przewodzącego. Zagrożenie korozyjne zbrojenia szacuje się porównując otrzymane wyniki z wartościami kryterium według instrukcji przyrządu [103]. Jeżeli rezystywność wynosi:

- poniżej 5 k Ω ·cm - prawdopodobieństwo korozji jest bardzo duże,
- od 5 do 10 k Ω ·cm - prawdopodobieństwo korozji uznaje się za duże,
- od 10 do 20 k Ω ·cm - prawdopodobieństwo korozji jest nieznaczne,
- powyżej 20 k Ω ·cm - prawdopodobieństwo korozji jest bardzo małe.

Wyniki badań potencjału stacjonarnego oraz wyniki badań rezystywności betonu otulenia przedstawia się w postaci map warstwicznych stanowiących wykresy izolinii określanych parametrów.

Należy zaznaczyć, że wyznaczone wartości potencjałów dają jedynie jakościową ocenę stanu korozyjnego zbrojenia stalowego [5, 6, 7, 59, 78, 79, 98, 107, 109]. Natomiast na podstawie tych pomiarów nie można uzyskać danych potrzebnych do ilościowego określenia szybkości korozji zbrojenia. Pomiary potencjału są wykonywane na powierzchni betonu w pewnej odległości od zbrojenia, którą limituje otulina betonowa. Wyznaczone w ten sposób potencjały są zaburzone omowym spadkiem potencjału w warstwie betonu, i dlatego są w rzeczywistości potencjałami złożonymi. Na wartość zmierzonego potencjału ma znaczący wpływ grubość otuliny betonowej. Wraz ze zwiększaniem się grubości otuliny wartości potencjału określone na powierzchni betonu w obszarach aktywnej korozji i w obszarach pasywnych, stają się zbliżone. Istotnym czynnikiem jest rezystywność betonu, na którą ma wpływ wilgotność betonu, obecność jonów cieczy porowej, obecność i rozkład kruszywa w betonie. Rezystywność betonu może w czasie ulegać zmianie w związku z różną lokalną wilgotnością lub zawartością jonów oraz odmiennym usytuowaniem badanego miejsca w konstrukcji. Należy przypuszczać, że powstający błąd dochodzi do ± 50 mV. Na wartość potencjału wpływają warstwy o tej samej rezystywności znajdujące się na powierzchni makroogniwa, a także efekty polaryzacji. Stal w konstrukcjach zatopionych w wodzie lub umieszczonych w ziemi ma często bardziej ujemny potencjał z powodu ograniczonego dostępu tlenu. W

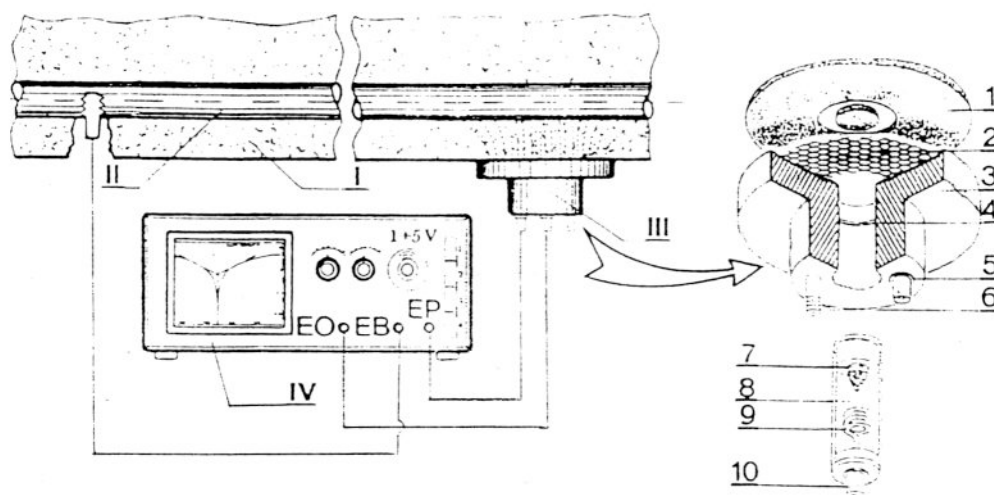
obszarze konstrukcji, narażonej na zmieniające się warunki środowiskowe (strefa rozbryzgów fal morskich lub strefa nad gruntem) mogą być notowane ujemne potencjały, wywołane elektrycznym kontaktem z zatopionymi w wodzie prętami.

2.3. Pomiar szybkości korozji metodą polaryzacji liniowej (LPM)

W ostatnich kilku latach pomiary szybkości korozji stali zbrojeniowej próbuje się wykonywać metodą polaryzacji liniowej (LPM). Badania były przeprowadzane w warunkach laboratoryjnych przy zastosowaniu uniwersalnej aparatury, a także w obiektach żelbetowych po uzupełnieniu urządzeń pomiarowych dodatkowym osprzętem [6, 26, 75, 105, 106]. Metoda polaryzacji liniowej polega na rejestracji odpowiedzi prądowej korodującej elektrody w obszarze potencjałów zawartych w granicach ± 100 mV od potencjału stacjonarnego. Odpowiedź ta jest w przybliżeniu liniowa, a wartość nachylenia krzywej jest odwrotnie proporcjonalna do szybkości procesu korozji. Badania korozyjne pręta zbrojeniowego pod otuliną betonową wymagają użycia trzech elektrod. Oprócz elektrody badanej stanowiącej zbrojenie elementu jest konieczna elektroda odniesienia oraz elektroda pomocnicza z metalu odpornego na korozję. Potencjał elektrody badanej jest mierzony względem elektrody odniesienia, przy czym elektroda badana jest polaryzowana prądem pochodzącym z zewnętrznego źródła podłączonego do elektrody pomocniczej.

W badaniach eksploatowanych konstrukcji, zarówno elektroda odniesienia jak i elektroda pomocnicza muszą być dostawiane do powierzchni elementu. Z tego powodu do badań polaryzacyjnych „in situ” przeprowadzonych za granicą skonstruowano specjalną zintegrowaną głowicę - por [77, 99]. Schemat urządzenia do badań metodą polaryzacji liniowej zbrojenia konstrukcji przedstawiono na rys. 2.6.

Głowica styka się z badaną powierzchnią betonu za pośrednictwem gąbki z tworzywa sztucznego 1. Bezpośrednio pod wkładką gąbczastą znajduje się pierścieniowa siatka ze stali nierdzewnej pełniąca funkcję elektrody pomocniczej 2. Elektroda siatkowa 2 jest zamocowana do obudowy 3 z tworzywa sztucznego za pośrednictwem stalowego pierścienia 4. Połączenie elektrody siatkowej 2 z potencjostatem umożliwia gniazdo konektorowe 5. W obudowie głowicy znajduje się także króciec 6, przez który zostaje wtłaczany płyn przewodzący.



Rys. 2.6. Schemat badań konstrukcji z zastosowaniem przestawnej głowicy dwuelektrodowej; I - otulenie, II - zbrojenie, III - głowica pomiarowa, IV - potencjostat [100].

Postępowanie przy badaniu jest stosunkowo proste. Jednak podczas interpretacji wyników należy zwracać szczególną uwagę na ograniczenia tej metody, które mogą prowadzić do błędnych wniosków.

Największymi źródłami błędów są: nieznajomość powierzchni aktywnej badanego pręta oraz niestabilny opór elektryczny betonu. Zazwyczaj pole powierzchni uwzględniane w obliczeniach jest znacznie większe niż w rzeczywistości. Z tego powodu otrzymane wartości szybkości korozji są niedoszacowane. Natomiast wielkość oporu betonu pomiędzy elektrodą odniesienia a badaną zależy od stopnia wilgotności otuliny i niejednorodności struktury, a także oporu polaryzacji korodującej powierzchni zbrojenia.

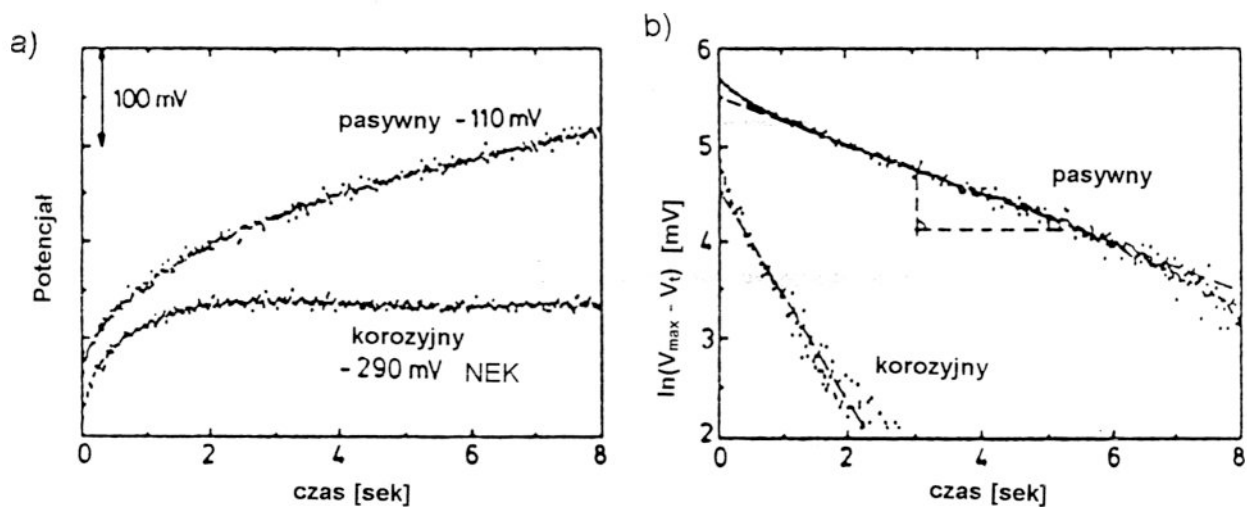
2.4. Pomiar impulsem galwanostatycznym.

Metoda impulsu galwanostatycznego jest szybką, nieniszczącą metodą uzyskiwania informacji o stanie zagrożenia korozyjnego zbrojenia, poprzez wykonanie jednego pomiaru. Dzięki tej metodzie można wyznaczyć rezystywność betonu oraz stopień zniszczenia korozyjnego wkładek zbrojeniowych.

Pomiary impulsem galwanostatycznym, opisane w pracach [5, 6, 77, 78, 101] polegają na „nałożeniu” krótkotrwałego impulsu prądu anodowego na pręt zbrojeniowy w betonie stosując małą elektrodę pomocniczą. Typowy czas trwania impulsu

wynosi 3 sekundy. Wywołana tym impulsem zmiana potencjału jest zapamiętywana przez komputer, a dane są przechowywane do dalszych obliczeń. W prowadzonych badaniach [5] oddziaływano impulsami prądu o natężeniu 0,1 mA i 1 mA, natomiast oscyloskop cyfrowy był zaprogramowany na 20 msek/punkt. Elektrode odniesienia umieszczono w środku elektrody pomocniczej.

Typowe przebiegi zależności potencjał-czas uzyskane na nawierzchni mostowej, nad zbrojeniem korodującym i zbrojeniem w stanie pasywnym przedstawiono na rys. 2.7 ([5]).



Rys. 2.7. Wykres zależności potencjał-czas dla pomiarów galwanostatycznych „on site” w obszarach pasywnym i korozyjnym stali zbrojeniowej w betonie, impuls prądowy $\Delta I = 0,1$ mA. a) liniowy b) krzywa logarytmiczna [5]

W strefie korozji, krzywa pomiarowa szybko osiąga wartość maksymalną potencjału równowagowego $V_{\max}$. W przypadku zlokalizowania korozji stromy przebieg krzywej polaryzacji powoduje, że przy zadziałaniu impulsem prądu o natężeniu 0,1 mA zbrojenie może być polaryzowane tylko do wartości 100 mV. W przypadku zbrojenia w stanie pasywnym stwierdza się w miarę upływu czasu zwiększanie się wartości potencjału. Zbrojenie może być łatwo polaryzowane potencjałem o wartości kilkuset miliwoltów, ale w znacznie dłuższym czasie. Rezystywność betonu R_{Ω} przy znanym prądzie oblicza się według wzoru

$$R_{\Omega} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta I} \quad (2.1)$$

gdzie $\Delta \varepsilon$ oznacza omowy spadek potencjału, ΔI - impuls prądu.

Przy stałej grubości otulenia, rezystancja omowa jest wprost proporcjonalna do rezystywności betonu. Z tej zależności można więc uzyskać informacje o zawartości soli, wilgotności betonu, które pozwalają na zlokalizowanie obszarów o wysokim stopniu zagrożenia korozją.

2.5. Metoda spektroskopii impedancyjnej.

Obok klasycznych metod badań korozji elektrochemicznej opierających się na pomiarze prądu stałego (metoda: krzywych polaryzacji, galwanostatyczna, rozkładu potencjału), w ostatnich latach intensywnie rozwijane są badania nad opracowaniem metod diagnostycznych korozji żelbetu przy użyciu spektroskopii impedancyjnej (EIS) [5, 52, 60-72, 78, 79, 80-92, 96, 99, 105].

Impedancja określa oporność pozorną obwodu elektrycznego przy przepływie prądu przemiennego. Układ, w którym zachodzą procesy elektrochemiczne może być uważany jako kombinacja elementów elektrycznych: rezystancji, pojemności i indukcyjności. Impedancja elektrochemiczna charakteryzuje odpowiedź prądową takiego układu na sinusoidalne zaburzenie potencjału elektrody.

Analiza wyników pomiarów impedancyjnych przeprowadzonych w odpowiednio szerokim zakresie częstotliwości (od ułamka do kilkuset kHz) umożliwia określenie elektrycznego schematu zastępczego badanego układu. Poszczególne elementy schematu zastępczego odpowiadają właściwościom elektrycznym i elektrochemicznym tego układu.

Metoda spektroskopii impedancyjnej pozwala na znaczne rozszerzenie zakresu uzyskiwanych informacji o kinetyce i mechanizmie badanych procesów korozyjnych w żelbecie, w porównaniu z metodami stałoprądowymi. Względne zmiany wartości takich parametrów jak: oporność R_Ω i pojemność C_Ω warstwy betonu, pojemność warstwy podwójnej C_{dl} , oporność przeniesienia ładunku R_t , z uwzględnieniem warunków ekspozycji próbki, mogą dostarczyć informacji o stopniu degradacji korozyjnej zbrojenia. Ponadto, wyniki te pozwalają uzyskać jakościowe dane umożliwiające porównanie wpływu warunków ekspozycji w czasie różnych próbek oraz określić ilościowo parametry charakteryzujące intensywność procesu korozyjnego.

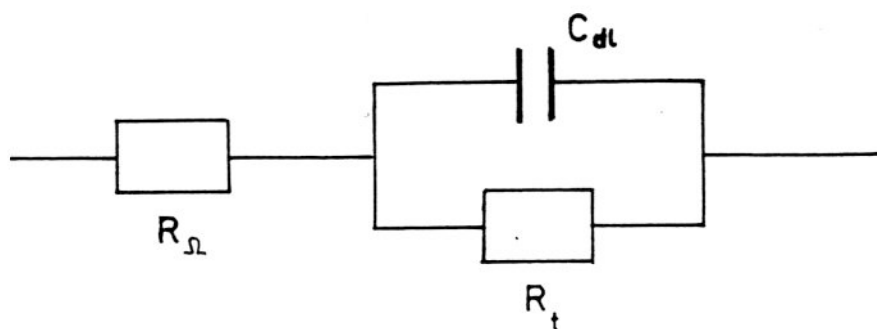
Pomimo przedstawionych wyżej cech pozytywnych spektroskopia impedancyjna nie stwarza takich „dogodności” w badaniu kinetyki procesu korozji w żelbecie, jak metoda krzywych polaryzacji. Na przykład, konieczna jest kosztowna aparatura oraz długie czasy pomiarów. Czas pomiarów wydłuża się szczególnie przy małych szybkościach korozji, które należy badać przy bardzo niskich częstotliwościach.

2.6. Inne metody badawcze.

Do metod elektrochemicznych rzadziej stosowanych w badaniach korozji zbrojenia w betonie można zaliczyć:

- metodę kulostatyczną [62, 101, 102],
- metodę szumu elektrochemicznego [62, 78, 103].
- metodę analizy harmonicznego [62].

W metodzie kulostatycznej określa się opór polaryzacji R_p na podstawie analizy zmiany wartości potencjału elektrody badanej, na skutek zaburzenia w układzie metal - elektrolit (otulina betonowa) małym ładunkiem lub krótkotrwałym impulsem prądowym. Odpowiedź na wprowadzone zaburzenie jest równoważna odpowiedzi elektrycznego układu zastępczego Randelsa przedstawionego na rys. 2.8.



Rys. 2.8. Układ zastępczy Randelsa.

Zmiana napięcia bezpośrednio po wprowadzeniu zaburzenia jest funkcją pojemności warstwy podwójnej metalu

$$\eta_o = \frac{\Delta q}{C} \quad (2.2)$$

gdzie η_o oznacza nad napięcie początkowe, Δq - ładunek, natomiast C - pojemność warstwy podwójnej badanej próbki.

Wzrost ładunku jest stopniowo niwelowany w wyniku zachodzących reakcji korozji, które powodują przesunięcie wartości potencjału do potencjału korozji E_{corr} . Zależność potencjału od czasu jest określona równaniem

$$\eta_t = \eta_o \exp \left\{ -t / (CR_p) \right\}, \quad (2.3)$$

w którym η_t oznacza polaryzację elektrody pracującej w czasie t podczas zaburzenia.

W równaniu (2.3) założono, że zmiana ładunku następuje tylko na skutek reakcji roztwarzania metalu. Przekształcenie równania (2.3) do postaci logarytmicznej pozwala wyrazić zależność $\eta_t(t)$ w formie liniowej

$$\ln \eta_t = \ln \eta_o - \frac{t}{CR_p} \quad (2.4)$$

Z nachylenia wykresu liniowego można wyznaczyć stałą czasową układu CR_p , a następnie opór polaryzacji R_p . Pojemność warstwy podwójnej C jest określona z równania (2.2).

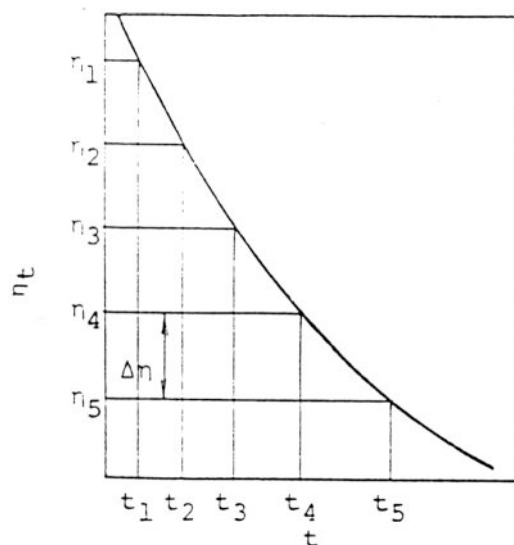
Gęstość prądu korozyjnego i_{corr} oblicza się z równania Sterna-Geary'ego.

$$i_{corr} = \frac{\beta_a \cdot \beta_k}{2,3(\beta_a + \beta_k)R_p}, \quad (2.5)$$

Potrzebne do obliczeń nachylenia tafelowskie β_a i β_k wyznaczane są także przy użyciu metody kulostatycznej. Przy pomiarach nachyleń tafelowskich, w celu wyeliminowania reakcji ubocznych, przyjmuje się wartość ładunku powodującego podwyższenie potencjału o 50 mV lub wyżej, niż nad napięcie początkowe. Do obliczania nachyleń tafelowskich stosuje się wzór [101]

$$\beta = \frac{\Delta\eta}{\log \left\{ (t_3 - t_2) / (t_2 - t_1) \right\}} \quad (2.6)$$

gdzie $\Delta\eta$ jest dowolnym przedziałem nadnapięcia, który oddziela wzrost krzywej w czasie np. t_1 , t_2 i t_3 , (według rys. 2.9). Wartość $\Delta\eta$ wynosi zwykle od 5 do 10 mV.



Rys. 2.9. Wykres krzywej nadnapięcia określony w celu wyznaczania nachyleń tafelowskich [101]

Należy podkreślić, że metoda kulostatyczna została zastosowana z pozytywnym skutkiem zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i polowych - por. [62, 101, 102].

Badanie procesów korozyjnych techniką szumu elektrochemicznego wyróżnia się od innych metod badawczych tym, że nie wykorzystuje się zewnętrznego sygnału pobudzającego. Pomiaru te polegają na rejestrowaniu i analizowaniu zmian potencjału korozyjnego E_{corr} niezależnie lub wraz ze zmianami natężenia prądu, który występuje „naturalnie” podczas procesu korozyjnego (bez polaryzacji elektrody pracującej). Wartości potencjału zmieniają się zwykle o kilka mikro- lub miliwoltów, a natężenie prądu o kilka nano- lub mikroamperów. W porównaniu z innymi metodami elektrochemicznymi (z wyjątkiem pomiarów potencjałowych) metoda szumu elektrochemicznego ma tę przewagę, że nie wprowadza w czasie pomiarów zaburzenia do układu badanego. Ponieważ sygnał pobudzający ma charakter wewnętrzny, więc tym samym zostaje wyeliminowany wpływ obcego czynnika związanego z metodą badań. Możliwość badania procesu korozyjnego w warunkach naturalnych zdecydowała o zainteresowaniu się ostatnio tą techniką badawczą w

monitorowaniu korozji w żelbecie. Dodatkowym czynnikiem stymulującym rozwój tej metody jest rozwój numerycznych metod pomiarowych, zapewniający szybką rejestrację, przetwarzanie i analizę szumów elektrochemicznych. Chociaż niekiedy dzięki tej metodzie uzyskuje się zadawalające ilościowe oszacowanie szybkości korozji w układzie stal-beton, to jednak wyniki pomiarów są mało wiarygodne w warunkach polowych. Należy spodziewać się wpływu struktury otulenia betonowego, która może ekranować (zaburzać) obraz korozji zbrojenia. W dodatku pomiary szumów są długotrwałe, uzyskane wyniki wymagają dokładnej interpretacji, natomiast aparatura stosowana do badań jest kosztowna.

Ostatnio rozwijającą się techniką pomiarową, inną niż metoda spektroskopii impedancyjnej, jest analiza harmoniczna. W przypadku spektroskopii harmonicznej nie jest spełniony warunek liniowości. Amplituda napięciowego sygnału pobudzającego jest stała, ale na tyle wysoka, że prądowy sygnał odpowiedzi badanego procesu elektrochemicznego ma naturę poliharmoniczną. Detekcji ulegają poza harmoniczną podstawową, dalsze składowe harmoniczne. W technice elektrochemicznej spektroskopii harmonicznej analizę poszczególnych składowych harmonicznym prądowego sygnału odpowiedzi badanego procesu elektrodowego przeprowadza się zwykle dla stałej częstotliwości pomiarowej. Elektrochemiczną spektroskopię harmoniczną wykorzystuje się głównie do badania procesów elektrodowych kontrolowanych aktywacyjnie. W tym przypadku poliharmoniczny prądowy sygnał odpowiedzi można przedstawić w postaci szeregu Fouriera, którego wyrazy są w prosty sposób związane z parametrami kinetycznymi badanej reakcji elektrodowej. Na podstawie wartości amplitud trzech kolejnych składowych harmonicznym prądowego sygnału odpowiedzi możliwe jest określenie współczynników Tafela. Ponadto analizę harmoniczną można wykonywać w wąskim zakresie częstotliwości, co znacznie skraca czas trwania pomiarów.

W celu ogólnego scharakteryzowania sposobów badań stosowanych do monitorowania korozji stali zbrojeniowej w żelbecie z pracy [62] zacytowano tablicę 2.1, w której zestawiono zasadnicze cechy poszczególnych metod pomiarów stosując skalę: A - optymalne (bardzo szybkie), B - zadawalające (wolniejsze), C - nie zadawalające (bardzo wolne).

Tablica 2.1. Zestawienie najczęściej stosowanych metod pomiarowych w monitorowaniu korozji stali w betonie zbrojonym

Charakterystyka	Jakościowa ocena wizualna	Ilościowa ocena wizualna	Test grawimetryczny	Mapa potencjałowa	LPM (R_p)	Elektroda pierścieniowa	Kulostatyczna	Szumu Elektrochemicznego	EIS	Analiza Harmoniczna
szybkość pojedynczego pomiaru	A	C	C	A	A	A	A	B	B	B
szybkość odpowiedzi na zmiany	C	C	C	A	A	A	A	A	A	A
Informacja jakościowa	C	A	A	C	A	A	A	B	B	A
Nie niszcząca	A	C	C	A	A	A	A	A	A	A
Nie zaburzająca	A	C	C	A	C	C	B	A	B	C
Parametry wyznaczane	Widoczne zmiany	Ocena obszarów zniszczeń	Wartość średnia i_{corr}	Prawdopodobieństwo korozji	i_{corr}	i_{corr}	i_{corr}	i_{corr}	i_{corr} mecha- -nizm	i_{corr}

Część druga

OKREŚLENIE INTENSYWNOŚCI PROCESU KOROZYJNEGO ZBROJENIA
ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

•

BADANIA WŁASNE

ZAKRES BADAŃ WŁASNYCH

W celu doświadczalnego odwzorowania procesów elektrochemicznych zachodzących na prętach zbrojeniowych stykających się z zarysowaną otuliną betonową wykonano badania modelowe przedstawiające korozję w żelbecie. Modelowanie procesu rozpoczęto od wykonania ogniwa galwanicznego z oddzieloną komorą anodową i katodową. Następnie, dążąc do porównania wyników uzyskanych w modelu doświadczalnym, wyznaczono gęstość prądu korozyjnego i opór polaryzacji ogniwa. Wykorzystano teorię potencjału mieszanego oraz wykonano symulacje komputerowe ogniwa korozyjnego w badanym środowisku.

Otrzymane w modelu makroogniwa, parametry charakteryzujące proces korozji, zweryfikowano w warunkach laboratoryjnych wykonując na około dwudziestu elementach próbnym betonowych i zbrojonych badania elektrochemiczne.

W programie badań uwzględniono dotychczas najczęściej stosowaną w praktyce metodę pomiaru rozkładu potencjału stacjonarnego [59, 67, 69, 81] a także inne metody elektrochemiczne. Metody te polegają na analizie przebiegów krzywych polaryzacji anodowej i katodowej, a następnie wyznaczając na tej podstawie gęstości prądu korozyjnego oraz opór polaryzacji [5, 6, 28, 88, 89]. Do badania części elementów próbnym z betonu zastosowano nowoczesną metodę analizy widm spektroskopii impedancyjnej (EIS), która umożliwia uzyskanie jakościowych i ilościowych informacji o procesie korozji zbrojenia pod otuliną. Spektroskopia impedancyjna stanowi jedyną metodę pozwalającą na oddzielenie oporu i własności dielektrycznych otuliny betonowej od elektrochemicznych reakcji przebiegających na zbrojeniu.

Wykonywanie badań elektrochemicznych na elementach próbnym z betonu jest znacznie utrudnione w porównaniu z typowymi badaniami w laboratorium. W badaniach elektrochemicznych ważne jest zapewnienie jednorodności elektrolitu oraz odtwarzalności powierzchni elektrody badanej. Oczywiście warunków tych nie można spełnić w przypadku zbrojenia znajdującego się pod otuliną betonową. Niejednorodna powierzchnia pręta stalowego styka się z cieczą porową betonu (elektrolitem), której własności są trudne do jednoznacznego określenia. Własności cieczy porowej są bowiem wypadkową technologii wykonania betonu oraz oddziaływania otoczenia na eksploatowaną konstrukcję żelbetową. Odmienność

warunków prowadzenia badań elektrochemicznych w przypadku zbrojenia konstrukcji żelbetowych może mieć istotny wpływ na wyniki eksperymentów.

Podejmując kompleksowe badania elektrochemiczne procesów korozyjnych zachodzących na powierzchni zbrojenia chronionego zarysowaną otuliną betonową, zdawano sobie sprawę z wymienionych wyżej utrudnień i ograniczeń. Badania przeprowadzono w ścisłym reżimie laboratoryjnym stosując odpowiednią aparaturę pomiarową. W elementach próbnych odwzorowano zasadnicze warunki występujące w rzeczywistych konstrukcjach żelbetowych: przeciętne parametry geometryczne i materiałowe, istnienie naprężeń mechanicznych oraz zarysowań otuliny betonowej.

Przyjęty zakres badań wynikał z wcześniejszych doświadczeń analizowanych w opracowaniu literaturowym (część pierwsza pracy), możliwości techniczno-laboratoryjnych oraz ze specyfiki badań korozyjnych wymagających długiego czasu potrzebnego na rozwój procesu. Konieczność skrócenia czasu badań w warunkach laboratoryjnych, spowodowała przyjęcie modelu środowiska, w którym stężenie substancji agresywnych jest wyższe niż występujące przeważnie w rzeczywistości oraz wykonania elementów próbnych o mniejszych gabarytach w porównaniu z konstrukcją.

Badania elektrochemiczne wykonano łącznie na 19. elementach próbnych z betonu. Każdy element zbrojono jednym prętem stalowym. Dążąc do ujęcia wpływu profilu powierzchni zewnętrznej wkładek na intensywność korozji w 16. elementach zastosowano zbrojenie ze stali gładkiej gatunku St3S, natomiast w 3. elementach zbrojenie ze stali żebrowanej gatunku St3Y-b-500.

Jeden element ze zbrojeniem gładkim traktowano jako porównawczy i badano w stanie beznaprężeniowym. Pozostałe 18. elementów eksponowano w środowisku agresywnym i badano pod obciążeniami mechanicznymi wywołującymi w strefie rozciąganej zarysowanie otulenia betonowego.

Przeprowadzono:

- pomiary rozkładu potencjału na powierzchniach: 16. elementów zbrojonych prętami gładkimi oraz 3. elementach zbrojonych prętami żebrowanymi (łącznie 19 elementów);
- badania potencjodynamiczne na powierzchniach: 15. elementów zbrojonych prętami gładkimi i 3. elementów zbrojonych prętami żebrowanymi oraz porównawczo na powierzchni jednego elementu nieobciążonego i

niezarysowanego zbrojonego prętem gładkim; beleczek żelbetowych zarysowanych oraz jednej beleczce bez zarysowań .

- badania metodą spektroskopii impedancyjnej na 3. elementach zbrojonych prętami żebrowanymi.

W końcowym etapie pracy dokonano weryfikacji wyników badań szybkości korozji zbrojenia w elementach próbnych. Analizowano wyniki pomiarów elektrochemicznych, uwzględniając wielkość powierzchni anodowych zmierzonych po odkuciu otuliny betonowej (metoda wizualna). Zweryfikowane wartości gęstości prądów korozyjnych i oporów polaryzacyjnych porównano z wartościami uzyskanymi w modelowych makroogniwach galwanicznych.

Rozdział trzeci

BADANIE OGNIWA GALWANICZNEGO MODELUJĄCEGO KOROZJĘ ZBROJENIA.

3.1. Założenia modelu ogniwa galwanicznego.

Opisywany w literaturze model makroogniwa korozyjnego przyjęto już w latach sześćdziesiątych uzasadniając go obszernymi badaniami Verbeckiego [10]. W badaniach tych stwierdzono, że na powierzchni zbrojenia w obszarze zarysowanym występowały trzy charakterystyczne odcinki. Bezpośrednio z rysą stykał się odcinek środkowy z rozwiniętą korozją wżerową natomiast w sąsiedztwie istniały dwa odcinki skrajne, na których stwierdzono jedynie ślady produktów korozji - por. 1.18. Wygląd odcinków skorodowanych sugerował występowanie procesów anodowych w strefie wżerów o długości równej połowie odcinka uszkodzonego oraz ograniczenie zasięgu efektywnej reakcji depolaryzacji tlenowej do pozostałej długości odcinka uszkodzonego.

Wiadomo, że intensywność działania ogniwa korozyjnego zależy od powierzchni elektrod. Jednak do chwili obecnej nie udało się ustalić zasięgu obszarów elektrodowych utworzonych na zbrojeniu stykającym się z zarysowanym otuleniem betonowym.

Zamierzając uściślić model elektrochemiczny podjęto badania, w których rzeczywiste procesy korozyjne na zbrojeniu elementu żelbetowego odwzorowano działaniem typowego ogniwa galwanicznego. W ogniwie tym elektrody wykonano ze stali zbrojeniowej, natomiast elektrolit stanowił roztwór o składzie odpowiadającym cieczy porowej betonu w obrębie rysy i poza rysą.

W badaniach określano wielkości prądów korozyjnych powstających w modelowym ogniwie z uwzględnieniem wpływu stosunku powierzchni obszaru katodowego do obszaru anodowego.

Siłę elektromotoryczną ogniwa galwanicznego określa się różnicą potencjałów elektrodowych

$$E = E_k - E_a, \quad (3.1)$$

gdzie E_k oznacza potencjał równowagowy obszaru katodowego, natomiast E_a - potencjał równowagowy obszaru anodowego.

W ogniwie modelującym proces korozji zbrojenia potencjał anodowy E_a w stanie równowagowym zgodnie z równaniem Nernsta ujmuje wzór

$$E_a = E_a^0 + \frac{RT}{2F} \ln a_{Fe^{2+}}, \quad (3.2)$$

gdzie $E_a^0 = -0.44$ V jest potencjałem w stanie standardowym, R - uniwersalną stałą gazową, T - temperaturą bezwzględną, F - stałą Faradaya, $a_{Fe^{2+}}$ - aktywnością jonów żelaza w roztworze elektrolitu na powierzchni zbrojenia.

Aktywność jonów żelaza można aproksymować stężeniem molowym tych jonów w roztworze

$$a_{Fe^{2+}} \cong [Fe^{2+}].$$

W pracy [13] przeprowadzono oszacowanie wartości potencjału anodowego uwzględniając, że stężenie molowe jonów żelaza w roztworze wodnym nie może przekraczać wartości wynikającej z rozpuszczalności produktów ich syntezy z jonami wodorotlenowymi, które stanowią zasadniczy składnik cieczy porowej betonu.

Po przyjęciu stałej wartości iloczynu rozpuszczalności wodorotlenku żelazawego $L_{Fe(OH)_2}$ obliczono stężenie molowe jonów żelaza ze wzorów

$$[Fe^{2+}] = \frac{L_{Fe(OH)_2}}{[OH^-]^2}, \quad [OH^-] = 10^{pH-14}, \quad (3.3)$$

gdzie $[OH^-]$ jest stężeniem molowym jonów wodorotlenowych w roztworze porowym na powierzchni zbrojenia.

Analogicznie określając potencjał równowagowy reakcji katodowej (1.31) przyjęto aktywność jonów wodorotlenowych w cieczy porowej betonu równą stężeniu molowemu

$$a_{OH^-} \cong [OH^-].$$

Zgodnie z równaniem Nernsta potencjał katodowy oblicza się z zależności

$$E_k = E_k^0 - \frac{RT}{F} \ln[\text{OH}^-] = E_k^0 - \frac{2.303RT}{F} \log(14 - \text{pH}) \quad , \quad (3.4)$$

gdzie $E_k^0 = + 0.401 \text{ V}$ jest potencjałem standardowym reakcji katodowej.

Na podstawie przedstawionych w literaturze wyników pomiarów odczynu zasadowego cieczy porowej uwzględniono przeciętną wartość $\text{pH} \cong 8$ w rysie (wpływ karbonatyzacji) oraz $\text{pH} \cong 11$ w obszarach przylegających bezpośrednio do rysy, po czym ze wzorów (3.2), (3.3) i (3.4) wyznaczono potencjały elektrodowe w stanie równowagowym

$$E_a = - 0.536 \text{ V} \quad (\text{przy } \text{pH} = 8) \quad ,$$

$$E_k = + 0.574 \text{ V} \quad (\text{przy } \text{pH} = 11).$$

Określone w ten sposób, teoretycznie wartości potencjałów równowagowych nie są wystarczające do bezpośredniego wyznaczenia gęstości prądu, która decyduje o intensywności procesu korozyjnego. Gęstość prądu korozyjnego można określić jedynie doświadczalnie przeprowadzając pomiary metodą polaryzacji liniowej.

Przystępując do modelowania ogniwa galwanicznego przyjęto następujące założenia:

- miejsca anodowe powstają na styku z rysą, natomiast miejsca katodowe w sąsiedztwie rysy,
- ciecz porowa betonu wokół rysy jest zobojętniona wskutek karbonatyzacji i charakteryzuje się wartością $\text{pH} \cong 8$,
- w cieczy porowej stykającej się z miejscem anodowym występują jony żelaza wyniesione ze zbrojenia zgodnie z reakcją (1.30),
- zwiększona przepuszczalność betonu wywołana lokalnym uszkodzeniem otulenia w sąsiedztwie rysy (mikrospękania) powoduje nieznaczne obniżenie odczynu zasadowego cieczy porowej do $\text{pH} \cong 11$ w miejscu reakcji katodowej.

3.2. Sposób przeprowadzenia badań.

Badaniom poddano ogniwa galwaniczne, w których anoda i katoda zostały wykonane ze stali zbrojeniowej St3S, natomiast elektrolitem był wyciąg wodny otrzymywany z rozdrobnionego betonu elementów próbných nr 1÷5 zarysowanych jedną rysą, po przeprowadzonych pomiarach potencjałów por. rozdz. 4.4.

Do sporządzenia wyciągu wodnego roztworu anodowego użyto betonu z beleczek, pobranego w obszarze rysy. Natomiast roztwór katodowy był sporządzany na bazie betonu pochodzącego z obszaru oddalonego około 10 cm od rysy. Beton mielono, po czym przesiano przez sito o oczkach 0,06 mm. Odsiany beton zmieszano z wodą podwójnie destylowaną w stosunku objętościowym 1 : 5 i pozostawiono na okres 30 dni w szklanych butlach, zamkniętych szczelnie korkiem ze szlifem, okresowo mieszając. Następnie roztwory gotowano przez 15 minut a po ochłodzeniu przefiltrowano przez sączeek o średniej porowatości.

Otrzymany wyciąg z rozdrobnionego betonu pochodzącego z obszaru niezarysowanego beleczek, o $\text{pH}=11,96$, stanowił roztwór katodowy. Do roztworu anodowego, sporządzonego z betonu z obszaru rys, wprowadzono opiłki żelaza, w celu wytworzenia równowagowej ilości jonów żelaza w tym roztworze w stosunku do żelaza metalicznego. Po okresie 14 dni, roztwór anodowy nasycano gazowym CO_2 do wartości $\text{pH}=7,79$. Wyniki analizy chemicznej roztworu katodowego i anodowego przedstawiono w tablicy 3.1.

Różnica w składzie uzyskanych roztworów (anodowym i katodowym) może wynikać z faktu pobrania w różnych miejscach badanych elementów oraz karbonatyzacji betonu. Niższa zawartość jonów oznaczonych w roztworze anodowym, związana jest z dużą karbonatyzacją oraz ze zwiększoną przepuszczalnością betonu wywołaną lokalnym uszkodzeniem otulenia w sąsiedztwie rysy i wymywaniem z niego soli oraz powstałych produktów korozji. W roztworach anodowym i katodowym występują jony Fe^{2+} i Fe^{3+} , jednakże w momencie analizy, jony Fe^{2+} utleniano do Fe^{3+} , oznaczając żelazo całkowite. Wynik tak prowadzonej analizy jest dokładniejszy, a sam jej przebieg mniej skomplikowany.

Tablica 3.1. Składniki roztworu katodowego i anodowego

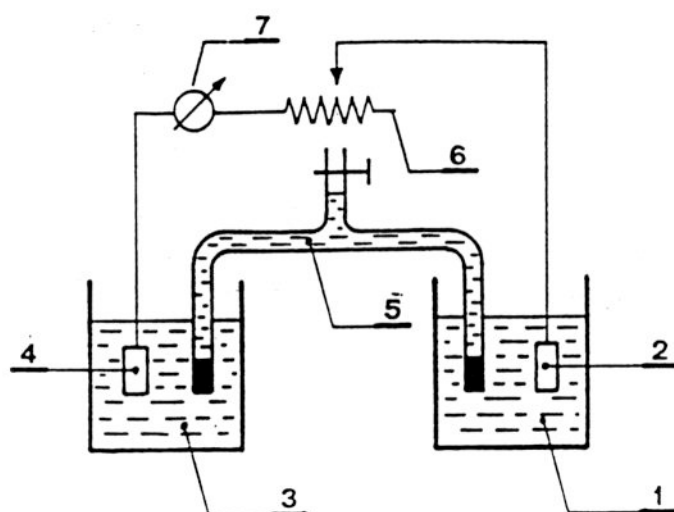
Oznaczenie	roztwór		jednostki
	katodowy	anodowy	
pH	11.96	7.78	mg/dm ³
Cl ⁻	3.5	-	
SO ₄ ²⁻	225	89.0	
Ca ²⁺	170.3	302.6	
Mg ²⁺	-	1.22	
Na ⁺	160.0	2.0	
K ⁺	216.0	14.6	
CO ₂	22.7	700	
Fe ³⁺	0.54	0.06	
zasadowość miar. HCl przy pH = 4.6	11.75	13.94	mval/dm ³
Kwasowość HCl przy pH = 8.3	0	4.5	

• Komory elektrodowe połączone kluczem elektrolitycznym (model I)

Modelowanie procesu rozpoczęto od próby zbudowania ogniwa galwanicznego z oddzieloną komorą anodową i katodową. Schemat ogniwa przedstawiono na rys. 3.1. Zastosowano elektrody z prętów zbrojeniowych o powierzchni 1 cm², 2 cm², 5 cm² i 10 cm².

Roztwory w komorach elektrodowych połączono kluczem elektrolitycznym. Ponadto obie elektrody złączono za pośrednictwem dużego oporu zewnętrznego 100 kΩ. Zmniejszanie oporu miało stopniowo zwierać układ i powodować przepływ prądu oraz polaryzację ogniwa.

Przeprowadzone pomiary nie pozwoliły na wyznaczenie z ekstrapolacji wartości gęstości prądu korozyjnego (bardzo duży opór wewnętrzny układu), gdyż nie uzyskano wystarczającej ilości punktów pomiarowych.



Rys. 3.1. Schemat zamierzonego modelu ogniwa galwanicznego: 1 - roztwór anodowy, 2 - anoda, 3 - roztwór katodowy, 4 - katoda, 5 - klucz elektrolityczny, 6 - zmienny opór zewnętrzny, 7 - miliamperomierz

•Symulacja komputerowa krzywych polaryzacji (model II)

Ponieważ bezpośrednie badania ogniwa galwanicznego nie przyniosły zadowalających rezultatów, więc gęstość prądu oraz opór polaryzacji wyznaczono stosując teorię potencjału mieszanego. Zgodnie z tą teorią ogniwo korozyjne modelowały dwie krzywe polaryzacji określone oddzielnie:

- a) anodowa krzywa polaryzacji otrzymana w roztworze anodowym,
- b) katodowa krzywa polaryzacji uzyskana w roztworze katodowym.

Krzywe polaryzacji dla katody i anody wykonanych ze stali St3S o polu powierzchni $A_k=1 \text{ cm}^2$ i $A_a=1 \text{ cm}^2$, wyznaczono przy użyciu zautomatyzowanego zestawu badawczego firmy Tacussel typu PTJ-24 wraz z interfejsem IMT-1. W wyniku pomiarów wyznaczono potencjał korozyjny, gęstość prądu korozyjnego i nachylenia anodowej i katodowej krzywej Tafela oraz opór polaryzacji. Do opracowania wyników pomiarów stosowano program obliczeniowy IMT1VOLT firmy Tacussel. Na podstawie tego programu wyznaczono:

$R_p [\Omega \cdot \text{cm}^2]$ - opór polaryzacyjny,

E_{corr} [mV]	- potencjał korozyjny,
i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	- gęstość prądu korozyjnego,
β_a [mV]	- nachylenie tafelowskie krzywej anodowej,
β_c [mV]	- nachylenie tafelowskie krzywej katodowej.

Ogólną teoretyczną zależność potencjał - gęstość prądu w środowiskach wodnych opisują wzory - por. [50]

$$E'_k = E_k - \beta_k \frac{\log i_k}{A_k i_{ok}}, \quad (3.5)$$

$$E'_a = E_a - \beta_a \frac{\log i_a}{A_a i_{oa}}, \quad (3.6)$$

gdzie: i oznacza gęstość prądu, E - potencjał, β - nachylenie tafelowskie krzywych polaryzacji, A - powierzchnię elektrody; indeksy „k” i „a” odnoszą się odpowiednio do katody i anody.

W stanie równowagowym zachodzą równości

$$E'_k = E'_a = E_o, \quad i_k = i_a = i_o \quad (3.7)$$

które na podstawie przebiegu krzywych polaryzacji umożliwiają określenie gęstości prądu korozyjnego.

Ponieważ zgodnie z zależnościami (3.5) i (3.6) polaryzacja obszarów anodowych i katodowych zależy od ich pól powierzchni, więc stosunek pól $A_a:A_k$ ma wpływ na szybkość procesu korozyjnego. Uwzględniając tę przesłankę w modelowaniu procesu rozważono anodę o polu powierzchni $A_a=1 \text{ cm}^2$ oraz katodę o polu powierzchni $A_k: 1 \text{ cm}^2, 2 \text{ cm}^2, 5 \text{ cm}^2$ i 10 cm^2 .

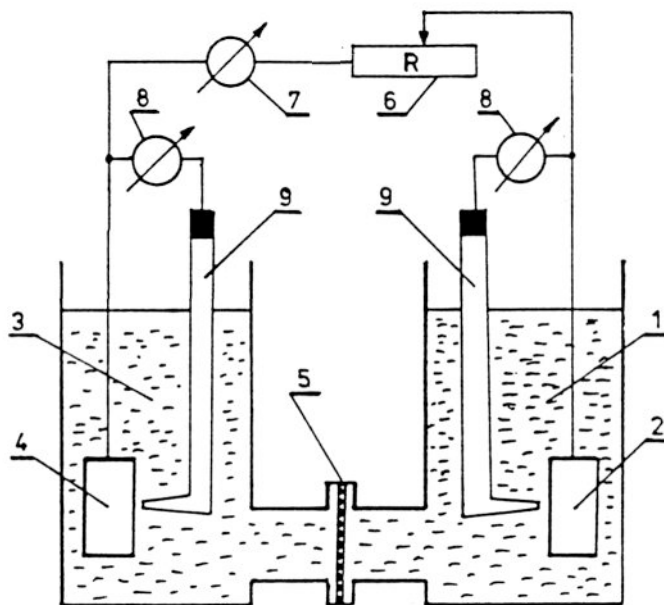
Uzyskane wartości potencjału E i odpowiadające im wartości gęstości prądu „ i ” dla $A_k=1 \text{ cm}^2$ oraz $A_a=1 \text{ cm}^2$ poddano obróbce komputerowej przy użyciu zestawu pomiarowo-obliczeniowego ATLAS 88. Wprowadzono wartości gęstości prądu oraz odpowiadające im wartości potencjału krzywej anodowej z uprzednio wyznaczonej krzywej potencjodynamicznej w roztworze anodowym dla $A_a=1 \text{ cm}^2$ i krzywej katodowej wyznaczonej w roztworze katodowym dla $A_k=1 \text{ cm}^2$. Analogicznie postępowano w przypadku wyznaczania krzywej katodowej dla katody o polu

powierzchni $A_k = 2, 5$ i 10 cm^2 , odpowiednio wielkość powierzchni elektrody badanej.

Na podstawie poszczególnych krzywych polaryzacji anodowej w roztworze anodowym i katodowej w roztworze katodowym komputerowo wyznaczono krzywe polaryzacji modelowego ogniwa korozyjnego w którym pola powierzchni anody do katody były zmienne w stosunku 1:1, 1:2, 1:5 i 1:10.

•Komory elektrodowe połączone diafragmą półprzepuszczalną (model III)

Ze względu na zbyt duże przybliżenia (uwzględniano tylko zmiany powierzchni elektrod) podczas komputerowego modelowania procesu korozji w żelbecie (model II) podjęto próbę przeprowadzenia eksperymentu, w którym zmniejszono opór wewnętrzny przez wyeliminowanie klucza elektrolitycznego. Schemat zastosowanego układu pomiarowego przedstawiono na rys. 3.2.



Rys. 3.2. Schemat usprawnionego modelu ogniwa galwanicznego: 1 - roztwór anodowy, 2 - anoda, 3 - roztwór katodowy, 4 - katoda, 5 - diafragma półprzepuszczalna, 6 - zmienny opór zewnętrzny, 7 - mikroamperomierz, 8 - miliwoltomierz, 9 - elektroda kalomelowa

Specjalnie do badań wykonano naczynko pomiarowe mające komory elektrodowe połączone diafragmą półprzepuszczalną. Zastosowanie tej przegrody zmniejszyło opór wewnętrzny ogniwa modelowego, i co zostanie wykazane dalej,

umożliwiło uzyskanie poprawnych danych doświadczalnych porównywalnych z wynikami innych badań. Wypolerowane i odtłuszczone w acetonie elektrody, umieszczono odpowiednio, w roztworze anodowym i katodowym, o składzie przedstawionym w tablicy 3.1. Elektrody połączono za pośrednictwem dużego oporu zewnętrznego $120\text{ k}\Omega$, którego zmniejszanie stopniowo zwierało układ i powodowało przepływ prądu oraz polaryzację ogniwa. Potencjały elektrod mierzono za pomocą pH-metru cyfrowego typu N-5170 o rezystancji wejściowej większej od $10^{12}\ \Omega$, natomiast natężenie prądu I przepływającego w wewnętrznym ogniwie mierzono mikroamperomierzem typu DC-MILLI-PICO-METER MV 40 (produkcji niemieckiej). Zastosowano zmienny stosunek pól powierzchni anody do katody, przyjmując powierzchnię anody $A_a=10, 5, 2$ i 1 cm^2 oraz powierzchnię katody $A_k=1\text{ cm}^2$, a następnie powierzchnię katody $A_k=10, 5, 2$ i 1 cm^2 oraz powierzchnię anody $A_a=1\text{ cm}^2$. Po podłączeniu układu, przez okres 30 min ustalano potencjał stacjonarny elektrod. Odczytu wartości potencjału na elektrodach dokonywano po upływie 1 min od momentu zmiany wartości oporu zwierającego ogniwo. Zmniejszanie oporu dokonywano dekadowo.

3.3. Wyniki badań modelowego ogniwa oraz ich omówienie.

• Symulacja komputerowa krzywych polaryzacji (model II)

Dla każdego stosunku pola powierzchni anody do katody ($A_a : A_k$ od 1:1 do 1:10) badanego układu anoda-roztwór anodowy, katoda - roztwór katodowy dla modelu uzyskanego na drodze symulacji komputerowej, wykreślono komputerowo poszczególne krzywe polaryzacji. Krzywą polaryzacji dla stali St3S o polu powierzchni $A=1\text{ cm}^2$ w roztworze anodowym, przedstawiono na rys. 3.3a, natomiast krzywą polaryzacji otrzymaną w roztworze katodowym zamieszczono na rys. 3.3b.

Na podstawie poszczególnych krzywych polaryzacji anodowej i katodowej wyznaczono drogą symulacji komputerowej krzywe polaryzacji modelu ogniwa korozyjnego. Wydruki komputerowe tych krzywych przedstawiono na rys. 3.4 ÷ 3.7. Zbiorcze zestawienie wyników badań ujęto w tablicy 3.2. Podano wartości potencjału korozyjnego E_{corr} , gęstości prądu korozyjnego i_{corr} oraz oporu polaryzacyjnego R_p otrzymane przy czterech rozważanych stosunkach pola powierzchni anody do

katody $A_a : A_k$. Ponadto wyznaczono szybkość korozji H_t [mm/rok] dla ogniwa, na podstawie uzyskanych wartości gęstości prądu korozyjnego i_{corr} według wzoru podanego w pracy [104]

$$H_t = 1,123 \cdot k \cdot i_{corr}, \quad (3.8)$$

gdzie: $k=1,042$ g/Ah jest równoważnikiem elektrochemicznym żelaza.

Tablica 3.2.

Zestawienie wyników badań polaryzacji modelu ogniwa korozyjnego uzyskanych metodą komputerową.

Stosunek powierzchni anody do katody	E_{corr} [mV]	i_{corr} [$\mu A/cm^2$]	$R_p \cdot 10^3$ [$\Omega \cdot cm^2$]	H_t [mm/rok]
1:1	-747,60	59,34	8,07	0,69
1:2	-735,12	94,74	7,85	1,11
1:5	-696,44	174,57	2,45	2,04
1:10	-678,04	378,90	1,29	4,43

Analizując krzywe polaryzacji wyznaczone metodą symulacji komputerowej, zauważa się, że zwiększenie stosunku pola powierzchni katody do anody powoduje podwyższenie potencjału korozyjnego (E_{corr}), wzrost wartości gęstości prądu korozyjnego (i_{corr}) oraz zmniejszenie oporu polaryzacji (R_p).

Obserwowane przesunięcie wartości potencjału korozyjnego E_{corr} w kierunku dodatnim, przy jednoczesnym wzroście gęstości prądu korozyjnego i_{corr} , świadczy o katodowej kontroli procesu w modelowym ogniwie korozyjnym. Wyznaczone wartości gęstości prądu korozyjnego są maksymalnymi wartościami w tego typu ogniwie krótkozwartym, w którym przeważa polaryzacja aktywacyjna.

a)

DATA PROCESSING

$E(i=0) = -691.8 \text{ mV}$

$R_p = 1.22E+03 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$

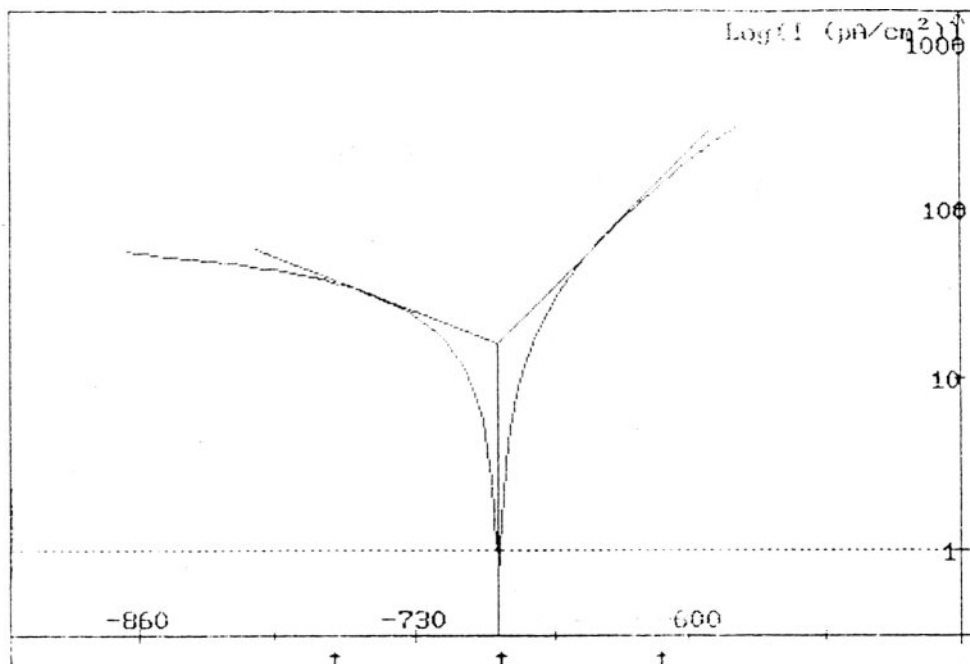
$r^2 = 0.9956$

$I(i=0) = 15.33 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

$B_c = -201.3 \text{ mV}$

$r^2 = 0.9984$

$B_a = +80.9 \text{ mV}$



b)

DATA PROCESSING

$E(i=0) = -406.8 \text{ mV}$

$R_p = 2.47E+04 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$

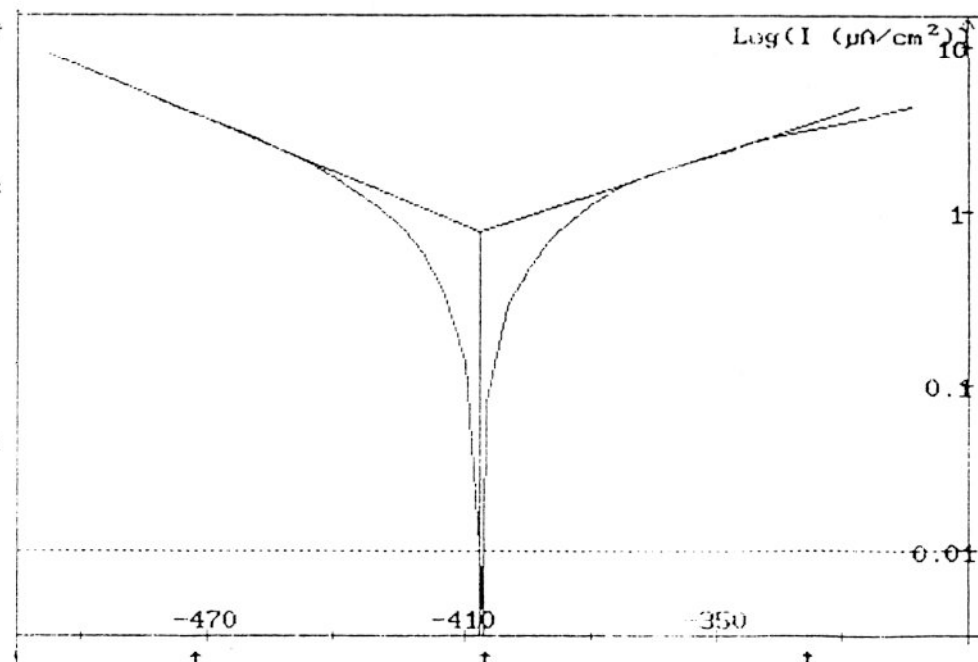
$r^2 = 0.9995$

$I(i=0) = 0.74 \mu\text{A}/\text{cm}^2$

$B_c = -95.9 \text{ mV}$

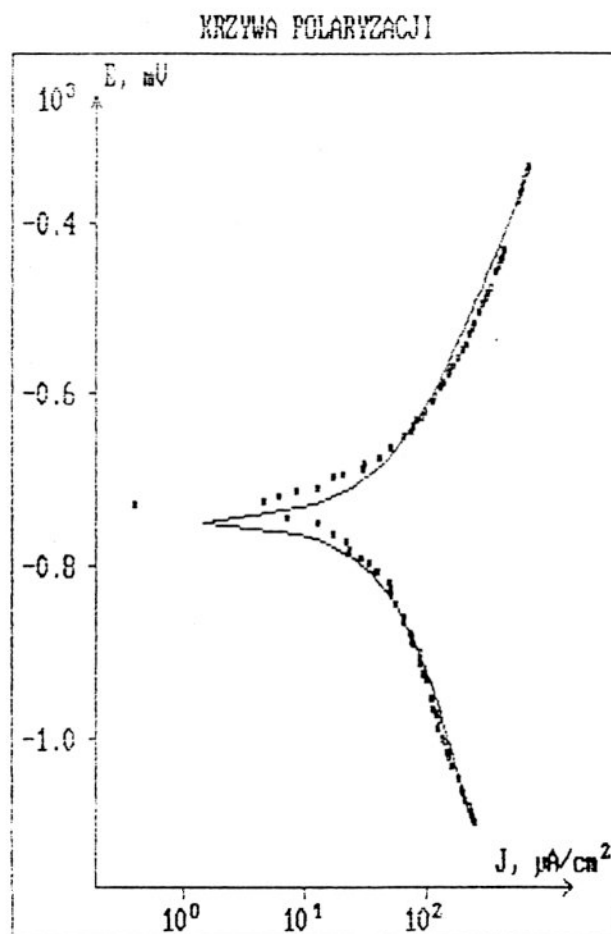
$r^2 = 0.9997$

$B_a = +124.2 \text{ mV}$



Rys. 3.3. Krzywa polaryzacji dla stali St3S: a) w roztworze anodowym, b) w roztworze katodowym.

Date: 1994-10-17
 Material of sample: steel
 Area of sample (cm²): 1.00
 Environment: r-r
 Temperature: 298 K
 pH value:
 Corrosion potential: -728 mV
 Notices:



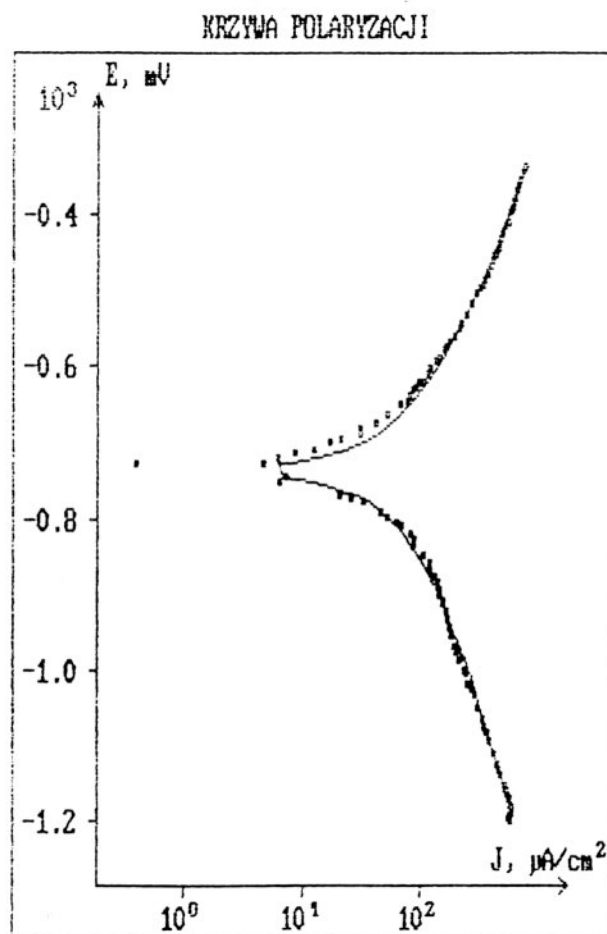
OBLICZENIA

$J_0 = 59.34 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
 $B_a = 375.89 \text{ mV}$
 $B_k = 570.48 \text{ mV}$
 $E_0 = -747.60 \text{ mV}$

$E_{st} = -1098 \text{ mV}$
 $E_{fn} = -334 \text{ mV}$

Rys. 3.4. Krzywe polaryzacji modelowego ogniwa korozyjnego
 o stosunku pola powierzchni anody do katody 1:1

Date: 1994-10-17
 Material of sample: steel
 Area of sample (cm²): 1.00
 Environment: r-r
 Temperature: 298 K
 pH value:
 Corrosion potential: -728 mV
 Notices: powierzchnia katody 2 cm



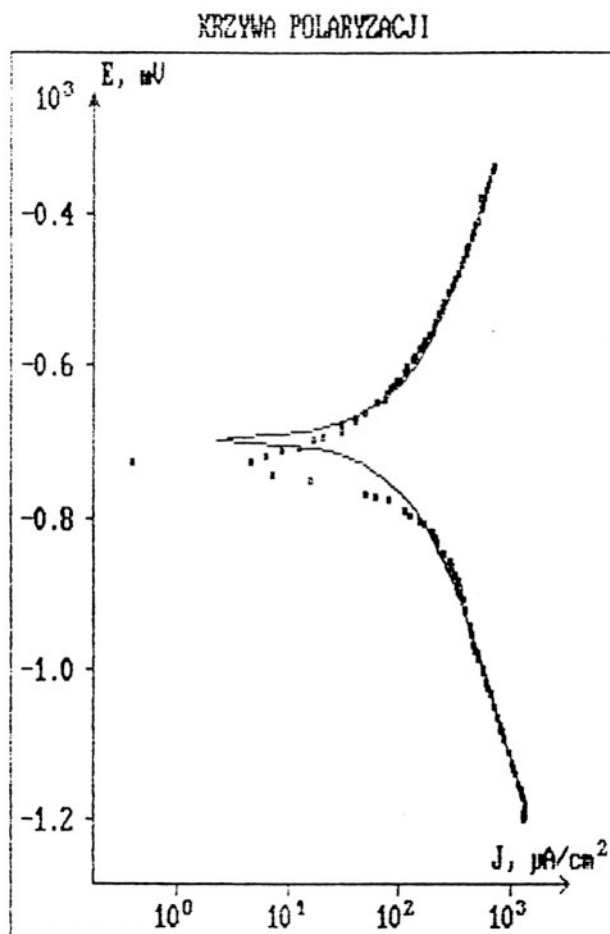
OBLICZENIA

$J_0 = 94.74 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
 $B_a = 442.21 \text{ mV}$
 $B_k = 595.62 \text{ mV}$
 $E_0 = -735.12 \text{ mV}$

$E_{st} = -1199 \text{ mV}$
 $E_{fn} = -334 \text{ mV}$

Rys. 3.5. Krzywe polaryzacji modelowego ogniwa korozyjnego
 o stosunku pola powierzchni anody do katody 1:2.

Date: 1994-12-19
Material of sample: steel
Area of sample (cm²): 1.00
Environment: r-r
Temperature: 298 K
pH value:
Corrosion potential: -740 mV
Notices: powierzchnia katody 5 cm



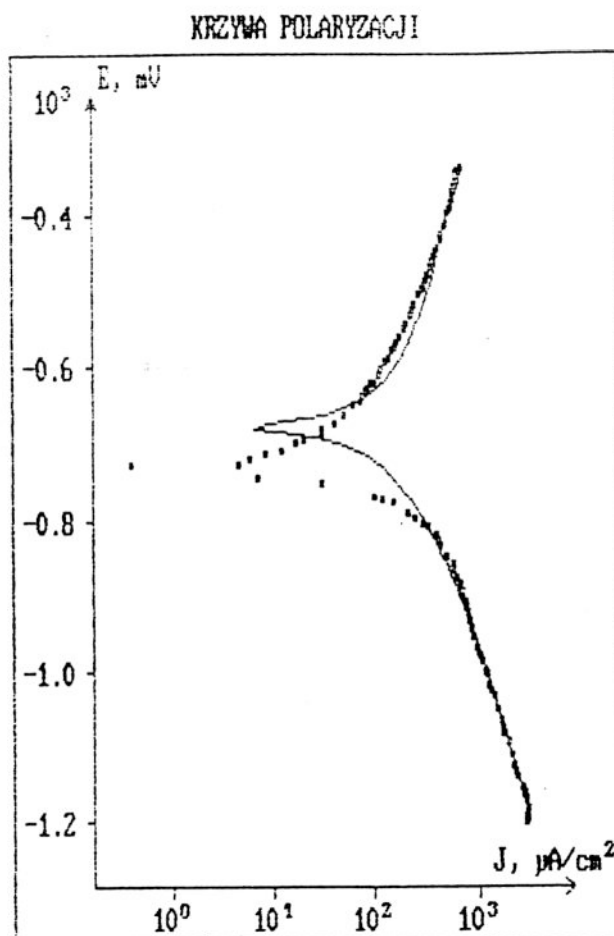
OBLICZENIA

$J_0 = 174.97 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
 $B_a = 578.29 \text{ mV}$
 $B_k = 545.99 \text{ mV}$
 $E_0 = -696.44 \text{ mV}$

$E_{st} = -1199 \text{ mV}$
 $E_{fn} = -334 \text{ mV}$

Rys. 3.6. Krzywe polaryzacji modelowego ogniwa korozyjnego o stosunku pola powierzchni anody do katody 1:5.

Date: 1994-12-19
Material of sample: steel
Area of sample (cm²): 1.00
Environment: r-r
Temperature: 298 K
pH value:
Corrosion potential: -750 mV
Notices: powierzchnia katody 10 cm.



OBLICZENIA

$J_0 = 378.90 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
 $B_a = 1199.40 \text{ mV}$
 $B_k = 580.83 \text{ mV}$
 $E_0 = -678.04 \text{ mV}$

$E_{st} = -1199 \text{ mV}$
 $E_{fn} = -334 \text{ mV}$

Rys. 3.7. Krzywe polaryzacji modelowego ogniwa korozyjnego
stosunku pola powierzchni anody do katody 1:10.

•Komory elektrodowe połączone diafragmą półprzepuszczalną (model III).

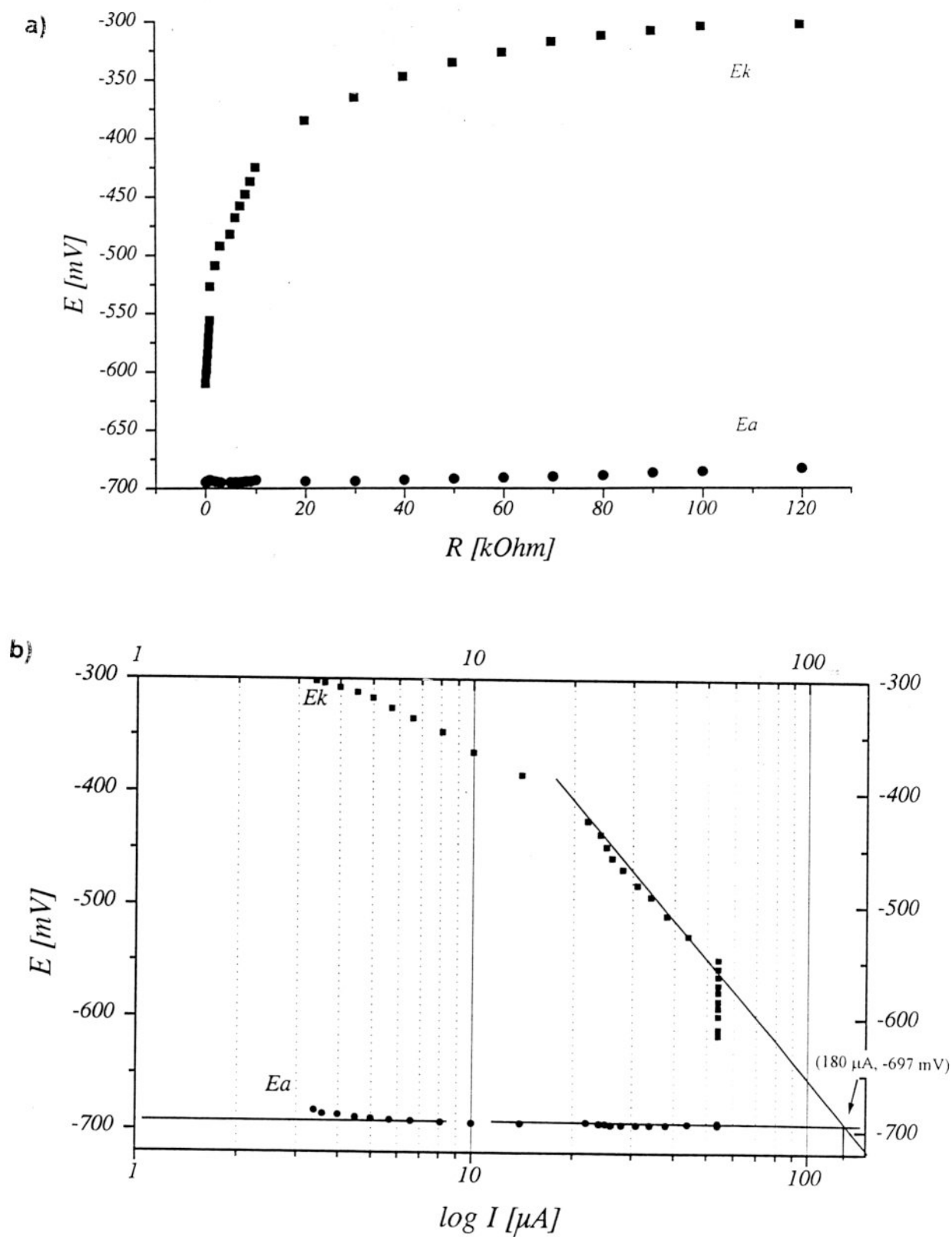
Wyniki badania ogniwa otrzymanego przez połączenie komór elektrodowych półprzepuszczalną diafragmą przedstawiono graficznie, zamieszczając zależności potencjału E elektrod od zmieniającego się oporu R ($E=f(R)$) oraz zależności natężenia prądu I od potencjału E poszczególnych elektrod ($I=f(E)$). Aproksymując liniowo przebieg krzywych polaryzacji anodowej i katodowej w przecięciu prostych wyznaczono natężenie prądu płynącego w ogniwie oraz wartość potencjału korozyjnego. Na rys. 3.8. zamieszczono wyniki badania ogniwa z katodą o powierzchni $A_k = 10 \text{ cm}^2$ i anodą o powierzchni $A_a = 1 \text{ cm}^2$. Na kolejnych rys. 3.9. ÷ 3.14. przedstawiono dalsze wyniki badania ogniwa, w którym zastosowano elektrody o innych powierzchniach. Pola powierzchni elektrod w poszczególnych badaniach określono w podpisach rysunków.

Wyniki badań zestawiono w tablicy 3.3, podając wartości zmierzonego potencjału korozyjnego w skali NEK, wartości wyznaczonego na podstawie krzywych polaryzacji prądu korozyjnego „I” w $[\mu\text{A}]$ i odpowiednio: gęstości prądu korozyjnego i_{corr} $[\mu\text{A}/\text{cm}^2]$ i obliczoną na podstawie wzoru 3.8 przeciętną szybkość korozji H_t $[\text{mm}/\text{rok}]$.

Tablica 3.3

Zestawienie wartości uzyskanych w pomiarach prądu i potencjału w modelowym ogniwie korozyjnym.

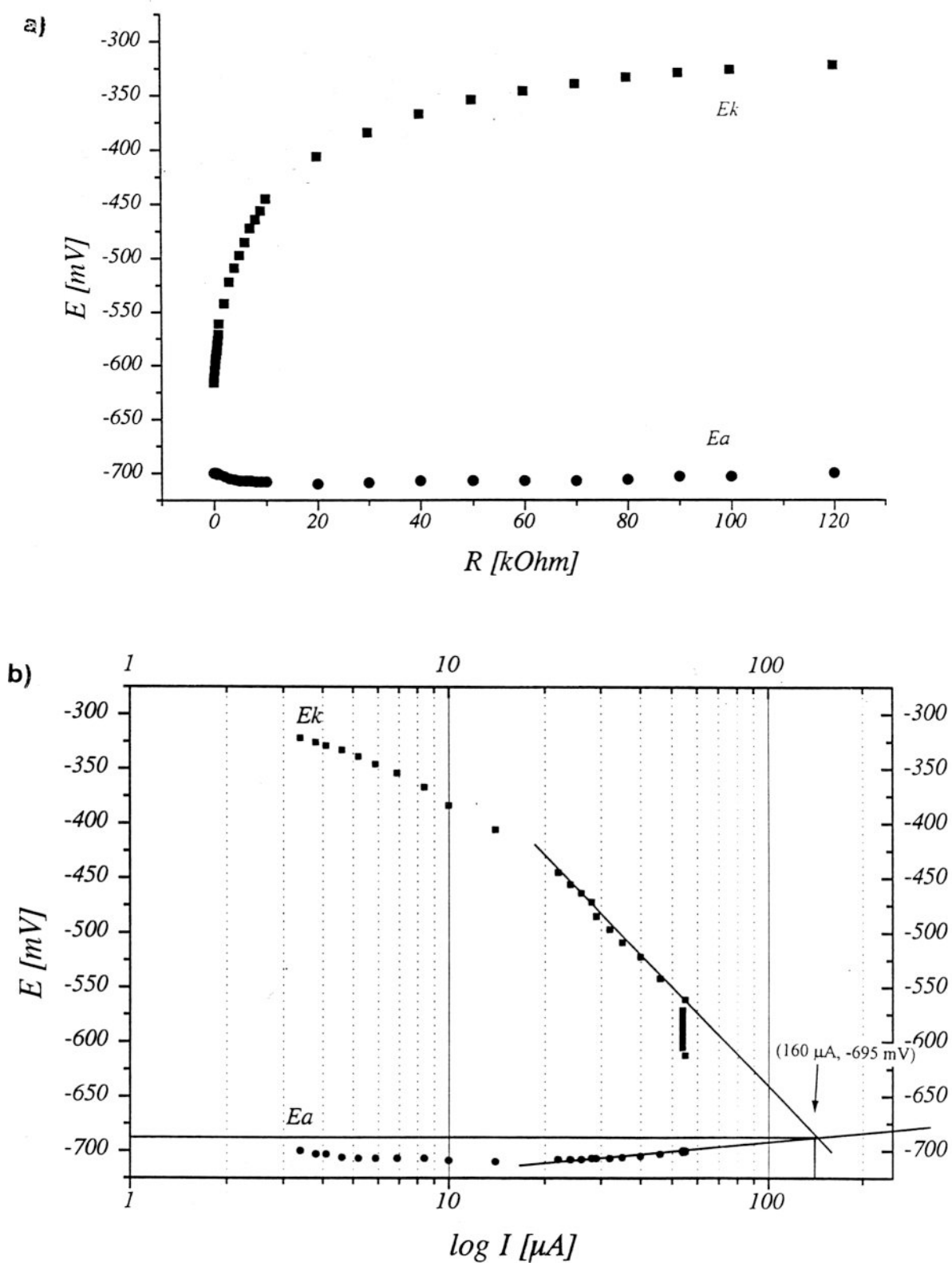
Stosunek powierzchni anody do katody	E_{corr} [mV]	I [μA]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	H_t [mm/rok]
10:1	-697	180	18,0	0,2
5:1	-695	160	21,2	0,25
2:1	-650	80	40,0	0,47
1:1	-645	60	60,0	0,70
1:2	-615	94	94,0	1,09
1:5	-597	134	134,0	1,57
1:10	-530	175	175,0	2,05



Rys.3.8. Wyniki badania ogniwa, w którym $A_s=10 \text{ cm}^2$, $A_k=1 \text{ cm}^2$:

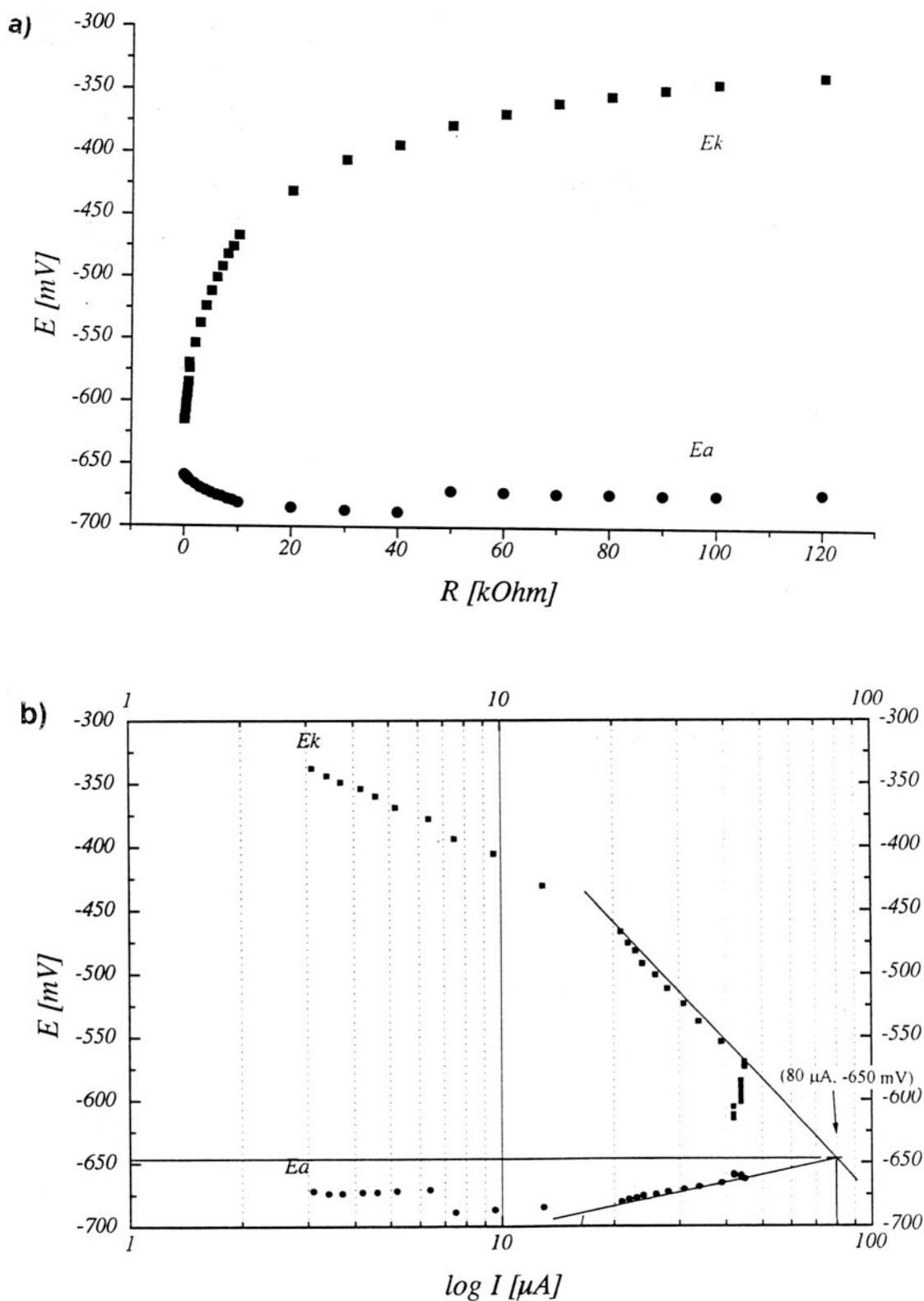
a) zależność potencjału od wartości zmienianego oporu $E=f(R)$,

b) zależność logarytmiczna gęstości prądu od potencjału $I=f(E)$



Rys. 3.9. Wyniki badania ogniwa, w którym $A_a=5 \text{ cm}^2$, $A_k=1 \text{ cm}^2$:

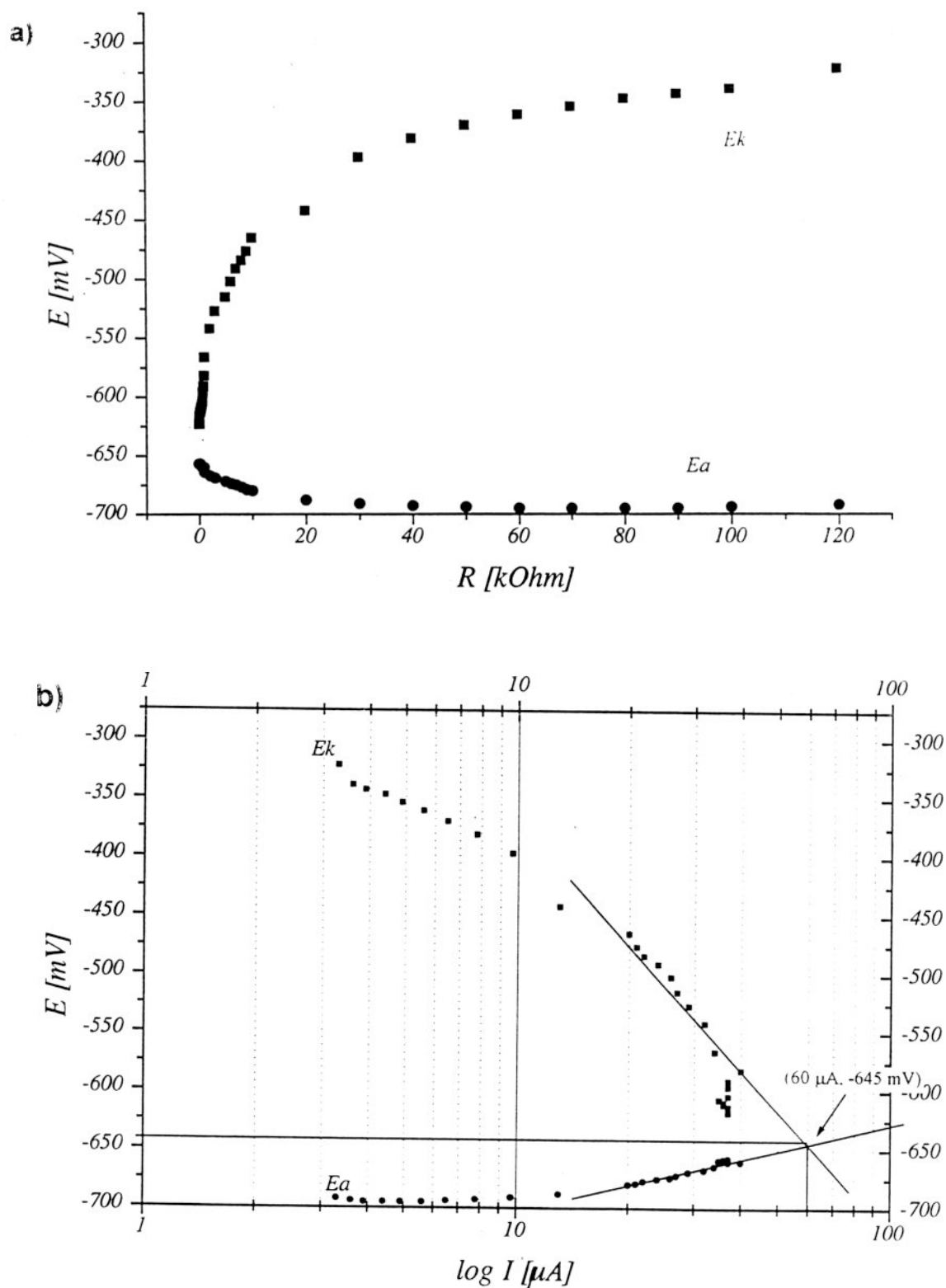
- a) zależność potencjału od wartości zmienianego oporu $E=f(R)$,
- b) zależność logarytmiczna gęstości prądu od potencjału $I=f(E)$



Rys. 3.10. Wyniki badania ogniwa, w którym $A_a=2 \text{ cm}^2$, $A_k=1 \text{ cm}^2$:

a) zależność potencjału od wartości zmienianego oporu $E=f(R)$,

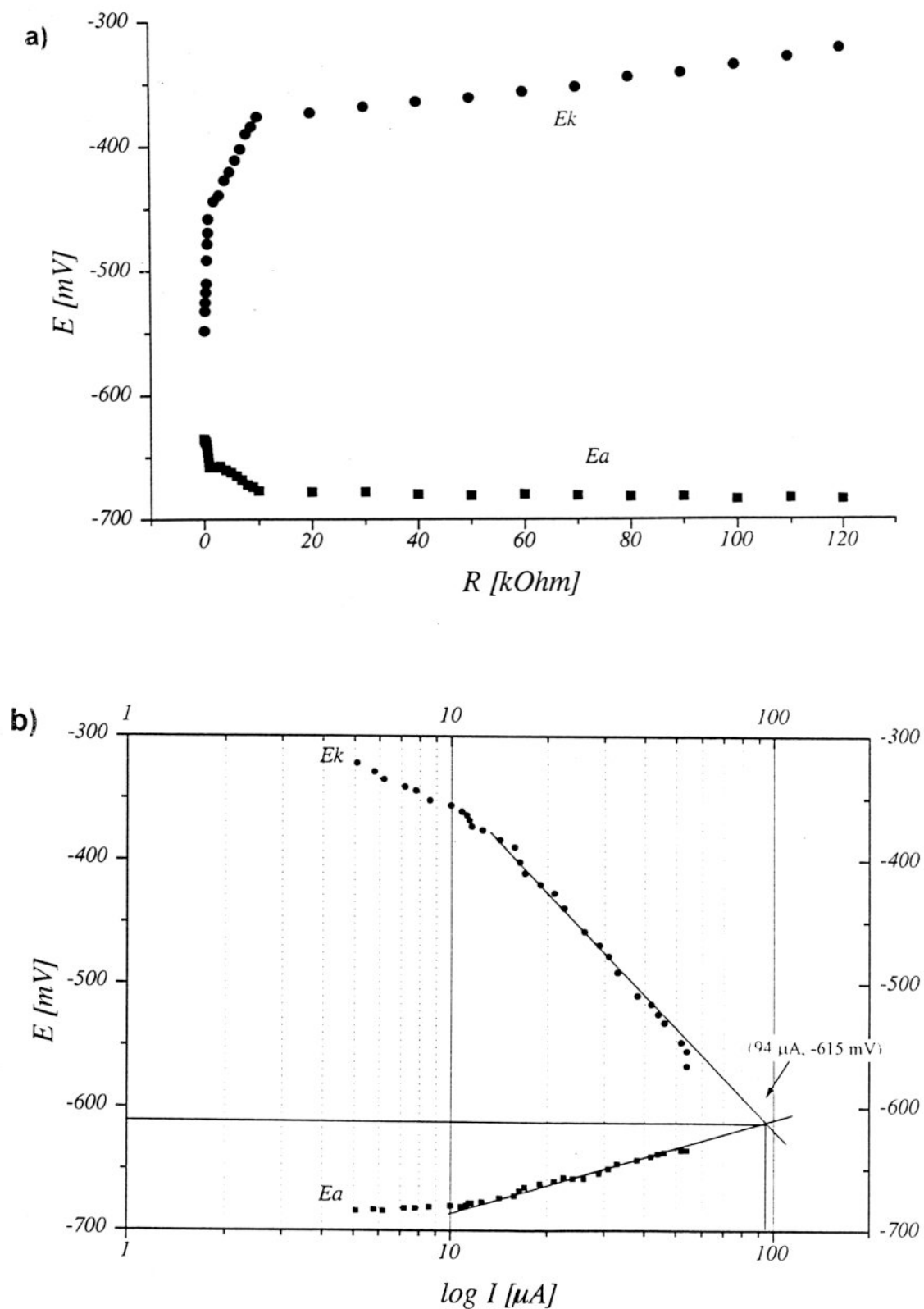
b) zależność logarytmiczna gęstości prądu od potencjału $I=f(E)$.



Rys. 3.11. Wyniki badania ogniwa, w którym $A_a=1 \text{ cm}^2$, $A_k=1 \text{ cm}^2$:

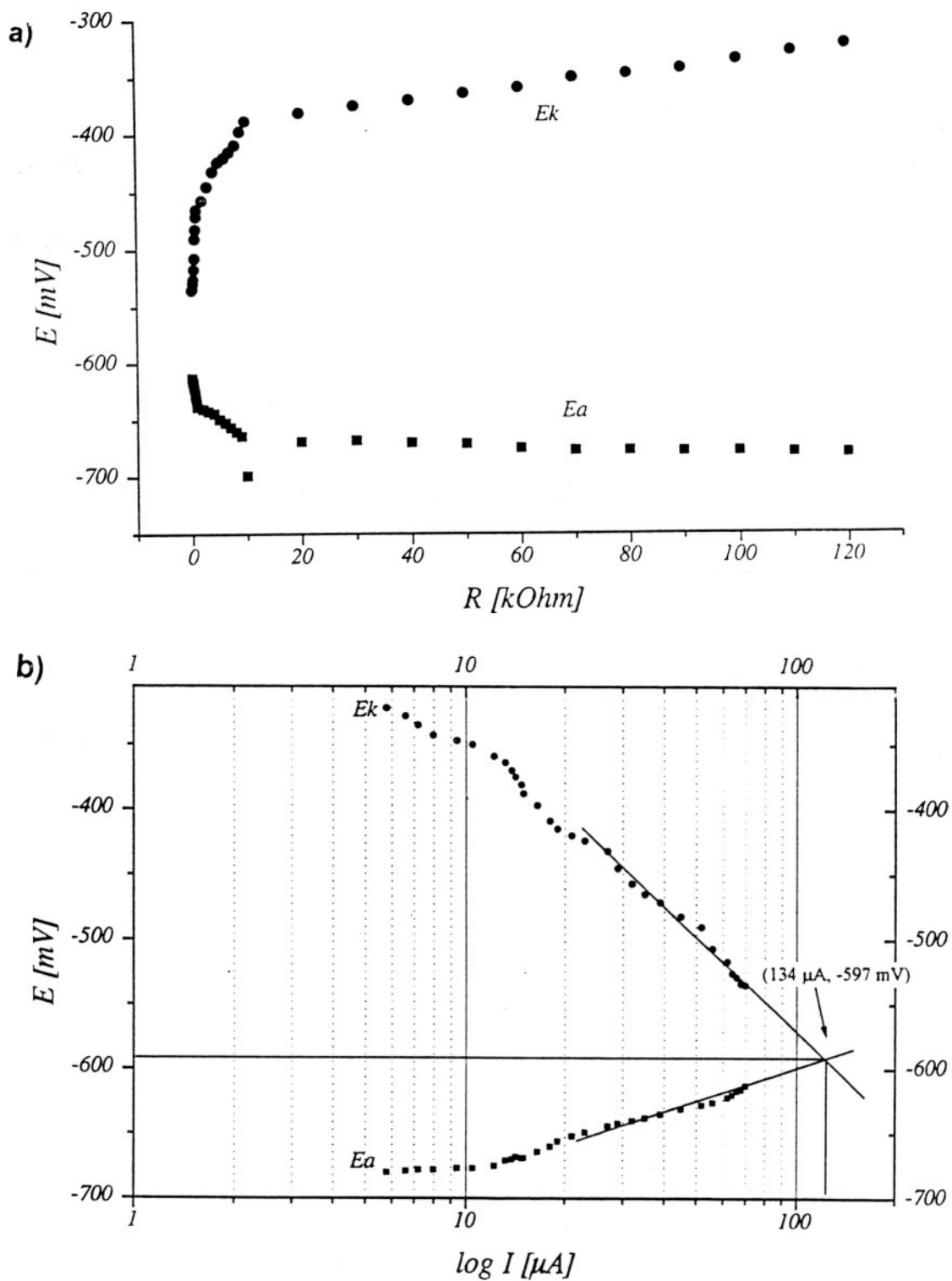
a) zależność potencjału od wartości zmienianego oporu $E=f(R)$,

b) zależność logarytmiczna gęstości prądu od potencjału $I=f(E)$



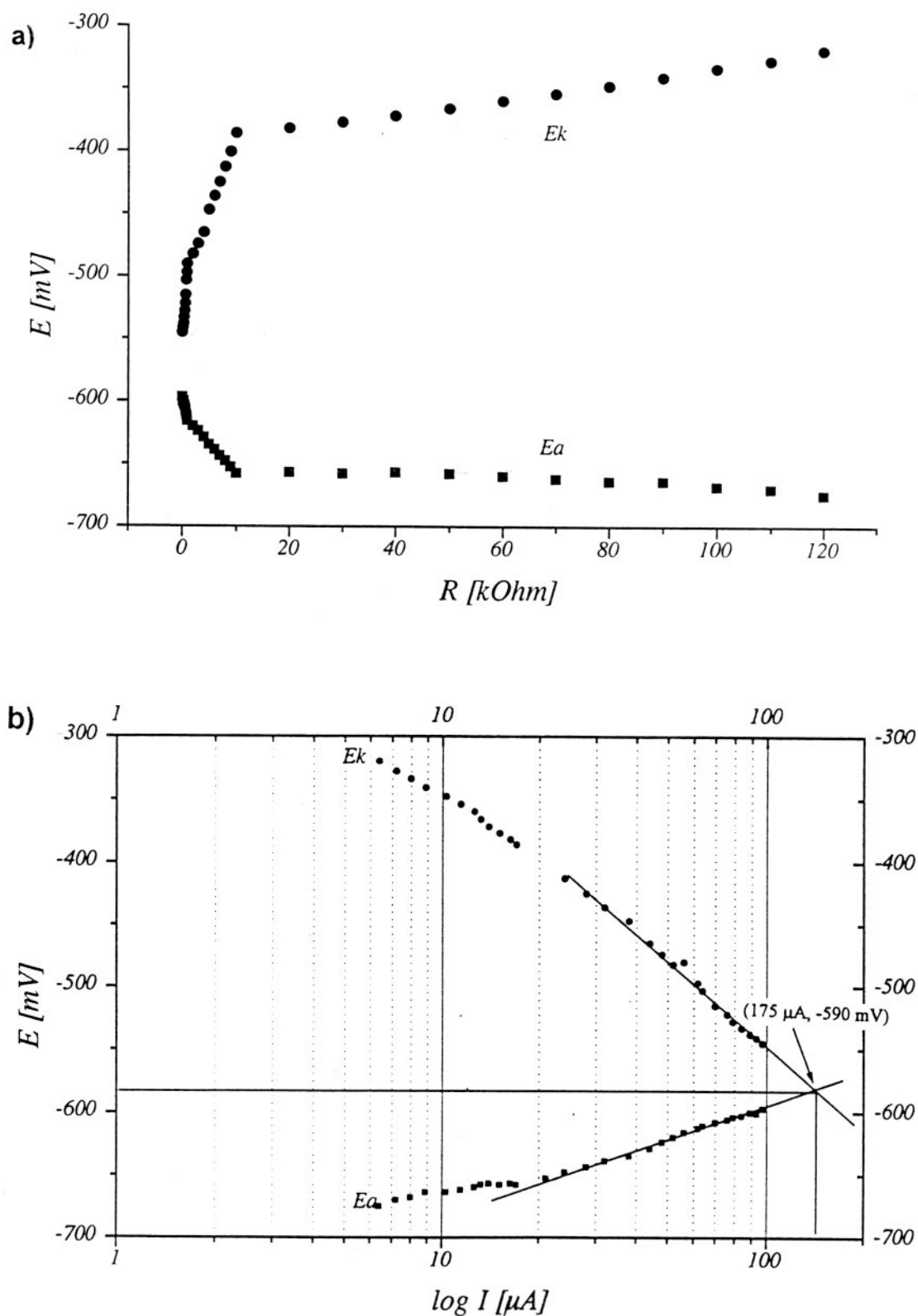
Rys. 3.12. Wyniki badania ogniwa, w którym $A_a=1 \text{ cm}^2$, $A_k=2 \text{ cm}^2$:

- a) zależność potencjału od wartości zmienianego oporu $E=f(R)$,
- b) zależność logarytmiczna gęstości prądu od potencjału $I=f(E)$.



Rys. 3.13. Wyniki badania ogniwa, w którym $A_a=1 \text{ cm}^2$, $A_k=5 \text{ cm}^2$:

- a) zależność potencjału od wartości zmienianego oporu $E=f(R)$,
- b) zależność logarytmiczna gęstości prądu od potencjału $I=f(E)$.

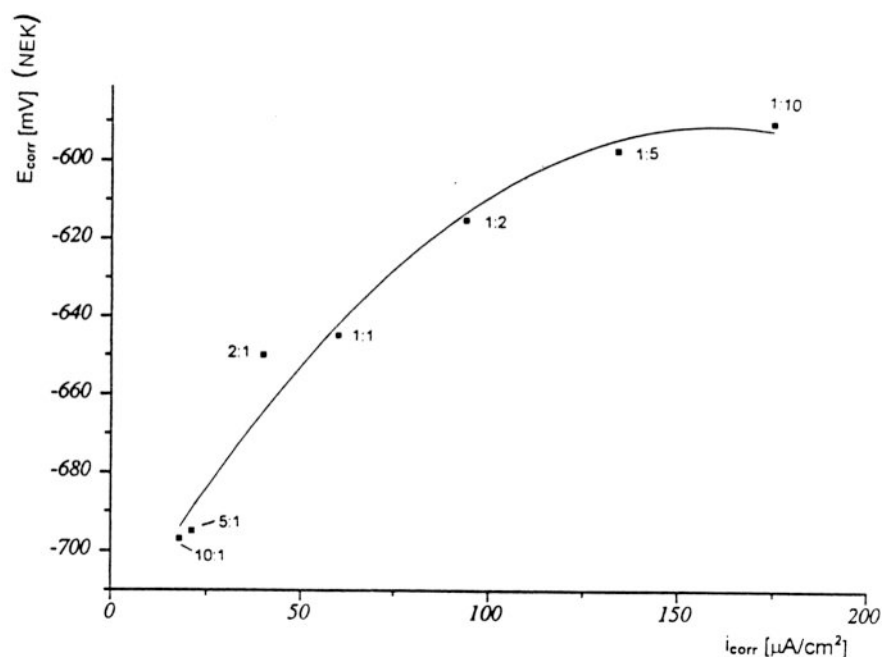


Rys. 3.14. Wyniki badania ogniwa, w którym $A_a=1 \text{ cm}^2$, $A_k=10 \text{ cm}^2$:

- a) zależność potencjału od wartości zmienianego oporu $E=f(R)$,
- b) zależność logarytmiczna gęstości prądu od potencjału $I=f(E)$.

Analizując wyniki przeprowadzonych badań modelowego ogniwa korozyjnego zauważa się, że zmniejszenie stosunku powierzchni $A_a:A_k$ od 10 do 0,1 powoduje wzrost gęstości prądu korozyjnego od $18 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ do $175 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, co odpowiada zwiększeniu szybkości korozji od 0,21 mm/rok do 2,05 mm/rok. Charakter przebiegu krzywych na rys. 3.8 ÷ 3.14 umożliwia określenie typu kontroli procesu korozji. Jeżeli stosunek powierzchni anody do katody $A_a:A_k > 1$ to zgodnie z oczekiwaniem, obserwuje się kontrolę katodową procesu. W tym przypadku E_k zmienia się bardzo wyraźnie, podczas gdy E_a prawie nie ulega zmianie - rys. 3.8 ÷ 3.10. Analiza wyników badań przedstawionych na rysunkach 3.11. ÷ 3.14. prowadzi do wniosku, że przy $A_a:A_k \leq 1$ zwiększa się rola kontroli anodowej procesu korozji. W tych warunkach proces w ogniwie przebiegał z kontrolą katodowo-anodową.

Na rys. 3.15 przedstawiono zależność potencjału korozyjnego E_{corr} - gęstość prądu korozyjnego i_{corr} uzyskaną przy zmianie stosunku powierzchni anody do katody.



Rys. 3.15. Zależność potencjału korozyjnego E_{corr} - gęstość prądu korozyjnego sporządzona dla badanych stosunków powierzchni anody A_a do katody A_k . Przy punktach podano odpowiadający stosunek $A_a:A_k$.

Taką tendencję odnotowano do osiągnięcia stosunku powierzchni anody do katody $A_a:A_k = 1/5$. Dalsze zmniejszanie stosunku powierzchni katody nie spowodowało już znaczącego wzrostu gęstości prądu

Rozdział czwarty

BADANIA POTENCJAŁOWE I POLARYZACYJNE ZBROJENIA ELEMENTÓW PRÓBNYCH Z BETONU

4.1. Elementy próbne.

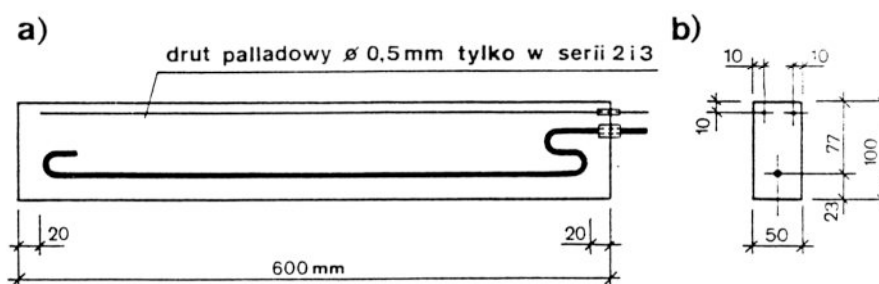
Do badań przygotowano 18 beleczek żelbetowych o wymiarach 5×10×60 cm, zbrojonych 1 prętem o średnicy 6 mm ze stali St3S oraz 6 beleczek zbrojonych prętem żebrowanym o średnicy 6 mm ze stali St3SY-b-500. Założono klasę betonu B 20.

Mieszkankę sporządzono z cementu portlandzkiego marki 35 (Cementownia Strzelce Opolskie) stosując konsystencję plastyczną, wskaźnik $w/c = 0.51$ oraz kruszywo naturalne (mieszanka żwirowo-piaskowa) o wodoządnosci $W_k = 0.031$. Składniki mieszanki betonowej zestawiono w tablicy 4.1.

Tablica 4.1. Składniki w 1 m³ zarobu

Cement portlandzki 35	306,5 kg
Kruszywo 0:10 mm	1418,6 kg
Piasek	551,7 kg
Woda	157,6 dcm ³

Wykonano cztery serie elementów próbnych, po 6 elementów w każdej serii. Wraz z elementami próbnymi danej serii betonowano 6 lub 7 kostek kontrolnych o boku 10 cm służących do badań wytrzymałościowych. W pierwszych trzech seriach zastosowano zbrojenie z prętów gładkich. Zakotwienie tych prętów w betonie elementów uzyskano dzięki wygiętym na końcach hakom. Schemat konstrukcji elementów serii 1, 2 i 3 przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Schemat konstrukcji elementów próbnych pierwszych trzech serii: a) widok z boku, b) przekrój poprzeczny.

W elementach serii czwartej, zbrojenie stanowił pręt żebrowany prosty zakotwiony na całej długości wskutek tarcia betonu o wyprofilowania powierzchni. W elementach serii 2, 3 i 4 oprócz zbrojenia zasadniczego umieszczono dwa druty palladowe o średnicy 0,5 mm będące podczas badań polaryzacyjnych elektrodami pomocniczymi. Druty palladowe oraz pręty zbrojeniowe zaizolowano żywicą epoksydową, umieszczone w miejscu wyjścia z betonu.

Elementy betonowano w indywidualnie wykonanej drewnianej formie zespolonej. Widok formy wraz ze zbrojeniem przed betonowaniem przedstawiono na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Forma zespolona z ułożonym zbrojeniem przed zabetonowaniem elementu.

4.2.. Badania materiałowe.

Po upływie 28 dni od wykonania elementów próbnych przeprowadzono badania betonu. Określono masę każdej próbki kostkowej w warunkach powietrzno-suchych i wyznaczono gęstość objętościową γ_k betonu. Następnie próbki obciążono w maszynie wytrzymałościowej do zniszczenia. Wytrzymałość betonu na ściskanie wyznaczoną na próbkach kostkowych o boku 10 cm sprowadzono do wytrzymałości określonej na kostkach podstawowych o boku 15 cm zgodnie z relacją [110]

$$R_{\square 15} = 0.90 R_{\square 10} \quad (4.1)$$

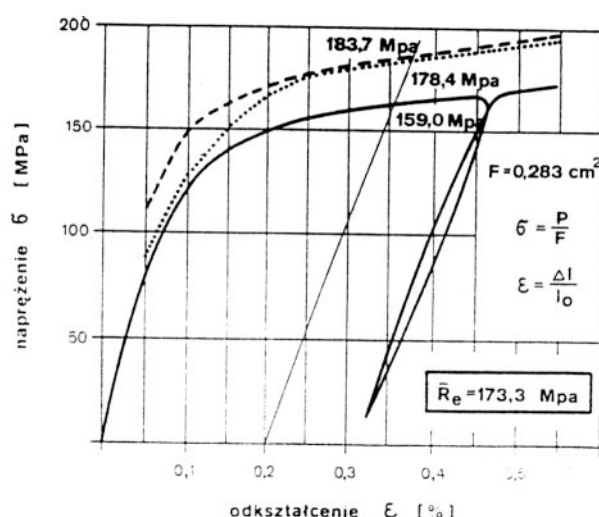
Wyniki badań betonu zestawiono w tablicy 4.2.

Tablica 4.2. Wyniki badania próbek kostkowych

Seria	n [szt.]	Gęstość objętościowa		Wytrzymałość na ściskanie		
		$\bar{\gamma}_k$ [g/cm ³]	s_γ [g/cm ³]	$\bar{R}_{\square 15}$ [MPa]	s_R [MPa]	R_b^G [MPa]
1	7	2,51	0,14	30,73	2,75	26,22
2	6	2,29	0,05	32,02	2,29	28,26
3	6	2,43	0,14	32,10	5,19	20,29
4	6	2,48	0,13	31,03	3,15	25,84

W tablicy podano wartość średnią i odchylenie standardowe gęstości objętościowej betonu $\bar{\gamma}_k$, s_γ oraz wytrzymałość średnią na ściskanie, odchylenie standardowe i wytrzymałość gwarantowaną betonu $\bar{R}_{\square 15}$, s_R , R_b^G .

Z prętów gładkich (St3S), używanych do wykonania zbrojenia, pobrano losowo 3 odcinki, które poddano próbie rozciągania w maszynie wytrzymałościowej. Odkształcenia mierzono ekstensometrem o bazie $l_0 = 40$ mm. Określając trwałe odkształcenie $\varepsilon_{trw.} = 0,2$ % wyznaczono siły odpowiadające umownej granicy plastyczności - $P_1 = 4,5$ kN, $P_2 = 5,2$ kN, $P_3 = 5,05$ kN, a następnie średnią wartość granicy plastyczności $\bar{R}_e \cong 174,0$ MPa. Wykres służący do obliczenia granicy plastyczności przedstawiono na rys. 4.3. Podobnie wykonano badania stali żebrowanej St3SY-b-500. Otrzymano - $P_1 = 19,6$ kN, $P_2 = 19,4$ kN, $P_3 = 19,0$ kN, a następnie określono średnią wartość granicy plastyczności $\bar{R}_e \cong 675$ MPa.



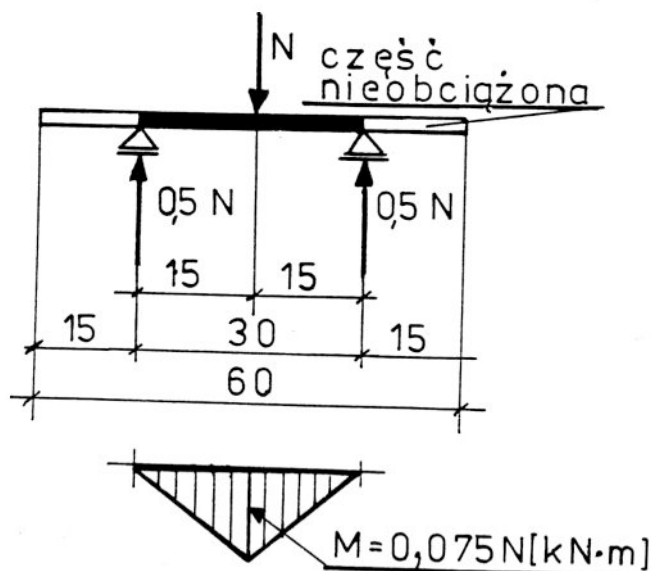
Rys. 4.3. Wyniki badania stali zbrojeniowej gładkiej (St3S).

Wyniki badań wskazują, że stal żebrowana była znacznie mniej odkształcalna od stali gładkiej.

4.3. Technika i przebieg obciążania elementów próbnych.

4.3.1. Elementy próbne z jedną rysą w strefie rozciąganej

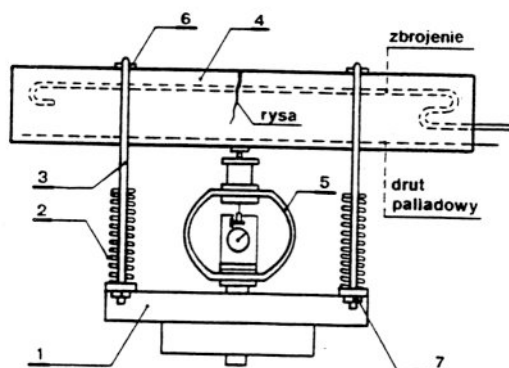
Zmierzając do uzyskania w strefie rozciąganej jednej rysy elementy próbne obciążono w schemacie belki wolnopodpartej siłą skupioną - rys. 4.4.



Rys. 4.4.

Schemat obciążenia elementów próbnych momentem zginającym skoncentrowanym w jednym przekroju.

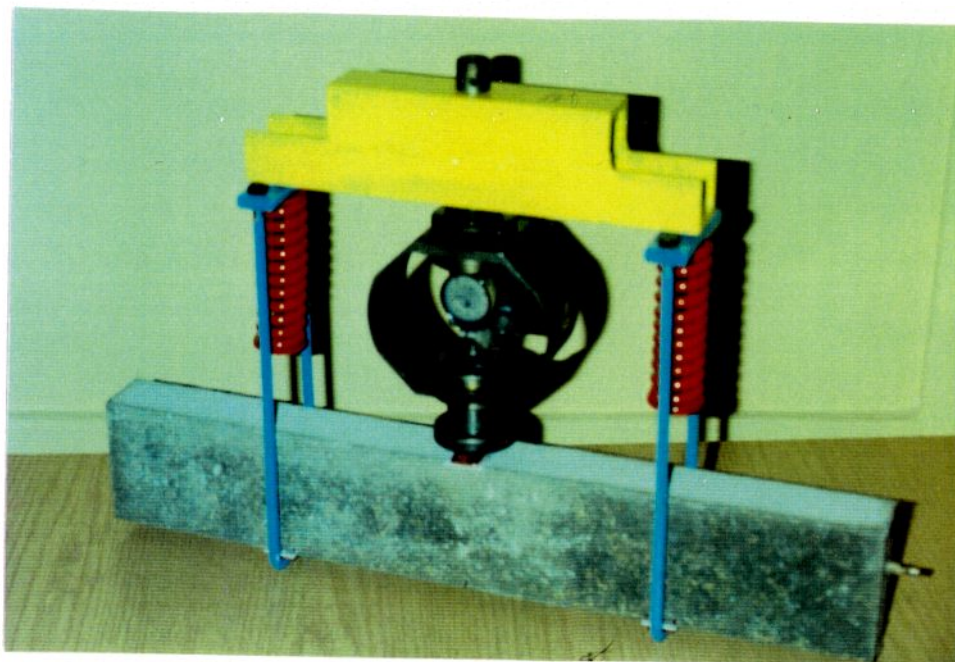
Siła obciążająca charakteryzowała się prawie stałą wartością przez cały kilkunastomiesięczny okres badania. Obciążenie każdego elementu próbnego realizowano wykonanym indywidualnie układem ciągnowo-belkowym. Siłę obciążającą przekazywano za pośrednictwem sprężyn i kontrolowano siłomierzem mechanicznym. Schemat konstrukcji układu obciążającego przedstawiono na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Schemat konstrukcji układu obciążającego elementy próbne z jedną rysą.

Układ obciążający składał się z belki stalowej **1**, do której połączono za pośrednictwem sprężyn **2** dwuramienne ciągną prętowe **3**. Rozstaw cięgien wynosił 30 cm. Sprężyna **2** była przymocowana w osi belki znajdującą się wewnątrz śrubą, natomiast ciągną prętowe **3** opierało się na tej sprężynie dzięki poprzeczce z płaskownika. Między belką stalową **1** urządzenia i elementem próbnym **4** umieszczono siłomierz mechaniczny **5**.

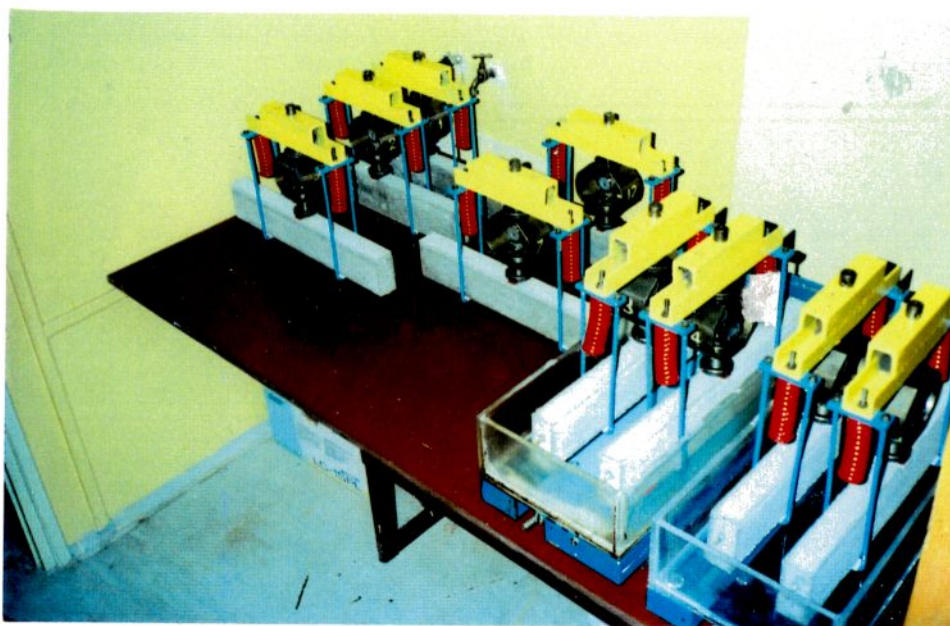
Obciążenie przekazywano na element próbny przez łożyska wałkowe **6** odizolowane od elementu próbnego **4** podkładkami z teflonu. Masa całkowita jednego zestawu (element próbny i układ obciążający) wynosiła 12 kg. Widok elementu próbnego wraz z osprzętem obciążającym przedstawiono na rys. 4.6. Po założeniu osprzętu i skorygowaniu położenia łożysk wałkowych pod siłomierzem **5** i ciągnami prętowymi **3** element próbny **4** stopniowo obciążano. Wzrost siły następował na skutek skręcania nakrętek **7**. Obciążenie N kontrolowane siłomierzem zwiększano do momentu pojawienia się na powierzchni elementu śladu rysy. Następnie obciążenie N w dalszym ciągu zwiększano starając się uzyskać rysy szersze o rozwartości rzędu 0.3 mm. W większości elementów rysy rozwierały się nagle przyjmując natychmiast ostateczną szerokość. Po pełnym zarysowaniu wartość siły obciążającej N uległa pewnemu, niewielkiemu zmniejszeniu.



Rys. 4.6. Widok elementu próbnego z jedną rysą wraz z osprzętem obciążającym.

W tablicy 4.3. zamieszczono parametry charakteryzujące elementy badane: siłę rysującą N_r oraz siłę N_m odnotowaną tuż przed powstaniem rysy o określonej rozwartości. Ujęto także siłę N , obliczone na jej podstawie naprężenie σ_a w zbrojeniu oraz zmierzoną szerokość rozwarcia a_r rysy w poziomie osi zbrojenia na obu powierzchniach pionowych (strona 1 i 2). Parametry N , σ_a , a_r określono na początku badań ($t = 0$) oraz po upływie 10 miesięcy.

Obciążone elementy próbne przygotowane do badań elektrochemicznych przedstawiono na rys. 4.7. Część elementów umieszczono w pojemnikach służących do ekspozycji w środowisku agresywnym.



Rys. 4.7. Widok elementów przygotowanych do badań elektrochemicznych.

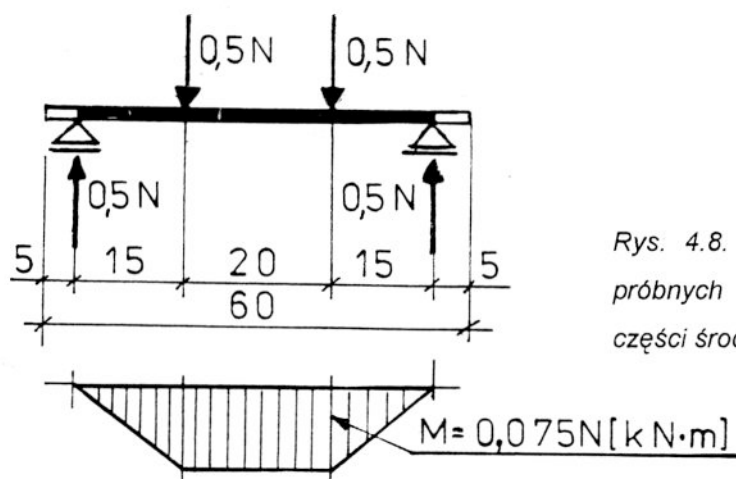
Oszacowane wartości naprężenia σ_a oraz nagły przyrost rozwarcia rys świadczą o lokalnym uplastycznieniu zbrojenia w przekrojach zarysowanych. Ponieważ przeprowadzone badania miały na celu odwzorowanie metodami elektrochemicznymi procesów korozyjnych zachodzących w bardzo nietypowych warunkach pomiarowych (duża niejednorodność w styku zbrojenia z betonem), więc zdecydowano się wykonać pomiary w ekstremalnych warunkach znacznie zróżnicowanych szerokości rozwarcia rys oraz dużych odkształceń i naprężeń zbrojenia.

Tablica 4.3. Obciążenie oraz szerokości rozwarcia rys w elementach badawczych.

Seria	Nr. elementu	N_r [kN]	N_m [kN]	t = 0				t = 10 miesięcy			
				N [kN]	σ_a [MPa]	a_r [mm]		N [kN]	σ_a [MPa]	a_r [mm]	
						1	2			1	2
1	1	4.9	6.2	6.0	212	1.0	1.0	5.2	183	1.3	1.3
	2	5.5	6.6	6.4	226	0.5	0.6	5.9	208	0.9	0.9
	3	5.4	7.6	6.0	212	0.4	0.4	5.9	208	0.5	0.5
	4	5.0	6.5	6.1	215	0.9	0.5	5.5	194	1.2	1.2
	5	5.5	6.0	6.0	212	0.2+0.1	0.3	5.5	194	0.5	0.5
	6	5.7	6.6	6.0	212	0.5+0.3	0.5+0.5	5.8	204	0.5+0.4	0.5+0.5
2	7	5.0	6.1	6.0	214	0.3	0.3	5.6	199	0.4	0.4
	8	6.0	6.5	6.2	222	0.6	0.05+0.55	6.0	214	0.7	0.7
	9	5.8	7.0	6.7	240	0.9	0.9	5.8	207	0.9	0.9
	10	5.9	6.2	6.0	214	0.04+0.2	0.2	5.8	207	0.3	0.3
	11	6.5	6.7	6.3	226	0.5+0.6	1.2	5.9	210	0.5+0.6	1.2
	12	6.3	6.3	6.0	214	0.5	0.5	5.8	207	0.7	0.5

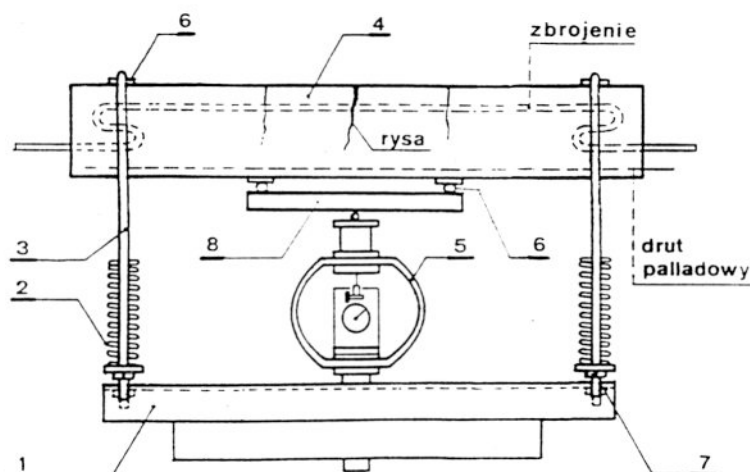
4.3.2. Elementy próbne z kilkoma rysami w strefie rozciąganej

W celu otrzymania kilku rys w strefie rozciąganej elementy próbne obciążono dwiema siłami skupionymi według schematu zamieszczonego na rys. 4.8.



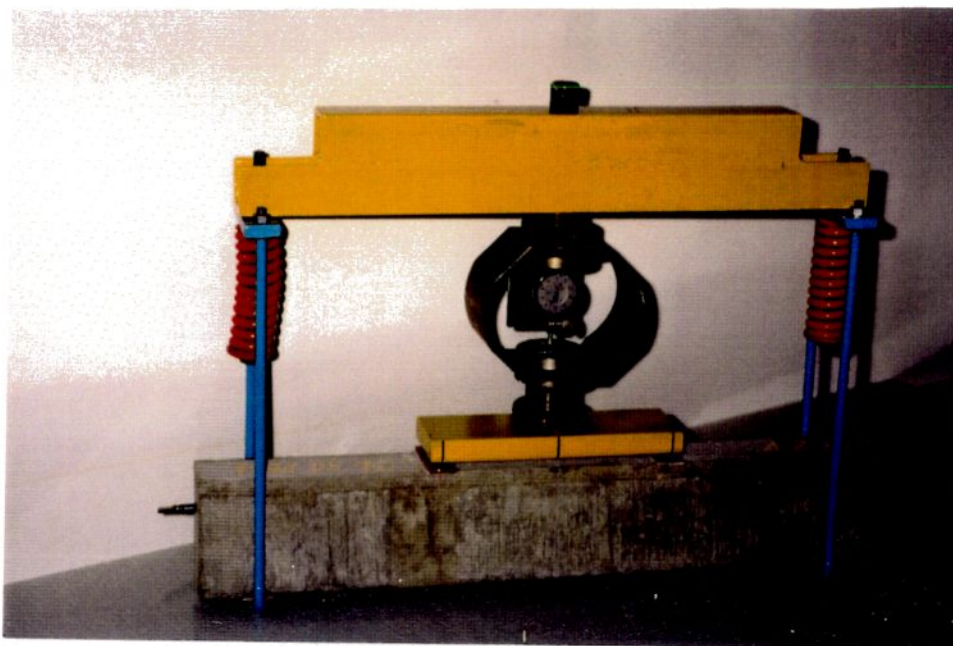
Rys. 4.8. Schemat obciążenia elementów próbnych stałym momentem zginającym w części środkowej.

Elementy próbne obciążono zmodyfikowanym układem ciągnowo-belkowym, którego konstrukcję przedstawiono na rys. 4.9. Zasadę działania układu obciążającego omówiono w poprzednim punkcie - por. rys. 4.5. Zastosowano przedłużoną belkę **1** oraz rozsunięto o 20 cm cięgna prętowe **3** wraz ze sprężynami **2**. Siłomierz **5** oparto za pośrednictwem łożyska kulowego na dodatkowej beleczce stalowej **8**. Obciążenie przekazywano przez łożyska wałkowe **6** odizolowane od elementu próbnego **4** podkładkami z teflonu. Obciążenie elementu następowało wskutek skręcania nakrętek **7**. Osprzęt obciążający zamontowano na trzech elementach próbnych serii 3 zbrojonych prętami gładkimi (St3S) i trzech elementach serii 4 zbrojonych prętami żebrowanymi (St3SY-b-500).



Rys. 4.9. Schemat konstrukcji układu obciążającego elementy próbne stałym momentem zginającym w części środkowej.

Widok elementu próbnego z kilkoma rysami w strefie rozciąganej wraz z osprzętem obciążającym przedstawiono na rys. 4.10.



Rys. 4.10. Widok elementu próbnego z kilkoma rysami wraz z osprzętem obciążającym.

Siły działające na elementy próbne zwiększano stopniowo do momentu pojawienia się pierwszej rysy. Następnie obciążenie zwiększano w dalszym ciągu powodując powstanie na odcinku stałego momentu zginającego (por. rys. 4.8) dalszych dwóch lub trzech rys. Obciążenie elementów Nr 13 ÷ 15 zbrojonych prętem gładkim ze stali St3S kończono w momencie osiągnięcia przez najszerszą rysę rozwartości około 0,3 mm w osi zbrojenia. W tablicy 4.4 zestawiono parametry charakteryzujące elementy badawcze serii 3: siłę rysującą N_r , siłę N określoną po osiągnięciu przez rysy maksymalnego rozwarcia, obliczone na jej podstawie naprężenie σ_a w zbrojeniu oraz pomierzone szerokości rozwarcia rys w poziomie osi zbrojenia oraz obu powierzchniach pionowych 1 i 2. Obciążenia elementów Nr 16 ÷ 18 zbrojonych prętami stalowymi żebrowanymi St3SY-b-500 kończono w momencie powstania trzeciej rysy, przy sile obciążającej $N = 7,6$ kN. Przy stałej sile obciążającej $N = 7,6$ kN, po pewnym czasie na powierzchni elementów badanych powstała czwarta rysa. Wszystkie rysy na powierzchni poziomej elementów próbnych miały identyczną szerokość rozwarcia $a_r = 0,1$ mm. Na rys. 4.11. zamieszczono wartości sił powodujących powstanie kolejnych rys N_{ri} . Wszystkie trzy elementy po zarysowaniu

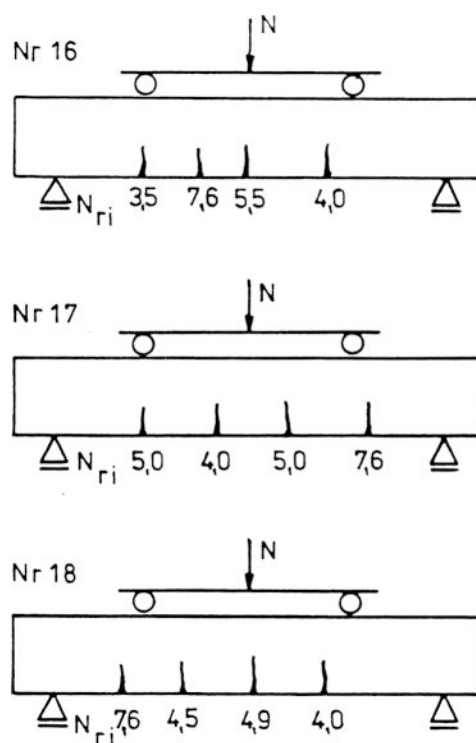
obciążono jednakową siłą $N = 7,6$ kN, która wywołała naprężenie w zbrojeniu $\sigma_a = 278$ MPa.

Tablica 4.4.

Obciążenie oraz szerokość rozwarcia rys w elementach serii 3

Nr elem.	N_r [kN]	N [kN]	σ_a [MPa]	szerokość rozwarcia rysy a_r [mm]							
				i		ii		iii		iiii	
				1	2	1	2	1	2	1	2
13	7,5	7,6	278	0,05	0,01	0,40	0,30	0,05	0,02	0,40	0,40
14	5,4	7,7	281	0,01	0,10	0,12	0,10	0,30	0,30	-	-
15	5,7	7,3	266	0,02	0,01	0,30	0,25	0,25	0,25	-	-

gdzie i oznacza kolejną rysę.



Rys. 4.11. Parametry charakteryzujące elementy badawcze Nr 16 ÷ 18 czwartej serii.

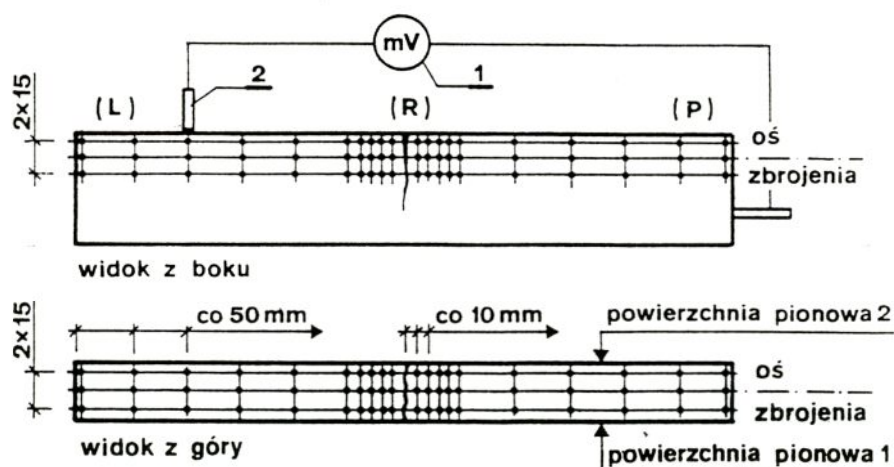
4.4. Zakres i sposób przeprowadzenia pomiarów elektrochemicznych.

Badania elektrochemiczne obejmowały pomiary potencjałów oraz pomiary potencjodynamiczne zbrojenia elementów próbnych znajdujących się pod działaniem momentów zginających. Ogółem pomiary wykonano na 15. zarysowanych beleczkach zbrojonych prętami gładkimi ze stali St3S, oraz 3. zarysowanych beleczkach zbrojonych prętami żebrowanymi ze stali St3SY-b-500. Dodatkowo, w celach porównawczych wymienione pomiary przeprowadzono na jednej nieobciążonej beleczce zbrojonej prętem gładkim.

Przed pomiarami każda beleczka była ekspozycja według unormowanych cykli [108] przez 3,5 godziny w 3,1% roztworze chlorku sodowego o $\text{pH} = 8,4$, a następnie przez 68,5 godziny suszona w temperaturze otoczenia. Pomiary wykonywano po jednym lub kilku cyklach nawilżania i suszenia, przez okres trwający kilkanaście miesięcy. Wymieniony program pomiarów powtarzano w dwóch, trzech lub czterech etapach realizowanych po przerwach trwających 4 lub 8 tygodni.

• Pomiary potencjału.

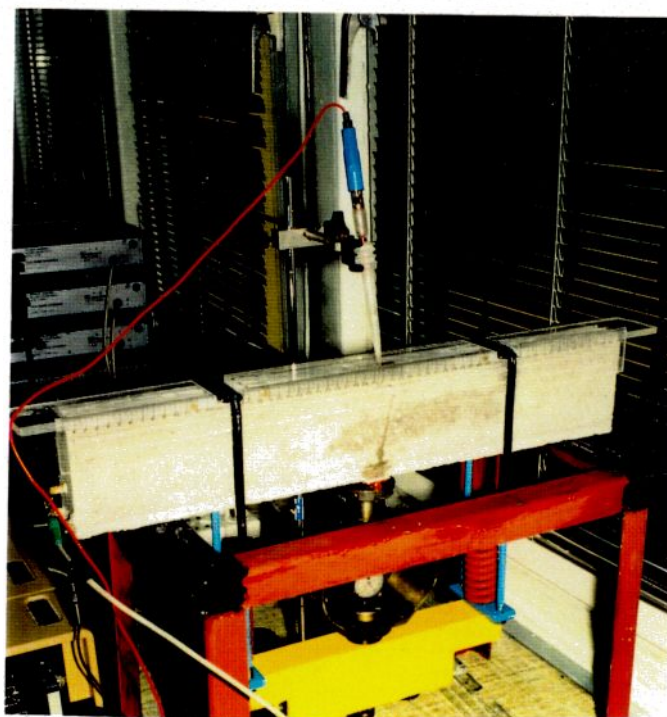
Pomiary potencjału zbrojenia beleczek wykonano na powierzchni betonu stosując przedstawiony na rys. 4.12. prosty układ pomiarowy. Badaniami objęto wszystkie wymienione wyżej beleczki.



Rys. 4.12. Schemat pomiaru potencjału zbrojenia.

Jako miernik potencjału **1** służył pH-metr cyfrowy typu N-5170 o rezystancji wejściowej większej od $10^{12} \Omega$, natomiast elektrodę odniesienia **2** stanowiła elektroda kalomelowa. Kontakt między elektrodą porównawczą a powierzchnią betonu zapewniała umieszczona na końcu elektrody gąbka nasycona roztworem KCl (średnica gąbki od strony betonu wynosiła około 3 mm). Odczytu wartości potencjału dokonywano po upływie 5 sekund od momentu przyłożenia elektrody porównawczej do powierzchni betonu.

Początkowo pomiary prowadzono na powierzchni poziomej zarysowanej (rozciąganej) i na obu powierzchniach pionowych. Odczyty wykonywano wzdłuż trzech linii pomiarowych umieszczonych w osi zbrojenia oraz wzdłuż sześciu linii usytuowanych w odległości 15 mm od osi zbrojenia. Rozstaw punktów pomiarowych wynosił 50 mm. W otoczeniu rysy na odcinku o długości 100 mm rozstaw punktów pomiarowych zagęszczono do 10 mm - por. rys. 4.12. Ponieważ w poszczególnych rzędach wartości potencjałów na powierzchniach pionowych nie różniły się istotnie od potencjałów określonych na powierzchni poziomej, więc w następnych etapach pomiary ograniczono jedynie do powierzchni poziomej. Na rys. 4.13 pokazano styk elektrody kalomelowej z powierzchnią betonu elementu w punkcie wyznaczonym za pośrednictwem szablonu.



Rys. 4.13. Styk elektrody kalomelowej z powierzchnią betonu.

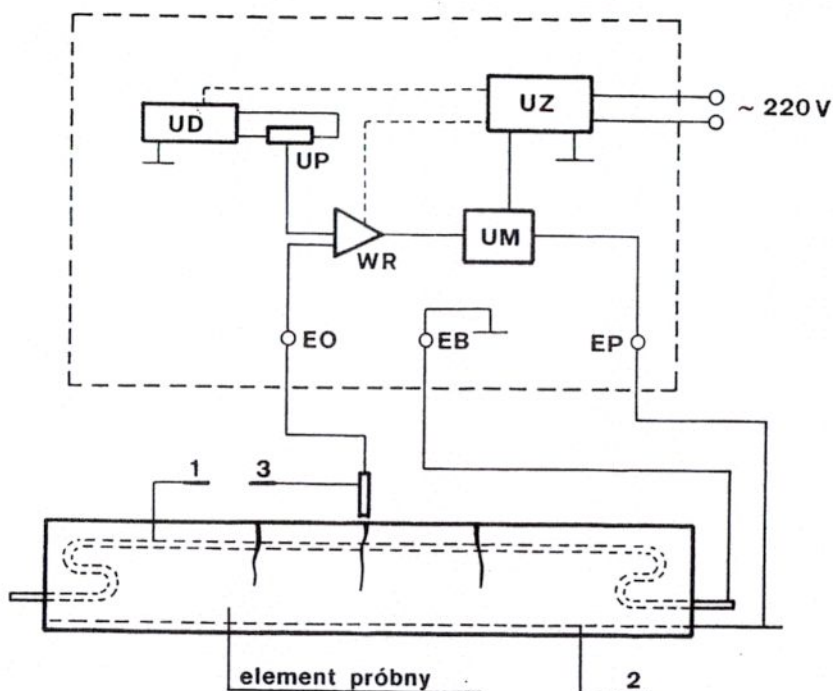
• **Badania polaryzacyjne.**

Celem badań polaryzacyjnych było dokładniejsze odwzorowanie przebiegu procesów korozyjnych zbrojenia znajdującego się pod otuleniem zarysowanym. Pomiary polaryzacyjne zbrojenia w elementach próbnych przeprowadzono metodą potencjodynamiczną, w układzie trójelektrodowym. Do tych pomiarów zastosowano automatyczną aparaturę badawczą, dzięki której określano nie tylko potencjał korozyjny, ale także gęstość prądu korozyjnego, nachylenia anodowej i katodowej krzywej Tafela oraz opór polaryzacji. Ze względu na pracochłonność badań pomiarami objęto kilka elementów stosowanych w badaniach rozkładu potencjału.

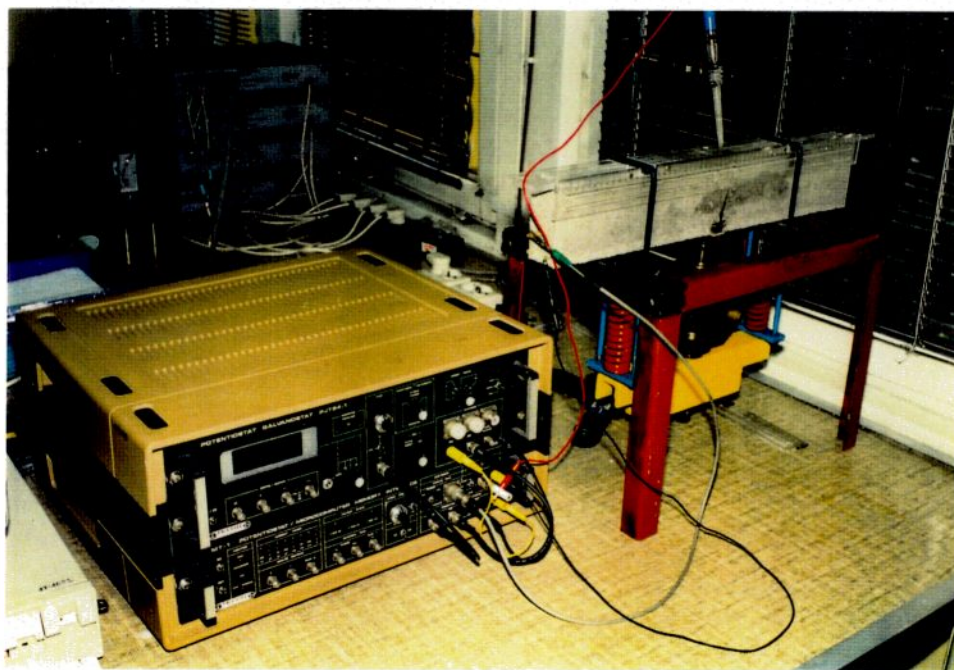
Badania polaryzacji zbrojenia wykonano na wybranych elementach próbnych stosowanych do badań rozkładu potencjału. Badania polaryzacji zbrojenia wykonano na:

- jednym elemencie porównawczym Nr 0, nieobciążonym i niezarysowanym, zbrojonym stalą St3S.
- sześciu elementach Nr 7 ÷ 12 z jedną rysą (St3S),
- jednym elemencie Nr 13 z czterema rysami (St3S),
- dwóch elementach Nr 14 i 15 z trzema rysami (St3S),
- trzech elementach Nr 16 ÷ 18 z czterema rysami ze stali St3SY-b-500.

Badania polaryzacji wykonano automatycznym zestawem do pomiarów elektrochemicznych firmy Tacussel typu PJT-24 wraz z interfejsem IMT-1. Zestaw pomiarowy był połączony z elementem badanym według schematu zamieszczonego na rys. 4.14. Kontakt między elektrodą odniesienia (kalomelową) i powierzchnią betonu zapewniała umieszczona w styku gąbka nasycona roztworem KCl. Ogólny widok stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 4.15.



Rys. 4.14. Schemat potencjostatu wraz z elementem badanym; UD - układ napięcia wzorcowego, UP - układ programowania, WR - wzmacniacz różnicowy, UM - układ mocy, UZ - układ zasilania, EB - elektroda badana (zbrojenie 1), EP - elektroda pomocnicza (druć palladowy 2), EO - elektroda odniesienia (kalomelowa 3).



Rys. 4.15. Widok ogólny stanowiska pomiarowego podczas badań polaryzacyjnych.

Po podłączeniu elementu do zestawu przez okres 30 minut ustalano potencjał stacjonarny (korozyjny). Następnie zgodnie z programem pomiarowym polaryzowano zbrojenie (elektrodę badaną) w zakresie potencjałów, zmieniających się o około ± 100 mV, od potencjału stacjonarnego, zmieniając wartość potencjału z szybkością 1 mV/sek. W każdym punkcie przyłożenia elektrody porównawczej otrzymywano przebieg zależności potencjał - gęstość prądu w postaci wykresu. Ponieważ na tym etapie badań nie jest znana powierzchnia obszaru anodowego i katodowego, więc przy obliczaniu gęstości prądu natężenie odnoszono do całej powierzchni zabetonowanego zbrojenia (elektrody badanej).

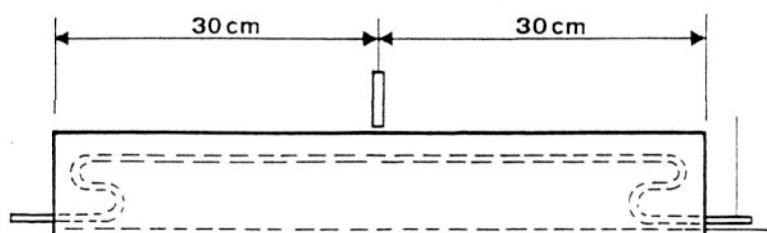
Do opracowania wyników pomiarów stosowano program obliczeniowy IMT1VOLT firmy Tacussel. .

4.5. Wyniki pomiarów potencjałowych i potencjodynamicznych

4.5.1. Wyniki badań elementu niezarysowanego

Element niezarysowany Nr 0 (porównawczy), został poddany czterem próbom działania roztworu agresywnego. Rozkłady potencjału w poszczególnych etapach, określano przed ekspozycją a następnie po jednym i pięciu cyklach zwilżania i suszenia w roztworze NaCl. W załączniku nr 1 (rys. z.1.1 i z.1.2) zamieszczono wykresy zależności wartości potencjału od miejsca położenia punktu pomiarowego na powierzchni beleczki w poszczególnych próbach.

Podczas badań potencjodynamicznych elektrodę odniesienia umieszczono na powierzchni beleczki w jednym punkcie usytuowanym w połowie długości - rys. 4.16.



Rys. 4.16. Usytuowanie elektrody odniesienia w elemencie Nr 0 niezarysowanym podczas badań potencjodynamicznych.

Wykonano cztery próby działania roztworem agresywnym. W pierwszej, trzeciej i czwartej próbie pomiary polaryzacji przeprowadzono przed ekspozycją elementu w roztworze NaCl, a następnie po jednym cyklu zwilżania roztworem i suszenia oraz po pięciu cyklach zwilżania i suszenia. W drugiej próbie pomiary polaryzacji wykonano tylko po pięciu cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia. Poszczególne próby rozdzielały dwumiesięczne okresy przechowywania elementu w warunkach powietrzno-suchych. W załączniku nr 2 na rys. z.2.1. przedstawiono wydruki komputerowe wyników badań przeprowadzonych w ramach pierwszej próby. Wydruki komputerowe pozostałych wyników w materiałach archiwalnych Instytutu technologii Nieorganicznej i Nawozów Mineralnych.

Na podstawie uzyskanych komputerowo pozostałych wykresów w tablicy 4.5. zestawiono wartości potencjału korozyjnego E_{corr} , oporu polaryzacji R_p oraz gęstości prądu korozyjnego i_{corr} określone podczas wszystkich czterech prób.

Tablica 4.5.

Zestawienie wyników polaryzacji zbrojenia elementu Nr 0 niezarysowanego.

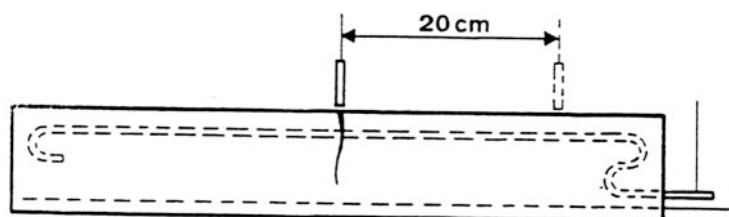
Nr próby	Liczba cykli	E_{corr} [mV]	R_p [Ωcm^2]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
1.	0	-145,0	$6,40 \cdot 10^5$	---
	1	-333,2	$1,56 \cdot 10^5$	0,089
	5	-387,4	$1,41 \cdot 10^5$	0,07
2.	5	-321,9	$1,95 \cdot 10^5$	0,07
3.	0	-247,0	$6,45 \cdot 10^5$	0,009
	1	-366,4	$2,34 \cdot 10^5$	0,04
	5	-374,8	$1,81 \cdot 10^5$	0,02
4.	0	-265,2	$7,30 \cdot 10^5$	0,21
	1	-374,9	$4,10 \cdot 10^5$	0,05
	5	-423,8	$8,63 \cdot 10^4$	0,32

4.5.2. Wyniki badań elementów zarysowanych w jednym miejscu

• Pomiary potencjału

Pomiary potencjału w elementach badawczych Nr 1 ÷ 12 z jedną rysą wykonano dwuetapowo. Pierwszy etap obejmował pomiary przeprowadzone po jednym i pięciu cyklach okresowego zwilżania roztworem chlorku sodowego. Poszczególne wartości są usytuowane na liniach pomiarowych ściśle w miejscu dokonania odczytu. Syntezę wyników pomiarów potencjału przedstawiono graficznie w załączniku nr 1 na rys. z.1.3. - z.1.17. („0” oznacza pomiar przed zwilżaniem, „1” - po pierwszym cyklu zwilżania, „5” - po piątym cyklu zwilżania, znak ” oznacza pomiar w próbie 2.). Wszystkie wyniki tych pomiarów znajdują się w materiałach archiwalnych Instytutu Technologii Nieorganicznej i Nawozów Mineralnych.

W tablicy 4.6. zestawiono minimalne wartości potencjałów po pierwszym i piątym cyklu zwilżania zmierzonych wzdłuż osi zbrojenia przy rysie (R) oraz średnie wartości określone po obu stronach rysy, od krawędzi lewej (L) i prawej (P) beleczki - por. rys. 4.17. Podane w tablicy wartości średnie obejmują odcinki pomiarowe, na których nie obserwowano wpływu rysy na wartość potencjału.



Rys. 4.17. Miejsca usytuowania elektrody kalomelowej na poziomej powierzchni w elementach z jedną rysą.

W drugim etapie badań rozpoczętym po upływie około 6 miesięcy od wykonania badań etapu 1. kontynuowano pomiary potencjału zbrojenia w trzech elementach Nr 3, 7 i 10. Wybrane do dalszych badań elementy przechowywano w stanie obciążonym zapewniając warunki identyczne jak przy suszeniu po ekspozycji w roztworze wodnym.

Tablica 4.6.

Zestawienie wyników pomiarów potencjałów na powierzchni poziomej elementów próbnych w 1 próbie, po 1 i 5 cyklu zwilżania.

Nr elem.	a _r [mm]	Liczba cykli	Długość odcinka spadku potencjału [cm]	E [mV]		
				kraw. P	Rysa	kraw. L
1	1,0	1	13,0	-250	-370	-250
		5	9,0	-330	-429	-220
2	0,5	1	7,0	-250	-374	-230
		5	8,0	-240	-442	-320
3	0,4	1	11,0	-280	-483	-260
		5	14,0	-310	-421	-220
4	0,9	1	15,0	-270	-482	-275
		5	19,0	-330	-420	-325
5	0,3	1	12,0	-250	-372	-245
		5	14,0	-360	-453	-325
6	0,5+	1	15,0	-260	-429	-265
	0,3	5	17,0	-335	-440	-320
7	0,3	1	21,0	-300	-623	-310
		5	15,0	-320	-517	-340
8	0,6	1	13,0	-265	-367	-240
		5	9,0	-330	-514	-290
9	0,9	1	27,0	-265	-549	-270
		5	15,0	-300	-420	-335
10	0,2	1	20,0	-260	-526	-250
		5	22,0	-310	-458	-320
11	0,5+	1	12,0	-280	-533	-240
	0,6	5	14,0	-345	-456	-325
12	0,5	1	---	-200	-288	-220
		5	11,0	-350	-442	-340
		10	18,0	-310	-440	-310

Elementy badawcze nr 3, 7 i 10 z jedną rysą zostały poddane trzem próbom działania substancji agresywnej. W pierwszej próbie wykonano 3 pomiary rozkładu

potencjału: pierwszy pomiar przed ekspozycją, drugi pomiar po jednym cyklu zwilżania i suszenia oraz trzeci po pięciu cyklach. Drugą próbę przeprowadzono po upływie jednego miesiąca. Rozkład potencjału w tej próbie określono jeden raz, po pięciu cyklach zwilżania i suszenia. Trzecią próbę wykonano po przerwie trwającej dwa miesiące. Rozkłady potencjału wyznaczono identycznie jak w pierwszej próbie wykonując pomiary przed ekspozycją, a następnie po jednym i pięciu cyklach zwilżania roztworem NaCl i suszenia. Charakterystyczne wyniki pomiarów wykonanych w etapie drugim zamieszczono w tablicy 4.7. ujęto minimalne i maksymalne wartości potencjału odnotowane na powierzchni poziomej zarysowanej.

Tablica 4.7.

Zestawienie ekstremalnych wartości potencjału zbrojenia w elementach z jedna rysą w strefie rozciąganej etap 2.

Nr próby	Liczba cykli	Nr elementu					
		3. ($a_r=0,5\text{mm}$)		7. ($a_r=0,4\text{ mm}$)		10. ($a_r=0,3\text{ mm}$)	
		$E_{\min}$	$E_{\max}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$	$E_{\min}$	$E_{\max}$
1	0	-189	-149	-254	-142	-209	-123
	1	-420	-328	-470	-339	-430	-321
	5	-438	-368	-473	-373	-423	-329
2	5	-290	-239	-325	-222	-258	-184
3	0	-218	-179	-191	-103	-261	-167
	1	-425	-344	-423	-344	-451	-347
	5	-476	-370	-423	-350	-470	-365

• Badania potencjodynamiczne

Początkowo badania polaryzacji i oporu polaryzacji zbrojenia wykonywano na sześciu elementach Nr 7 ÷ 12. Badania zwane próbą 1. były prowadzone równolegle z pierwszym etapem badań rozkładu potencjału. Pomiary przeprowadzono po jednym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia oraz po pięciu cyklach. W

beleczce Nr 12 dodatkowo wykonano pomiary po 10 cyklach zwilżania i suszenia. Elektrode odniesienia umieszczano na powierzchni betonu w osi zbrojenia bezpośrednio przy rysie, a następnie w odległości 20 cm od rysy. Miejsca przyłożenia elektrody przedstawiono na rys. 4.17.

Wyniki badań otrzymano w postaci standardowych wykresów komputerowych z wydrukiem wartości potencjału korozyjnego $E(i=0)$, oporu polaryzacyjnego R_p , gęstości prądu korozyjnego $I(i=0)$ i nachyleń krzywych Tafela β_c , β_a . Na wykresach znajduje się przebieg krzywej polaryzacji anodowej i katodowej oraz ekstrapolacja tych krzywych liniami prostymi, których przecięcie określa gęstość prądu korozyjnego. W załączniku nr 2 na rys. z.2.2. i z.2.3. przedstawiono podstawowe wyniki badań elementu Nr 7, natomiast na rys. z.2.4. i z.2.5. wyniki badań elementu Nr 10. Wydruki komputerowe wyników badań pozostałych elementów (18 wykresów) zamieszczono w materiałach archiwalnych Instytutu Technologii Nieorganicznej i Nawozów Mineralnych.

Zestawienie wartości potencjału korozyjnego $E_{corr} = E(i=0)$, oporu polaryzacji R_p oraz gęstości prądu korozyjnego $i_{corr} = I(i=0)$ określonych podczas próby 1. we wszystkich elementach badawczych (Nr 7 ÷ 12) zestawiono w tablicy 4.8.

Po upływie około sześciu miesięcy wykonano dalsze badania, do których wybrano dwie beleczki Nr 7 i 10 z wąskimi rysami o szerokości rozwarcia 0.3 i 0.2 mm. Badania realizowano równolegle z drugim etapem badań rozkładu potencjału. Przeprowadzono kolejne próby działania substancji agresywnej. W próbie 2. wykonano 3 pomiary polaryzacji i oporu polaryzacji: pierwszy pomiar przed ekspozycją, drugi pomiar po jednym cyklu zwilżania i suszenia oraz trzeci pomiar po pięciu cyklach. Próbę 3. przeprowadzono po upływie jednego miesiąca. Polaryzację i opór polaryzacji w tej próbie określono jeden raz, po pięciu cyklach zwilżania i suszenia. Próbę 4. wykonano po przerwie trwającej dwa miesiące. Badania polaryzacyjne przeprowadzono identycznie jak w próbie 2. wykonując pomiary przed ekspozycją, a następnie po jednym i pięciu cyklach zwilżania roztworem NaCl i suszenia. W załączniku nr 2 zamieszczono wydruki komputerowe podstawowych wyników badań elementu Nr 7. Na rys. z.2.6, z.2.7 i z.2.8 przedstawiono wyniki uzyskane w próbie drugiej, natomiast na rys. z.2.9, z.2.10 i z.2.11 wyniki próby czwartej. Zbiorcze zestawienie wszystkich wyników ujęto w tablicy 4.9. Porównując zestawione w tablicy 4.8. wyniki pomiarów polaryzacji zbrojenia sześciu elementów

Nr 7 ÷ 12 nie stwierdzono występowania regularnej zależności między określonymi wartościami potencjału korozyjnego E_{corr} , oporu polaryzacji R_p i gęstości prądu korozyjnego i_{corr} , a szerokością rozwarcia rys a_r . Na rys. 4.25 przedstawiono wyniki badania w poszczególnych rysach gęstości prądu korozyjnego i_{corr} , stanowiącego miarę postępu korozji zbrojenia. Największa gęstość prądu korozyjnego wystąpiła w rysie o rozwarości $a_r = 0,3$ mm, natomiast najmniejszą gęstość prądu stwierdzono w elemencie Nr 11, w którym występowały dwie rysy o rozwarości $a_r = 0,5$ mm i $a_r = 0,6$ mm.

Tablica 4.8.

Zestawienie wyników pomiarów polaryzacji zbrojenia elementów Nr 7 - 12 w próbie pierwszej.

Liczba cykli	Nr elem.	a_r [mm]	Pomiar w rysie			Pomiar 20 cm od rysy		
			E_{corr} [mV]	R_p [Ωcm^2]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	E_{corr} [mV]	R_p [Ωcm^2]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
1	7	0,3	-645,9	$7,50 \cdot 10^3$	2,32	-482,7	$2,61 \cdot 10^4$	0,60
	8	0,6	-494,4	$2,10 \cdot 10^4$	0,97	-444,0	$4,11 \cdot 10^4$	0,49
	9	0,9	-583,3	$1,00 \cdot 10^4$	1,31	-417,6	$1,78 \cdot 10^4$	1,12
	10	0,2	-536,6	$1,60 \cdot 10^4$	0,95	-421,6	$3,31 \cdot 10^4$	0,70
	11	0,5+0,6	-500,9	$1,77 \cdot 10^4$	0,18	-396,8	$7,29 \cdot 10^4$	0,07
	12	0,5	-386,0	$9,14 \cdot 10^4$	0,20	-352,9	$1,27 \cdot 10^5$	0,15
5	7	0,3	-530,9	$6,74 \cdot 10^3$	1,23	-428,0	$3,35 \cdot 10^4$	0,06
	8	0,6	-433,3	$3,29 \cdot 10^4$	0,47	-383,2	$7,39 \cdot 10^4$	0,20
	9	0,9	-482,1	$1,07 \cdot 10^4$	1,19	-383,8	$4,28 \cdot 10^4$	0,08
	10	0,2	-478,6	$1,69 \cdot 10^4$	0,36	-388,0	$4,22 \cdot 10^4$	0,20
	11	0,5+0,6	-487,5	$1,56 \cdot 10^4$	0,14	-395,7	$5,55 \cdot 10^4$	0,04
	12	0,5	-460,5	$5,15 \cdot 10^4$	0,47	-338,8	$7,11 \cdot 10^4$	0,04
10	12	0,5	-438,2	$2,46 \cdot 10^4$	0,26	-362,6	$7,54 \cdot 10^4$	0,05

Nr 7 ÷ 12 nie stwierdzono występowania regularnej zależności między określonymi wartościami potencjału korozyjnego E_{corr} , oporu polaryzacji R_p i gęstości prądu korozyjnego i_{corr} , a szerokością rozwarcia rys a_r . Na rys. 4.25 przedstawiono wyniki badania w poszczególnych rysach gęstości prądu korozyjnego i_{corr} , stanowiącego miarę postępu korozji zbrojenia. Największa gęstość prądu korozyjnego wystąpiła w rysie o rozwarości $a_r = 0,3$ mm, natomiast najmniejszą gęstość prądu stwierdzono w elemencie Nr 11, w którym występowały dwie rysy o rozwarości $a_r = 0,5$ mm i $a_r = 0,6$ mm.

Tablica 4.8.

Zestawienie wyników pomiarów polaryzacji zbrojenia elementów Nr 7 - 12 w próbie pierwszej.

Liczba cykli	Nr elem.	a_r [mm]	Pomiar w rysie			Pomiar 20 cm od rysy		
			E_{corr} [mV]	R_p [Ωcm^2]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	E_{corr} [mV]	R_p [Ωcm^2]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
1	7	0,3	-645,9	$7,50 \cdot 10^3$	2,32	-482,7	$2,61 \cdot 10^4$	0,60
	8	0,6	-494,4	$2,10 \cdot 10^4$	0,97	-444,0	$4,11 \cdot 10^4$	0,49
	9	0,9	-583,3	$1,00 \cdot 10^4$	1,31	-417,6	$1,78 \cdot 10^4$	1,12
	10	0,2	-536,6	$1,60 \cdot 10^4$	0,95	-421,6	$3,31 \cdot 10^4$	0,70
	11	0,5+0,6	-500,9	$1,77 \cdot 10^4$	0,18	-396,8	$7,29 \cdot 10^4$	0,07
	12	0,5	-386,0	$9,14 \cdot 10^4$	0,20	-352,9	$1,27 \cdot 10^5$	0,15
5	7	0,3	-530,9	$6,74 \cdot 10^3$	1,23	-428,0	$3,35 \cdot 10^4$	0,06
	8	0,6	-433,3	$3,29 \cdot 10^4$	0,47	-383,2	$7,39 \cdot 10^4$	0,20
	9	0,9	-482,1	$1,07 \cdot 10^4$	1,19	-383,8	$4,28 \cdot 10^4$	0,08
	10	0,2	-478,6	$1,69 \cdot 10^4$	0,36	-388,0	$4,22 \cdot 10^4$	0,20
	11	0,5+0,6	-487,5	$1,56 \cdot 10^4$	0,14	-395,7	$5,55 \cdot 10^4$	0,04
	12	0,5	-460,5	$5,15 \cdot 10^4$	0,47	-338,8	$7,11 \cdot 10^4$	0,04
10	12	0,5	-438,2	$2,46 \cdot 10^4$	0,26	-362,6	$7,54 \cdot 10^4$	0,05

Tablica 4.9.

Zestawienie wyników pomiarów polaryzacji zbrojenia elementów Nr 7 i 10 w próbie drugiej, trzeciej i czwartej

Nr próby	Nr elem.	Liczba cykli	Pomiar w rysie			Pomiar 20 cm od rysy		
			E_{corr} [mV]	R_p [Ωcm^2]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	E_{corr} [mV]	R_p [Ωcm^2]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
2.	7	0	-246,7	$2,44 \cdot 10^5$	0,04	-276,4	$4,65 \cdot 10^5$	0,028
	10		-453,5	$1,70 \cdot 10^4$	1,01	-190,7	$2,25 \cdot 10^5$	0,037
	7	1	-478,1	$2,82 \cdot 10^4$	0,66	-374,5	$1,03 \cdot 10^5$	0,08
	10		-488,9	$4,48 \cdot 10^4$	0,60	-352,6	$1,30 \cdot 10^5$	0,06
	7	5	-475,4	$2,21 \cdot 10^4$	0,96	-406,5	$7,44 \cdot 10^4$	0,04
	10		-467,6	$1,70 \cdot 10^4$	1,08	-394,2	$6,25 \cdot 10^4$	0,22
3.	7	5	-359,4	$3,12 \cdot 10^4$	0,72	-330,9	$1,38 \cdot 10^5$	0,12
	10		-358,6	$2,58 \cdot 10^4$	0,77	-298,3	$1,84 \cdot 10^5$	0,08
4.	7	0	-342,1	$1,38 \cdot 10^4$	1,12	-353,4	$1,04 \cdot 10^5$	0,10
	10	0	-404,8	$2,06 \cdot 10^4$	0,97	-331,0	$1,19 \cdot 10^5$	0,07
	7	1	-469,7	$1,66 \cdot 10^4$	1,18	-411,6	$6,83 \cdot 10^4$	0,30
	10	1	-480,3	$1,93 \cdot 10^4$	1,14	-369,8	$9,90 \cdot 10^5$	0,017
	7	5	-472,6	$1,77 \cdot 10^4$	0,76	-397,9	$1,29 \cdot 10^5$	0,36
	10		-494,0	$9,95 \cdot 10^3$	1,74	-401,0	$3,89 \cdot 10^4$	0,38

4.5.3. Wyniki badań elementów zarysowanych w kilku miejscach

•Pomiary potencjału

Pomiary potencjału w elementach Nr 13 ÷ 18 z kilkoma rysami wykonano dwuetapowo, według przyjętego schematu badań dla beleczek z jedną rysą. Syntezę wyników pomiarów potencjału przedstawiono w załączniku nr 1 (rys. z.1.18 ÷ z.1.23). W tablicach 4.10 i 4.11 zestawiono wartości minimalne i maksymalne potencjałów uzyskanych w badanych elementach.

Tablica 4.10.

Zestawienie ekstremalnych wartości potencjału zbrojenia w elementach z czterema i trzema rysami w strefie rozciąganej, zbrojonych prętem gładkim [mV].

Nr próby	Liczba cykli	Nr elementu					
		13. ($a_r=0,01; 0,3;0,02; 0,04$ mm)		14. ($a_r=0,01; 0,10; 0,30$ mm)		15. ($a_r=0,02; 0,25;0,25$ mm)	
		E_{min}	E_{max}	E_{min}	E_{max}	E_{min}	E_{max}
1	0	---	---	-72	-47	-270	-86
	1	-372	-307	-457	-323	-478	-333
	5	-434	-309	-448	-325	-467	-340
2	0	-232	+93	-30	+87	-224	-156
	1	-478	-309	-470	-266	-461	-223
	5	-490	-340	-449	-347	-444	-356

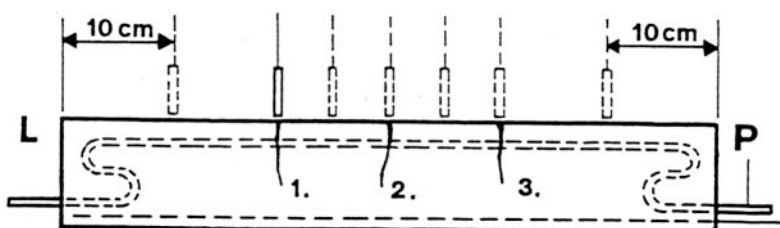
Tablica 4.11.

Zestawienie ekstremalnych wartości potencjału zbrojenia w elementach z czterema rysami w strefie rozciąganej, zbrojonych prętem żebrowanym [mV].

Nr próby	Liczba cykli	Nr elementu					
		16. ($a_r=0,1$ mm)		17. ($a_r=0,1$ mm)		18. ($a_r=0,1$ mm)	
		E_{min}	E_{max}	E_{min}	E_{max}	E_{min}	E_{max}
1	0	---	---	---	---	---	---
	1	-368	-195	-159	-22	-268	-118
	5	-364	-271	-140	-110	-234	-99
2	0	-384	-177	-400	-289	-342	-199
	1	-458	-369	-429	-339	-408	-340
	5	-446	-381	-423	-388	-489	-391

• Badania potencjodynamiczne

W elementach Nr 13 i 16 ÷ 18 z czterema rysami oraz Nr 14 i 15 z trzema rysami elektrodę odniesienia przykładano w miejscach rys, w punktach usytuowanych w połowie rozstawu rys, a także w odległości 10 cm od krawędzi skrajnych. Punkty usytuowania elektrody odniesienia znajdowały się na powierzchni poziomej w osi zbrojenia. Położenie elektrody wzdłuż beleczki z trzema rysami przedstawiono na rys. 4.18.



Rys. 4.18. Położenie elektrody odniesienia w elementach Nr 13 ÷ 18 z czterema lub trzema rysami.

Przeprowadzono dwie próby działania substancji agresywnej. W pierwszej próbie wykonano trzy pomiary polaryzacji i oporu polaryzacji: pierwszy pomiar przed ekspozycją, drugi pomiar po jednym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia oraz trzeci pomiar po pięciu cyklach. Drugą próbę zrealizowano po upływie trzech miesięcy, powtarzając identyczny jak poprzednio cykl pomiarowy. W okresie między próbami obciążone elementy badawcze przechowywano w warunkach powietrzno-suchych. W załączniku nr 2 zamieszczono wydruki komputerowe wyników z badań próby pierwszej elementu Nr 14. Na rys. z.2.12, z.2.13 i z.2.14 ujęto wyniki pomiarów uzyskane przed działaniem roztworu NaCl, natomiast na rys. z.2.15, z.2.16 i z.2.17 wyniki pomiarów przeprowadzonych po pięciu cyklach zwilżania i suszenia. Pozostałe wydruki wyników (115 wykresów) znajdują się w materiałach archiwalnych Instytutu Technologii Nieorganicznej i Nawozów Mineralnych.

Podstawowe wyniki wszystkich pomiarów wykonanych w próbie pierwszej i drugiej zestawiono w tablicy 4.12 - 4.15. W tablicach 4.12. i 4.13. zamieszczono wartości potencjału korozyjnego E_{corr} , oporu polaryzacji R_p oraz gęstości prądu korozyjnego i_{corr} określone w miejscach rys. W tablicach 4.14 i 4.15. przedstawiono

identyczne parametry wyznaczone między rysami oraz w odległości 10 cm od krawędzi skrajnych.

Cykliczne oddziaływanie roztworu agresywnego oraz dwumiesięczny okres przechowywania w warunkach powietrzno-suchych nie wpłynęły istotnie na wyniki pomiarów polaryzacji w elementach zbrojonych prętem gładkim nr 13-15. Na rys. 4.19. zestawiono wartości potencjału korozyjnego E_{corr} , określone po kolejnych cyklach zwilżania roztworem agresywnym i suszenia w obu próbach traktowanych wspólnie. Pierwszą część wyników uzyskanych w miejscach rys ujęto na rys. 4.19a, natomiast drugą część wyników pomiarów wykonanych w połowie odległości między rysami na rys. 4.19b.

Na rys. 4.20 podobnie usystematyzowano w zależności od liczby cykli zwilżania wyniki pomiaru oporu polaryzacji R_p , natomiast na rys. 4.21 wyniki pomiaru gęstości prądu korozyjnego i_{corr} . Wymienione rysunki zawierają wartości R_p , i_{corr} pomierzone w rysach oraz w połowie odległości między rysami.

Przedłużanie działania roztworu agresywnego nie wpłynęło również istotnie na wyniki pomiarów polaryzacji w elementach nr 16-18, zbrojonych prętami żebrowanymi. Na rys. 4.22 zestawiono wartości potencjału korozyjnego E_{corr} , określone po kolejnych cyklach zwilżania roztworem agresywnym i suszenia w obu próbach traktowanych wspólnie. Pierwszą część wyników uzyskanych w miejscach rys ujęto na rys. 4.22a, natomiast drugą część wyników pomiarów wykonanych w połowie odległości między rysami na rys. 4.22b.

Na rys. 4.23 podobnie usystematyzowano w zależności od liczby cykli zwilżania wyniki pomiaru oporu polaryzacji R_p , natomiast na rys. 4.24 wyniki pomiaru gęstości prądu korozyjnego i_{corr} . Wymienione rysunki zawierają wartości R_p , i_{corr} pomierzone w rysach oraz w połowie odległości między rysami.

Tabela 4.12

Zestawienie wyników pomiarów polaryzacji zbrojenia elementów Nr 13-15 w miejscach rys.

Nr próby	liczba cykli	Nr elem.	Pomiar przy 1 rysie			Pomiar przy 2 rysie			Pomiar przy 3 rysie			Pomiar przy 4 rysie		
			E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]
1	0	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		14	-484,6	2,69	0,48	-481,6	2,20	0,97	-428,4	3,72	0,65	—	—	—
		15	-476,8	3,82	0,57	-486,9	2,64	0,90	-403,9	5,56	0,17	—	—	—
	1	13	-488,7	0,92	0,74	-463,9	1,60	0,47	-489,9	0,97	2,30	-405,7	3,74	0,60
		14	-488,8	1,37	1,70	-507,5	1,09	1,58	-449,2	1,62	1,09	—	—	—
		15	5244	0,81	2,64	-507,1	0,92	2,25	-504,0	1,12	1,55	—	—	—
	5	13	-469,1	1,35	0,95	-498,8	1,30	1,74	-495,4	1,23	1,90	-424,3	2,70	0,85
		14	-495,2	1,24	1,87	-487,6	1,69	1,44	-497,9	1,13	2,24	—	—	—
		15	-513,4	0,86	2,53	505,5	1,05	2,01	-497,1	1,14	1,75	—	—	—
2	0	13	-487,8	0,58	2,62	-445,5	3,29	0,70	-486,2	0,66	2,09	-411,5	11,9	0,19
		14	-487,2	0,75	1,40	-493,5	1,58	0,22	-428,8	0,75	0,98	—	—	—
		15	-265,9	1,80	2,50	-401,6	1,17	1,88	-368,8	15,0	0,04	—	—	—
	1	13	-556,5	0,99	1,64	-548,1	1,01	2,08	-543,6	1,41	0,88	-521,1	1,48	1,40
		14	-534,8	1,08	1,75	-540,6	1,20	1,50	-517,4	1,30	1,66	—	—	—
		15	-551,8	1,08	1,81	-533,0	1,17	1,73	-506,9	0,84	2,68	—	—	—
	5	13	-497,6	0,88	2,52	-543,5	0,77	2,96	-531,0	0,83	2,70	-507,1	1,21	1,88
		14	-507,6	1,13	1,74	-513,1	1,15	1,74	-495,2	0,93	2,04	—	—	—
		15	-523,5	0,72	3,12	-484,8	1,09	1,78	-511,2	0,796	3,09	—	—	—

Tabela 4.13

Zestawienie wyników pomiarów polaryzacji zbrojenia elementów Nr 16÷18 w miejscach rys.

Nr próby	liczba cykli	Nr elem.	Pomiar przy 1 rysie			Pomiar przy 2 rysie			Pomiar przy 3 rysie			Pomiar przy 4 rysie		
			E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
1	1	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		17	-352,2	4,35	0,26	-282,2	18,6	0,063	-319,7	15,7	0,11	-306,8	1,69	0,02
		18	-328,7	6,22	0,13	-370,2	6,48	0,62	-346,4	8,69	0,18	-333,8	7,62	0,20
	5	16	-328,2	10,2	0,172	-325,9	9,41	0,148	-358,0	6,92	0,407	-347,0	12,7	0,00
		17	-304,9	15,7	0,069	-294,2	13,7	0,063	-318,9	15,0	0,080	-306,8	16,2	0,072
		18	-254,7	9,10	0,049	-236,2	21,1	0,028	-245,6	—	0,037	-261,3	36,7	0,062
2	0	16	-499,5	3,59	0,49	-400,7	18,8	0,03	-469,8	3,90	0,37	-407,0	11,5	0,06
		17	-453,3	5,02	0,27	-487,3	4,22	0,36	-460,5	10,2	0,08	-390,1	13,0	0,09
		18	-444,7	5,33	0,34	-401,2	10,5	0,18	-408,4	5,39	0,30	-398,8	7,46	0,19
	1	16	-479,2	2,97	0,48	-470,1	3,36	0,50	-467,4	3,60	0,45	-460,	3,35	0,59
		17	-436,1	4,65	0,36	-427,5	4,97	0,21	-434,7	14,4	0,26	-418,2	8,24	0,29
		18	-486,7	1,68	1,02	-426,3	3,62	0,41	-479,5	2,30	0,68	-449,4	3,23	0,48
	5	16	-501,5	2,49	0,767	-480,5	2,91	0,56	-454,3	3,80	0,419	-453,8	3,50	0,43
		17	-436,3	4,23	0,64	-450,6	3,68	0,91	-429,2	5,38	0,55	-413,3	6,69	0,32
		18	-507,9	1,40	1,65	-443,9	3,32	0,48	-483,5	1,86	1,50	-464,4	2,19	1,05

Tabela 4.14

Zestawienie wyników pomiarów polaryzacji zbrojenia elementów Nr 13÷15 wykonanych między rysami i w odległości 10 cm od krawędzi skrajnych.

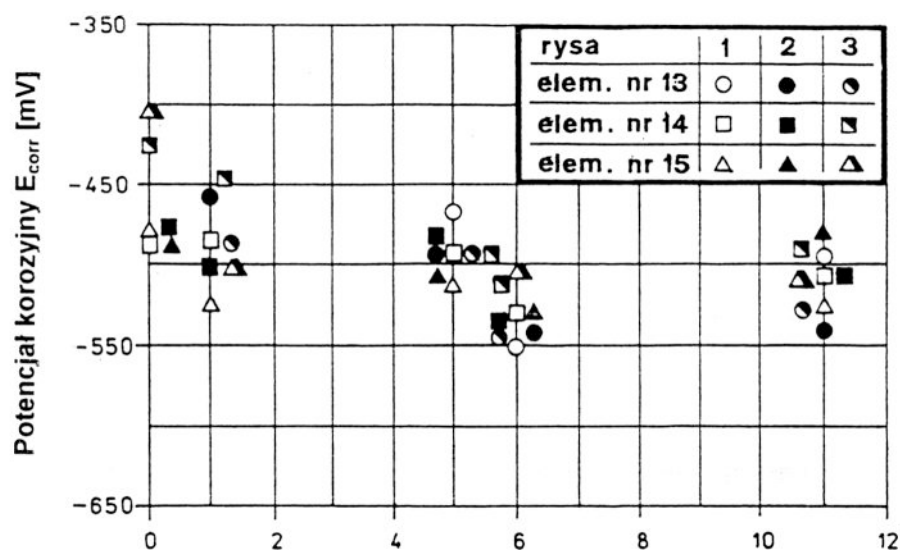
Nr próby	liczba cykli	Nr elem.	10 cm od krawędzi L			między 1 a 2 rysą			między 2 a 3 rysą			między 3 a 4 rysą			10 cm od krawędzi P		
			E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]
1	0	13	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		14	-381,4	14,4	0,14	-473,9	2,05	0,98	-479,5	1,36	1,56	—	—	—	-432,7	3,63	0,49
		15	-351,6	10,9	0,06	-421,7	422	0,66	-452,2	3,49	0,54	—	—	—	-369,8	6,59	0,42
	1	13	-391,4	2,45	0,87	-427,4	1,49	1,39	-448,2	1,57	1,29	-427,3	1,28	0,97	-387,6	2,38	0,22
		14	-401,7	3,10	0,85	-479,4	1,38	1,08	-459,9	1,49	1,00	—	—	—	-393,5	408	0,42
		15	-387,0	2,15	0,99	-462,8	1,28	1,91	-470,4	1,32	1,74	—	—	—	-434,7	1,81	0,68
	5	13	-392,7	3,27	0,53	-433,5	2,24	1,12	-455,7	1,65	0,63	-469,8	1,87	2,20	-377,2	1,95	0,96
		14	-372,5	5,54	0,31	-445,1	2,69	0,58	-449,0	2,40	0,91	—	—	—	-410,3	2,98	0,46
		15	-386,5	2,86	0,48	-446,6	1,72	1,38	-466,0	1,41	1,44	—	—	—	-418,2	2,11	1,12
2	0	13	-332,3	9,38	0,09	-461,6	0,995	2,11	-480,4	1,73	1,28	-515,1	0,926	2,53	-486,9	3,73	0,52
		14	-387,0	0,23	1,49	-480,1	0,73	3,17	-454,5	2,18	1,28	—	—	—	-455,2	1,14	2,35
		15	-278,0	44,5	0,01	-363,7	9,96	0,05	-399,4	4,10	0,30	—	—	—	-338,8	7,11	0,04
	1	13	-386,7	7,32	0,35	-498,6	1,42	1,57	-509,4	1,41	1,55	-496,9	1,94	0,93	-409,9	3,28	0,60
		14	-391,1	8,95	0,14	-518,8	1,79	1,22	-552,1	1,54	0,32	—	—	—	-407,3	5,51	0,37
		15	-380,3	7,35	0,23	-487,2	2,42	0,91	-466,8	1,82	1,09	—	—	—	-455,6	2,06	0,89
	5	13	-394,7	3,57	0,78	-458,0	1,26	1,90	-499,6	1,08	2,15	-453,8	1,66	1,35	-397,5	2,79	0,96
		14	-380,8	5,39	0,34	-445,4	2,51	0,87	-459,4	2,05	1,16	—	—	—	-412,5	2,91	0,45
		15	-389,8	3,34	0,75	-436,0	2,10	1,17	-442,9	1,70	1,23	—	—	—	-444,2	1,99	1,12

Tabela 4.15

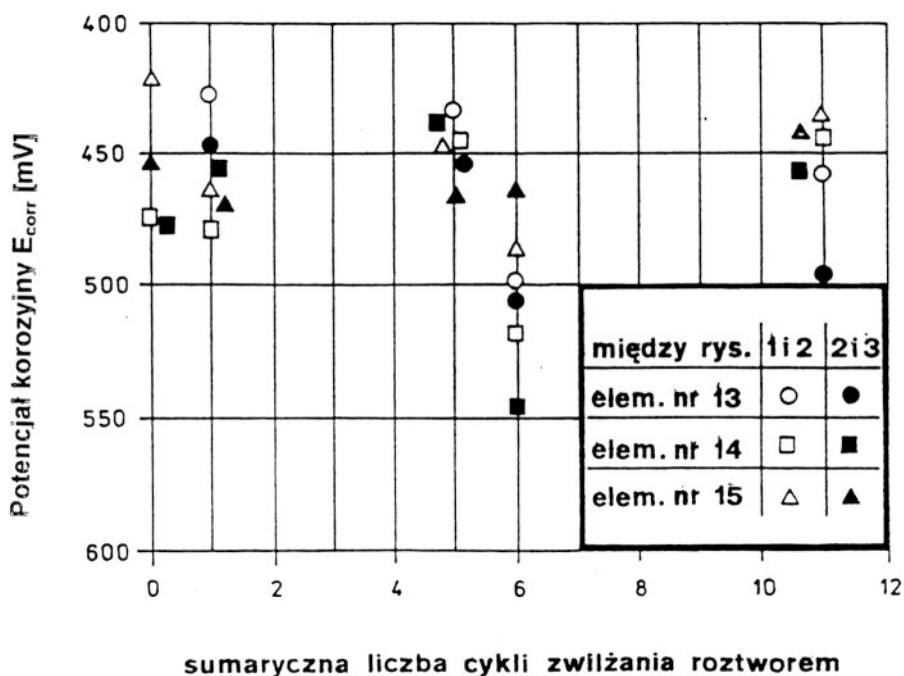
Zestawienie wyników pomiarów polaryzacji zbrojenia elementów Nr 16÷18 wykonanych między rysami i w odległości 10 cm od krawędzi skrajnych.

Nr próby	liczba cykli	Nr elem.	10 cm od krawędzi L			między 1 a 2 rysą			między 2 a 3 rysą			między 3 a 4 rysą			10 cm od krawędzi P		
			E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]	E_{corr} [mV]	$R_p \times 10^4$ [$\Omega \text{ cm}^2$]	i_{corr} [$\mu\text{A/cm}^2$]
1	1	16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		17	-303,7	12,0	0,20	—	—	—	-316,8	17,1	0,097	—	—	—	—	—	—
		18	-342,4	7,36	0,38	-361,2	7,76	0,37	-342,1	7,00	0,064	-318,6	9,06	0,13	-314,1	11,3	0,087
	5	16	-326,3	11,0	0,173	-320,1	7,88	0,151	-343,0	8,78	0,326	-355,6	6,85	0,141	-363,0	7,52	0,426
		17	-285,0	13,2	0,088	—	—	—	-314,8	11,7	0,200	-326,7	11,5	0,17	-260,2	37,2	0,066
		18	-223,4	45,0	0,027	-240,1	30,8	0,038	-228,9	33,2	0,028	-242,0	—	0,02	—	—	—
2	0	16	-401,0	10,5	0,13	-454,3	6,93	0,16	—	—	—	-437,8	5,39	0,35	-408,5	7,00	0,17
		17	-389,6	8,43	0,08	-421,9	6,93	0,11	-424,4	5,11	0,16	—	—	—	-371,9	16,3	0,00
		18	-415,1	5,72	0,21	-423,9	5,99	0,30	-382,0	8,92	0,07	-391,0	7,49	0,18	-366,0	12,3	0,07
	1	16	-428,3	5,28	0,33	-459,3	3,16	0,395	-462,5	3,33	0,55	-459,6	3,37	0,44	-418,0	3,97	0,35
		17	-398,9	5,38	0,19	-438,5	3,35	0,47	—	—	—	-408,9	14,5	0,02	-403,1	10,3	0,23
		18	-463,9	1,93	0,79	-445,6	2,52	0,74	-418,9	3,30	0,52	-442,7	3,03	0,55	-402,6	7,47	0,19
	5	16	-442,0	4,68	0,696	-483,6	2,84	0,863	-461,8	3,30	0,94	-454,8	3,78	0,55	-438,1	3,55	0,58
		17	-416,4	4,22	0,53	-436,8	4,09	0,51	-435,7	4,65	0,85	-419,5	6,12	0,13	-412,5	6,02	0,22
		18	-474,8	1,73	1,37	-436,8	1,81	1,22	-435,3	2,90	0,61	-461,1	2,42	1,21	-413,7	4,23	0,96

a)

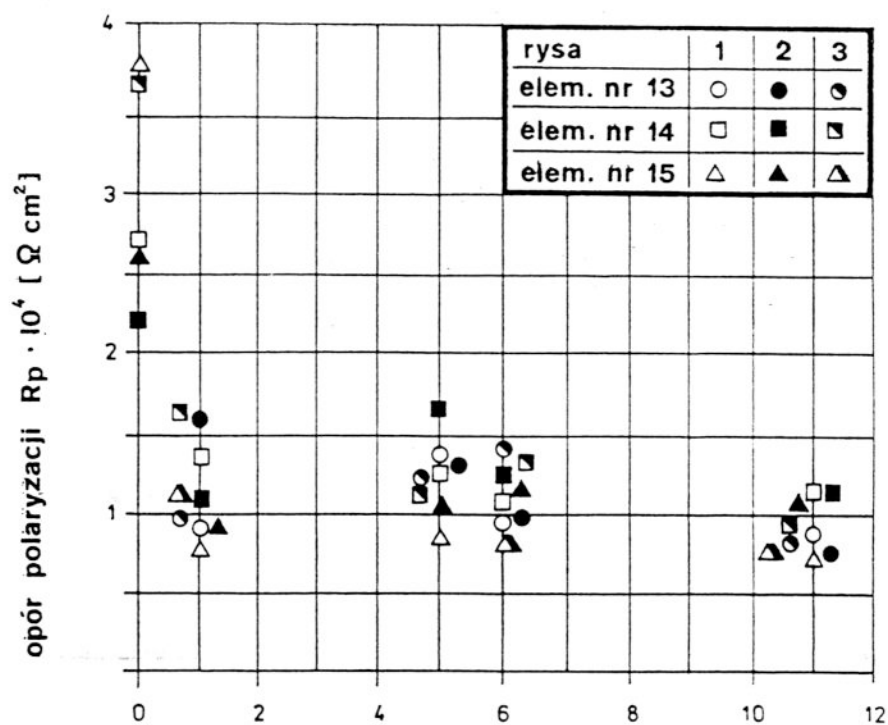


b)

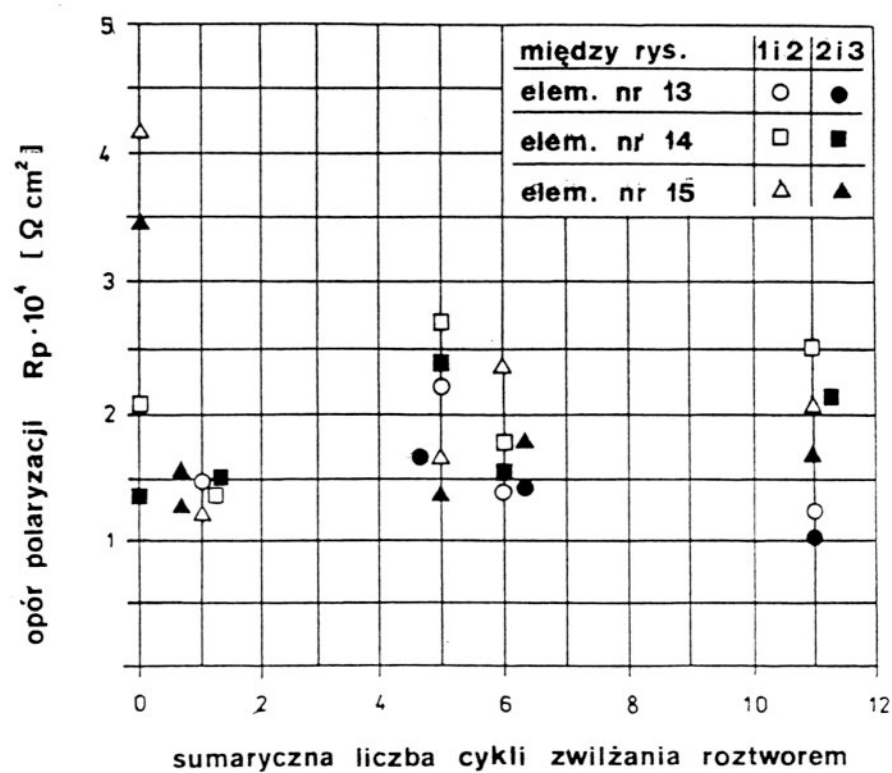


Rys. 4.19. Wartości potencjału korozyjnego w elementach Nr 13, 14 i 15 określone po sumarycznej liczbie cykli zwilżania roztworem: a) w rysach, b) między rysami.

a)

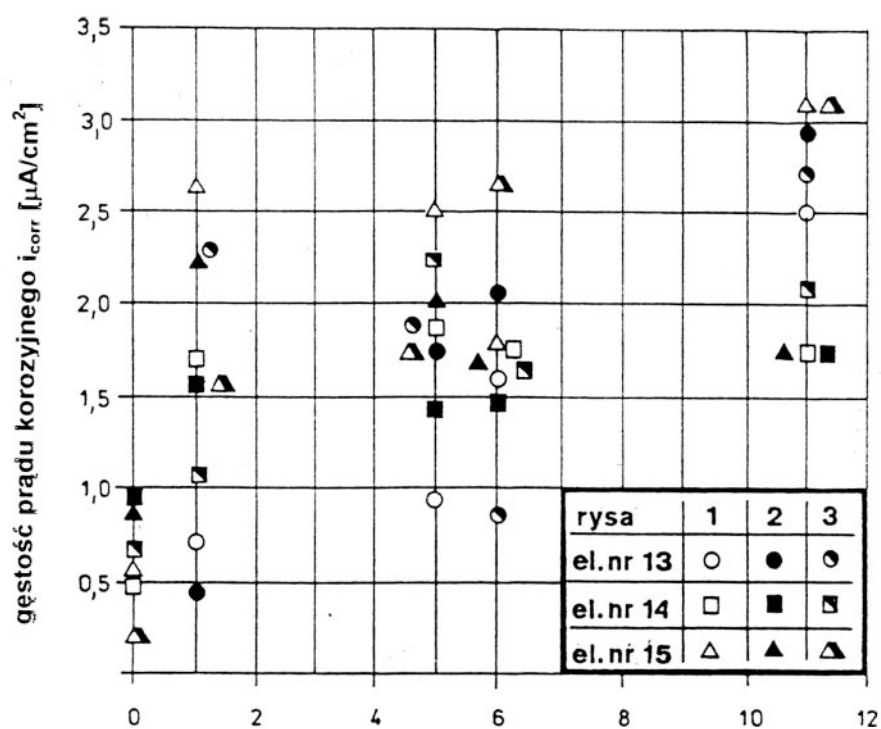


b)

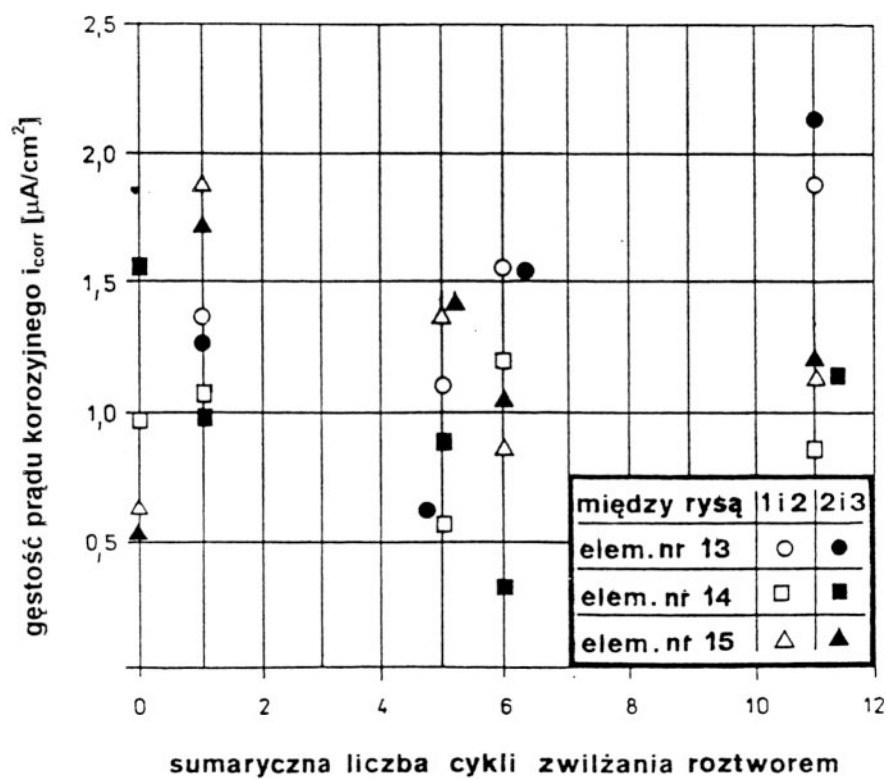


Rys. 4.20. Wartości oporu polaryzacji w elementach Nr 13, 14 i 15 określone po sumarycznej liczbie cykli zwilżania roztworem: a) w rysach, b) między rysami

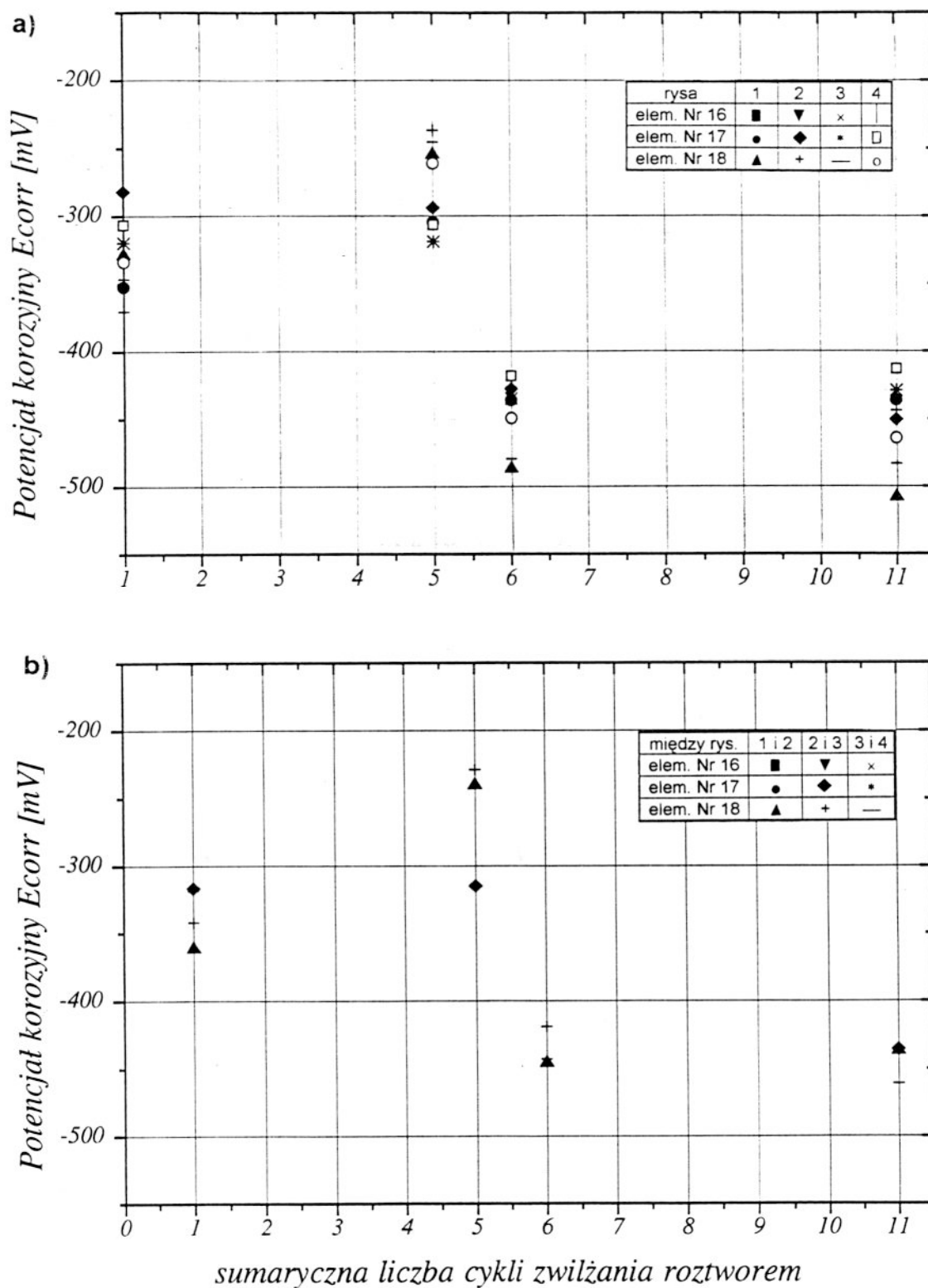
a)



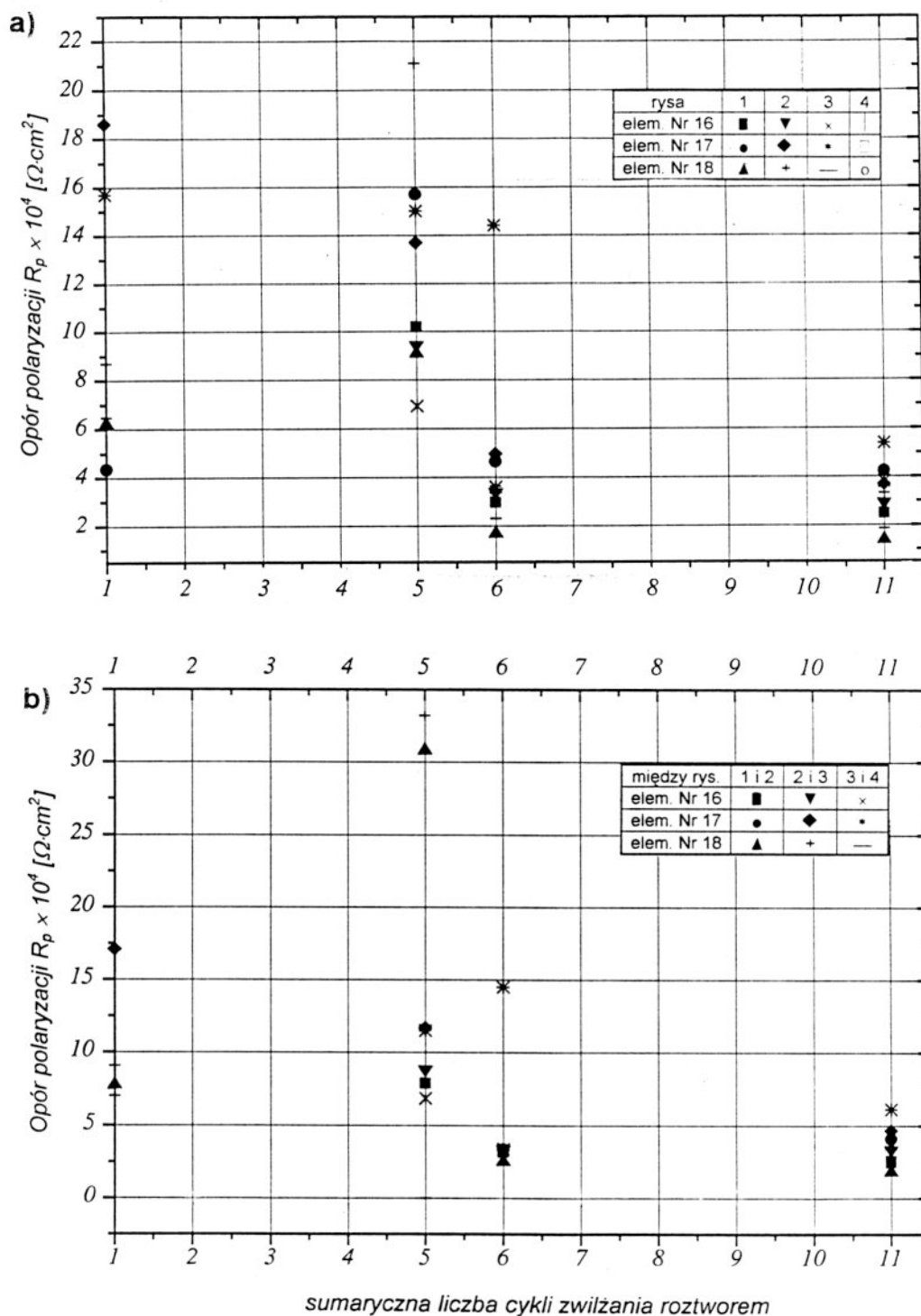
b)



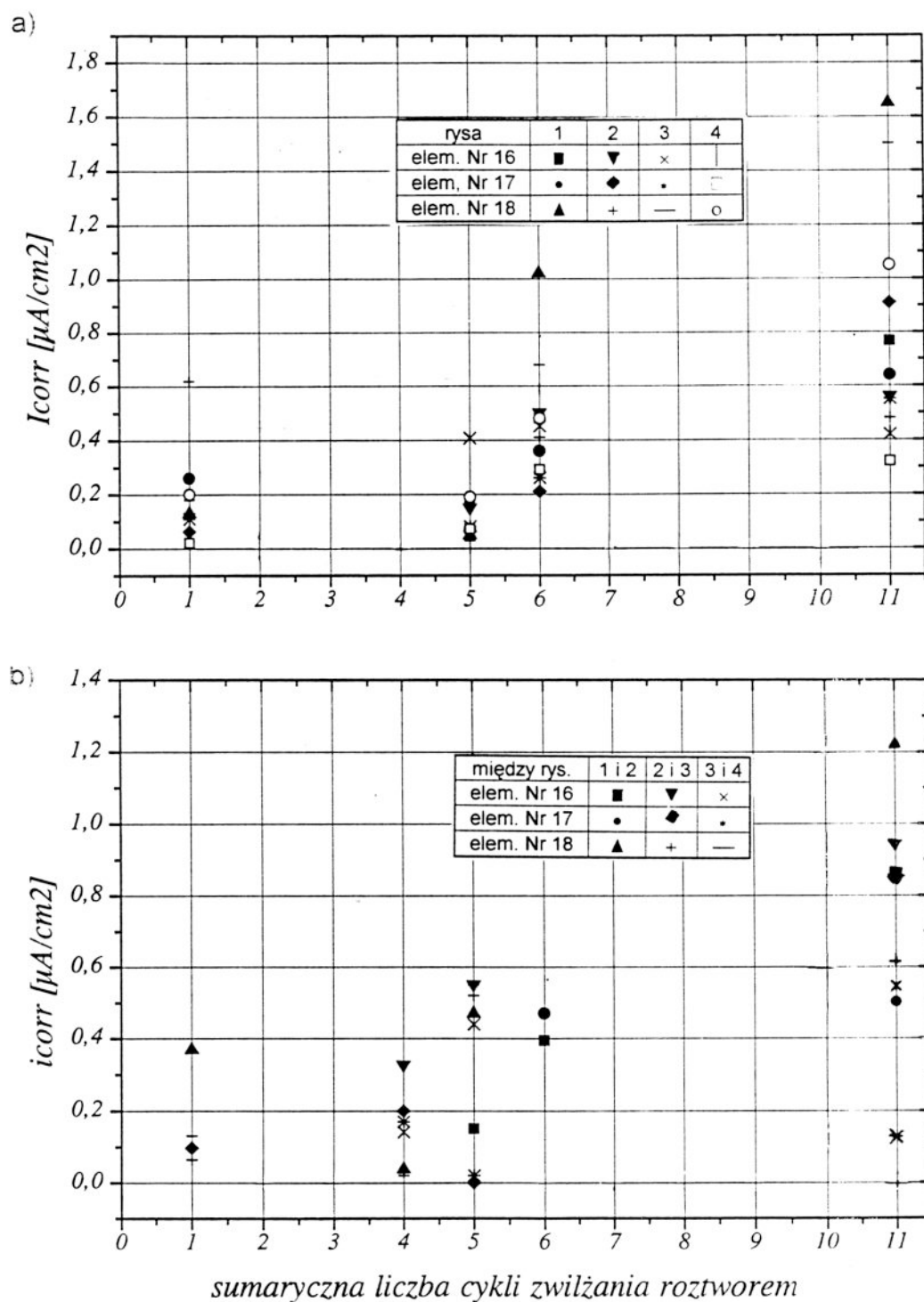
Rys. 4.21. Wartości gęstości prądu korozyjnego w elementach Nr 13, 14 i 15 określone po sumarycznej liczbie cykli zwilżania roztworem: a) w rysach, b) między rysami



Rys. 4.22. Wartości potencjału korozyjnego w elementach Nr 16, 17 i 18 określone po sumarycznej liczbie cykli zwilżania roztworem: a) w rysach, b) między rysami.



Rys. 4.23. Wartości oporu polaryzacji w elementach Nr 16, 17 i 18 określone po sumarycznej liczbie cykli zwilżania roztworem: a) w rysach, b) między rysami



Rys. 4.24. Wartości gęstości prądu korozyjnego w elementach Nr 16, 17 i 18 określone po sumarycznej liczbie cykli zwilżania roztworem: a) w rysach, b) między rysami.

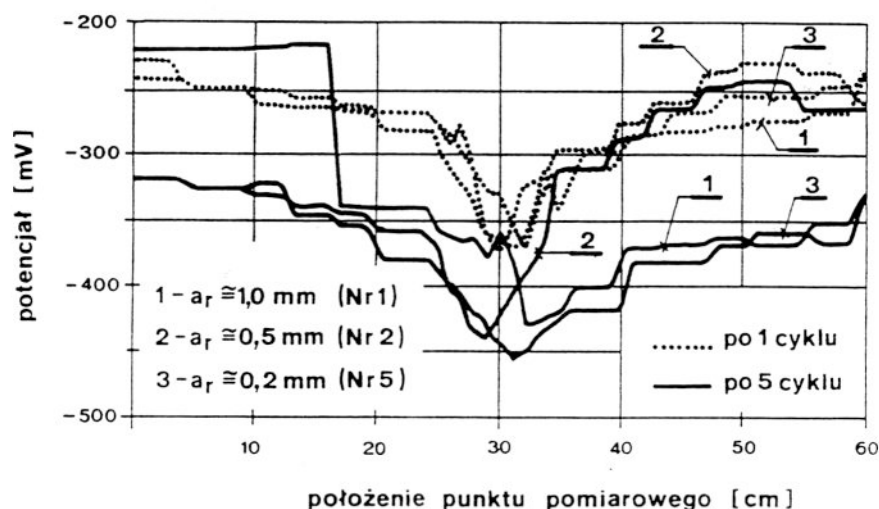
4.6. Omówienie wyników badań potencjałowych i polaryzacyjnych.

4.6.1. Pomiary potencjału

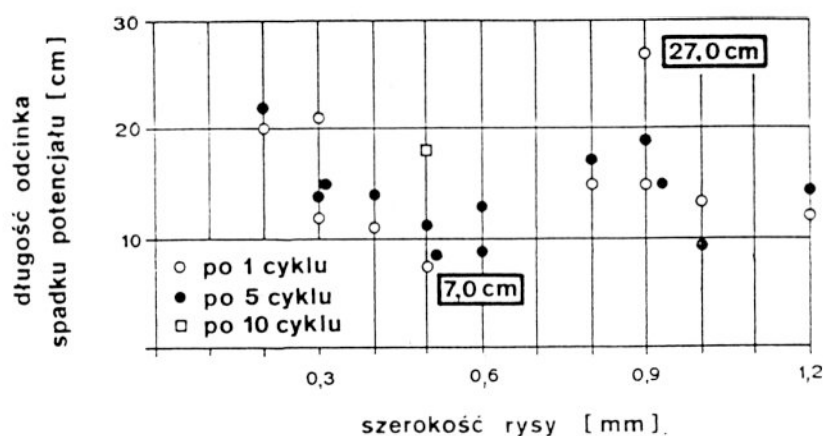
We wszystkich elementach przebadanych w etapie 1. zaobserwowano w otoczeniu rysy obniżenie potencjału w stosunku do potencjału pozostałych odcinków zbrojenia od kilkudziesięciu do 100 mV. Długość odcinka obniżenia potencjału przy rysie wahała się w granicach od 7 cm do 27 cm.

Porównując rozkłady potencjałów nie stwierdzono zależności między szerokością rozwarcia rysy i wielkością obniżenia potencjału. Przykładowe porównanie wyników w trzech elementach o zróżnicowanej szerokości rozwarcia rysy zamieszczono na rys. 4.25. Podobnie nie stwierdzono zależności między szerokością rozwarcia rysy i długością odcinka obniżonego potencjału - rys. 4.26.

Zmierzone wartości potencjałów wskazują na występowanie odcinków anodowych wokół rysy oraz odcinków katodowych na pozostałych powierzchniach zbrojenia, co świadczy o powstawaniu makroogniw korozyjnych i rozwoju korozji elektrochemicznej.



Rys. 4.25. Porównanie rozkładu potencjałów w trzech wybranych elementach o zróżnicowanych szerokościach rozwarcia rysy.



Rys. 4.26. Długości odcinków obniżonego potencjału w otoczeniu rys o różnych szerokościach rozwarcia elementów z jedną rysą.

Drugi etap badań miał na celu określenie ewolucji w czasie rozkładu potencjału zbrojenia oraz poznanie wpływu istnienia rys sąsiednich. Stwierdzono, że obniżenie wartości potencjału zarówno w obszarze rys, jak i poza rysami, następowało już po jednym cyklu nawilżania roztworem chlorku sodu i suszenia. Obniżenie wartości potencjału odnotowane w pierwszej próbie było prawie jednakowe jak obniżenie wartości potencjału uzyskane po upływie trzech miesięcy w trzeciej próbie. Pomiar przeprowadzone na beleczkach z jedną rysą wykazały miejscowe obniżenie wartości potencjału w otoczeniu rysy. Miejscowe obniżenie wartości potencjału po pięciu cyklach zwilżania i suszenia było w granicach od -390 mV do -480 mV. W beleczkach z kilkoma rysami stwierdzono obniżenie wartości potencjału w granicach od -300 mV do -480 mV na odcinkach obejmujących wszystkie rysy niezależnie od szerokości ich rozwarcia. Nie zauważono wyraźnego związku między szerokością rozwarcia rys i wartością potencjału.

W porównawczej beleczce niezarysowanej w miarę wzrostu liczby cykli zwilżania potencjał ulegał systematycznemu obniżeniu osiągając wartość dochodzącą do -350 ÷ -400 mV.

Trzeci etap badań miał na celu określenie wpływu użebrowania powierzchni zbrojenia na intensywność procesów korozyjnych w porównaniu z prętami gładkimi oraz wpływu istnienia sąsiednich rys na zmiany wartości jego potencjału. Ponieważ

stal St3SY-b-500 charakteryzowała się bardzo małą odkształcalnością (por. - punkt 4.2), więc w elementach zbrojonych prętami żebrowanymi Nr 16 ÷ 18 występowały rysy o rozwarości nie przekraczającej szerokości 0,1 mm. W beleczkach tych stwierdzono obniżenie potencjału od około -140 mV do około -460 mV, na odcinku obejmującym wszystkie rysy. Ponadto zauważono, że przy jednej z rys nastąpiło obniżenie wartości potencjału o około -50 mV w porównaniu z wartościami potencjału w miejscach występowania pozostałych rys. Zostało to potwierdzone po odkuciu zbrojenia i ocenie wizualnej stanu skorodowania powierzchni wkładek.

Zmiany wartości potencjałów odcinków anodowych i katodowych po kolejnych cyklach mogły być spowodowane zmianą agresywności korozyjnej środowiska w otoczeniu zbrojenia, aktywności elektrochemicznej zbrojenia oraz własności fizykochemicznych otuliny.

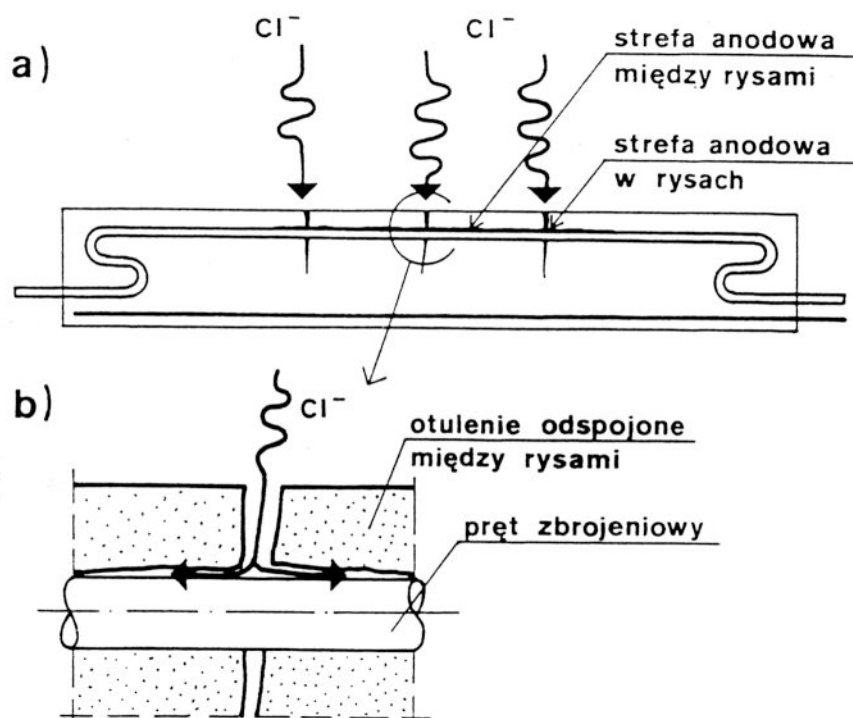
Na podstawie wyników pomiarów potencjału zbrojenia nie jest możliwa ocena korozji stali pod otuliną betonową. Natomiast otrzymane wyniki mogą być wykorzystane do opisu procesu korozyjnego w powiązaniu z wizualną oceną zbrojenia oraz z wynikami pomiarów polaryzacji, oporu polaryzacyjnego i prądu korozyjnego.

4.6.2. Badania polaryzacyjne

Przeprowadzone badania polaryzacji zbrojenia dowiodły, że zarysowanie otulenia betonowego pod wpływem obciążeń mechanicznych spowodowało przyspieszenie procesów korozyjnych na powierzchni wkładek. Największe pobudzenie procesów korozyjnych nastąpiło w rysach grupowych (3 ÷ 4 rysy w elemencie), gdzie stwierdzono odchylenie w kierunku ujemnym potencjału korozyjnego o 145 mV oraz zwiększenie ponad 20. krotne gęstości prądu korozyjnego w porównaniu z tymi parametrami określonymi w elemencie niezarysowanym.

Wyniki badań wskazują także na intensywny przebieg procesów korozyjnych zbrojenia pod otuleniem betonowym między rysami grupowymi. W tych miejscach zarówno w przypadku zbrojenia gładkiego, jak i żebrowanego zanotowano przesunięcie w kierunku ujemnym potencjału korozyjnego o ok. 120 mV oraz wzrost

gęstości prądu korozyjnego ok. 17. krotny w porównaniu z wynikami badań elementu niezarysowanego. Przypuszcza się, że między rysami nastąpiło odspojenie wkładek od betonu umożliwiające penetrację roztworu agresywnego z sąsiadujących rys wzdłuż powierzchni zbrojenia i powstanie miejsc anodowych także pod otuleniem - rys. 4.27.



Rys. 4.27. Schemat działania substancji agresywnej na zarysowane otulenie zbrojenia elementu próbnego: a) widok ogólny, b) szczegół w miejscu zarysowania.

Proces korozyjny w rysach pojedynczych przebiegał nieco łagodniej niż w rysach grupowych. W rysach pojedynczych stwierdzono odchylenie potencjału korozyjnego w kierunku ujemnym o ok. 120 mV oraz 10. krotne zwiększenie gęstości prądu korozyjnego, w porównaniu z tymi parametrami określonymi w elemencie niezarysowanym.

Porównując wyniki pomiarów polaryzacji zbrojenia nie stwierdzono występowania regularnej zależności między wartościami potencjału korozyjnego E_{corr} , oporu polaryzacji R_p i gęstości prądu korozyjnego i_{corr} , a szerokością rozwarcia rysy. Odnotowano przypadki, gdy w bardzo cienkich rysach gęstość prądu korozyjnego była znacznie większa od gęstości prądu korozyjnego określonego w rysach szerokich (np. $a_r = 0,02 \text{ mm} \rightarrow i_{corr} = 3,12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ - elem. Nr 15; $a_r = 0,5 + 0,6 \text{ mm} \rightarrow i_{corr} = 0,18 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ - elem. Nr 11).

Występujące zjawisko można tłumaczyć nieregularnością zarysowania betonu w bezpośrednim styku z powierzchnią wkładki. Należy spodziewać się także istnienia uszkodzeń struktury betonu w pobliżu rysy oraz odspojenia otulenia od powierzchni zbrojenia w bezpośrednim sąsiedztwie rysy. Powstające podczas zarysowania uszkodzenia struktury betonu umożliwiają łatwiejsze nasycenie roztworem agresywnym i sprzyjają powstaniu na powierzchni zbrojenia nowych obszarów anodowych. Ponadto w miarę postępu procesu drobniejsze uszkodzenie struktury betonu i mikrorysy mogą ulegać zamknięciu, wywołując zjawisko odwrotne - spowolnienie procesu korozyjnego.

Przedłużenie czasu ekspozycji elementów próbnych w warunkach atmosferycznych oraz zwiększenie liczby cykli zwilżania roztworem agresywnym nie wpłynęło znacząco na wyniki pomiarów.

Wyznaczone w rysach oraz na odcinkach między rysami wartości potencjałów korozyjnych charakteryzowały się zawsze przesunięciem w stronę wartości bardziej ujemnych w porównaniu z potencjałami określonymi poza rysą. Analogicznie gęstości prądu korozyjnego określone w rysach i w połowie odległości między rysami były znacznie większe od gęstości prądu w punktach usytuowanych poza rysami. Zależność badanych parametrów E_{corr} , R_p , i_{corr} od miejsca prowadzonych pomiarów polaryzacji zbrojenia chronionego zarysowanym otuleniem betonowym potwierdza występowanie makroogniw korozyjnych z aktywnym obszarem anodowym na powierzchni wkładek w styku z rysami lub obszarami odspojonego betonu między rysami.

Należy zwrócić uwagę, że stosunkowo niedużemu obniżeniu potencjału korozyjnego w elementach zbrojonych prętami gładkimi, rzędu $100 \div 150$ mV może towarzyszyć bardzo duży, ponad 20. krotny wzrost gęstości prądu korozyjnego. Ponieważ szybkość korozji stali zależy od gęstości prądu korozyjnego, a więc powinno się bardzo ostrożnie wnioskować o stanie zbrojenia na podstawie pomiarów jedynie potencjału korozyjnego. Jak wspomniano w opracowaniu literaturowym (część pierwsza) pomiary takie stosuje się obecnie w diagnostyce zbrojenia konstrukcji żelbetowych zagrożonych korozją- por. [42, 108, 109].

Wyniki badań potwierdziły wnioski przedstawione przez K. Suzuki, S. Praparntanatorn, H. Tamura [52] o „sumowaniu” się procesów korozyjnych przebiegających w rysach znajdujących się blisko siebie. Jednak w elementach

zbrojonych prętami gładkimi nie stwierdzono sugerowanego w tej pracy wyraźnego mechanizmu powstawania w jednej z rys procesów korozyjnych intensywniejszych od procesów zachodzących w pozostałych rysach danego elementu. Natomiast wzmożoną korozję w jednej z rys grupowych obserwowano w elementach zbrojonych prętami żebrowanymi.

Rozdział piąty

BADANIE ZBROJENIA ELEMENTÓW PRÓBNYCH Z BETONU METODĄ SPEKTROSKOPII IMPEDANCYJNEJ.

5.1. Ogólna charakterystyka badań impedancyjnych

W następnym etapie do badań powstawania i rozwoju korozji zbrojenia w elementach próbných z betonu zastosowano jedną z najnowocześniejszych metod laboratoryjnych - technikę spektroskopii impedancyjnej (EIS).

Zasadnicze przesłanki zastosowania EIS do badań procesu korozji prętów zbrojeniowych wynikają z następujących dogodnych właściwości tej metody:

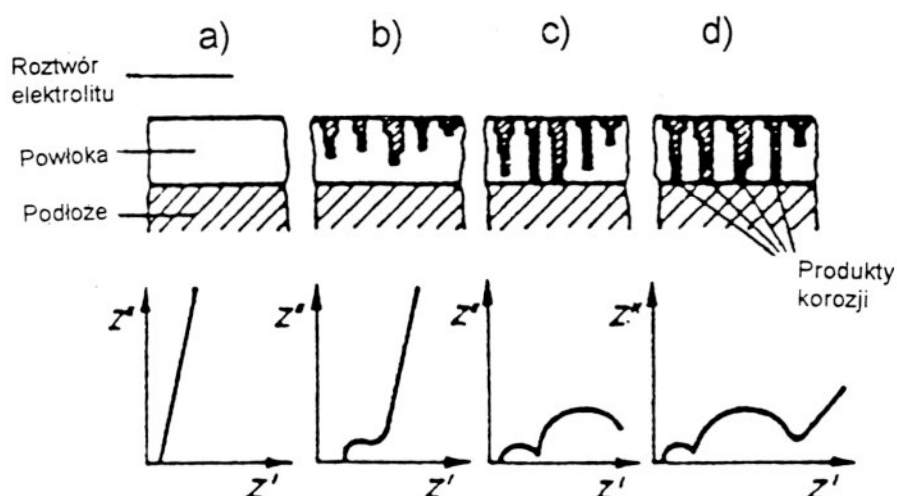
1. Technika spektroskopii impedancyjnej dostarcza najwięcej informacji o mechanizmie, rodzaju kontroli oraz szybkości procesu korozyjnego. Na podstawie tych pomiarów można wyznaczyć parametry układu: rezystancję omową (R_s) oraz rezystancję przeniesienia ładunku (R_t), która charakteryzuje szybkość procesu elektrochemicznego, a także pojemność warstwy podwójnej (C_{dl}), i współczynniki dyfuzji reagentów.
2. Metoda impedancyjna ma istotną zaletę w porównaniu z innymi badaniami, ponieważ można ją stosować w słabo przewodzących ośrodkach, natomiast rezultaty pomiarów nie są obarczone błędem wynikającym z niskiego przewodnictwa elektrolitu. Beton będący bezpośrednim środowiskiem zbrojenia jest takim właśnie trudnoprzewodzącym ośrodkiem.
3. Układ pozostaje w stanie równowagi przez cały czas pomiarów, gdyż amplituda sygnału zakłócającego jest niewielka i wynosi około 10 mV.
4. Badania wykonuje się sposobem nieniszczącym.

Jak wiadomo jony Cl^- zapoczątkowują korozję nawet przy wysokim pH poprzez lokalne niszczenie warstwy pasywnej i wywołują tzw. korozję wżerową. Następnym etapem jest propagacja procesu korozji. Do tego celu niezbędny jest tlen, który pełni funkcję depolaryzatora oraz wysokie przewodnictwo betonu związane z jego wilgotnością. Istotnym czynnikiem w procesie korozji jest także szczelność zastosowanego betonu.

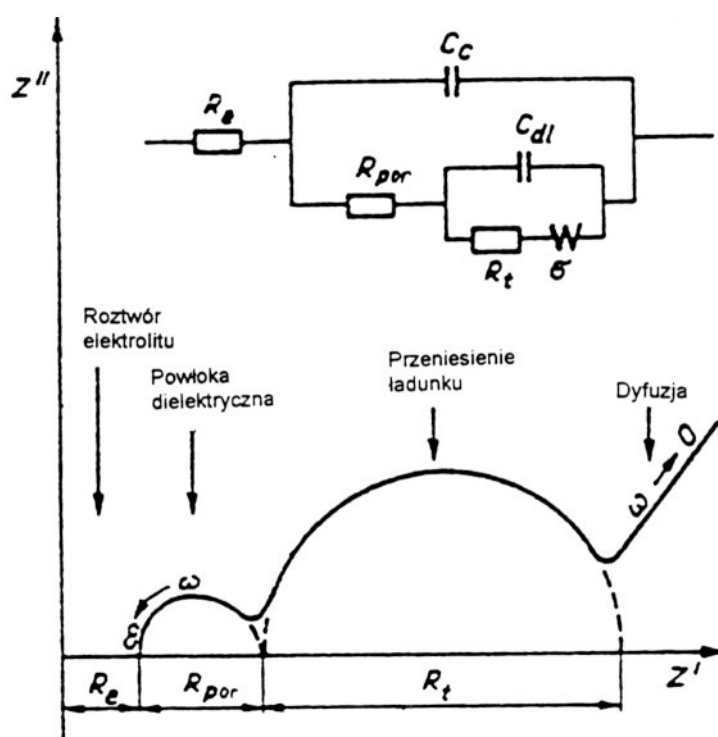
Pomiary układu metal-podłoże - powłoka - roztwór elektrolitu (MPE) umożliwiają określenie skuteczności i mechanizmu działania ochronnego powłoki. W celu uzyskania informacji zarówno o właściwościach dielektrycznych warstw powierzchniowych, jak i procesie korozyjnym, konieczne jest prowadzenie badań w szerokim zakresie częstotliwości (od ułamka mHz do kilkuset kHz)

Warstwy tlenkowe na zbrojeniu elementów żelbetowych stanowią niemetaliczną powłokę ochronną. W wyniku oddziaływania środowiska korozyjnego powłoka ta ulega mniej lub bardziej intensywnym zmianom. Na rys. 5.1 pokazano schematycznie kolejne fazy destrukcyjnego wpływu środowiska na powłoki niemetaliczne i odpowiadające im diagramy impedancji [90]. Początkowo niemetaliczna powłoka zachowuje się jak kondensator ze stratami, o czym świadczy stromy przebieg wykresu impedancji (rys. 5.1a). Po dłuższej ekspozycji w środowisku korozyjnym następuje penetracja roztworu elektrolitu w głąb warstwy. Powstanie w dielektrycznej powłoce dróg przewodnictwa elektrolitycznego prowadzi do pojawienia się łuku w wysokoczęstotliwościowej części widma impedancji (rys. 5.1b). dalsze wnikanie roztworu do wnętrza powłoki może spowodować jej całkowitą penetrację (rys. 5.1c). Przebicie powłoki umożliwia kontakt roztworu elektrolitu z metalem podłoża. Na odsłoniętej powierzchni podłoża na dnie porów następuje inicjacja korozji. Na wykresie Nyquista pojawiają się wtedy dwa półokręgi odpowiadające perforacji powłoki i procesowi korozijnemu. Rozwój korozji może być powodem blokowania porów przez nierozpuszczalne produkty korozji (rys. 5.1d). Osadzanie produktów utrudnia dostęp czynników do powierzchni metalu. W tych warunkach proces korozji zachodzi pod kontrolą dyfuzyjną, której odpowiada pojawienie się w zakresie niskich częstotliwości na wykresie Nyquista odcinka prostoliniowego charakterystycznego dla impedancji Warburga.

W przypadku zbrojenia elementu żelbetowego znajdującego się w środowisku zawierającym jony chlorkowe, wyniki badań impedancyjnych mogą być interpretowane na podstawie elektrycznego schematu zastępczego przedstawionego na rys. 5.2 [83, 90-92]. Na rysunku podano też wykres impedancji odpowiadający temu schematowi i wskazano sposób wyznaczania niektórych jego elementów składowych.

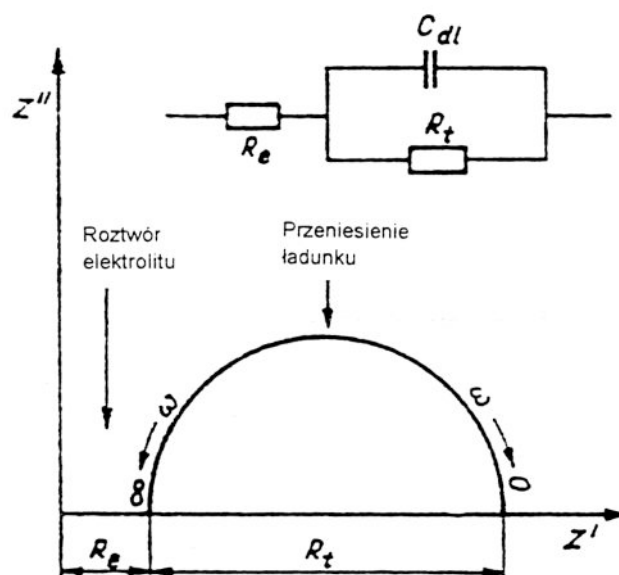


Rys. 5.1. Kolejne fazy destrukcyjnego wpływu środowiska korozyjnego na układ metal - powłoka niemetaliczna oraz odpowiadające im wykresy impedancji, według [90]



Rys. 5.2. Elektryczny schemat zastępczy dla układu MPE z powłoką niemetaliczną i odpowiadający mu wykres impedancji. Znaczenie symboli: R_e - rezystancja roztworu, R_{por} - rezystancja porów, R_t - rezystancja przeniesienia ładunku, C_c - pojemność niespenetrowanej części powłoki, C_{dl} - pojemność warstwy podwójnej na granicy metal podłoże roztwór elektrolitu (na dnie porów), σ - współczynnik Warburga charakteryzujący impedancję dyfuzji.

Zachowanie korozyjne zbrojenia elementu żelbetowego w środowisku zawierającym jony chlorkowe można przybliżyć stosując do interpretacji klasyczny model elektryczny według schematu zastępczego korodującej elektrody - rys. 5.3. Widmo impedancji takiego układu stanowi półokrag, którego wysokoczęstotliwościowe przecięcie z osią rzeczywistą wyznacza rezystancję elektrolitu R_e , natomiast przecięcie niskoczęstotliwościowe odpowiada sumie $R_e + R_t$.



Rys. 5.3. Zaproponowany schemat elektryczny modelu zastępczego dla układu stal zbrojeniowa - otulina betonowa w środowisku zawierającym jony Cl. Oznaczenia jak na rys. 5.2

5.2. Sposób wykonania badań impedancyjnych.

Badania impedancyjne zbrojenia wykonano na 3. elementach próbnym Nr 16 ÷ 18 zbrojnych prętami zebrowanymi (St3SY-b-500). Elementy w stanie obciążonym były poddane działaniu roztworu agresywnego według identycznego schematu, jaki został przyjęty w pomiarach rozkładu potencjału i badaniach potencjodynamicznych. Z powodu dużej czasochłonności badań impedancyjnych pomiary wykonano w elemencie Nr 16 po 5 cyklu nawilżania w 1 i 2 próbie dla elementu Nr 16, natomiast w elementach Nr 17 i 18 jedynie po 5. cyklu nawilżania w 2. próbie.

Pomiary przeprowadzono przy użyciu zestawu do badań impedancyjnych ATLAS 88. W skład zestawu wchodziły następujące bloki:

- 8811 generator - generator prądu zmiennego generujący napięcie przemienne o wybranym kształcie i częstotliwości oraz sygnały synchronizacji analizatora,
- 8821 analyser - analizator transmitancji służący do pomiaru parametrów napięć przemiennych o częstotliwości sygnału synchronizującego,
- 8831 potentiostat - potencjostat stanowiący wzmacniacz (bardzo duże wzmocnienie), który w połączeniu z celką pomiarową zapiętą w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego tworzy układ liniowy, odtwarzający potencjał zadany na wejściu programującym,
- 8891 computer interface - interfejs umożliwiający automatyczne sterowanie zestawem - reguluje nastawami generatora, analizatora i potencjostatu zgodnie z programem sterownika mikrokomputerowego, zapewnia komunikację pomiędzy zestawem i komputerem.

Wymieniony zestaw współpracuje z komputerem IBM, wyposażonym w kartę sterowania ATLAS COMPUTER CARD. Widok ogólny stanowiska pomiarowego przedstawia rys. 5.4.



Rys. 5.4. Widok ogólny stanowiska pomiarowego podczas badań impedancyjnych.

Charakterystyki impedancyjne były zdejmowane i analizowane przy pomocy programu IMP-88. Program IMP-88 umożliwia analizę widm metodą najlepszego dopasowania w oparciu o obwód zastępczy, która polega na poszukiwaniu takich wartości elementów składowych tego obwodu, aby otrzymane teoretyczne widmo było maksymalnie zbliżone do zmierzonego. Metoda ta polega na minimalizowaniu tzw. funkcji błędu która w tym programie jest zdefiniowana następująco:

$$S = \sum_{i=1}^n \frac{\{(Zx_i - Zx_i^*)^2 + (Zy_i - Zy_i^*)^2\}}{|Z_i|^2} \quad (3.8)$$

gdzie Zx , Zy - oznaczają część rzeczywistą i urojoną zmierzonej impedancji, Zx^* , Zy^* - część rzeczywistą i urojoną impedancji obliczonej z obwodu zastępczego, $|Z|$ - moduł impedancji, n - liczbę punktów widma.

Minimalizowanie wykonuje się metodą iteracyjną regresji nieliniowej według algorytmu Marquardta.

Pomiary prowadzono w układzie trójelektrodowym. Elektroda badaną (EW) był pręt zbrojeniowy żebrowany St3SY-b-500 elementu, elektrodą pomocniczą (EC) - druty palladowe o średnicy 0.5 mm, natomiast elektrodą odniesienia (ER) - nasycona elektroda kalomelowa.

Elektrodę odniesienia przykładano do powierzchni elementu próbnego w sposób identyczny jak podczas pomiarów polaryzacyjnych - rys. 4.18. Punkty pomiarowe usytuowano w miejscach rys, w połowie rozstawu rys oraz w odległości 10 cm od krawędzi skrajnych. Elektrode przemieszczano wzdłuż osi zbrojenia.

Po podłączeniu elementu żelbetowego do zestawu pomiarowego, ustalano potencjał stacjonarny przez około 30 min. Następnie rozpoczynano pomiar po wcześniejszym wprowadzeniu następujących wielkości sterujących procesem pomiarowym:

- zakres częstotliwości od 1000 Hz do 0,02 Hz,
- wartość amplitudy 10 mV,
- pomiar przy potencjale stacjonarnym,
- krok próbkowania - 12 punktów na dekadę.

5.3. Wyniki badań impedancyjnych i ich analiza

Na podstawie przetworzonych komputerowo wyników pomiarów oraz danych literaturowych [1÷4, 63, 69, 88, 90, 92, 100], do procesu przyjęto przedstawiony na rys. 5.3. elektryczny model zastępczy odpowiadający założonej strukturze beton-stal zbrojeniowa w środowisku zawierającym jony Cl^- . Model stanowi prosty układ RC, w którym rezystancja przeniesienia ładunku R_t jest miarą szybkości korozji, odwrotnie proporcjonalną do gęstości prądu korozyjnego. Ponadto pojemność warstwy podwójnej C_{dl} oddaje właściwości bezpośredniego kontaktu wkładki z betonem, natomiast rezystancja elektrolitu R_s ujmuje charakter otuliny betonowej. Do oceny wpływu warunków i czasu ekspozycji beleczek na szybkość korozji zbrojenia, przyjęto zgodnie z danymi literaturowymi [83-87, 93] parametr R_t . Oceniając intensywność procesu można założyć, że szybkość korozji jest odwrotnie proporcjonalna do oporu przeniesienia ładunku.

Otrzymane wyniki pomiarów elementu próbnego Nr 16 po 1 i 2 próbie zwilżania roztworem NaCl zestawiono w tablicach 5.1 i 5.2 i przedstawiono na rys. 5.5. - 5.10. Wydruki komputerowe z przeprowadzonych pomiarów zamieszczono w załączniku nr 3.

Przy analizie widm impedancyjnych przyjęto następujące oznaczenia:

E_{corr} - potencjał korozyjny elektrody badanej,

R_s - rezystancja elektrolitu między elektrodą badaną a elektrodą odniesienia,

R_t - rezystancja przeniesienia ładunku przez warstwę podwójną,

αd - pojemnościowy element fazy stałej związany z warstwą podwójną,

Y_{od} - admitancja $Y_{cpe} = (j\omega C)^\alpha$

Otrzymane widma impedancyjne są przedstawione na kartezjańskiej płaszczyźnie zespolonej $Z = Z_x + jZ_y$, gdzie oś odciętych stanowi część rzeczywistą widma Z_x , natomiast oś rzędnych - urojoną jZ_y , zmierzonej impedancji.

Tablica 5.1

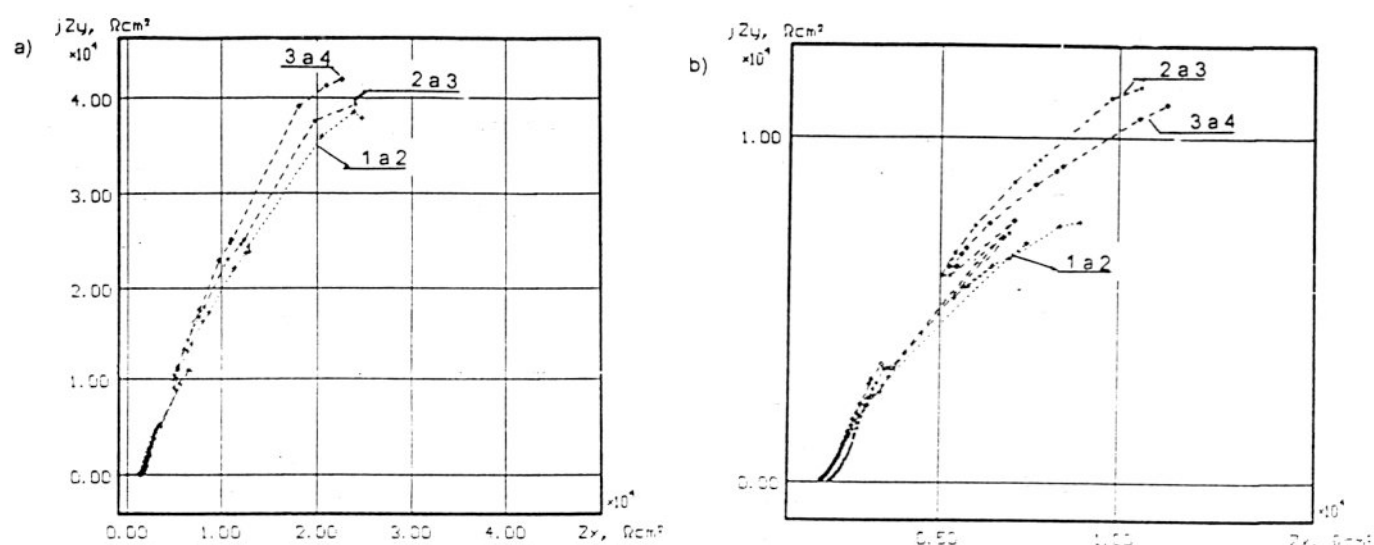
Wyniki badań impedancyjnych dla beleczki Nr 16, poza rysami, po 1 i 2 próbie zwilżania.

Punkt pom.	Próba	$R_s \cdot 10^3$ [Ωcm^2]	$Y_{od} \cdot 10^{-4}$	$\alpha d \cdot 10^{-1}$	$R_t \cdot 10^4$ [Ωcm^2]	E_{corr} [mV]
10 cm od krawędzi L	1	1,49	3,33	8,99	14,4	-257
	2	1,71	4,07	8,78	5,56	-379
między 1 a 2 rysą	1	1,66	2,26	8,51	20,7	-295
	2	1,68	3,25	7,85	3,75	-440
między 2 a 3 rysą	1	1,47	2,28	8,52	15,6	-311
	2	1,96	3,46	7,93	4,54	-432
między 3 a 4 rysą	1	1,47	2,29	8,56	12,7	-330
	2	1,65	4,17	7,50	2,72	-438
10 cm od krawędzi P	1	1,30	3,06	9,09	11,1	-324
	2	1,60	4,13	8,05	3,81	-402

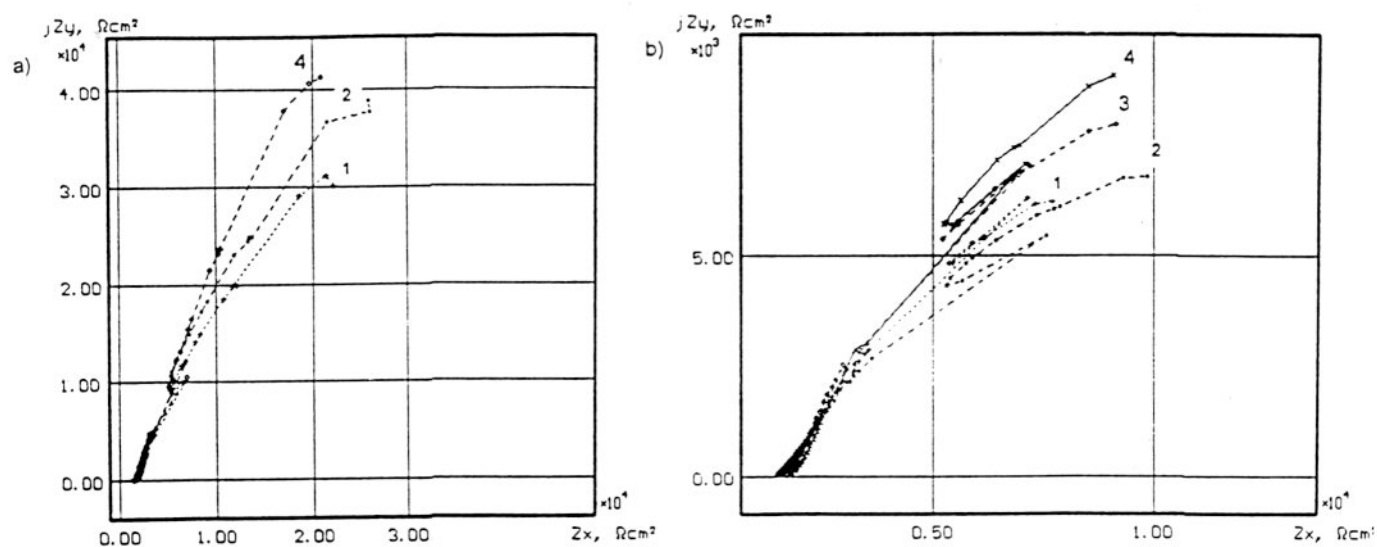
Tablica 5.2.

Wyniki badań impedancyjnych dla beleczki Nr 16, w rysach, po 1 i 2 próbie zwilżania.

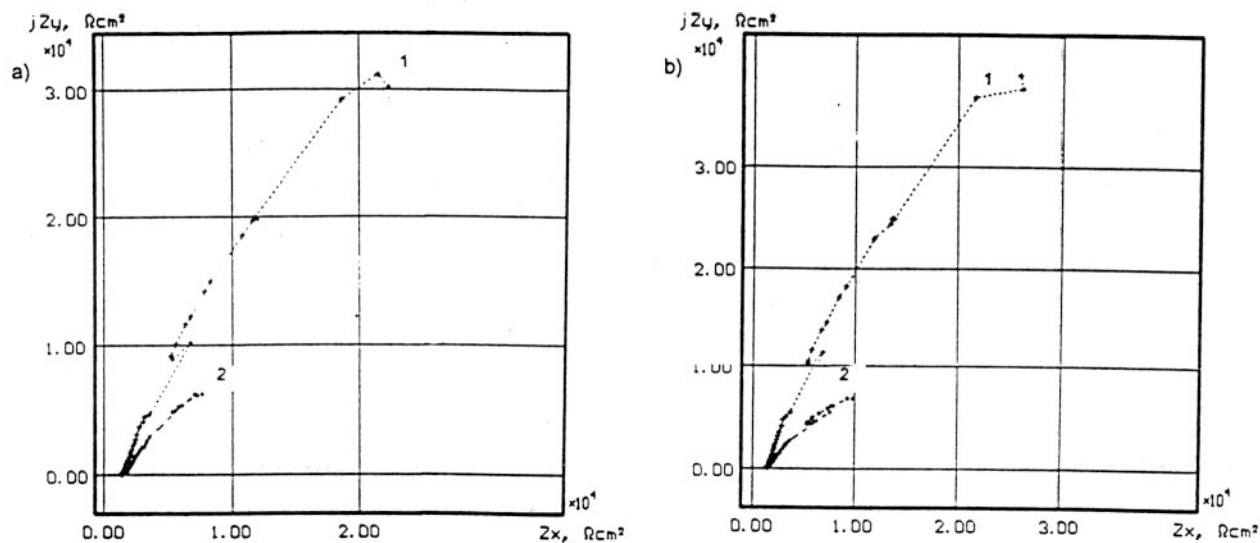
Punkt pom.	Próba	$R_s \cdot 10^3$ [Ωcm^2]	$Y_{od} \cdot 10^{-4}$	$\alpha d \cdot 10^{-1}$	$R_t \cdot 10^4$ [Ωcm^2]	E_{corr} [mV]
1	1	1,70	2,33	8,21	32,3	-295
	2	1,81	3,87	7,62	3,72	-439
2	1	1,55	2,23	8,59	18,6	-315
	2	1,68	4,34	7,69	2,72	-442
3	1	1,43	2,44	8,22	11,0	-238
	2	1,62	4,68	7,16	2,60	-432
4	1	1,42	2,15	8,46	13,3	-373
	2	1,53	3,26	7,03	2,35	-467



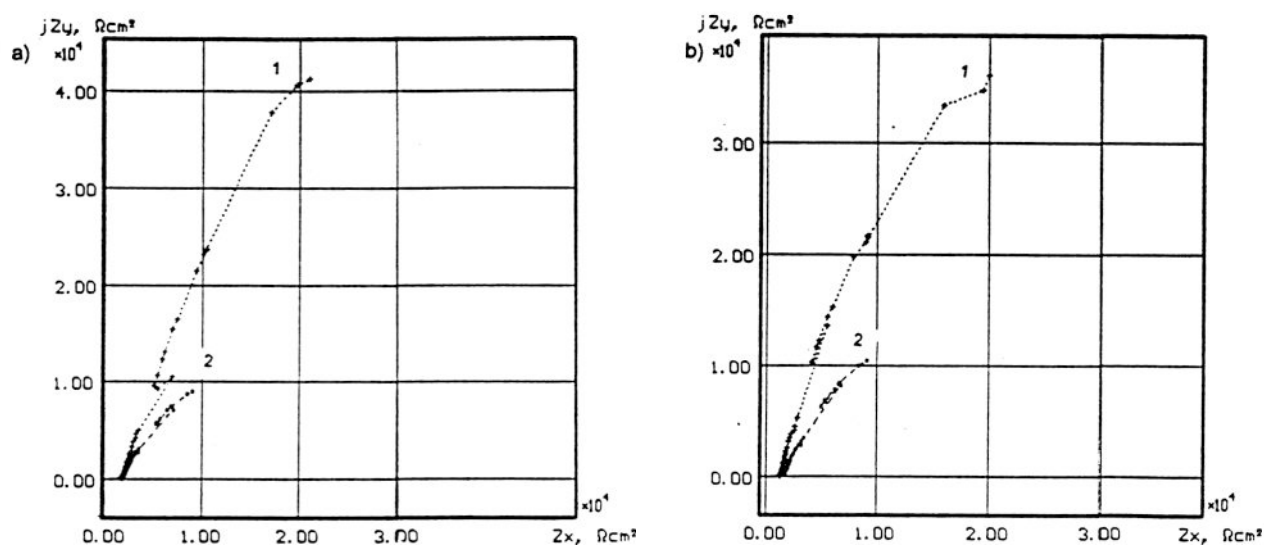
Rys. 5.5. Wykres impedancji dla elementu Nr 16: a) pomiar po 1 próbie, między rysami; b) pomiar po 2 próbie, między rysami.



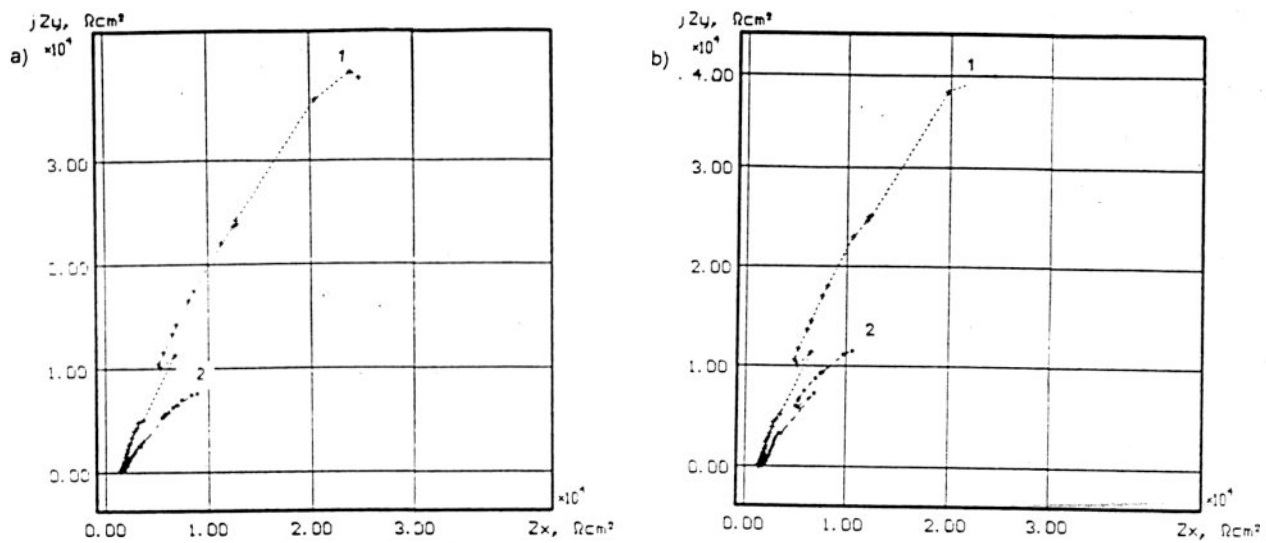
Rys. 5.6. Wykres impedancji dla elementu Nr 16: a) pomiar po 1 próbie, w rysach; b) pomiar po 2 próbie, w rysach.



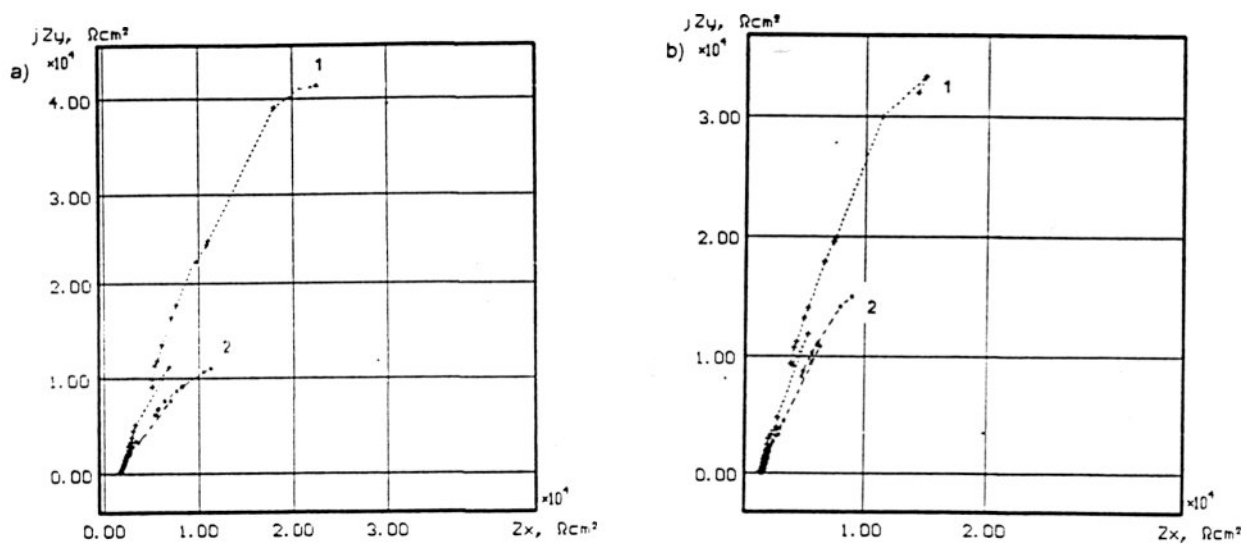
Rys. 5.7. Wykres impedancji dla elementu Nr 16: a) pomiar w 1 rysie, b) pomiar w 2 rysie, („1” - 1. próba, po 5 cyklu zwilżania, „2” - 2. próba, po 5 cyklu zwilżania).



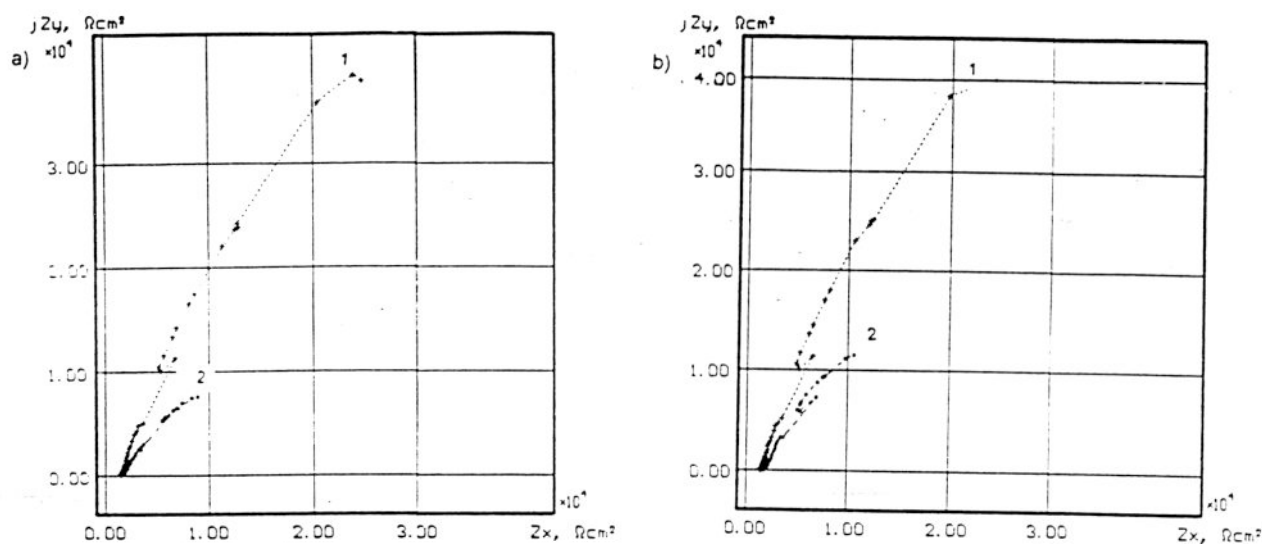
Rys. 5.8. Wykres impedancji dla elementu Nr 16: a) pomiar w 4 rysie, b) pomiar 10 cm od krawędzi L, („1” - 1. próba, po 5 cyklu zwilżania; „2” - 2. próba, po 5 cyklu zwilżania).



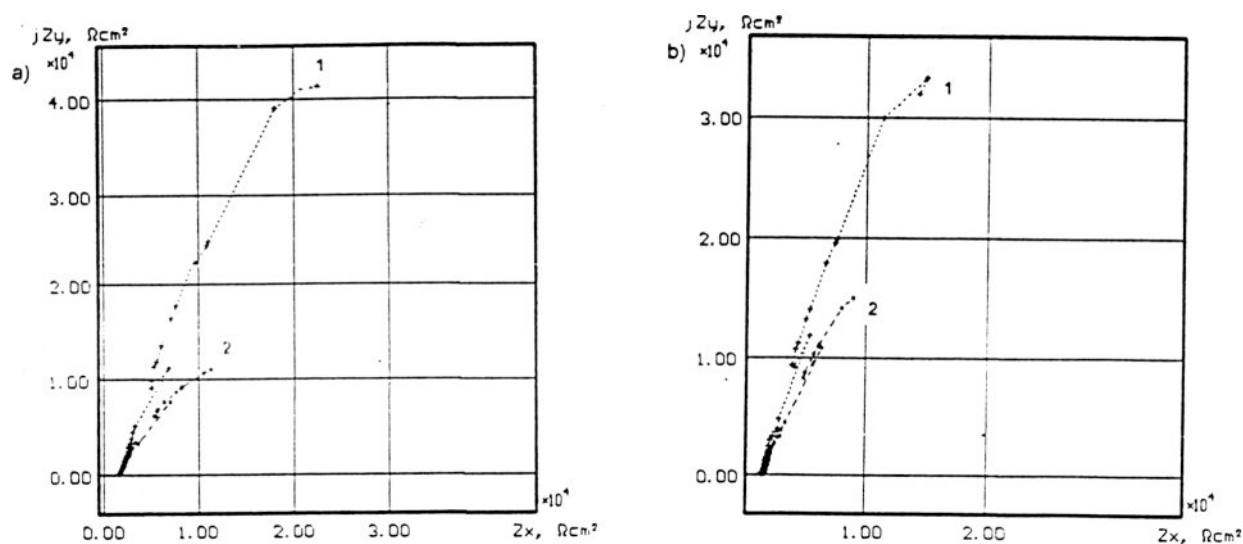
Rys. 5.9. Wykres impedancji dla elementu Nr 16: a) pomiędzy 1 a 2 rysą; b) pomiędzy 2 a 3 rysą; ("1" - 1 próba, po 5 cyklu zwilżania; "2" - 2 próba, po 5 cyklu zwilżania).



Rys. 5.10. Wykres impedancji dla elementu Nr 16: a) pomiędzy 3 a 4 rysą; b) 10 cm od krawędzi P; ("1" - 1 próba, po 5 cyklu zwilżania; "2" - 2 próba, po 5 cyklu zwilżania).



Rys. 5.9. Wykres impedancji dla elementu Nr 16: a) pomiędzy 1 a 2 rysą; b) pomiędzy 2 a 3 rysą: ("1" - 1 próba, po 5 cyklu zwilżania; "2" - 2 próba, po 5 cyklu zwilżania).



Rys. 5.10. Wykres impedancji dla elementu Nr 16: a) pomiędzy 3 a 4 rysą; b) 10 cm od krawędzi P: ("1" - 1 próba, po 5 cyklu zwilżania; "2" - 2 próba, po 5 cyklu zwilżania).

W pierwszej próbie po 5. cyklu nawilżania beleczki Nr 16 widmo impedancyjne wskazywało na stan pasywny - rys. 5.5. i 5.10. oraz załącznik nr 3. Spektrum składało się z bardzo małego półokręgu w zakresie wysokich częstotliwości i niskoczęstotliwościowego łuku, będącego początkiem dużego półokręgu. Pierwsza część wykresu charakteryzowała efekty dielektryczne w otulinie betonowej. Druga część wykresu odpowiadała procesowi korozyjnemu na granicy faz stal zbrojeniowa - otulina betonowa. Z tego fragmentu można wyznaczyć rezystancję przeniesienia ładunku, a następnie oszacować szybkość korozji.

W drugiej próbie po 5 cyklu nawilżania roztworem NaCl elementów wzrost zawartości jonów Cl^- w otulinie betonowej spowodował, że pierwszy półokrąg zaniknął, a także obniżyły się wartości R_t (rys. 5.5. - 5.10) zmiana charakteru wykresu wskazuje na intensywny rozwój procesu korozyjnego, zapoczątkowanego lokalnym niszczeniem warstwy pasywnej przez jony Cl^- . Nie obserwuje się odcinka prostoliniowego. Przy najniższych częstotliwościach widma nie obserwowano odcinka prostoliniowego, co świadczyło o kontakcie cieczy porowej z powierzchnią zbrojenia. Można przypuszczać, że na dnie rysy, na odsłoniętej powierzchni metalu następowała inicjacja korozji.

W tablicach 5.3. i 5.4. zestawiono parametry uzyskane w pomiarach impedancyjnych elementów próbnych Nr 16 ÷ 18 badanych po 2 próbie. Analiza tych wyników wskazuje na rozwój procesu korozyjnego wkładki pod wpływem karbonatyzacji betonu oraz działania jonów Cl^- . Wniosek taki wynika z obniżenia po drugiej próbie ekspozycji beleczek w roztworze NaCl wartości rezystancji przeniesienia ładunku R_t w rysach i poza rysami o jeden rząd.

Porównując zamieszczone w tablicach 5.1. i 5.2. wyniki badania elementu nr 16 oraz wyniki pomiarów dla beleczek Nr 16 ÷ 18 po zakończeniu drugiego cyklu badań można stwierdzić, że na powierzchni stali zbrojeniowej występowały makroogniwa korozyjne z obszarami anodowymi w miejscu styku powierzchni zbrojenia z rysą oraz katodowymi poza tym obszarem. Na taki układ elektrod wskazywały wartości rezystancji przeniesienia ładunku R_t wyznaczone w rysach były niższe o około 60% niż w miejscach poza rysami

Porównując wartości R_t określone w poszczególnych rysach danego elementu próbnego stwierdzono, że w jednej z rys proces korozji zbrojenia przebiegał najintensywniej.

- W beleczce Nr 16 proces korozji zbrojenia najszybciej rozwijał się w rysie 1 ($R_t = 2,35 \cdot 10^4 \Omega\text{cm}^2$), a najmniejsza szybkość korozji wystąpiła w rysie czwartej ($R_t = 3,72 \cdot 10^4 \Omega\text{cm}^2$).
- W beleczce Nr 17 proces korozji najszybciej przebiegał w rysie 1 ($R_t = 5,44 \cdot 10^4 \Omega\text{cm}^2$), a najmniejsza szybkość korozji została odnotowana w rysie czwartej ($R_t = 27,8 \cdot 10^4 \Omega\text{cm}^2$).
- W beleczce Nr 18 najintensywniejsza korozja wystąpiła w rysie pierwszej ($R_t = 3,74 \cdot 10^4 \Omega\text{cm}^2$), natomiast najmniejsza szybkość korozji była w rysie drugiej ($R_t = 27,8 \cdot 10^4 \Omega\text{cm}^2$).

Otrzymane wyniki potwierdzono po odkuciu otuliny betonowej i zwymiarowaniu obszarów zniszczeń korozyjnych.

Wyniki badań są zgodne z wnioskami przedstawionymi przez K. Suzuki, S. Praparnatanatarn, H. Tamura [52] o „sumowaniu” się procesów korozyjnych przebiegających w rysach znajdujących się blisko siebie oraz powstaniu w jednej z rys procesów korozyjnych intensywniejszych od procesów zachodzących w pozostałych rysach danego elementu.

Tablica 5.3.

Wyniki badań impedancyjnych dla beleczek Nr 16÷18, poza rysami, po drugiej próbie nawilżania.

Punkt pom.	Nr beleczki	$R_s \cdot 10^3$ [Ωcm^2]	$Y_{od} \cdot 10^{-4}$	$\alpha d \cdot 10^{-1}$	$R_t \cdot 10^4$ [Ωcm^2]	E_{corr} [mV]
10 cm od krawędzi lewej	16	1,71	4,07	8,78	5,56	-379
	17	2,08	3,13	8,68	5,36	-381
	18	1,94	2,83	7,74	6,22	-392
między 1 a 2 rysą	16	1,68	3,25	7,85	3,75	-440
	17	2,51	2,11	7,85	8,24	-395
	18	2,11	2,23	7,40	7,67	-402
między 2 a 3 rysą	16	1,93	3,46	7,93	4,54	-432
	17	2,23	2,34	8,00	10,5	-389
	18	2,09	2,07	7,62	9,81	-381
między 3 a 4 rysą	16	1,65	4,17	7,50	2,72	-483
	17	2,38	1,93	7,62	3,17	-358
	18	2,17	2,01	7,13	4,51	-403
10 cm od krawędzi prawej	16	1,60	4,13	8,05	3,81	-402
	17	2,61	2,01	8,25	23,9	-341
	18	2,68	1,79	7,53	10,5	-364

Tablica 5.4.

Wyniki badań impedancyjnych dla beleczki Nr 16÷17, w rysach, po drugiej próbie zwilżania.

Punkt pom.	Nr beleczki	$R_s \cdot 10^3$ [Ωcm^2]	$Y_{od} \cdot 10^{-4}$	$\alpha d \cdot 10^{-1}$	$R_t \cdot 10^4$ [Ωcm^2]	E_{corr} [mV]
1	16	1,81	3,87	7,62	3,72	-439
	17	2,16	2,80	7,95	5,44	-420
	18	2,02	3,24	7,03	3,74	-418
2	16	1,68	4,34	7,69	2,72	-442
	17	2,45	2,39	7,46	8,38	-406
	18	1,80	2,04	7,47	8,04	-396
3	16	1,62	4,68	7,16	2,60	-432
	17	2,04	2,35	7,58	19,5	-379
	18	2,00	2,65	6,86	4,93	-417
4	16	1,53	3,62	7,03	2,35	-467
	17	2,36	1,89	7,91	27,8	-346
	18	2,08	2,68	7,06	4,87	-411

Rozdział szósty

WERYFIKACJA MODELU OGNIWA KOROZYJNEGO.

6.1. Przygotowanie elementów do badań.

Po zakończeniu badań elektrochemicznych oceniono zasięg zniszczeń korozyjnych zbrojenia oraz oszacowano pola powierzchni aktywnych, na których przebiegały reakcje elektrodowe. Wyniki tych pomiarów skonfrontowano z rezultatami badań ogniwa korozyjnego, wyznaczając przez porównanie gęstości prądu korozyjnego przeciętny stosunek powierzchni anody do katody na zbrojeniu elementów próbnych.

Z elementów próbnych zdemontowano osprzęt obciążający, po czym beleczki rozcięto odstawiając na całej długości zbrojenie. Rozcinanie elementów wykonano w maszynie wytrzymałościowej. W osi wózka prasy ustawiono cienki pręt zbrojeniowy, na którym ułożono element próbny. Element próbny usytuowano tak, aby ułożony pręt znajdował się wzdłuż osi wkładki zbrojeniowej. W wyniku podłużnego docisku zewnętrznego pręta do powierzchni betonu nastąpiło lokalne działanie „noża naprężeń” i podłużne rozerwanie betonu na dwie części. Rozcięto elementy nr 7, 10, 13 i 15 zbrojone stalą gładką St3S oraz elementy nr 16, 17 i 18 zbrojone prętami żebrowanymi. Przykładowo na rys 6.1. przedstawiono fragmenty rozciętego elementu.

6.2. Opis stanu zbrojenia badanych elementów po odkuciu.

W przelomach wyraźnie odznaczały się części skorodowane pręta zbrojeniowego oraz produkty korozji osadzone w betonie. Rozmieszczenie miejsc skorodowanych w elementach nr 7, 10, 13 i 15 przedstawiono na rys 6.2 i 6.3b, odpowiednio. Największe uszkodzenia korozyjne zaobserwowano w miejscach styku zbrojenia z rysami w otuleniu betonowym. Długość odcinków skorodowanych wielokrotnie przekraczała szerokość rozwarcia rysy.

W beleczce nr 7 zarysowanej w jednym miejscu stwierdzono produkty korozji w bezpośrednim sąsiedztwie rysy - rys. 6.2a. Odcinek skorodowany był usytuowany

Rozdział szósty

WERYFIKACJA MODELU OGNIWA KOROZYJNEGO.

6.1. Przygotowanie elementów do badań.

Po zakończeniu badań elektrochemicznych oceniono zasięg zniszczeń korozyjnych zbrojenia oraz oszacowano pola powierzchni aktywnych, na których przebiegały reakcje elektrodowe. Wyniki tych pomiarów skonfrontowano z rezultatami badań ogniwa korozyjnego, wyznaczając przez porównanie gęstości prądu korozyjnego przeciętny stosunek powierzchni anody do katody na zbrojeniu elementów próbnych.

Z elementów próbnych zdemonutowano osprzęt obciążający, po czym beleczki rozcięto odsłaniając na całej długości zbrojenie. Rozcinanie elementów wykonano w maszynie wytrzymałościowej. W osi wózka prasy ustawiono cienki pręt zbrojeniowy, na którym ułożono element próbny. Element próbny usytuowano tak, aby ułożony pręt znajdował się wzdłuż osi wkładki zbrojeniowej. W wyniku podłużnego docisku zewnętrznego pręta do powierzchni betonu nastąpiło lokalne działanie „noża naprężeń” i podłużne rozerwanie betonu na dwie części. Rozcięto elementy nr 7, 10, 13 i 15 zbrojone stalą gładką St3S oraz elementy nr 16, 17 i 18 zbrojone prętami żebrowanymi. Przykładowo na rys 6.1. przedstawiono fragmenty rozciętego elementu.

6.2. Opis stanu zbrojenia badanych elementów po odkuciu.

W przełomach wyraźnie odznaczały się części skorodowane pręta zbrojeniowego oraz produkty korozji osadzone w betonie. Rozmieszczenie miejsc skorodowanych w elementach nr 7, 10, 13 i 15 przedstawiono na rys 6.2 i 6.3b, odpowiednio. Największe uszkodzenia korozyjne zaobserwowano w miejscach styku zbrojenia z rysami w otuleniu betonowym. Długość odcinków skorodowanych wielokrotnie przekraczała szerokość rozwarcia rysy.

W beleczce nr 7 zarysowanej w jednym miejscu stwierdzono produkty korozji w bezpośrednim sąsiedztwie rysy - rys. 6.2a. Odcinek skorodowany był usytuowany

niesymetrycznie względem osi rysy. Lewa część miała długość około 20 mm, natomiast prawa część około 40-45 mm. Podobne rozmieszczenie produktów korozji wystąpiło w beleczce nr 10, mającej także jedną rysę w strefie rozciąganej - rys. 6.2b. Produkty korozji były rozłożone na odcinku o długości 40 mm z lewej strony oraz 25 mm z prawej strony od osi rysy. Ponadto z obu stron obszaru skorodowanego występowały pojedyncze plamki rdzy na odcinkach o długości około 10 mm.

W beleczce nr 13 zarysowanej w czterech miejscach korozja zbrojenia rozwinęła się przy każdej rysie - rys. 6.3b. Na styku z lewą skrajną rysą, korozja powierzchni zbrojenia nie była intensywna. Występowały nieregularne plamy rdzy na odcinku o długości około 25 mm usytuowanym prawie symetrycznie względem osi rysy. W drugiej rysie rozwinęła się bardzo silna korozja. Odcinek wżerowy miał długość około 35 mm (15 mm na lewo i 20 mm na prawo od osi rysy). W trzeciej rysie wystąpiła korozja, której intensywność można ocenić na średnią - długość odcinka skorodowanego wynosiła około 30 mm. W ostatniej, czwartej rysie, korozja była nierównomierna - największe zniszczenia korozyjne zbrojenia obserwowano bezpośrednio przy rysie. Odcinek skorodowany był usytuowany niesymetrycznie względem osi rysy, około 30 mm na lewo i około 50 mm na prawo.

Beleczka nr 15 miała na powierzchni zbrojenia trzy miejsca skorodowane odpowiadające położeniu rys w strefie rozciąganej. W pierwszej rysie od strony lewej (rys. 6.3 b) wystąpiły produkty korozji na odcinku o długości około 75 mm (40 mm na lewo i 35 mm na prawo od osi rysy). Miejsce skorodowane przechodziło w lekkie plamki rdzy, aż do produktów korozji wytworzonych przy rysie środkowej, gdzie korozja była widoczna na odcinku o długości około 50 mm umieszczonym symetrycznie względem osi rysy. W trzeciej rysie korozja wystąpiła na odcinku o długości około 100 mm. Odcinek był usytuowany wyraźnie niesymetrycznie względem osi rysy (35 mm na lewo i 65 mm na prawo od osi rysy). Bezpośrednio przy rysie wytworzyła się wyraźna strefa wżerowa o długości około 15 mm, świadcząca o bardzo intensywnym przebiegu procesów korozyjnych.

We wszystkich elementach zbrojonych prętami żebrowanymi (beleczki nr 16-18) korozja zbrojenia rozwinęła się w każdej rysie, pomimo niedużej szerokości rozwarcia wynoszącej $a_r \cong 0,1$ mm.

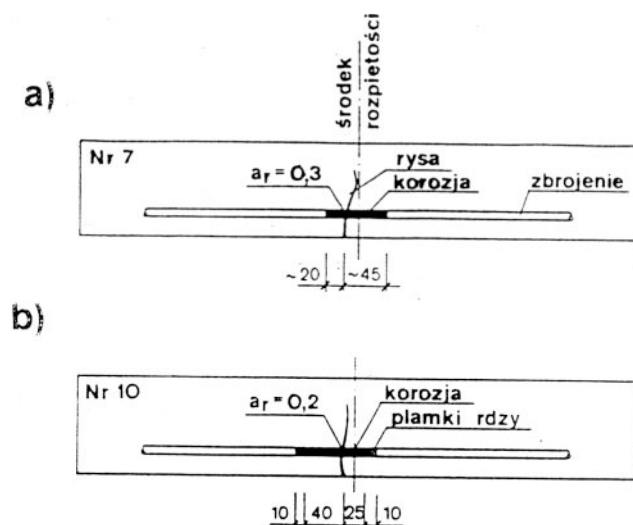
a)



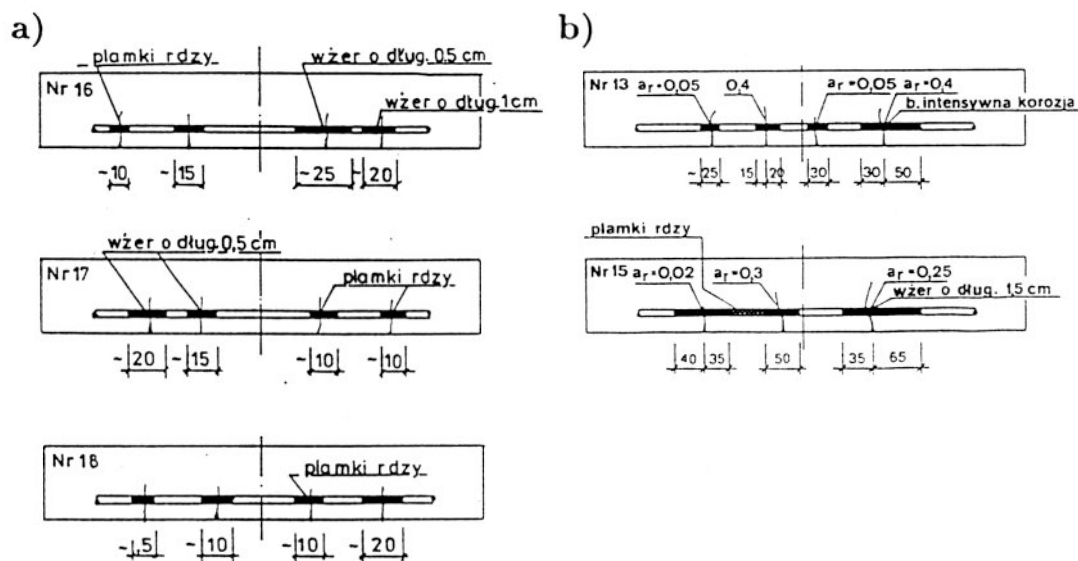
b)



Rys. 6.1. Widok rozciętego elementu Nr 12: a) w przekroju poprzecznym przez rysę, b) w przekroju podłużnym przy rysie na powierzchni zbrojenia i w odspojonym płacie betonu.



Rys. 6.2. Rozmieszczenie stref skorodowanych w elementach z jedną rysą zbrojonych prętem gładkim: a) element nr 7; b) element nr 10



Rys. 6.3. Rozmieszczenie stref skorodowanych w elementach z wieloma rysami zbrojonych prętem: a) żebrowanymi; b) gładkimi.

W przełomach podłużnych wyraźnie odznaczały się części skorodowane pręta zbrojeniowego, jednak trudno było sprecyzować położenia tych miejsc względem rys. Na styku ze zbrojeniem rysy były bardzo wąskie. Z tego powodu nie można było ściśle określić ich przebiegu wzdłuż przekroju poprzecznego odkutej otuliny. Nie zauważono także wyraźnego odspojenia prętów żebrowanych od otuliny betonowej, występującego w beleczkach zbrojonych prętami gładkimi. W beleczkach nr 16 ÷ 18 zbrojonych prętami żebrowanymi stwierdzono mniejsze długości strefy skorodowanej w porównaniu z elementami nr 13 i 15. Ograniczenie długości strefy skorodowanej zostało najprawdopodobniej spowodowane lepszą przyczepnością betonu do stali żebrowanej.

W beleczce nr 16 zarysowanej w czterech miejscach korozja zbrojenia rozwinęła się przy każdej rysie (rys. 6.3a). Na styku z lewą skrajną rysą, na powierzchni zbrojenia wystąpiły nieregularne, pojedyncze plamy rdzy na odcinku o długości około 10 mm. W drugiej rysie korozja rozwinęła się silniej. Skorodowany odcinek o długości około 15 mm pokryty był produktami korozji w sposób prawie równomierny. W kolejnej, trzeciej rysie, zaobserwowano produkty korozji na części zbrojenia o długości około 25 mm, przy czym w środku tej części widoczna była wyraźna strefa wżerowa o długości około 5 mm. W ostatniej, czwartej rysie, korozja była największa. Skorodowany odcinek miał długość około 20 mm, i zawierał obszar bardzo silnie skorodowany na długości około 10 mm.

W beleczce nr 17 zarysowanej w czterech miejscach korozja zbrojenia wystąpiła również rozwinęła się przy każdej rysie (rys. 6.3a). W pierwszej rysie, od lewej strony, korozja rozwinęła się najmocniej. W części środkowej powstała strefa wżerowa o długości około 5 mm, natomiast produkty korozji wytworzyły się na odcinku o długości około 20 mm. Na powierzchni zbrojenia stykającej się z drugą rysą także wystąpił wżer o długości około 5 mm, a ponadto odcinek o długości 15 mm był pokryty produktami korozji. W trzeciej i czwartej rysie zaobserwowano na powierzchni pręta produkty korozji na odcinku o długości około 10 mm w postaci pojedynczych plamek rdzy.

W beleczce nr 18 zbrojenie było skorodowane także w miejscach styku ze wszystkimi czterema rysami. W pierwszej i trzeciej rysie (od lewej strony według rys. 6.3a) zaobserwowano produkty korozji w postaci pojedynczych, słabych plamek rdzy odpowiednio na odcinku około 5 mm i 10 mm. Natomiast w drugiej i czwartej rysie,

produkty korozji pokrywały powierzchnię zbrojenia w postaci ciągłej warstewki na długości około 10 mm i 20 mm, bez wyraźnej strefy wżerowej.

Wyniki oględzin zbrojenia po rozcięciu betonu elementów doprowadziły się do następujących wniosków:

- Na styku pręta zbrojeniowego z każdą rysą rozwinęły się procesy korozyjne niezależnie od szerokości rozwarcia rys.
- Długość odcinków skorodowanego zbrojenia ze stali gładkiej wynosiła od kilku do kilkunastu centymetrów.
- Długość odcinków skorodowanego zbrojenia ze stali żebrowanej była znacznie mniejsza i nie przekraczała kilku centymetrów.
- Głębokość ubytków na stali żebrowanej była mniejsza niż na stali gładkiej.
- Przypuszcza się, że lokalizacja produktów korozji odpowiadała występowaniu miejsc anodowych tworzących się na powierzchni zbrojenia ulegającej depasywacji.
- Zasięg depasywacji odpowiadał odspojeniu się powierzchni zbrojenia od betonu i nie zależał od szerokości rozwarcia rysy.

6.3. Analiza uzyskanych wyników badań modelu ogniwa korozyjnego i elementów próbnych

Pomiary w elementach próbnych wykazały znaczne obniżenie potencjału w obszarach zarysowań otulenia betonowego. Zasięg obniżenia potencjału odpowiadał długości uszkodzonych korozyjnie odcinków zbrojenia. Zgodność położenia niskich wartości potencjałów z usytuowaniem uszkodzeń sugeruje występowanie na zbrojeniu elementów próbnych odcinków anodowych wokół każdej rysy niezależnie od jej szerokości rozwarcia. Spostrzeżenie to uzasadnia modelowanie procesu korozyjnego zbrojenia elementów żelbetowych makroogniwem galwanicznym o anodzie odpowiadającej aktywnej powierzchni zbrojenia w obszarze rysy (odcinek obniżonego potencjału) oraz katodzie obejmującej strefy przyległe na pręcie stalowym.

Jednak bezpośrednie porównanie wyników badania modelowego ogniwa korozyjnego (tablica 3.2. i 3.3) oraz elementów próbnych (tablice 4.8 ÷ 4.15) nie wykazuje zgodności.

Gęstości prądu w ogniwie modelowym wyznaczonym doświadczalnie oraz symulowanym metodą komputerową są kilka rzędów wielkości większe od gęstości prądów korozyjnych wyznaczonych na podstawie krzywych polaryzacji stali zbrojeniowej chronionej zarysowanym otuleniem betonowym w beleczkach. W modelowym ogniwie korozyjnym uzyskanym metodą komputerową gęstość prądu zmieniała się od $i_{\text{corr}} = 59,34 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ do $i_{\text{corr}} = 378,90 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ w zależności od stosunku powierzchni anody do katody. W ogniwie korozyjnym złożonym z komór elektrodowych połączonych półprzepuszczalną diafragmą otrzymano gęstości prądu nieco mniejsze w granicach $i_{\text{corr}} = 18,0 \div 175,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Natomiast podczas pomiarów polaryzacyjnych beleczek z jedną rysą, zbrojonych prętami gładkimi stwierdzono w rysie gęstość prądu korozyjnego w przedziale $i_{\text{corr}} = 0,2 \div 2,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($H_t = 0,002 \div 0,02 \text{ mm/rok}$). W beleczkach z wieloma rysami zbrojonych prętami gładkimi gęstości prądu korozyjnego w rysach wynosiły $i_{\text{corr}} = 0,98 \div 2,57 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($H_t = 0,01 \div 0,03 \text{ mm/rok}$) oraz w elementach zbrojonych prętami żebrowanymi $i_{\text{corr}} = 0,32 \div 1,65 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ($H_t = 0,004 \div 0,02 \text{ mm/rok}$).

Wyniki badań wskazują pozornie na zdecydowanie większą gęstość prądu korozyjnego w modelowym ogniwie galwanicznym, niż występującą na wkładkach chronionych zarysowanym otuleniem betonowym. Należy jednak podkreślić, że gęstość prądu w beleczkach zarysowanych została określona z uwzględnieniem całkowitej powierzchni zbrojenia. Konieczne jest więc odniesienie zmierzonego natężenia prądu do powierzchni anody, która jest znacznie mniejsza od przyjętej w obliczeniach.

Korektę gęstości prądu korozyjnego w elementach próbnych zarysowanych przeprowadzono uwzględniając ustalone po rozkuciu otulenia rzeczywiste powierzchnie aktywne. Na podstawie obrazu uszkodzeń prętów (rys. 6.2 i 6.3) określono długości odcinków skorodowanych, a następnie oszacowano wymiary obszarów anodowych. Wyniki badań polaryzacyjnych otrzymanych na podstawie całkowitej powierzchni wkładki A oraz wyniki skorygowane proporcjonalnie do powierzchni anody A_a zamieszczono w tablicy 6.1.

Porównując zestawione wartości gęstości prądu korozyjnego i_{corr} i oporu polaryzacji R_p zauważa się, że uwzględnienie rzeczywistej powierzchni anody spowodowało znaczny wzrost gęstości prądu korozyjnego.

Przeliczona na podstawie powierzchni rzeczywistych gęstość prądu polaryzacyjnego w beleczce nr 10 z jedną rysą oraz w beleczkach nr 13 i 15 z wieloma rysami, zbrojonych prętami gładkimi są tego samego rzędu, co wyznaczona w ogniwie modelowym przy stosunku powierzchni anody do katody 1:1 i 1:2. Podobna sytuacja wystąpiła w przypadku beleczek nr 16 ÷ 18 (z wyjątkiem rysy nr 1 $i_{\text{corr}}=1980 \mu\text{A}/\text{cm}^2$) zbrojonych prętami żebrowanymi. Natomiast w beleczkach nr 7 i nr 12 przeliczone gęstości prądów były o jeden rząd niższe. Wartości oporu polaryzacyjnego wszystkich beleczkach z jedną rysą były zbliżone do wyznaczonych w ogniwie modelowym przy stosunku powierzchni anody do katody 1:1 i 1:2.

Porównując zestawione w tablicy 6.1 wartości gęstości prądu korozyjnego i_{corr} i oporu polaryzacji R_p oraz rozmiary uszkodzeń obserwowane po odkuciu otulenia zauważa się mniejszą intensywność procesów korozyjnych w elementach z wieloma rysami zbrojonych prętami żebrowanymi w porównaniu z podobnymi elementami zbrojonymi prętami gładkimi.

Można przypuszczać, że zwiększeniu zasięgu obszarów anodowych na zbrojeniu gładkim sprzyjało lokalne odspojenie wkładek od betonu umożliwiając penetrację roztworu agresywnego z sąsiadujących rys wzdłuż powierzchni pręta i powstanie miejsc anodowych także pod otuleniem. Nie stwierdzono wyraźnej korelacji między szerokością rozwarcia rys oraz gęstością prądu korozyjnego i oporu polaryzacji. Natomiast wystąpienie nawet najdrobniejszej rysy spowodowało zarówno znaczne miejscowe obniżenie potencjału, jak i pojawienie się stosunkowo dużego prądu korozyjnego.

Na podstawie obrazu uszkodzeń prętów można dopatrywać się występowania wzmożonej korozji zawsze w jednej rysie, niekoniecznie najszerzej, sąsiadującej z rysami pozostałymi. Uzyskany wynik potwierdza to spostrzeżenie K. Suzuki, S. Praparntanatorna, H Tamura [52] o sumowaniu się procesów korozyjnych w rysach znajdujących się blisko siebie i powstaniu w jednej z nich procesów korozyjnych intensywniejszych od procesów w dalszej grupie rys.

Niektórzy autorzy [53, 63] sugerują, że działanie makroogniwa korozyjnego w zbrojonym betonie objawia się jedynie wzdłuż krótkiego odcinka granicy aktywno-

pasywnej na powierzchni zbrojenia. Uwzględnienie tego założenia zbliża model teoretyczny do warunków rzeczywistych, przy założeniu, że stosunek powierzchni anody do katody nie jest większy niż 1:2. Przytoczone dane znajdują potwierdzenie w wynikach przeprowadzonych kompleksowo własnych badań, które wskazują na brak znacznych zmian wartości prądu korozyjnego w ogniwie korozyjnym przy stosunkach powierzchni anody do katody 1:5 i 1:10.

Tablica 6.1. Wyniki badań polaryzacyjnych w rysach elementów próbnych.

Stal	Nr belki	Nr rysy	Rozwartość rysy [mm]	E_{corr} [mV]	Bezpośrednie pomiary ($A=120 \text{ cm}^2$)		Korekta po odkuciu		
					i_{corr}	$R_p \times 10^4$	A_a	i_{corr}	$R_p \times 10^4$
					[$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	[$\Omega \cdot \text{cm}^2$]	[cm^2]	[$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]	[$\Omega \cdot \text{cm}^2$]
Stal gładka	0	---	---	-343,8	0,0765	30,9	---	---	---
	7	1	0,4	-474,9	0,64	2,18	12,2	6,30	22,2
	10	1	0,3	-495,1	0,99	1,08	15,0	7,92	13,5
	12	1	0,5	-481,7	0,21	3,26	11,3	2,13	32,6
	13	1	0,05	-470,2	0,98	1,44	4,7	25,02	5,63
		2	0,4	-500,0	1,67	1,37	6,6	30,36	7,54
		3	0,05	-496,5	1,69	1,29	5,6	36,21	6,03
		4	0,4	-424,9	0,99	2,83	15,0	7,92	35,3
	15	1	0,02	-514,0	2,57	0,94	14,1	21,87	11,1
		2	0,3	-507,0	2,07	1,04	9,4	26,43	8,14
		3	0,25	-497,9	1,79	1,15	18,8	11,43	8,1
Stal żebrowana	16	1	0,1	-454,3	0,419	3,80	1,8	27,94	5,70
		2	0,1	-453,8	0,43	3,58	2,8	18,61	8,35
		3	0,1	-480,5	0,56	2,91	4,7	14,18	11,4
		4	0,1	-501,5	0,77	2,49	3,7	24,88	7,67
	17	1	0,1	-436,3	0,64	4,23	3,7	20,70	13,0
		2	0,1	-450,6	0,91	3,68	2,8	38,50	8,55
		3	0,1	-429,2	0,55	5,38	1,8	36,53	8,07
		4	0,1	-413,3	0,32	6,69	1,8	21,43	10,0
	18	1	0,1	-507,9	1,65	1,40	0,1	1980	1,16
		2	0,1	-443,9	0,48	3,32	1,8	32,23	4,98
		3	0,1	-483,5	1,50	1,86	1,8	99,76	2,78
		4	0,1	-464,4	1,05	2,19	3,7	34,05	6,76

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Opracowany model makroogniwa korozyjnego dobrze odzwierciedla procesy korozyjne przebiegające na stali zbrojeniowej chronionej zarysowaną otuliną betonową.

Porównując zmierzone wartości potencjałów, w modelowym ogniwie korozyjnym, dla anody i katody (około $E_a = -680$ mV i $E_k = -310$ mV) i wyznaczone w modelu komputerowym ($E_a = -691,8$ mV i $E_k = -406,8$ mV) są do siebie zbliżone. Natomiast obliczone wartości tych potencjałów teoretycznie w pracy [13] znacznie odbiegają od wartości uzyskanych eksperymentalnie w modelowych ogniwach. Różnica ta może być spowodowana nie uwzględnieniem w rozważaniach teoretycznych aktywności jonowej: Ca^{2+} , OH^- , Cl^- , Na^+ i K^+ , które to mają duży wpływ na stężenie i dyfuzję O_2 , a także na ustalanie się równowagi termodynamicznej w roztworach. Ponadto na wartość potencjałów stacjonarnych bardzo znaczny wpływ mają zarówno sposób przygotowania, jak i stan powierzchni metalu.

W modelowym ogniwie korozyjnym wyznaczono doświadczalnie zależności $E = \log I$ i $E = f(R)$, uwzględniając różne stosunki pola powierzchni $A_k:A_a$. Z otrzymanych zależności wynika, że przy stosunku $A_k:A_a < 1$ dominuje kontrola katodowa procesów korozyjnych, natomiast przy $A_k:A_a > 1$ występuje mieszana kontrola procesu korozyjnego katodowo-anodowa. Zwiększanie powyżej 5 stosunku pola powierzchni anody do katody, lub katody do anody, nie wpływało na szybkość procesów korozyjnych.

We wszystkich zarysowanych elementach żelbetowych wartości potencjałów oraz parametry charakteryzujące proces korozyjny wyznaczone na podstawie pomiarów potencjodynamicznych i impedancyjnych (EIS), wskazują na występowanie odcinków anodowych wokół rysy oraz odcinków katodowych na pozostałych powierzchniach zbrojenia.

Pomiary rozkładu potencjału oraz badania potencjodynamiczne i impedancyjne (EIS) przeprowadzone na elementach żelbetowych wskazują na rozwój w czasie procesów korozyjnych, pod wpływem okresowego nawilżania i suszenia w 3,1% roztworem NaCl w temperaturze otoczenia.

Badania polaryzacji zbrojenia wykazały, że zarysowanie otulenia betonowego pod wpływem obciążeń mechanicznych spowodowało zwiększenie szybkości korozji

wkładek. W elementach zarysowanych w czterech lub trzech miejscach stwierdzono obniżenie potencjału o 145 mV oraz zwiększenie ponad 20. krotne gęstości prądu korozyjnego w porównaniu z wielkościami wyznaczonymi dla belki niezarysowanej.

Porównując wyniki pomiarów polaryzacji zbrojenia nie stwierdzono występowania zależności między wartościami potencjału korozyjnego E_{corr} , oporu polaryzacji R_p i gęstości prądu korozyjnego i_{corr} , a szerokością rozwarcia rysy. Odnotowano przypadki, gdy w cienkich rysach o rozwarości np. 0,05 mm gęstości prądu korozyjnego była większa od gęstości prądu korozyjnego określonego w rysach szerokich, np. o rozwarości 0,5 mm.

Po odkuciu otulenia stwierdzono wyraźne mniejsze wymiary obszarów skorodowanych na powierzchni stali żebrowanej, niż na powierzchni stali gładkiej podobnych elementów. Powodem ograniczenia zasięgu korozji może być większa przyczepność otuliny do powierzchni zbrojenia, zapobiegająca procesowi depasywacji większego obszaru pręta stalowego.

Wyniki badań potwierdziły wnioski przedstawione przez K. Suzuki, S. Praparnatanorn, H. Tamura o „sumowaniu” się procesów korozyjnych przebiegających w rysach znajdujących się blisko siebie oraz lokalizacji w jednej z rys procesów korozyjnych intensywniejszych od procesów zachodzących w pozostałych rysach danego elementu.

Z przeprowadzonych badań wynika, że największymi źródłami błędów w pomiarach elektrochemicznych wykonanych na elementach żelbetowych jest nieznana powierzchnia obszaru anodowego badanego pręta oraz duży opór otuliny. Zazwyczaj powierzchnia uwzględniana w obliczeniach jest znacznie większa niż rzeczywisty obszar aktywny, stąd otrzymane wartości szybkości korozji są niedoszacowane.

Przeprowadzone badania pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

1. Opracowany model w sposób przybliżony opisuje procesy korozyjne przebiegające na stali zbrojeniowej chronionej zarysowaną otuliną betonową, co potwierdza weryfikacja doświadczalna.
2. Szybkość procesów korozyjnych w modelowym ogniwie korozyjnym przebiega pod kontrolą katodową, przy stosunku pola powierzchni $A_k:A_a < 1$, natomiast przy $A_k:A_a > 1$ występuje mieszana kontrola procesu korozyjnego katodowo-anodowa.

Zwiększanie powyżej 5 stosunku pola powierzchni anody do katody, lub katody do anody, nie wpływała na szybkość procesów korozyjnych.

3. Badania nie potwierdziły zależności między szerokością rozwarcia rys otulenia betonowego a szybkością procesu korozyjnego stali zbrojeniowej.
4. Wyniki badań potwierdziły wnioski przedstawione przez K. Suzuki, S. Praparnatanorn, H. Tamura o „sumowaniu” się procesów korozyjnych przebiegających w rysach znajdujących się blisko siebie oraz lokalizacji w jednej z rys procesów korozyjnych intensywniejszych od procesów zachodzących w pozostałych rysach danego elementu

Spis literatury

1. Juchniewicz R.: *Strategia zwalczania korozji w gospodarce polskiej*. Ochrona przed Korozją, 2, 1997, str. 30-35
2. Starosolski W., *Konstrukcje żelbetowe*, PWN Warszawa 1996
3. Wieczorek G., *Wpływ chlorków na korozję stali zbrojeniowej w betonie*, Wydawnictwo ITB, Warszawa 1993
4. Danielecki W., *Wpływ rys w betonie na korozję w świetle obserwacji i badań światowych, analiza badań i czynniki mające wpływ na korozję zbrojenia*, Warszawa 1971, str. 7-36
5. ASTM Standard C 876-87 *Test Method for Half-Cell Potentials Un-aerated Reinforcing Steel in Concrete* (Philadelphia, PA: ASTM, 1989)
6. Elsener B., Böhni H., *Potential Mapping and Corrosion of Steel in Concrete*, ASTM STP 1065, N.S. Berke, V. Chaker and D. Whiting, Eds. American Society for Testing and Materials Philadelphia, 1990, pp.143-156.
7. Glass G.K., Page C.L., Short N.R., Yu S.W., *An Investigation of Galvanostatic Transient Methods used to Monitor the Corrosion Rate of Steel in Concrete*. Corr. Science, 35, 5-8, 1992, pp.1585-1592.
8. Hope B.B., Page J.A., Ip A.K.C., *Corrosion Rates of Steel in Concrete*. Cement and Concrete Res., 16, 1986, pp.771-781
9. Flis J., Sabol S., Pickering H.W., Seghal A., Osseo-Asare K., Cady P.D., *Electrochemical measurements of concrete bridges for evaluation of reinforcement corrosion rate*. Corrosion, 49, 7, pp.601-613.
10. Vrabeckij G.P., *Issledowanie korrozji armatury w treščinach żelzobetona*. Beton i Żelzobeton, 11, 1964, str. 507-510.
11. Moskvina M.V., Aleksiejew S.N., Novogrodzkij W.J., *Gidrotechničeskoje Stroitelstvo*, 2, 1965, str. 20-26.
12. Ścisławski Z., *Korozja i ochrona zbrojenia*, Arkady, Warszawa 1981.
13. Zybura A., *Degradacja żelbetu w warunkach korozyjnych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, z. 72, Gliwice 1990.
14. Ścisławski Z., *Trwałość konstrukcji budowlanych*, WITB Warszawa 1995.
15. ENN-1992-1-1. EC 2-1-1. Design of Concrete Structures. General Rules and Rules for Buildings.
16. Bulletin d'Information CEB no 182, 1989 r. Durable Concrete Structures. CEB design guide.
17. Aleksiejew S.N. *Korozja i zaščita armatury w betonie*. Gosudarstvennoje Izdatelstvo Literatury po Stroitelstvu, Moskwa, 1962.
18. Moskvina M.V., Aleksiejew S.N., Verbeckij G.P., Novogrodzkij V.I., *Treščiny w żelzobetonie i korrozija armatury*, Strojizdat, Moskwa 1971.
19. Neville A.M., *Własności betonu*, Arkady, Warszawa 1977 (tłum. z j. angielskiego).
20. Babuszkin, *Fizyko-chimičeskie processy korozji betona i żelzobetona*, Strojizdat, Moskwa 1968
21. Kurdowski W., *Chemia cementu*, PWN, Warszawa 1991.
22. Wieczorek G., *Faza ciekła w porach z cementu portlandzkiego bez dodatków o różnej zawartości CaCl₂*. Cement, Wapno, Gips 8, 1988, str.164-168.
23. Hansson C.M., Frelund Th., Markussón I.B., *Cem. and Concrete Res.*, 15, 1985, p.65
24. Lewis D.A., *Copenhagen W.I.*, Corrosion, 15, 7, 1959, p. 382.

25. Wieczorek G., *Progowa zawartość CaCl_2 w betonie wywołująca korozję stali zbrojeniowej*. Cement, Wapno, Gips, 11, 1988, str.233-238.
26. Hansson C.M., *Cement and Concrete Res.*, 14, 1984, p.574
27. Kubik J., Zybura A., *Zmiany naprężeń w konstrukcjach żelbetowych wywołane korozją*. Archiwum Inżynierii Lądowej, 24, 4, 1980, str. 639-656.
28. Kubik J., Zybura A., *Ewolucja zniszczeń korozyjnych i jej wpływ na nośność przekroju żelbetowego*. Archiwum Inżynierii Lądowej, 28, 3-4, 1982, str. 295-309.
29. Kubik J., Zybura A., *Analiza procesów fizykochemicznych związanych z korozją żelbetu*, Archiwum Inżynierii Lądowej T XXVI, 3/1980, str. 481-501.
30. Moskvina B.M., *Korozja Betona*, Moskwa 1952
31. PN-80/B-01800 *Antykorozyjne zabezpieczenia w budownictwie. Konstrukcje betonowe i żelbetowe. Klasyfikacja i określenie środowisk*.
32. Polak A.F., Ratnov W.B., Gelfman G.N., *Korozja żelazobetonnych konstrukcji zdaniy nieftchimičeskoj promyšlennosti*, Izdatielstvo Litieratury po Stroitelstvu, Moskva 1971.
33. Mayer A., Wierig H.J., Hausmann K., *Karbonatisierung von Schwerbeton*, -Deutscher Ausschuss für Schwerbeton, Berlin, z. 182, 1967.
34. Saetta A.V., Schreflter B.A., Vitaliani R.W., *The Carbonation of Concrete and the mechanism of Moisture, Heat and Carbon Dioxide Flow Through Porous Materials*, Cement and Concrete Res., 23, 1993, pp.4-7.
35. Cahyadi J.K., Uomoto T., *Influence of Environmental Relative Humidity on Carbon of Concrete (Mathematical Modelling)*, Durability of Building Materials and Components, Wyd. Nagataki, Nireki, Tomsawa 1993.
36. Arya C., Buenfeld N.R., Newman J.B., *Assessment of Simple Methods of Determining the Free Chloride Ion Content of Cement Paste*. Cement and Concrete Res., 17, 1987, pp. 6-9.
37. Kayali O.A., Haque M.N., *Chloride Penetration and the Ratio Cl/OH in the Pores of cement Paste*. Cement and Concrete Res. 18, 1988.
38. Hausmann D.A., *Steel Corrosion in Concrete*. Mat. Protection, 1967, pp.36-41
39. Kubicki J., Zybura A., *Wpływ korozji stali zbrojeniowej na trwałość konstrukcji żelbetowych*. Ochrona przed korozją, 6, 1998, str. 154-161.
40. Czarnecki L., Broniewski T., Henning O., *Chemia w budownictwie*, Wydawnictwo ITB, Warszawa 1993
41. Browne R.D., *Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride environments*. Durability of Bulding Materials, 1, 1982, pp.113-125.
42. Poineau: *Origine des pathologies, observations, diagnostic dans les ouvrages d'art*. Annales de l'Institute Technique du Batiment et des Travaux Publics, 523, 1994, pp. 97-124.
43. Wieczorek G., Siemaszko-Lotkowska D., *Wpływ zawartości alkaliów w cemencie portlandzkim na podatność zbrojenia na korozję inicjowaną przez chlorki*. Cement, Wapno, Gips, 6, 1997, str. 228-232
44. Sobczyk A., Kiszka A., *Chemia fizyczna dla przyrodników*, PWN Warszawa 1981
45. Mangat P.S., Gurusamy K., *Chloride Diffusion in Steel Fibre Reinforced Concrete Containing PFA*. Cement and Concrete Res., 17, 1987, p.4
46. Bamforth P.B., Pocock D.C., *Minimising the Rise of Chloride Induced Corrosion by Selection of Congreting Materials*, Congress on Corrosion of Reinforcement in Concrete, Elsevier Applied Science, London 1989.

47. PN-84/B-03264 *Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowe.*
48. Kubicki J., *Podstawowe procesy korozji metali, ochrona przed korozją*, Poradnik WKŁ, Warszawa 1986.
49. Bohdanowicz W., *Ochrona katodowa zbrojenia betonu*, Mat. Konf. X Konferencji „KONTRA '96” Trwałość Budowli i Ochrona przed Korozją, Zakopane 1996, str. 7-21.
50. Uhlig H.H., *Korozja i jej zapobieganie*, WNT Warszawa 1976.
51. Shreir L.L., *Korozja metali i stopów*, WNT Warszawa 1966.
52. Suzuki K., Ohno Y., Parapanthanatarn S., Tamura H., *Mechanism of Steel Corrosion in Cracked Concrete*. Corrosion of Reinforcement in Concrete, C.L. Page, K.W.J. Treadaway, P.B. Bamforth, Published for the Society of Chemical Industry by Elsevier Applied Science, London - New York 1990, pp.12-28.
53. Andrade C., Maribona I.R., Feliu S., Gonzalez J.A., Feliu Jr.S., *The Effect of Makrocells Between Active and Passive Areas of Steel Reinforcements*. Corr. Science, 33, 2, 1992, pp.237-249.
54. Sagüés A.A., Kranc S.C., *Computer Modelling of Effect of Corrosion Macrocells on Measurement of Corrosion Rates of Reinforcing Steel in Concrete*. Techniques to Assess the Corrosion Activity of Steel Reinforced Concrete Structures, ASTM STP 1276, Neal S. Berke, Edward Escalante, Charles Nmai, David Whiting, Eds., American Society for Testing and Materials, 1996, pp. 58-73.
55. Sagüés A.A., *Electrochemical Impedance of Corrosion Macrocells on Reinforcing Steel in Concrete*. Corrosion'90, April 23-27, 1990 paper number 132.
56. Falewicz P., Klakočar-Ciepac M., Kubicki J., Kuczkowska S., Zybura A., *Modelowanie i eksperymentalna weryfikacja modelu makroogniwa korozyjnego w żelbecie*. Mat. Ogólnopolskiego Symp. Nauk.-Techn. "Nowe osiągnięcia w Badaniach i Inżynierii Korozyjnej" 20-22 listopada 1996 Poraj, str.125-129.
57. Menzel K., *Karbonatisierungszellen - Ein Beitrag zur Korrosion von Stahl in Karbonatisiertem Beton*, Werks. und Korr. 39, 1988, pp.123-129.
58. Andrade C., Rz-Maribona I., Feliu S., Gonzalez J.A., *Macrocell Versus Microcell Corrosion of Reinforcements Placed in Parallel*, Corrosion 92, paper No 194.
59. Suzuki K., Ohno Y., Prapanhtanatron S., Tamura H., *Some Phenomena of Macrocell Corrosion*. Konf. Corrosion of Reinforcement in Concrete, 21-24.05.1990, Wishaw, Warwickshire U.
60. Kranc S.C., Sagüés A.A., *Polarization current distribution and Electrochemical Impedance Response of Reinforced Concrete when Using Guard Ring Electrodes*. Electrochemical Acta, 38, 14, 1993, pp.2055-2061.
61. Siwiec B., Królikowski A., *Impedancyjne badanie korozji stali zbrojeniowej w skarbonizowanym betonie. Cz. 1 Ochrona przed Korozją*, 2, 1995, str. 36-40.
62. Rodriguez P., Ramirez E., Gonzalez J.A., *Methods for studying Corrosion in Reinforced Concrete*. Magazine of Concrete Research 1994, 46, 167, June, pp. 81-90.
63. Bondar V.A., *Promyšlennoje stroitelsvo i inžynerijne sooruzhenija*. 3-4, 1992, pp. 35-36.
64. Gonzalez J.A., Molina A., Escudero M.L., Andrade C., *Errors in the Electrochemical Evaluation of Very Small Corrosion Rates -II. Other*

- Electrochemical Techniques Applied to Corrosion of Steel in Concrete*. Corr. Science, 25, 7, 1985, pp.519-530.
65. Kranc S.C., Sagüés A.A., *Calculation of Counter Electrode Polarization Effects on the Electrochemical Impedance Response of Steel in Concrete*. Authorized reprint from Standard Technical Publication 1188.
66. Sagüés A.A., Kranc S.C., Moreno E.I., *The Time-Domain Response of a Corroding System with constant Phase Angle Interfacial Component: Application to Steel in Concrete*. Corr. Science, 37, 7, 1995, pp.1097-1113.
67. Kranc S.C., Sagüés A.A., *Computation of reinforcing Steel Corrosion Distribution in Concrete Marina Bridge Substructures*. Corrosion, 50, 1, 1994, pp.50-61.
68. Sagüés A.A., Kranc S.C., *On the Determination of Polarization Diagrams of Reinforcing Steel in Concrete.*, Corr. Science, 48, 8, 1992,
69. Sagüés A.A., Kranc S.C., *Scan Rate Effects on the Determination of Polarization Diagrams: Application to Steel in Concrete*. Proceedings, I, paper 94043, 1994
70. Sagüés A.A., Kranc S.C., Moreno I.E., *Evaluation of Electrochemical Impedance with Constant Phase Angle Component from the Galvanostatic Step Response of Steel in Concrete*. Electrochemical Acta, 41, 7/8, 1996, pp.1239-1243.
71. Kranc S.C., Sagüés A.A., *Computation of Corrosion Macrocell Current Distribution and Electrochemical Impedance of Reinforcing Steel in Concrete*. Computer Modelling in Corrosion, ASTM STP 1154, R.S. Minn, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992, pp.95-112.
72. Keddarn M., Novoa X.R., Soler L., Andrade C., Takenouth H., *An Equivalent Electrical Circuit of Macrocell Activity in Facing Electrodes Embedded in Cement Mortar*. Corr. Science, 36, 7, 1994, pp.1155-1166.
73. Zybura A., *Mechanizmy elektrochemiczne korozji zbrojenia w żelbecie*. 4 Konferencja Naukowo-Techniczna „Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce”, Łódź 1993, str.315-322.
74. Zybura A., *Metody oceny zagrożenia korozyjnego konstrukcji żelbetowych*, XIII Ogólnopolska Konferencja „Warsztat pracy projektanta konstrukcji”, Ustroń 1998, tom 1 referaty, str.345-360.
75. IN-4500 Polarization Resistance Monitor, Cortest Instruments Ltd., 1 Nelson Road Bishop's Stortford Herts Cm233LH
76. Falewicz P., Klakočar-Ciepac M., Kuczkowska S., Zybura A., *Próba modelowania korozji stali zbrojeniowej w betonie z rysą*. X Konferencja Naukowo-Techniczna KONTRA'96, Zakopane 1996, str.81-88.
77. Gowers K., Millarol S.G., *On - site linear polarization resistance mapping of reinforced concrete structures*. Corr. Science, 35, 5-8, 1993, pp.1593-1600.
78. Tullmin M.A.A., Hansson C.M., Roberge P.R., *Electrochemical techniques for measuring reinforcing steel corrosion*.
<http://www.intercorr.com/intercorr/techsess/papers/session1/abstracts/tullmin.html>
79. Gina R., Proverbio E., Rodhini G.M., *A Study of reinforcement behaviour in Concrete Structures using electrochemical techniques.*, Corr. Science, 35, 5-8, 1993, pp.1579-1584.

80. Hachani L., Fiaud C., Triki E., Raharinaivo A., *Characterisation of steel/concrete interface by electrochemical impedance spectroscopy*. British Corr. Journal, 29, 2., 1994, str.122-127.
81. Vilche J.R., Gassa L.M., Levean R.F., Barbosa M.R., Traversa L.P., Eperjesi L., *Corrosion behaviour of reinforcing steel in concrete*. The European Corrosion Congress „Erocorr'97”, Trondheim, Norway 22-25 Sept., 1., 1997, pp.505-510.
82. Królikowski A., *Zastosowanie pomiarów impedancyjnych w badaniach korozyjnych*. Materiały XVIII Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Nauka i praktyka w walce z korozją.” Poraj 1992, str.53-61.
83. Sagoe-Crensil K.K., Glasser F.P., Irvine J.T.S., *Electochemical characteristic of reinforced concrete corrosion as determined by impedance spectroscopy*. Br. Corr. Journal, 27, 2, 1992, pp.113-118.
84. Persidok P., Królikowski A., Czechowska E., *Impedancyjne badania procesu korozji stali w roztworach modelujących środowisko betonu i w zaprawie cementowej*. Materiały Konf. Seminarium Naukowego „Metody elektrochemiczne w badaniach korozyjnych.” Karpacz 1991, poz. 6
85. Mieluch J., Warsza Z., *Impedancyjne metody badań elektrochemicznych. Cz.1.* I Szkoła Korozji „Zastosowanie metody impedancji w elektrochemii i Korozji. Szklarska Poręba 1989, Inst. Techn. Nieorg. I NM, Polski Komitet N-T d/s Ochrony przed korozją ZG NOT, str.4-15.
86. Mieluch J., *Impedancyjne metody badań elektrochemicznych. Cz.2. Obwody zastępcze układów elektrochemicznych* I Szkoła Korozji „Zastosowanie metody impedancji w elektrochemii i Korozji.” Szklarska Poręba 1989, Inst. Techn. Nieorg. I NM, Polski Komitet N-T d/s Ochrony przed korozją ZG NOT, str.16-50.
87. Darowicki K., Polkowska Ż., Bordziłowski J., *Elektryczny schemat zastępczy w badaniach impedancyjnych*. I Szkoła Korozji „Zastosowanie metody impedancji w elektrochemii i Korozji.” Szklarska Poręba 1989, Inst. Techn. Nieorg. I NM, Polski Komitet N-T d/s Ochrony przed korozją ZG NOT, str. 56-66
88. Jütner K., *Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of corrosion process on inhomogeneous surface*. Electrochimica Acta, 35, 10, 1990, pp.1501-1508.
89. Gowers K.R., Millard S.G., Gill J.S., Gill R.P., *Programmable linear polarisation meter for determination of corrosion rate of reinforcement in concrete structures*. Br. Corr. Journal, , 29, 1., 1994, pp.25-32.
90. Królikowski A., *Nowoczesne metody badania odporności korozyjnej powłok ochronnych*. Powłoki ochronne NR 5/6 (87-88), 1987, str.2-8.
91. Szauer T., Bordziłowski J., Darowicki K., *Ocena mechanizmu działania i własności ochronnych powłok niemetalicznych w oparciu o pomiary impedancyjne*. Ochrona przed Korozją, 2, 1982, str.35-41.
92. Sadkowski A., Flis J., *„Zastosowanie pomiarów impedancyjnych w badaniach korozyjnych.”* Ochrona przed korozją, 8, 1980, str.210-217.
93. Digital Half-Cell Test Kit DHC 04 For Identifying the Presence of Corrosion in Rebars-CMT Instruments Limited, Raynsway, Derby, DE 21, 7BB.
94. CANIN Corrosion Analysing Instrument, PROCER S.A., Riesbachstrasse 57, CH-8034 Zürich.
95. Digital Restivity Array Meter DRAM 02, Operating Instructions, CMT Instruments Limited, Raynsway, Derby, DE 21, 7BB.
96. Flis J., *Ocena szybkości korozji stalowego zbrojenia metodą elektrochemiczną* Ochrona przed korozją, 8, 1996, str.201-205.

97. Magnat P.S., Molloy B.T., *Factors influencing chloride - induced corrosion of reinforcement in concrete*. Materials and Structures, 25, 1992, pp.404-411.
98. Królikowski A., Kołodziejczyk K., *Problemy pomiarowe przy rejestracji krzywych polaryzacji*. Konferencja naukowo-techniczna „Współczesne metody badań i ochrony materiałów przed korozją. Szklarska - Poręba, 1998, str.149-154
99. Andrade C., Alonso C., *Corrosion rate monitoring in the laboratory and on site.*, Construction and Building Materials, 10, 5, 1996, pp.315-328.
100. Nurek A., Zybura A., *Określenie postępu korozji zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych na podstawie badań polaryzacyjnych*, XVI Konferencja naukowo-Techniczna „Beton i prefabrykacja”, Jadwisin 1998, str.505-512.
101. Suzuki M., Kanno K., Sato Y., *An application of the coulstatic methods to corrosion rate measurements*. Werkstoffe und Korrosion 31, 1980, pp364-370.
102. Rodriguez P., Gonzalez J.A., *Use of the coulstatic methods for measuring corrosion rates of embedded metal in concrete*. Magazine of Concrete Research, 46, 167, 1994, pp.91-97
103. Hardon R.G., Lambert P., Page C.L., *Relationship between electrochemical noise and corrosion rate of steel in salt contaminated concrete*. Br. Corr. J., 23, 4, 1988, pp.225-228.
104. Praca zbiorowa pod red. Głuszka J. i Danielewskiego M., *Ćwiczenia rachunkowe z korozji i ochrony przed korozją*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1990
105. Sagoe-Crensil K.K., Glasser F.P., Irvine J.T.S., *Electochemical characteristic of reinforced concrete corrosion as determined by impedance spectroscopy*. Br. Corr. Journal, 27, 2, 1992, pp.113-118.
106. Wytyczne przeprowadzenia badań odporności korozyjnej w elementach żelbetowych. Ministerstwo Budownictwa i Przemysłu Materiałów Budowlanych ITB. Warszawa 1972
107. Hanson C.M., *Comments on electrochemical measurements of the rate of corrosion of steel in concrete*. Cement and Concrete Reaserch, 14, 1984, pp. 574-584.
108. Medgyesi I., Berecz J., Jantai A., Kelemen M., *Contrôle de la corrosion des armatures dans les structures en beton armé*. Bull. Liason Labo., Per Ch. T. 158, 1988, pp.29-38.
109. Wawrusiewicz A., *Elektrochemiczne metody oceny stanu stali zbrojeniowej w konstrukcjach betonowych*. XXXVII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Krynica 1991, str.69-84.
110. Polska Norma PN-75/B-06250 *Beton zwykły*.



ZAŁĄCZNIKI

do pracy doktorskiej pt.

„DOŚWIADCZALNE MODELOWANIE MAKROOGNIWA KOROZYJNEGO W ŻELBECIE”

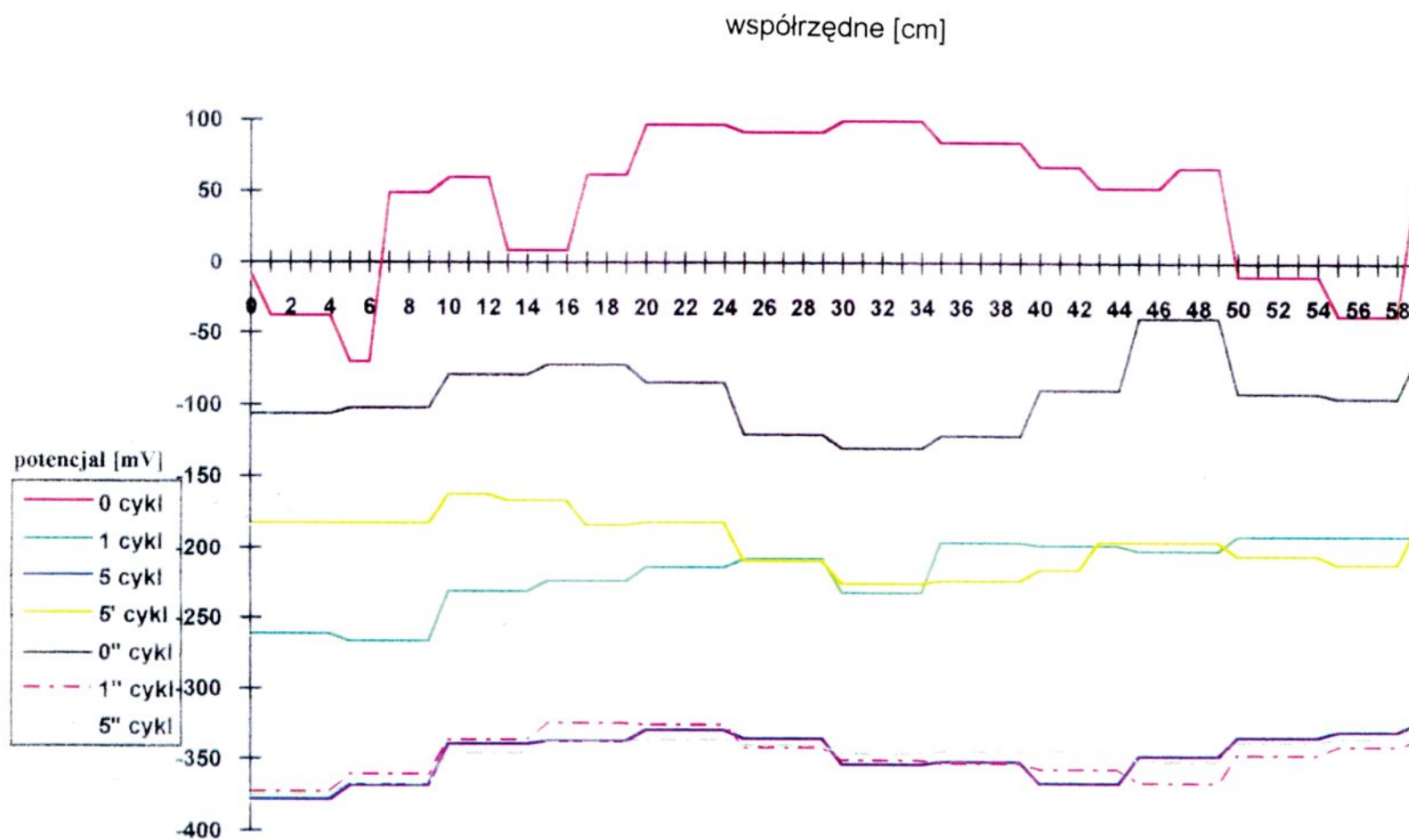
Załącznik nr 1. - Badanie rozkładu potencjału

Załącznik nr 2. - Badania potencjodynamiczne

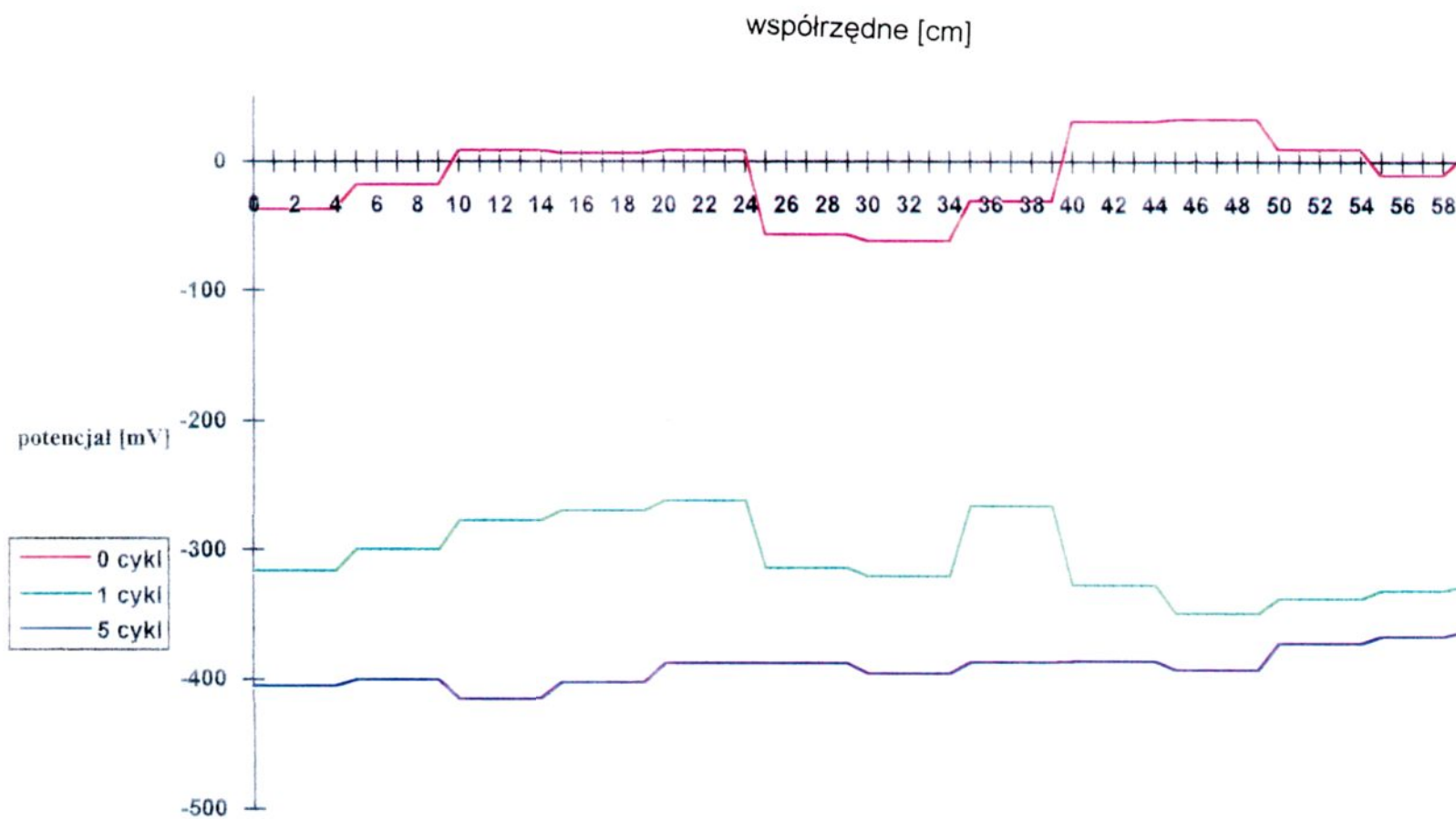
Załącznik nr 3. - Badania metodą spektroskopii impedancyjnej

ZAŁĄCZNIK Nr 1
Rozkłady potencjałów wzdłuż linii pomiarowych
w elementach żelbetowych Nr 0 ÷ 18

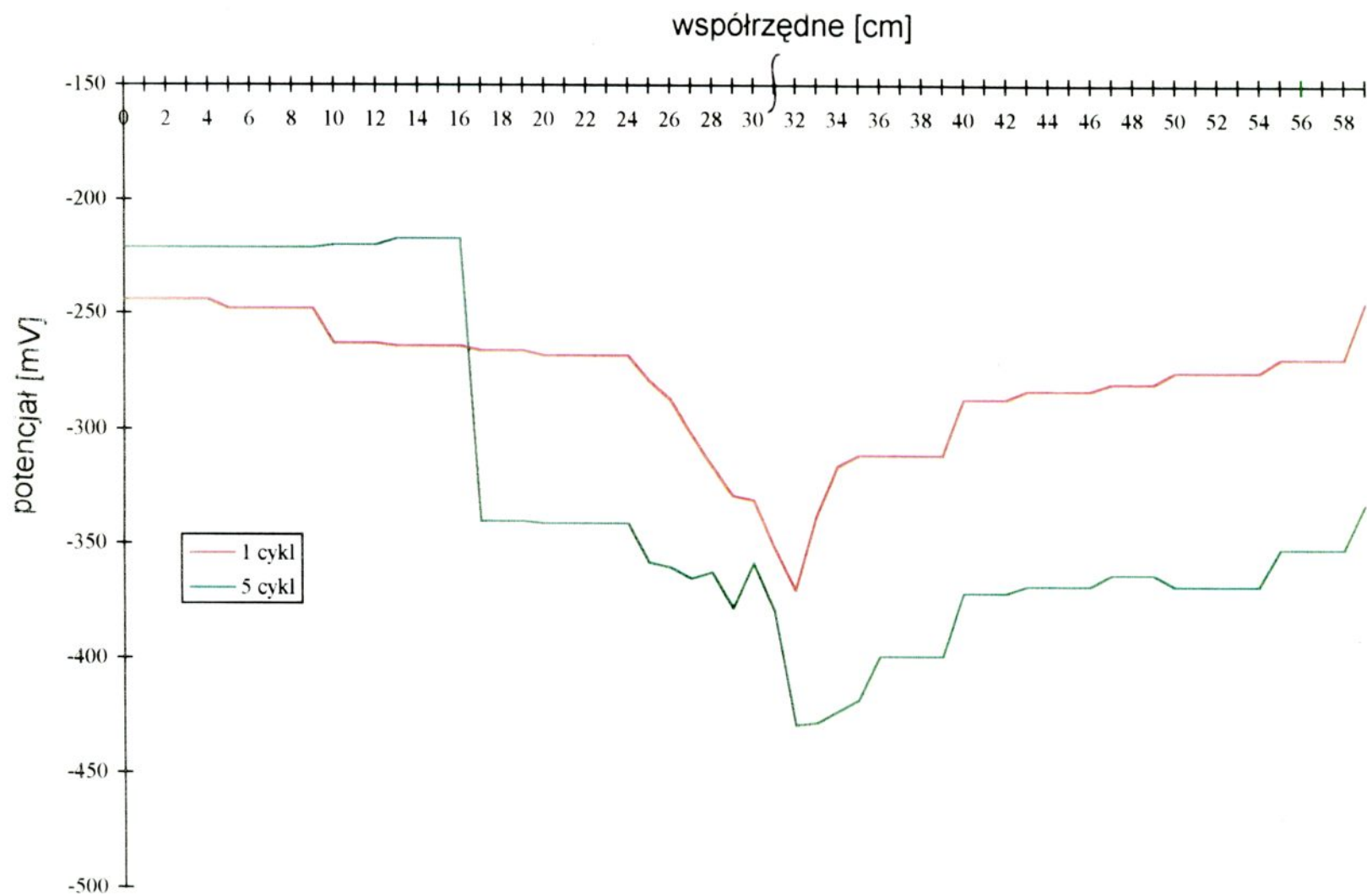




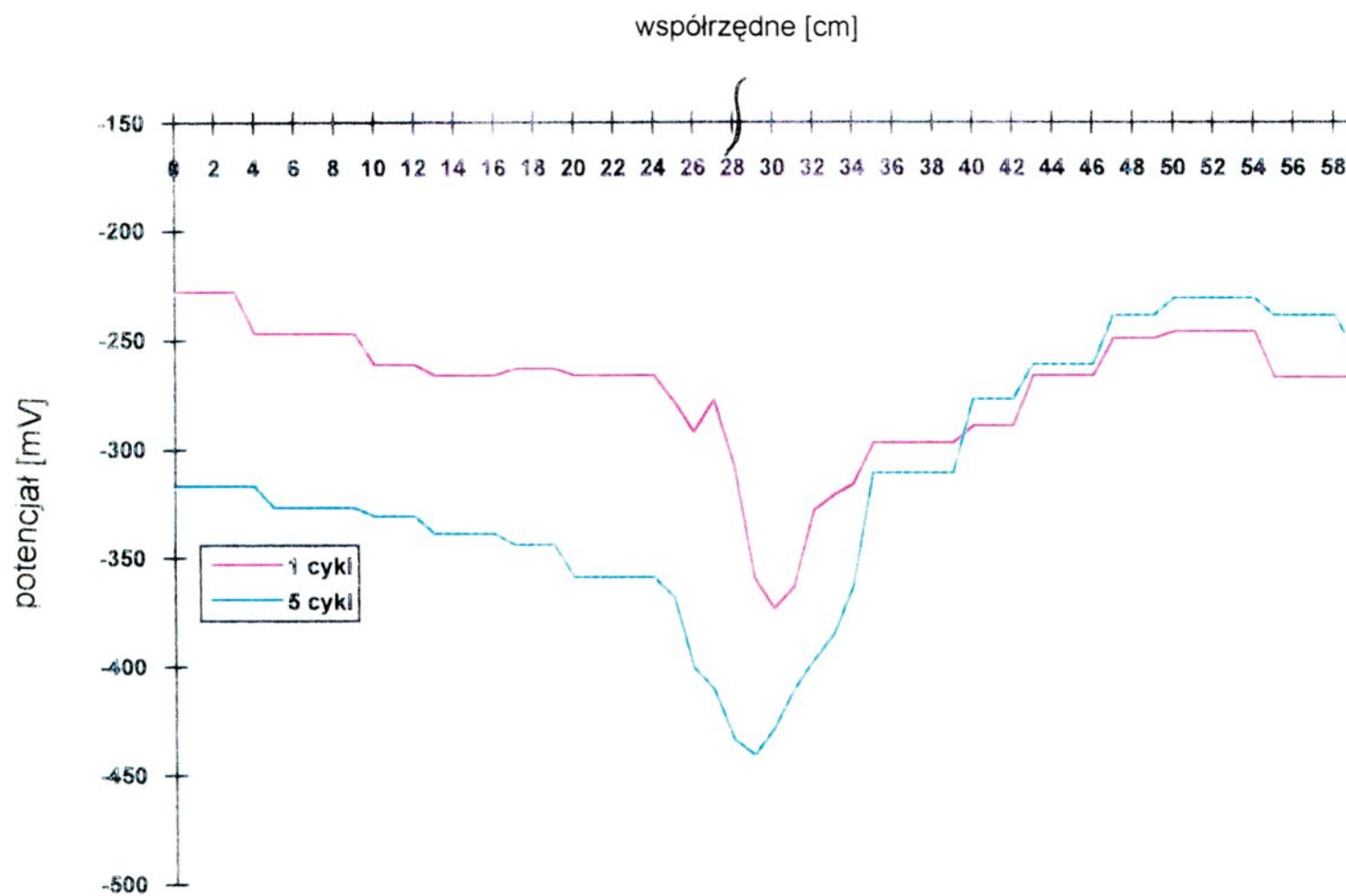
z.1.1. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej elementu nieobciążonego Nr 0, w 1., 2. i 3. próbie.



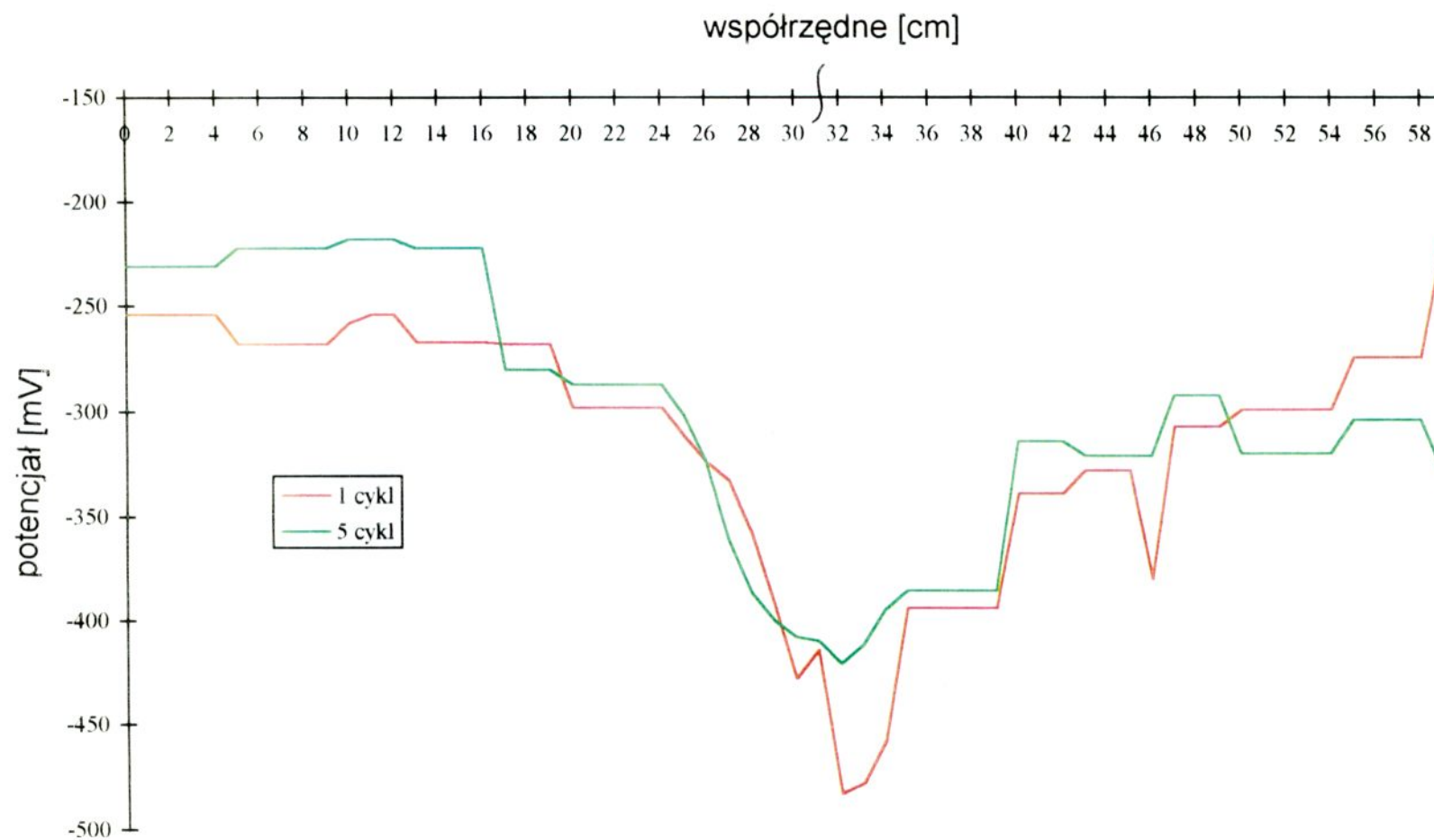
z.1.2. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej elementu nieobciążonego Nr 0, w 4. próbie.



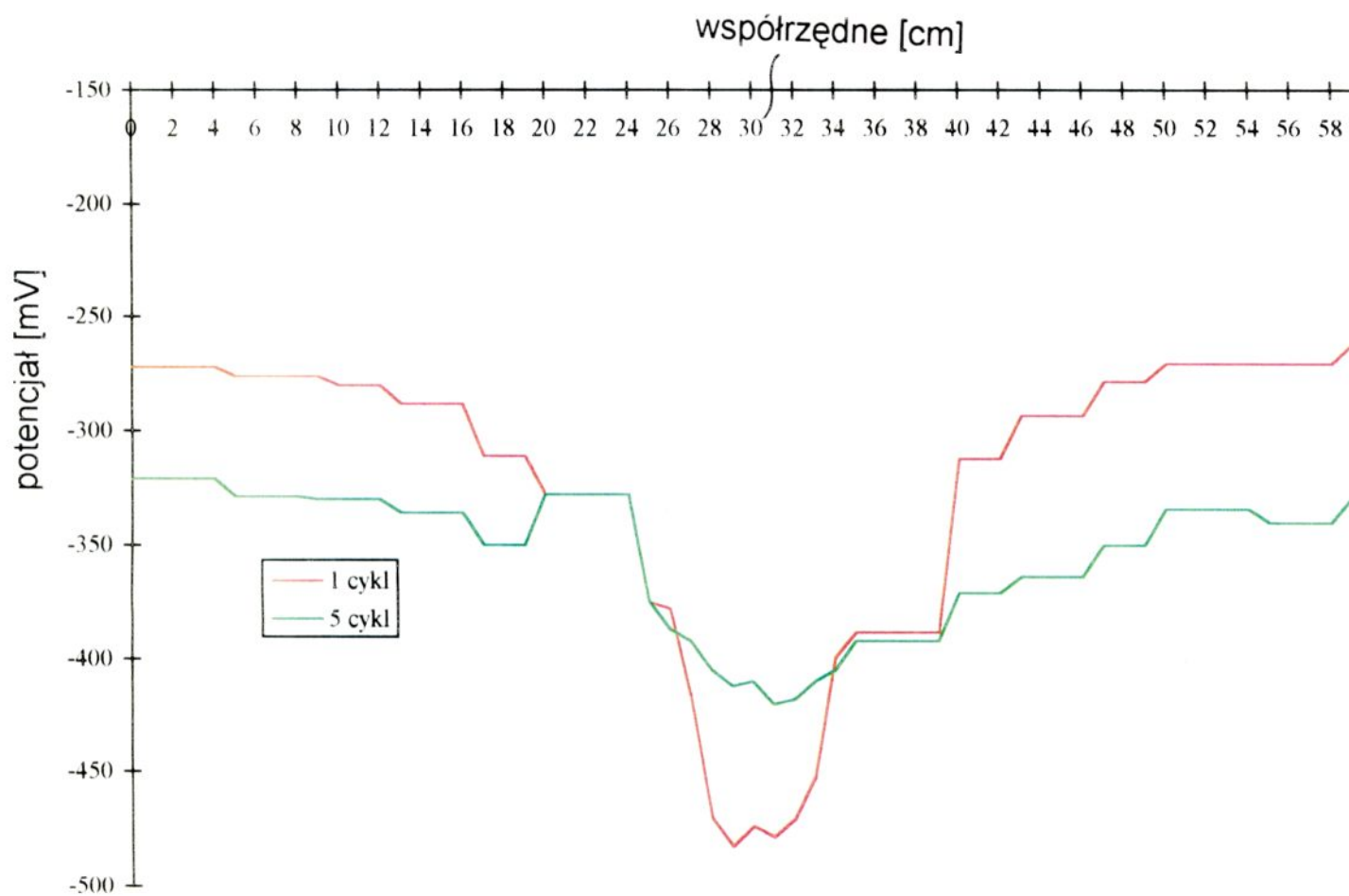
z. 1.3. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 1 ($a_r=1,0$ mm), w 1 próbie.



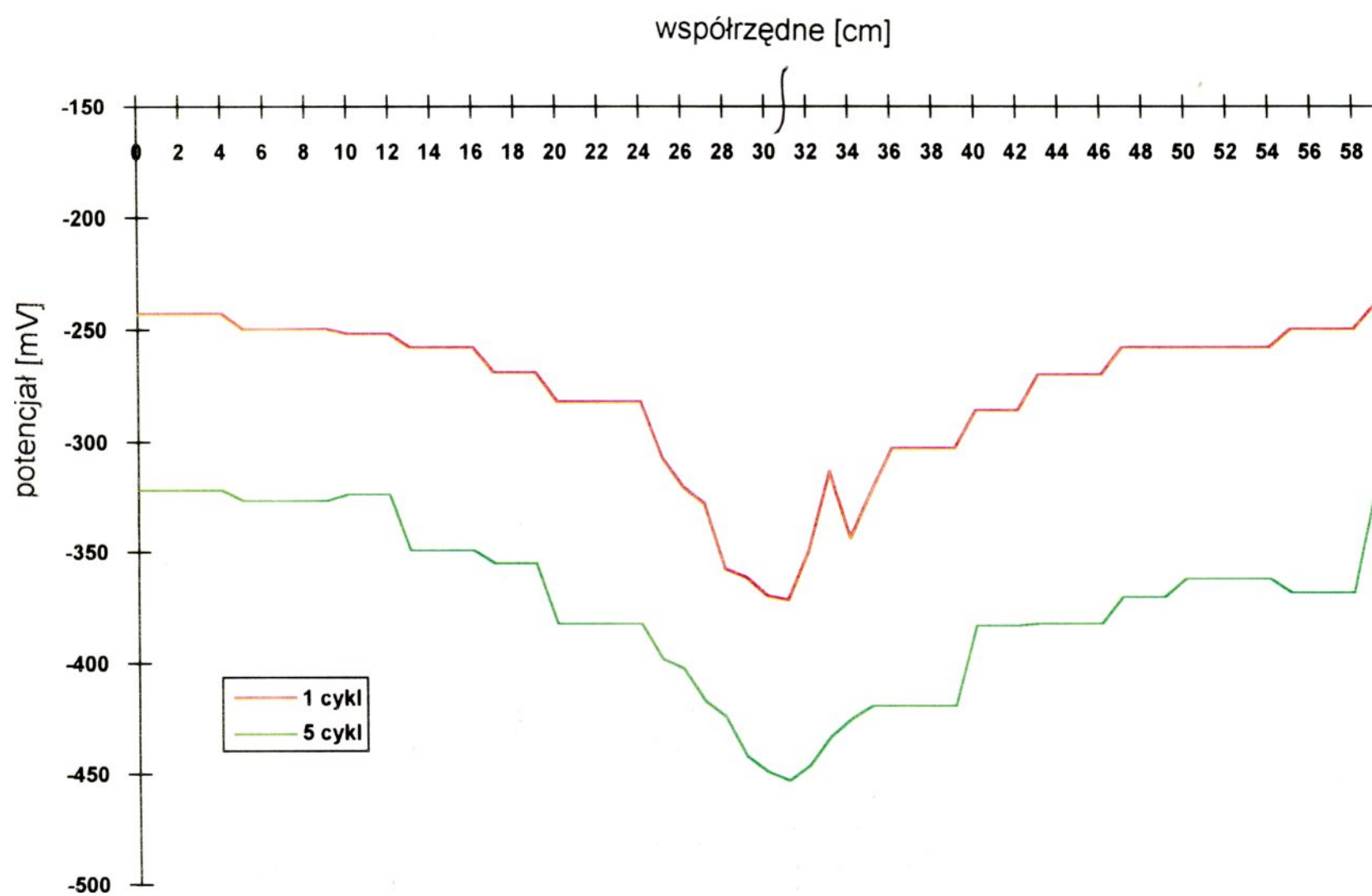
z. 1.4. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 2 ($a_r=0,5$ mm), w 1 próbie.



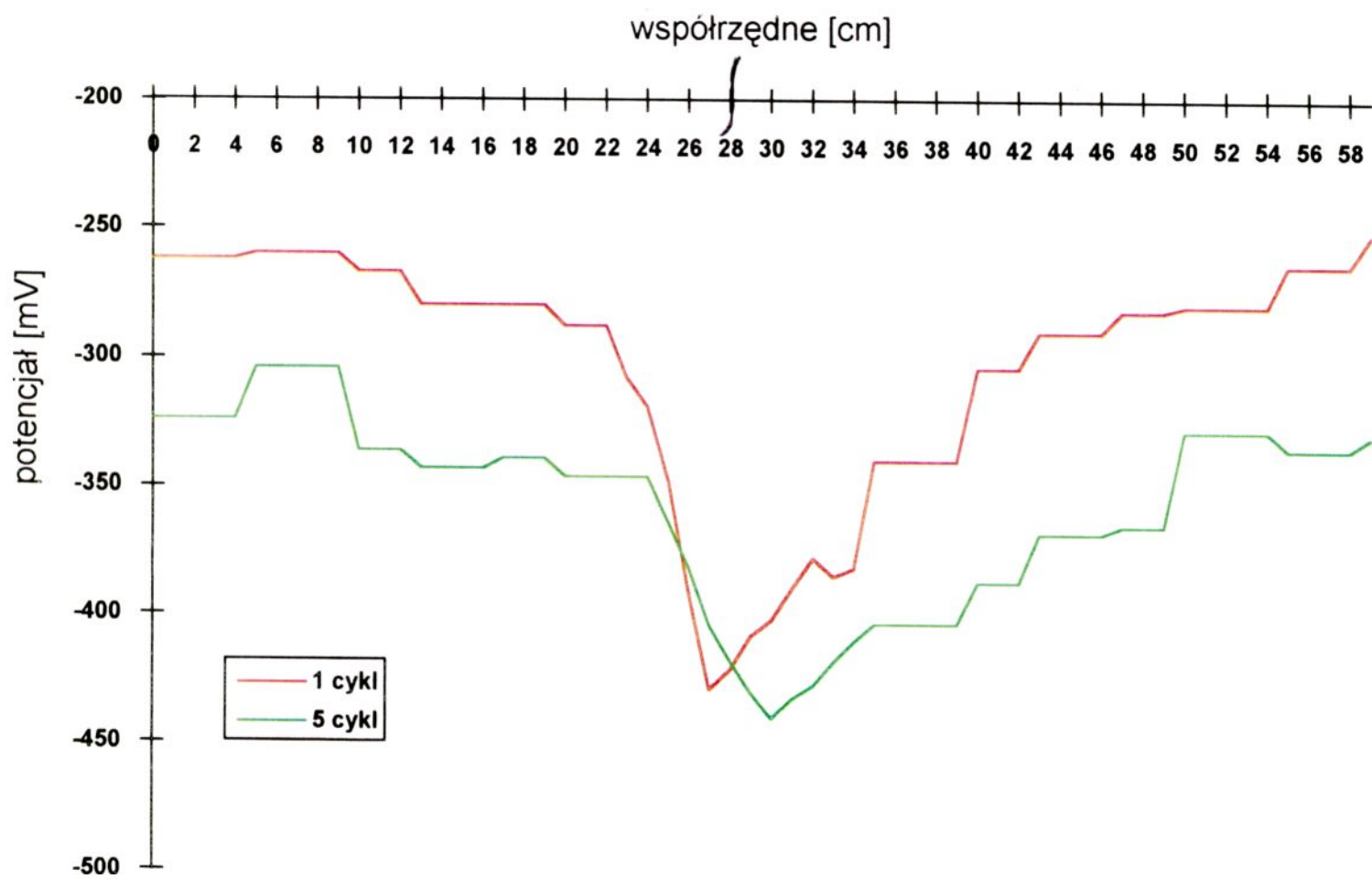
z 1.5. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 3 ($a_r=0,4$ mm), w 1. próbie.



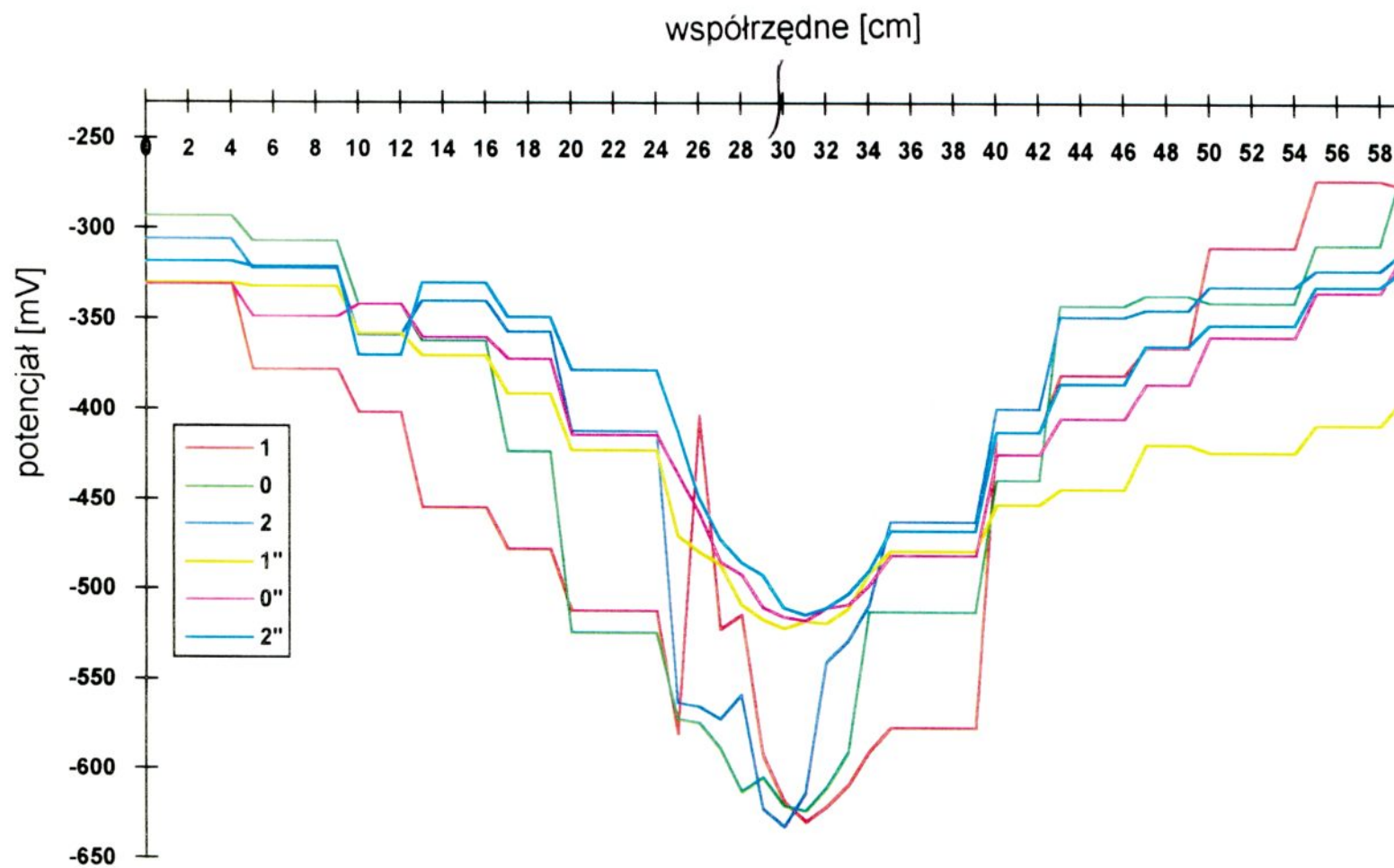
z.1.6. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 4 ($a_r=0,9$ mm), w 1 próbie.



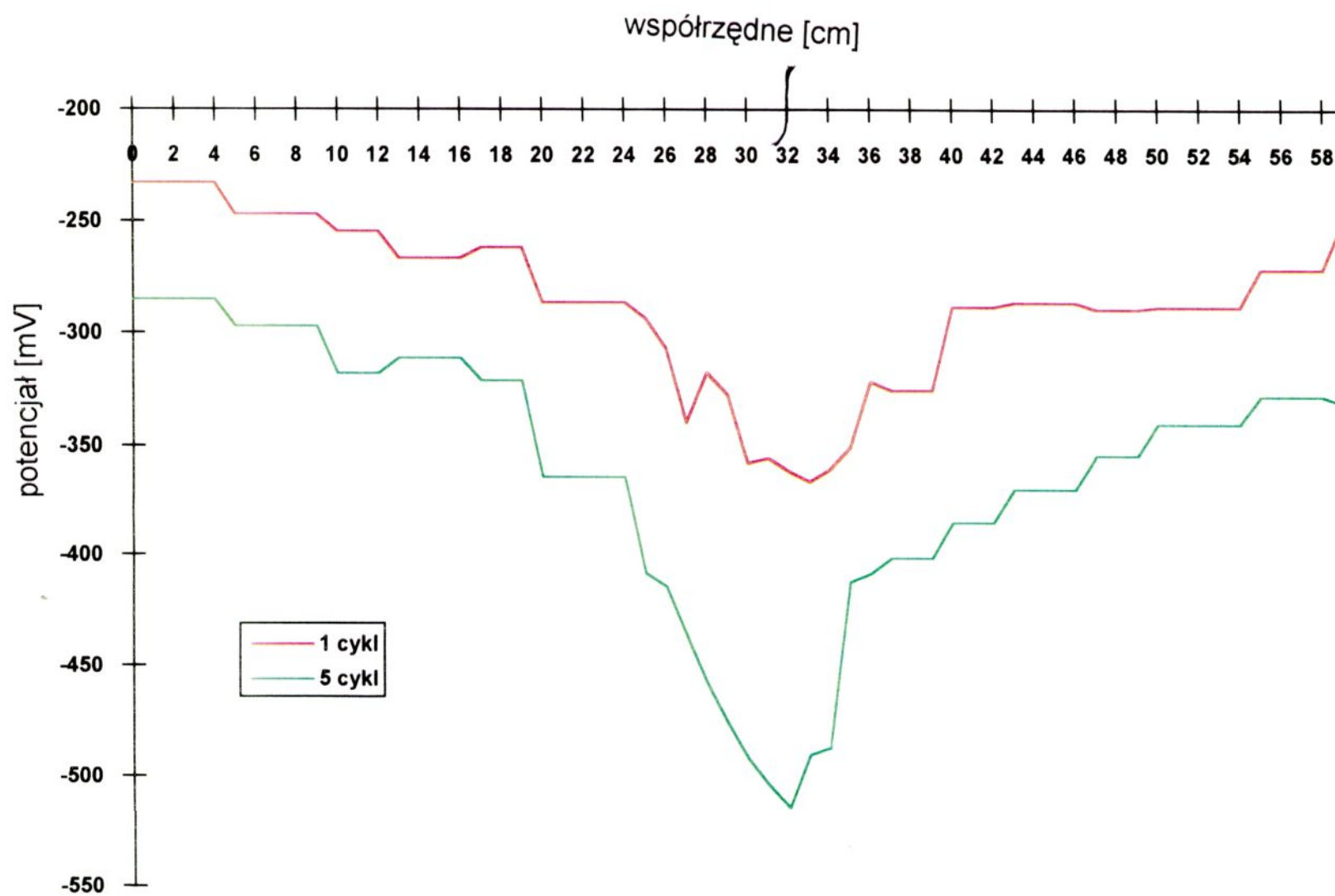
z.1.7. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 5 ($a_r=0,3$ mm), w 1. próbie.



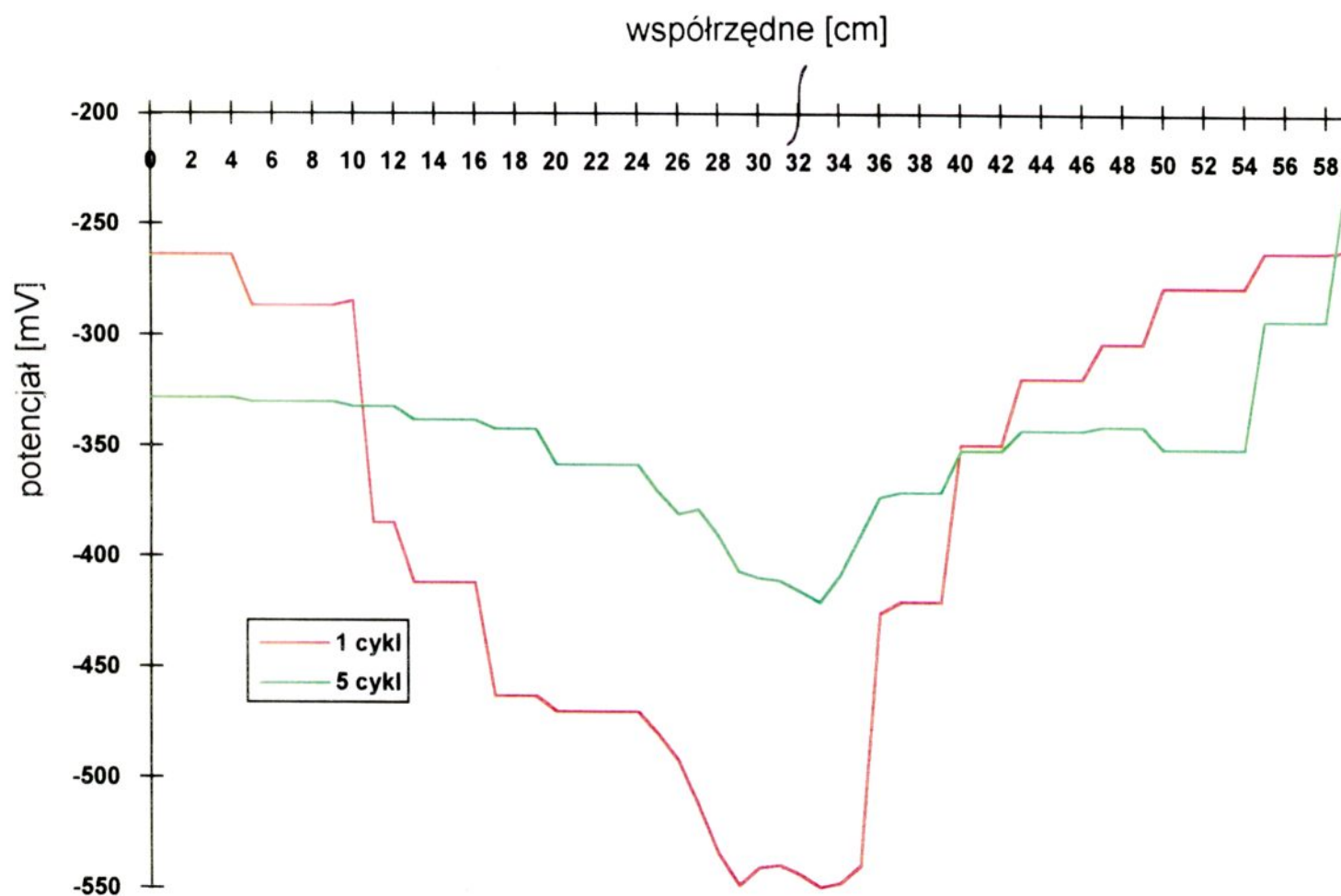
z.1.8. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 6 ($a_r \approx 0,8$ mm), w 1. próbie.



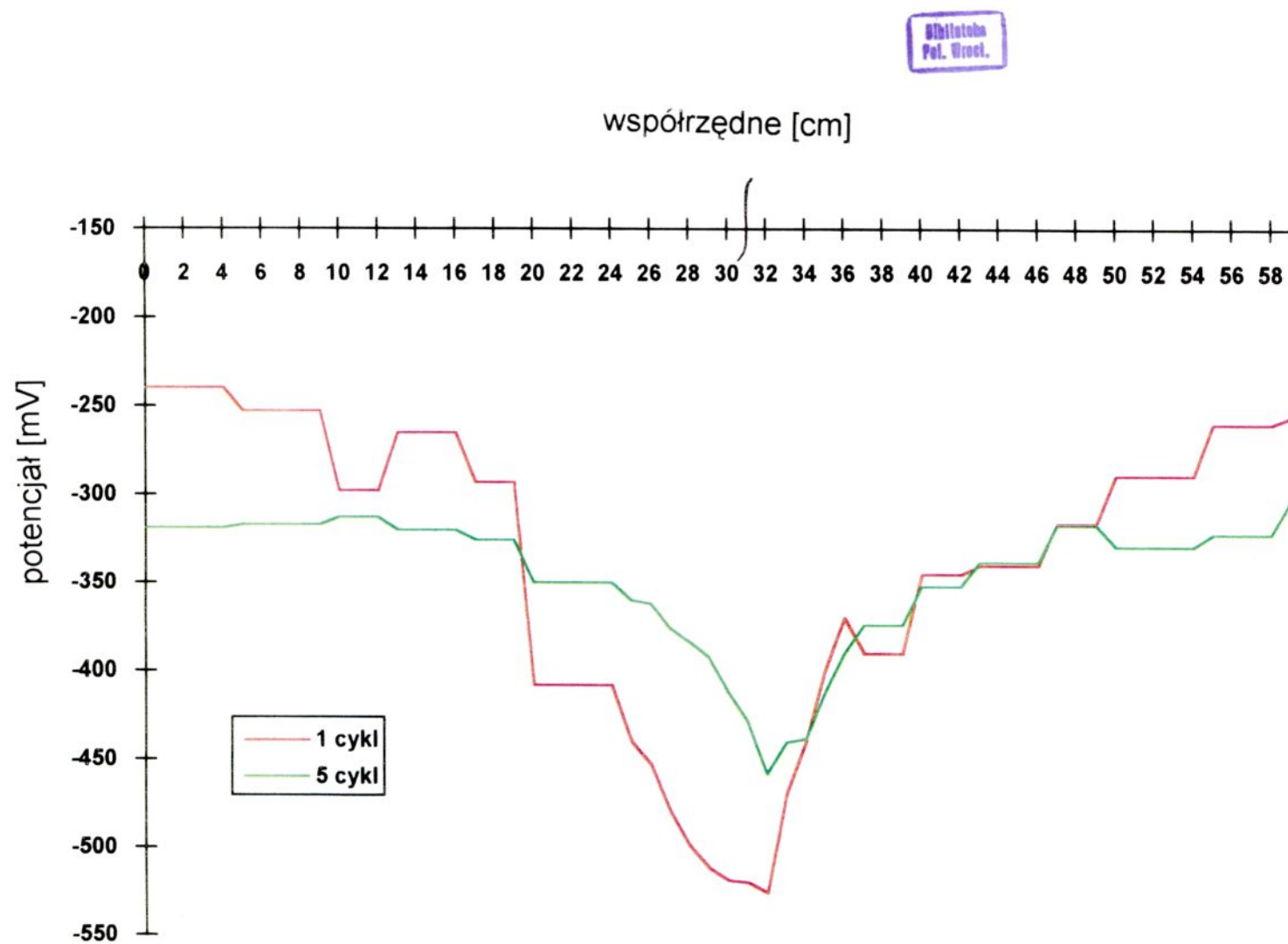
z.1.9. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 7 ($a_r=0,4$ mm), w 1. próbie.



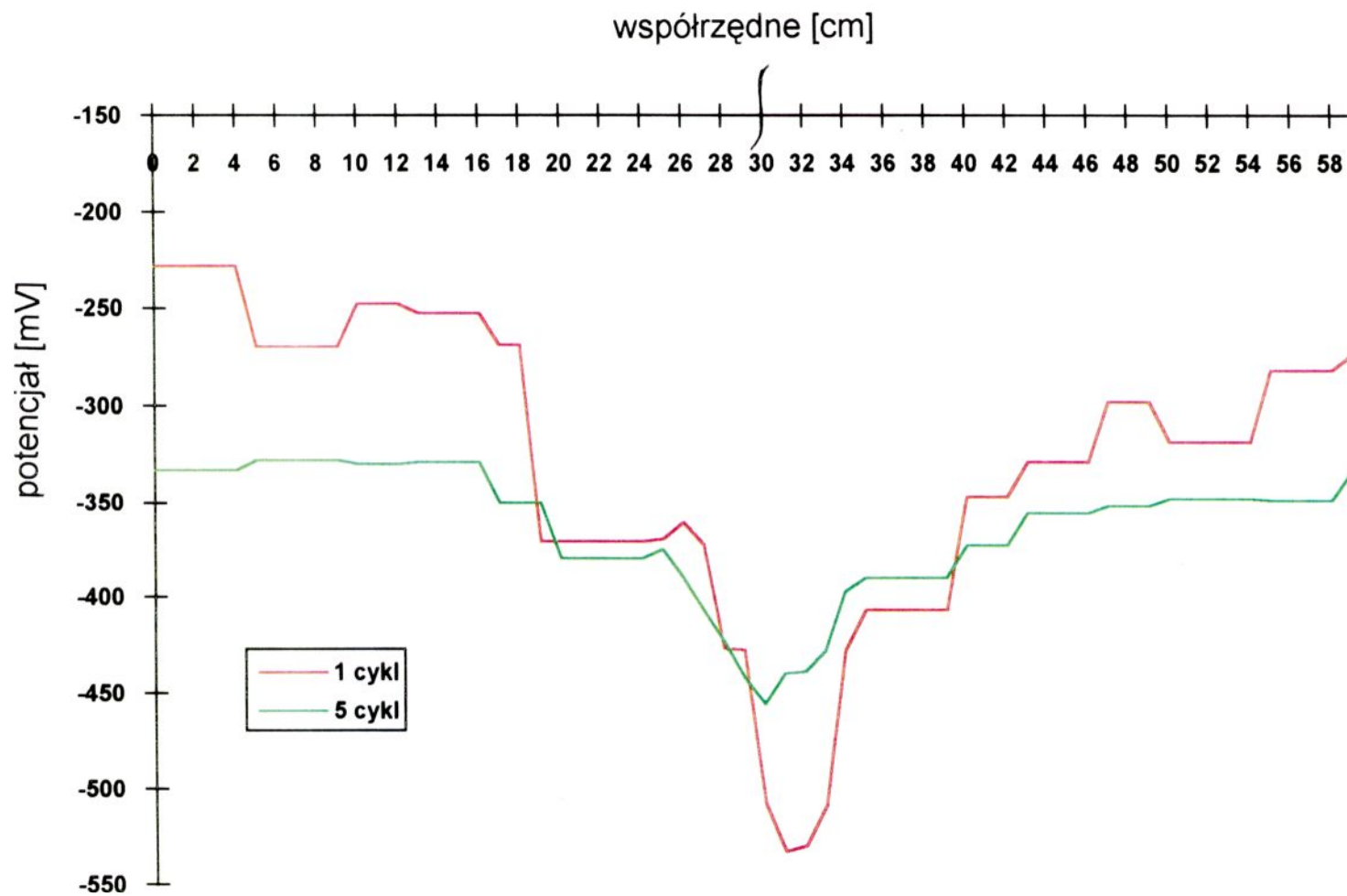
z.1.10. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 8 ($a_r=0,6$ mm), w 1. próbie.



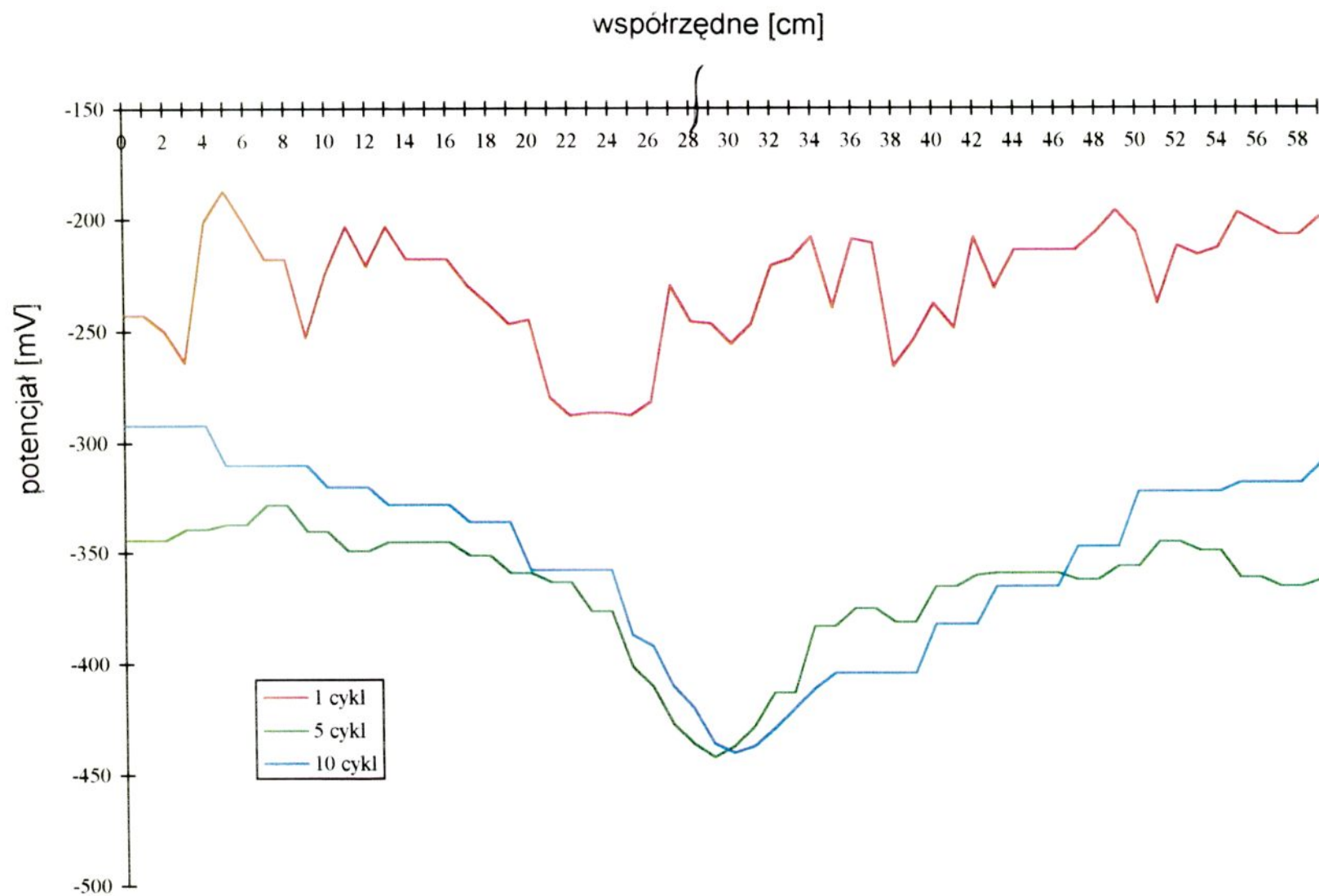
z.1.11. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 9 ($a_r=0,9$ mm), w 1. próbie.



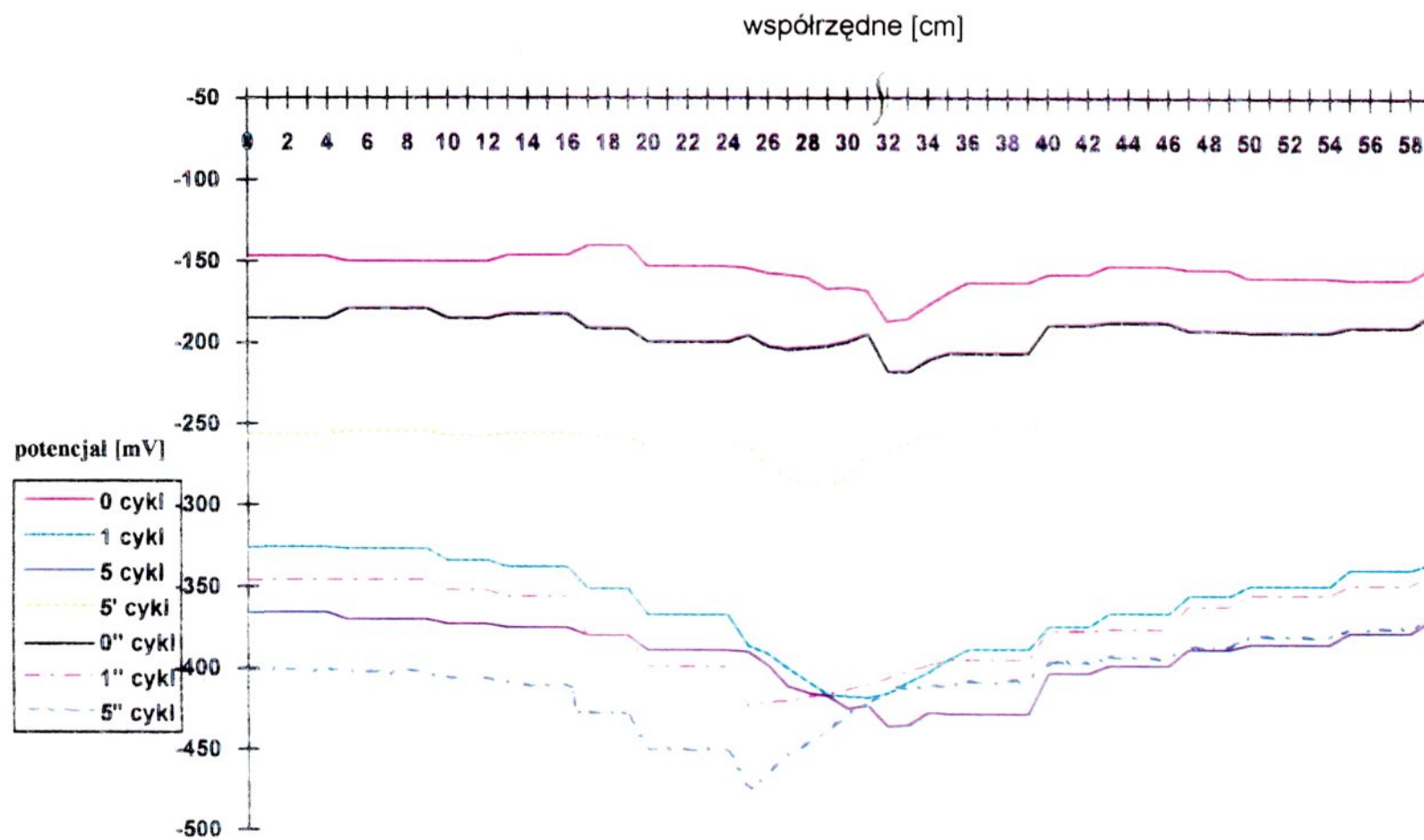
z.1.12. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 10 ($a_r=0,2$ mm), w 1. próbie.



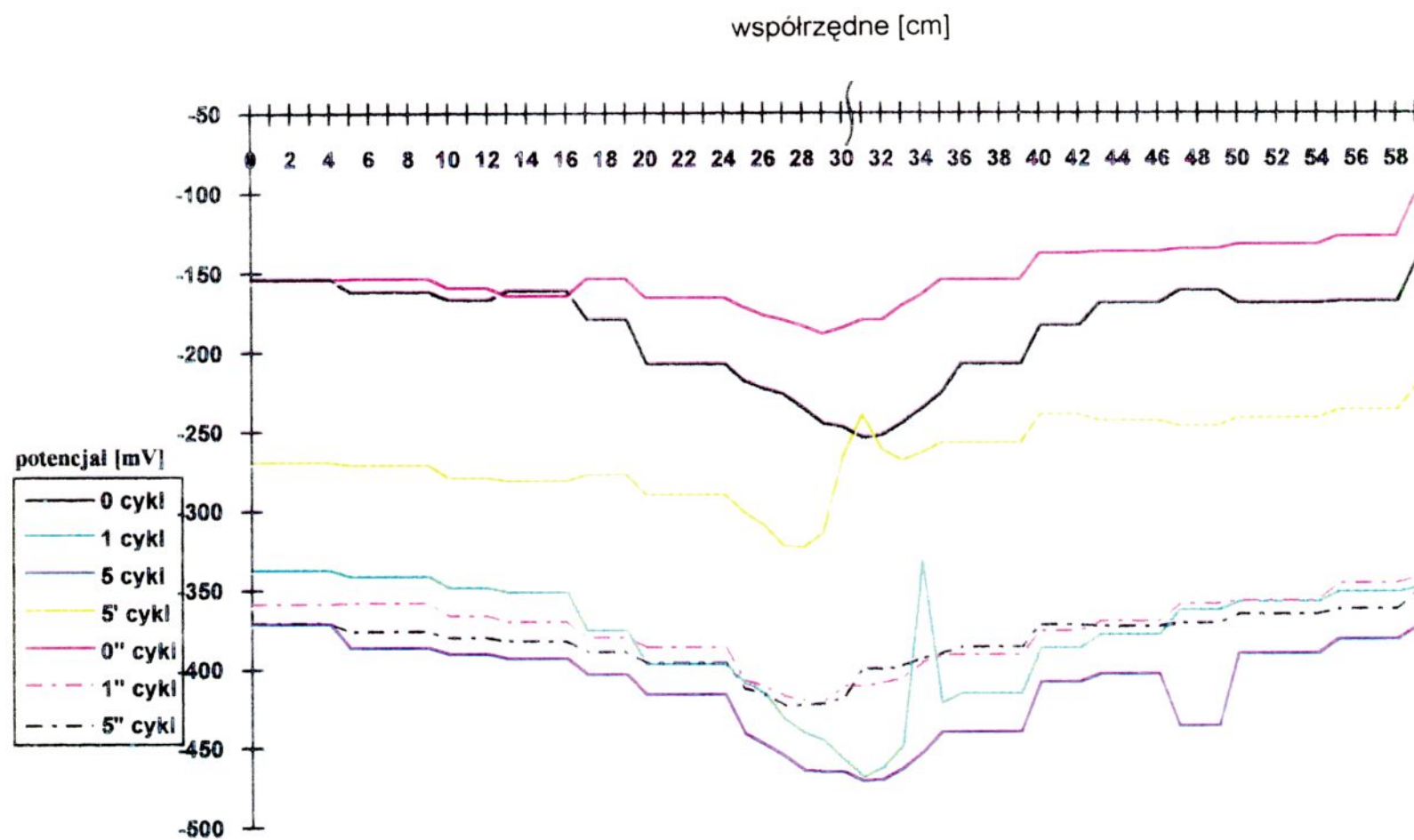
z.1.13. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 11 ($a_i \approx 1,1$ mm), w 1. próbie.



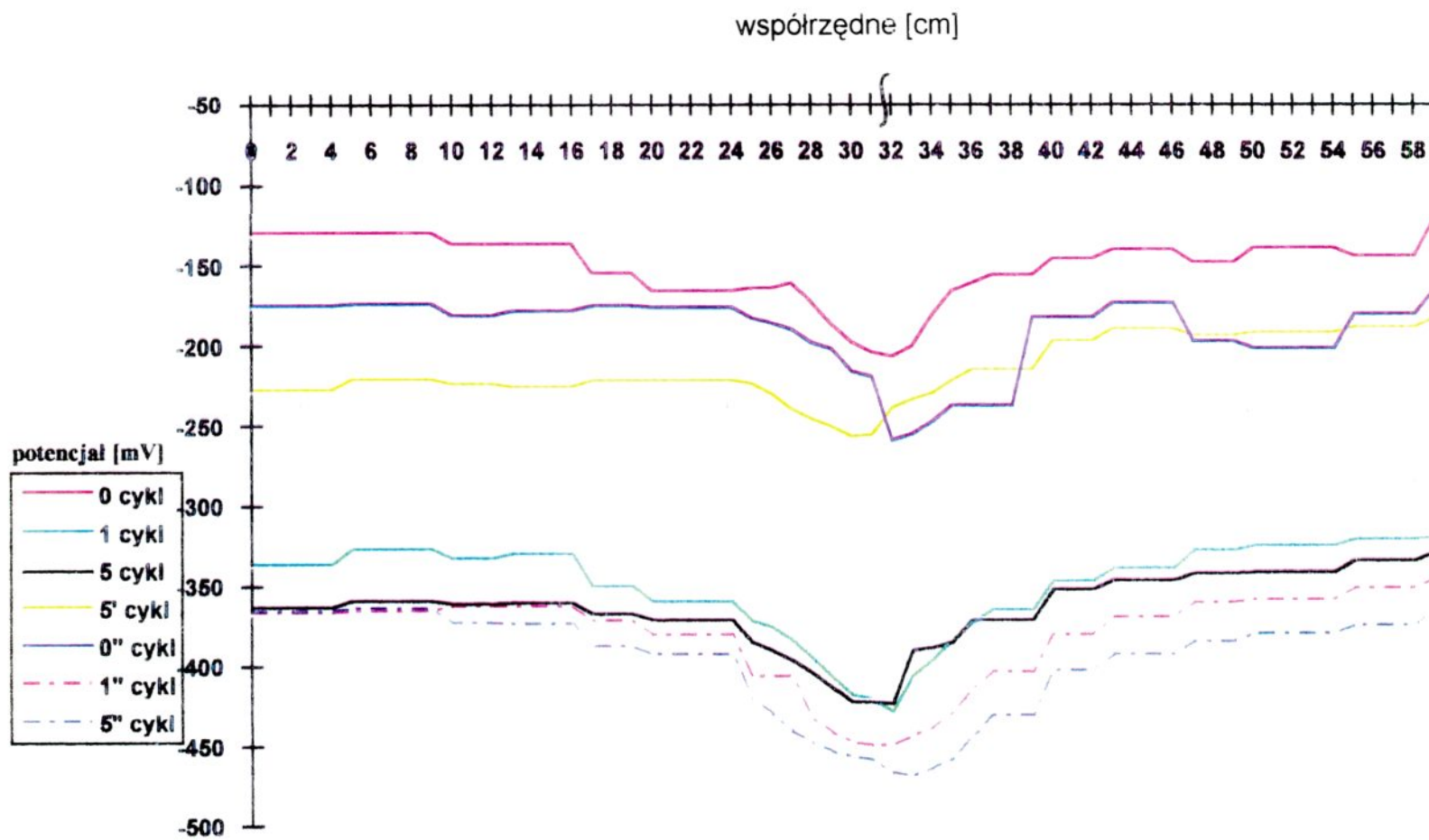
z.1.14. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 12 ($a_r=0,5$ mm), w 1. próbie.



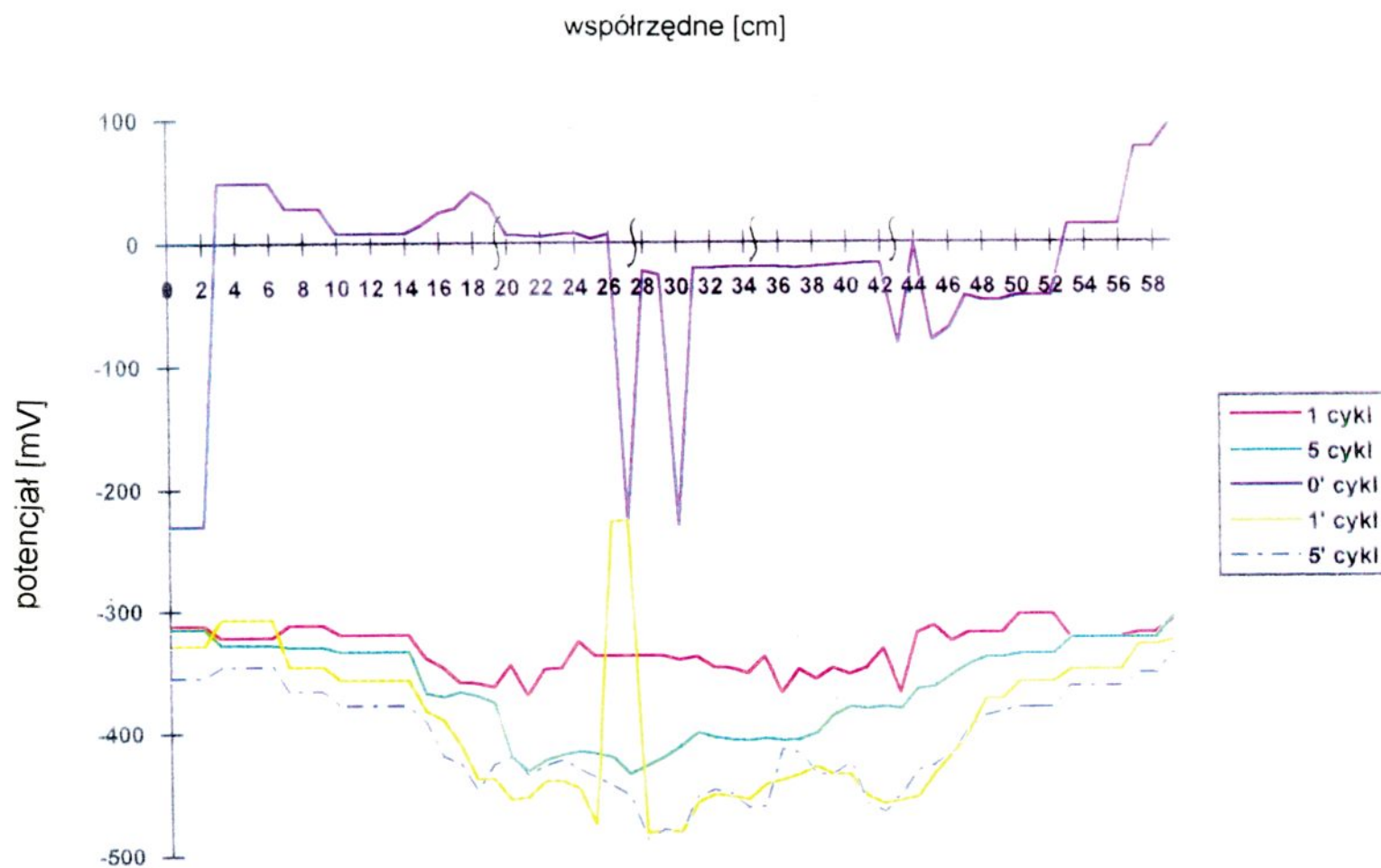
z.1.15. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 3, w 2. próbie.



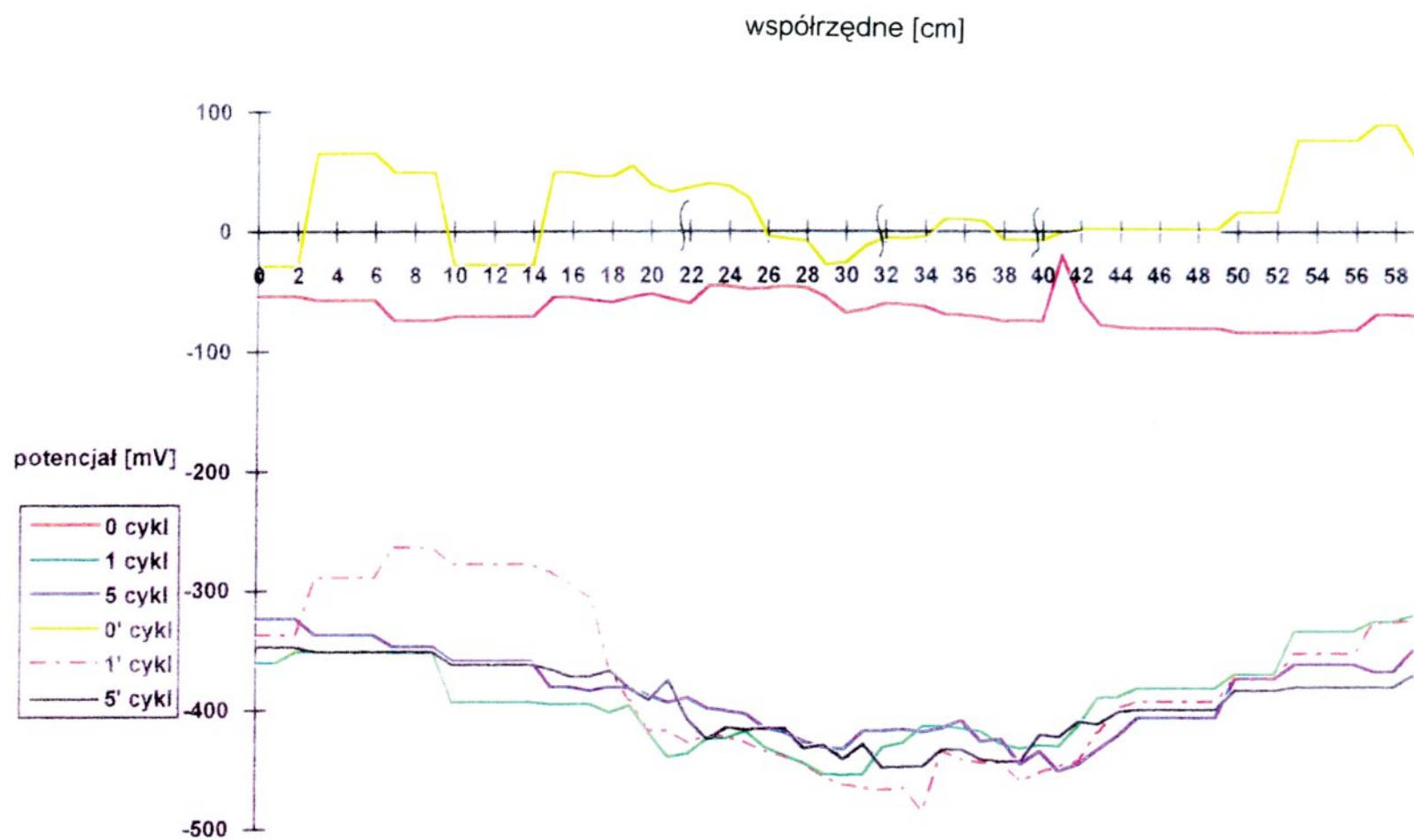
z.1.16. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 7, w 2. próbie.



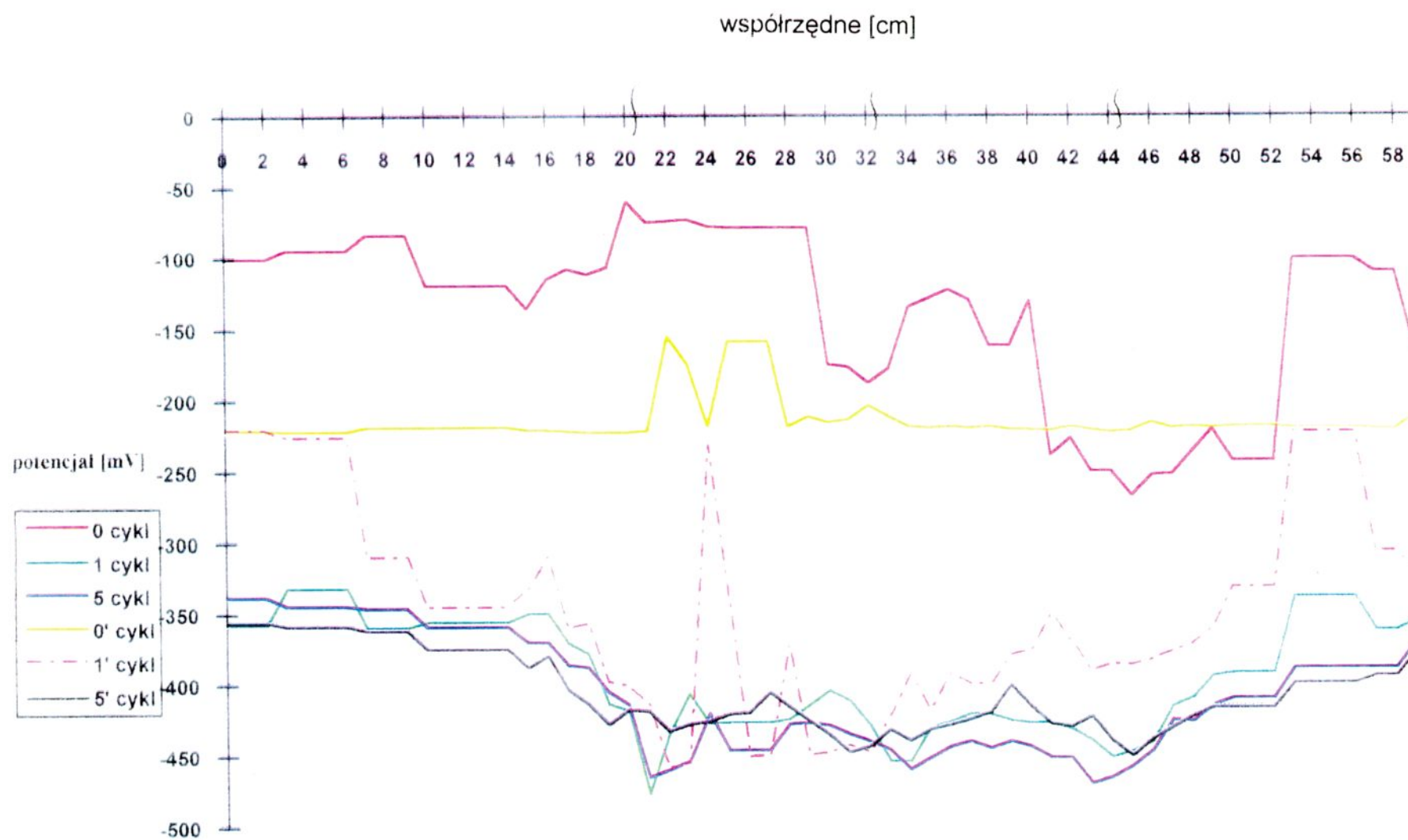
z.1.17. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 10, w 2 próbie



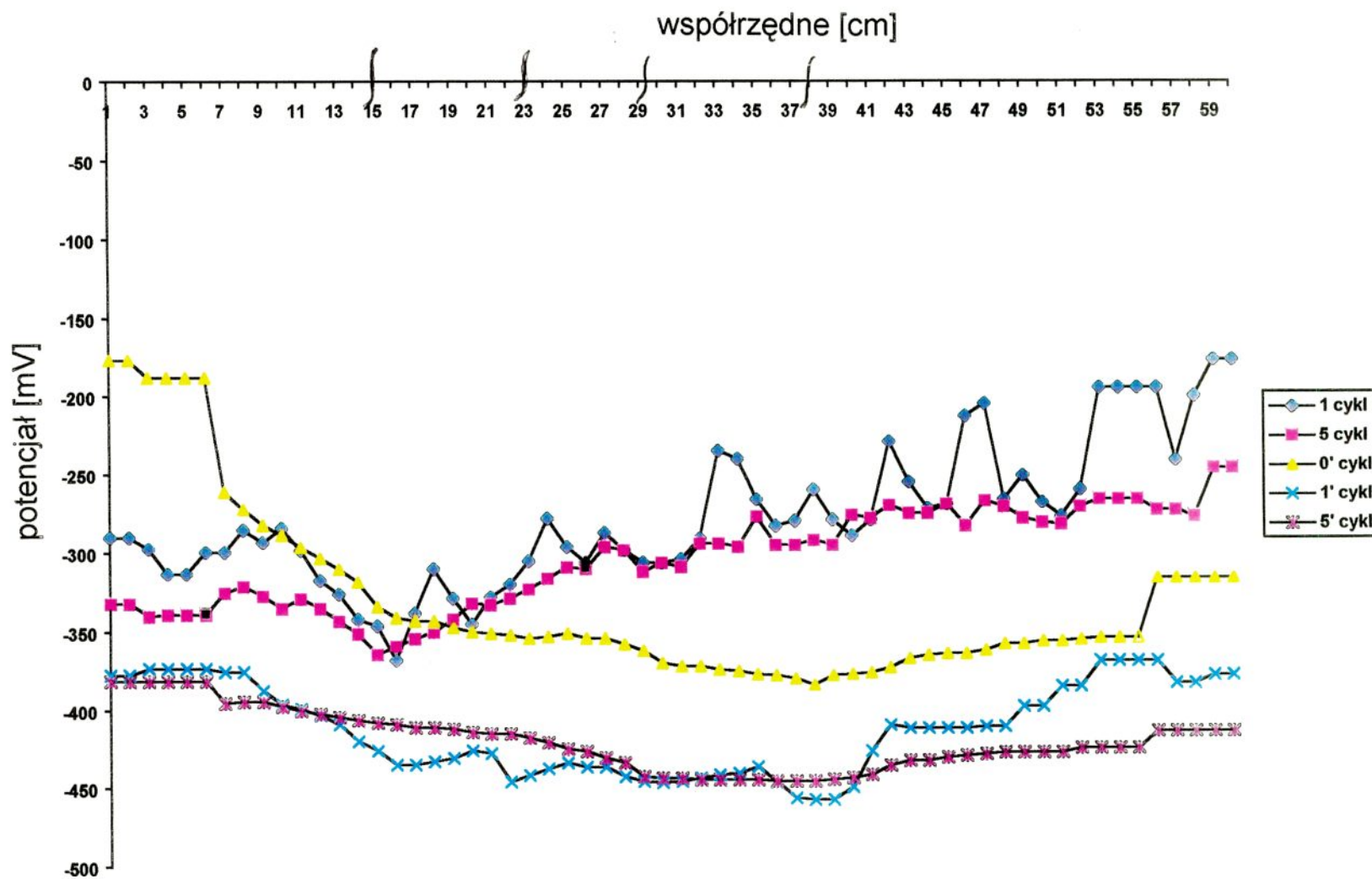
z.1.18. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 13.



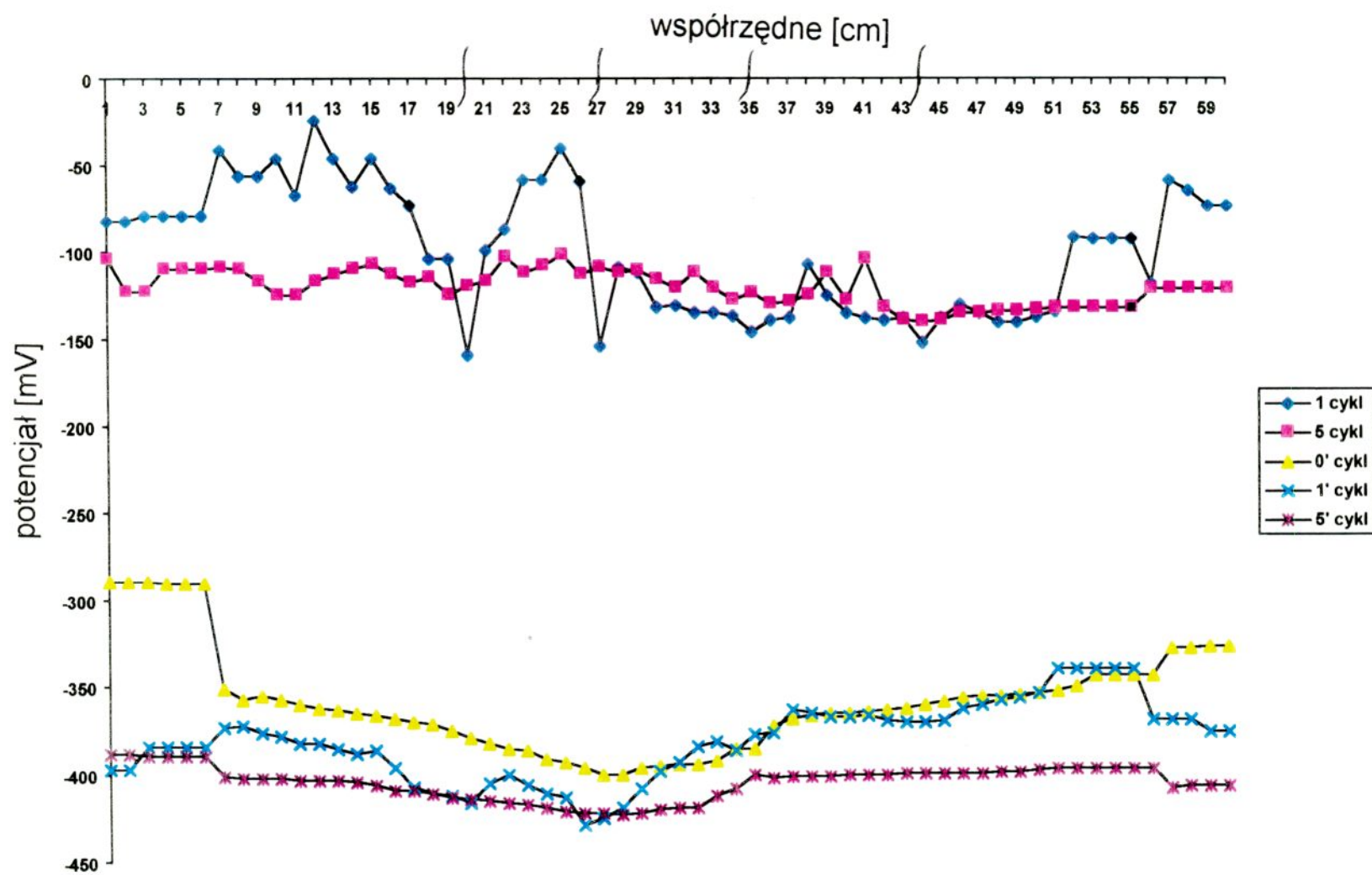
z.1.19. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 14



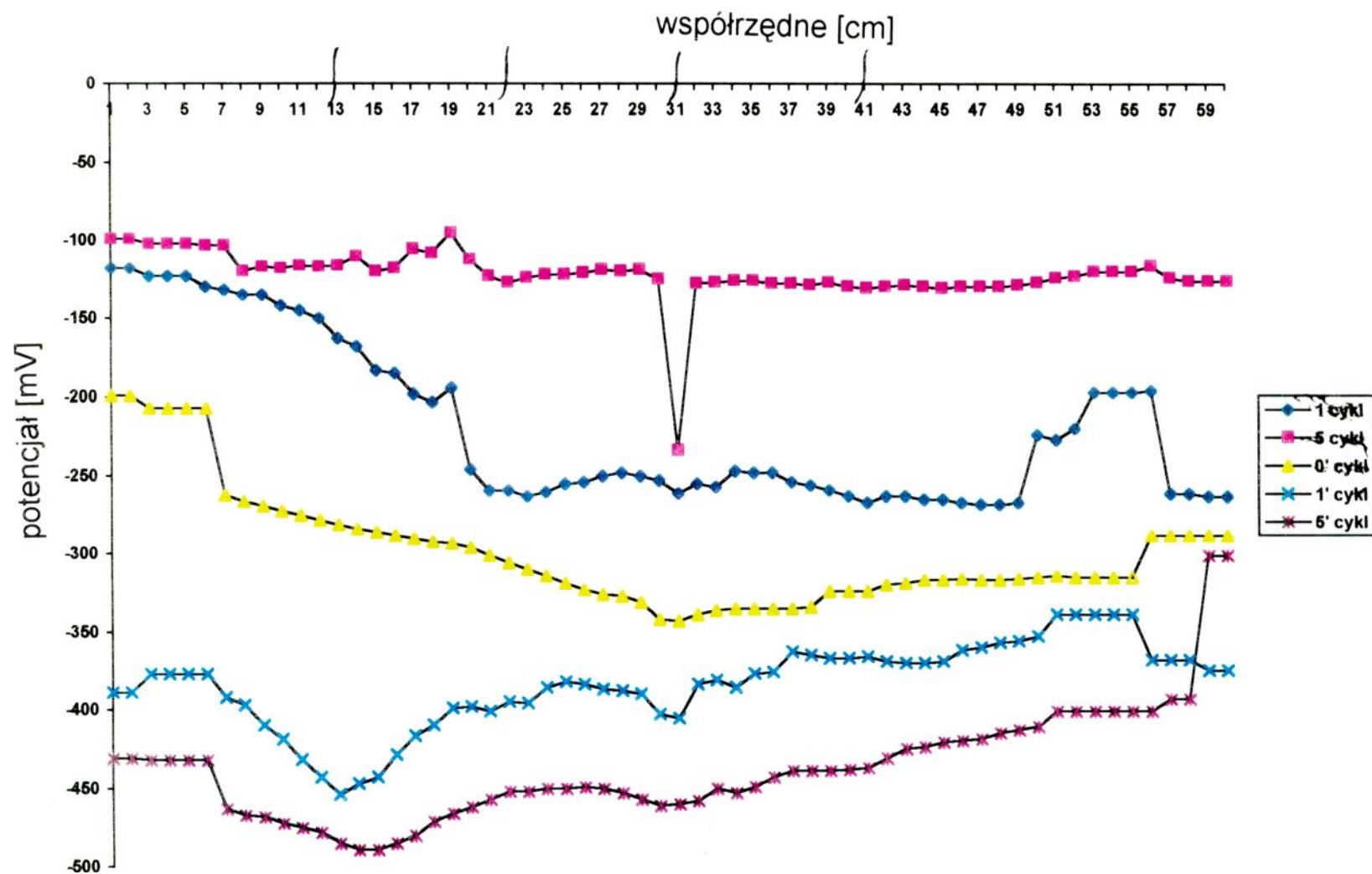
z.1.20. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 15



z.1.21. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 16.



z.1.22. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 17.

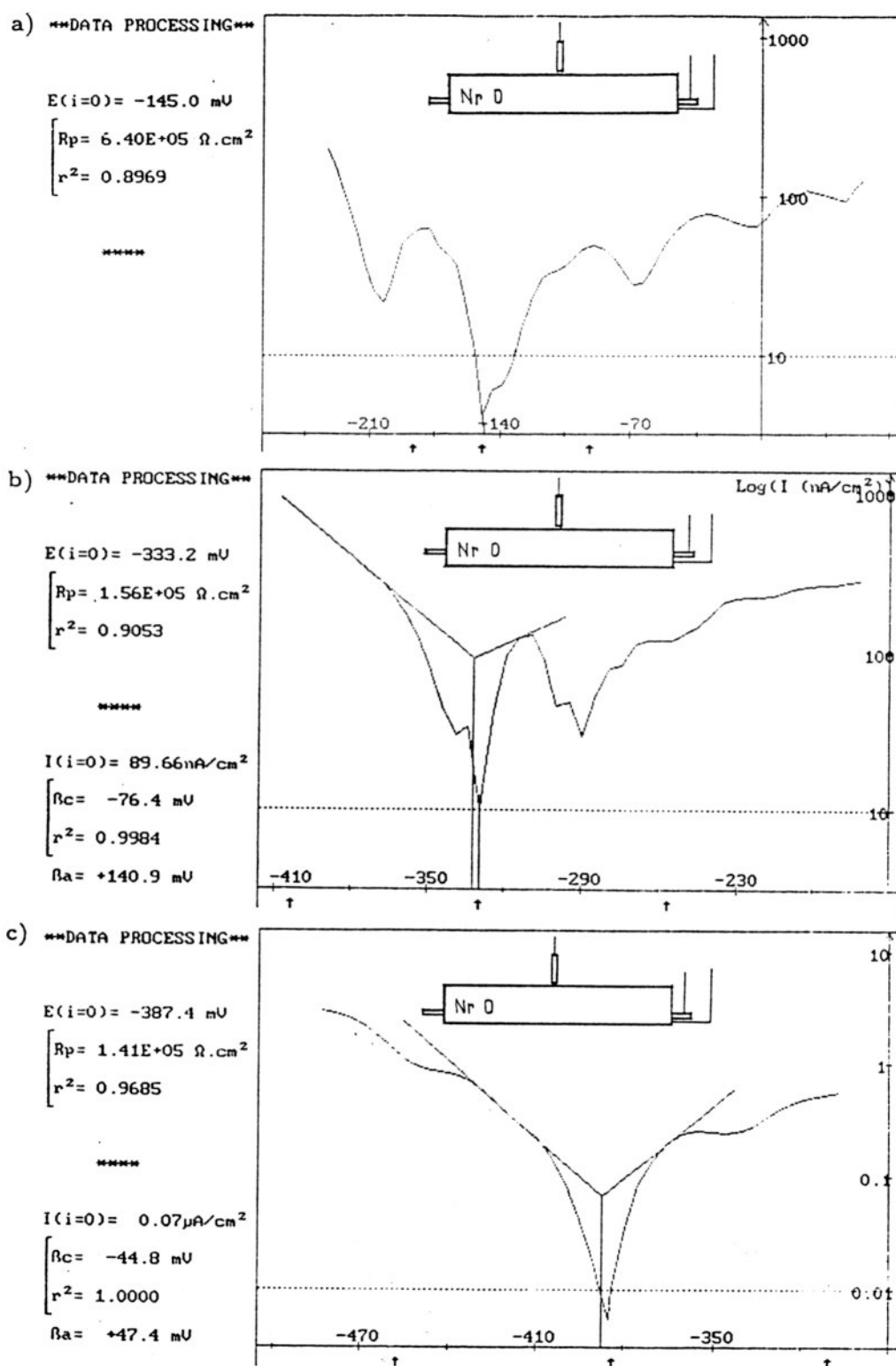


z. 1.23. Rozkład potencjału na powierzchni poziomej zarysowanej w osi zbrojenia elementu Nr 18

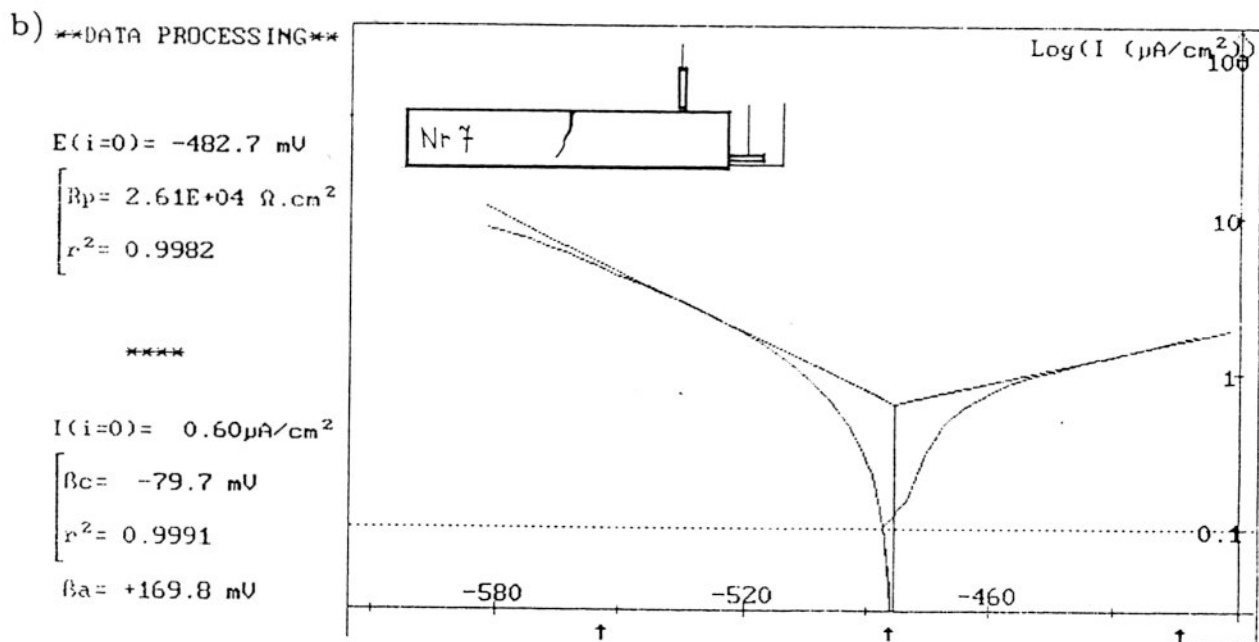
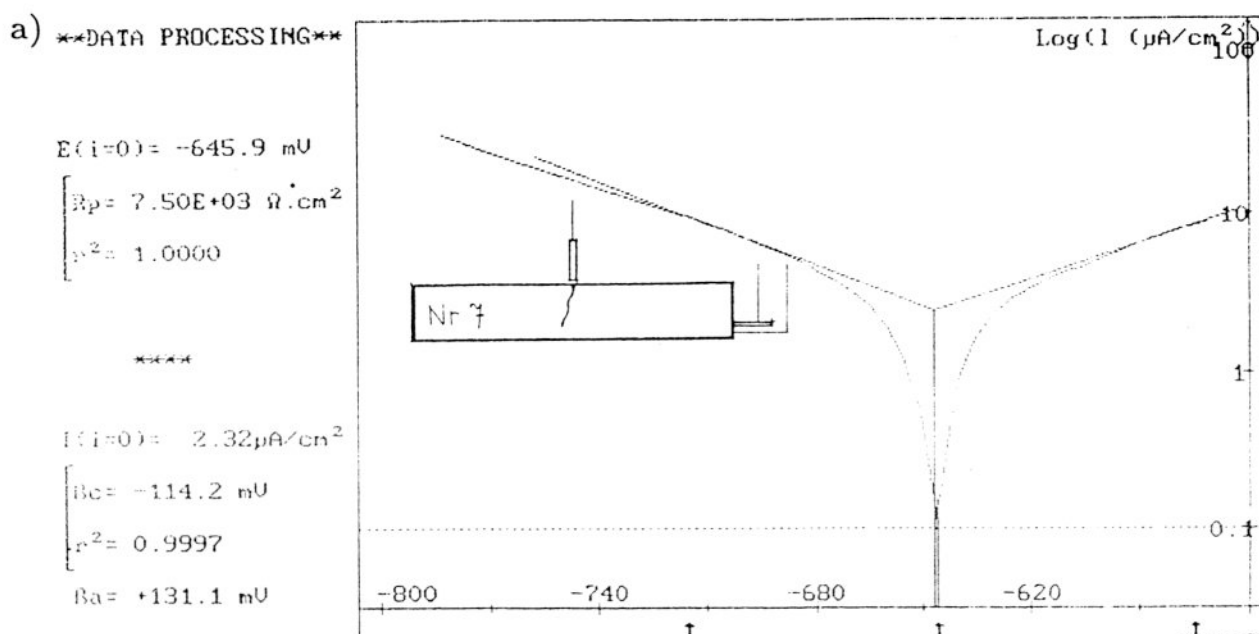
ZAŁACZNIK Nr 2

Badania potencjodynamiczne elementów żelbetowych

Element Nr 0	(Rys.z.2.1)
Element Nr 7	(Rys. z.2.2 - z.2.3 oraz Rys. z.2.7 - z.2.11)
Element Nr 10	(Rys. z.2.4 - z.2.6)
Element Nr 14	(Rys. z.2.12 - z.2.17)
Element Nr 18	(Rys. z.2.18 - z.2.29)



z.2.1. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 0 w próbie 1.: a) przed ekspozycją w roztworze NaCl, b) po 1. cyklu zwilżania i suszenia, c) po 5. cyklu zwilżania i suszenia.



z.2.2 Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 7 w 1. próbie po pierwszym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysu.

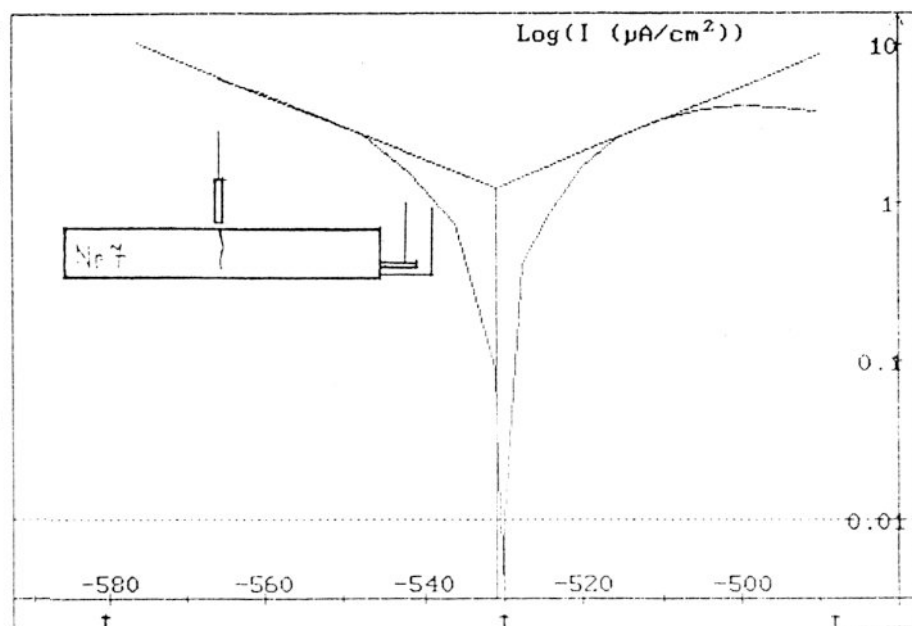
a) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -530.9 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 6.74E+03 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9917 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 1.23 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

$$\begin{cases} \beta_c = -50.6 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9918 \\ \beta_a = +49.9 \text{ mV} \end{cases}$$



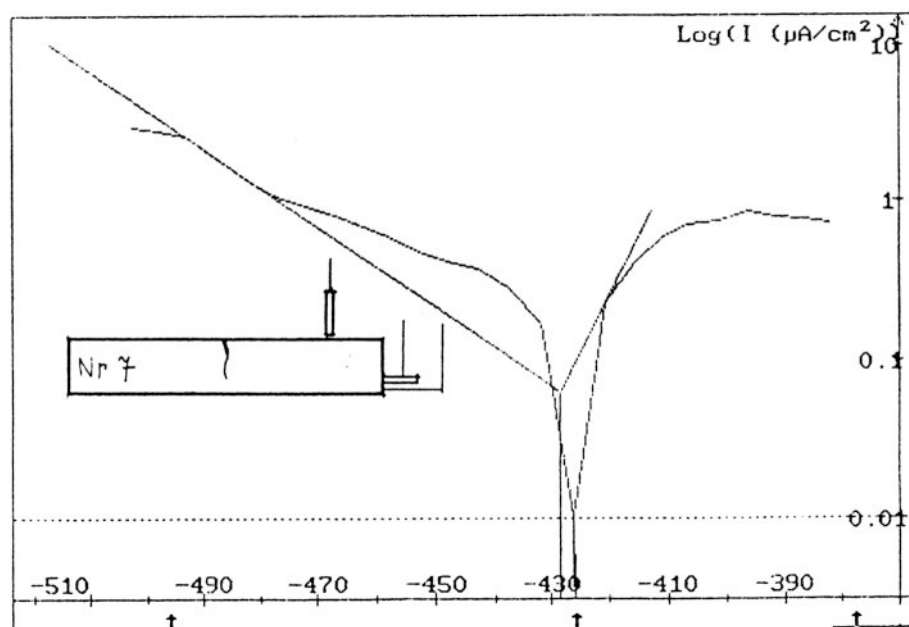
b) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -428.0 \text{ mV}$$

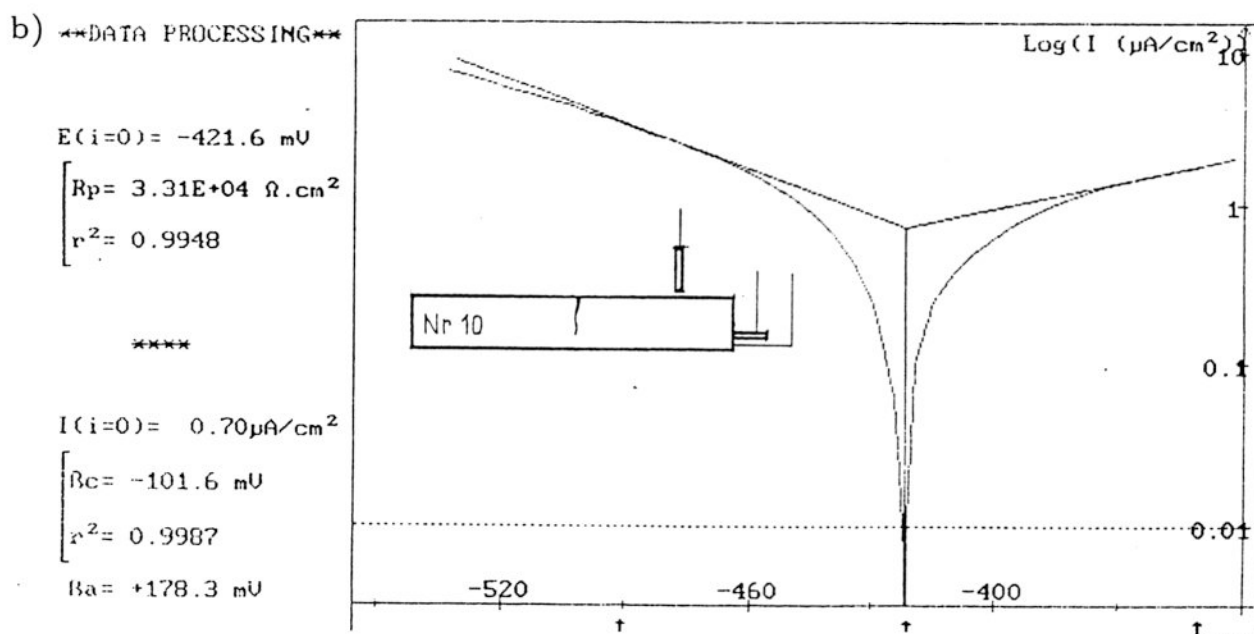
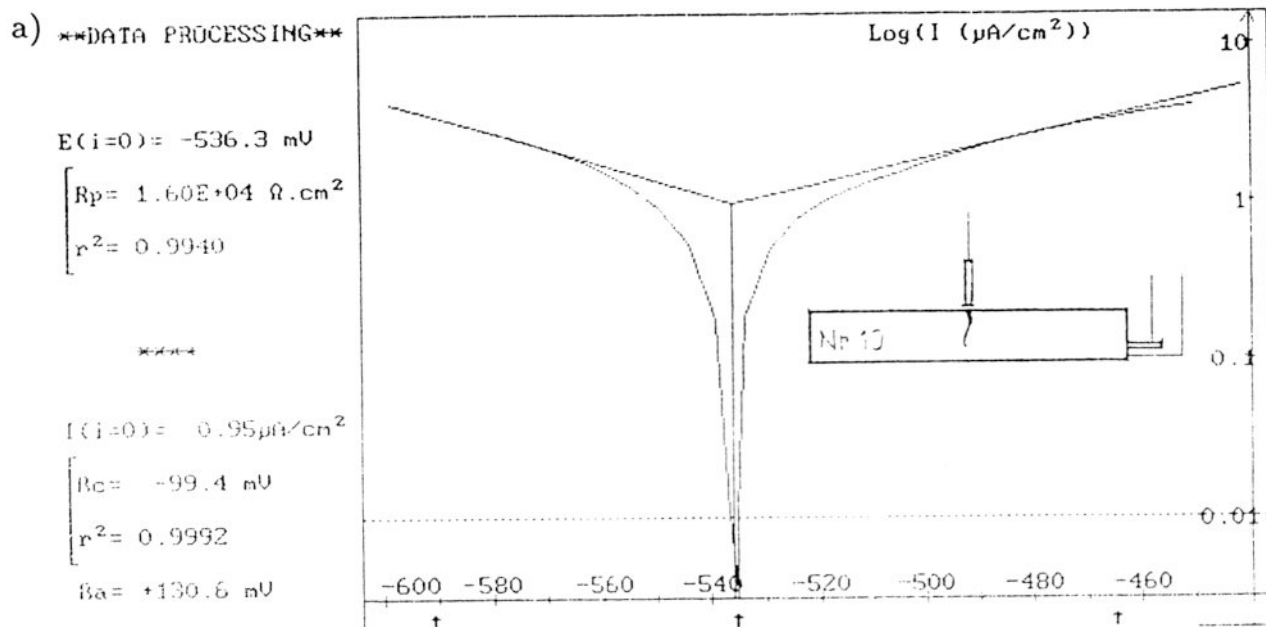
$$\begin{cases} R_p = 3.35E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9769 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 0.06 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

$$\begin{cases} \beta_c = -40.6 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9991 \\ \beta_a = +13.9 \text{ mV} \end{cases}$$



z.2.3 Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 7 w 1. próbie po piątym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysy.



z.2.4. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr10 w 1. próbie po pierwszym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysy.

a) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -478.6 \text{ mV}$$

$$R_p = 1.69E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

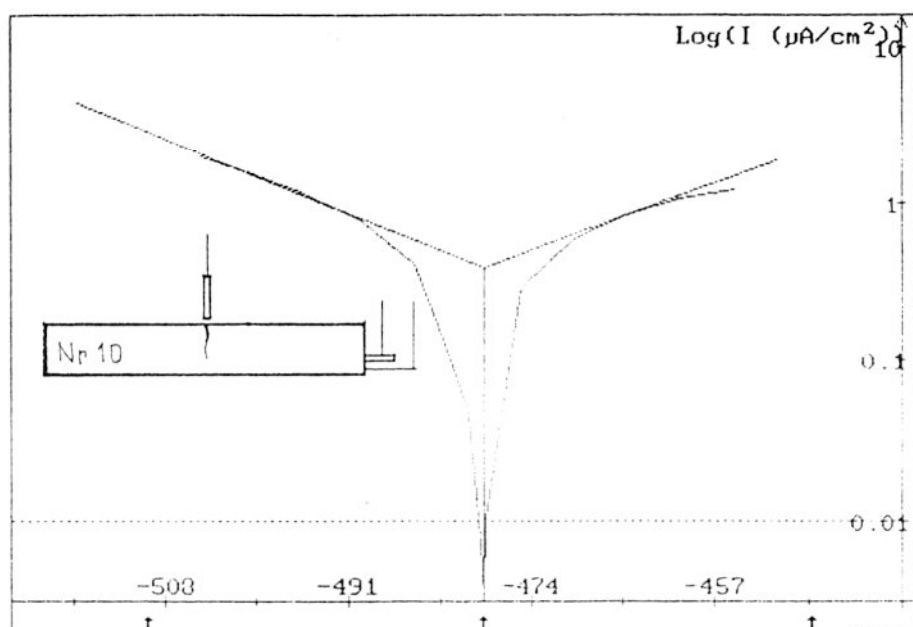
$$r^2 = 0.9938$$

$$I(i=0) = 0.36 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

$$\beta_a = -35.3 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9873$$

$$\beta_c = +39.2 \text{ mV}$$



b) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -388.0 \text{ mV}$$

$$R_p = 4.22E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

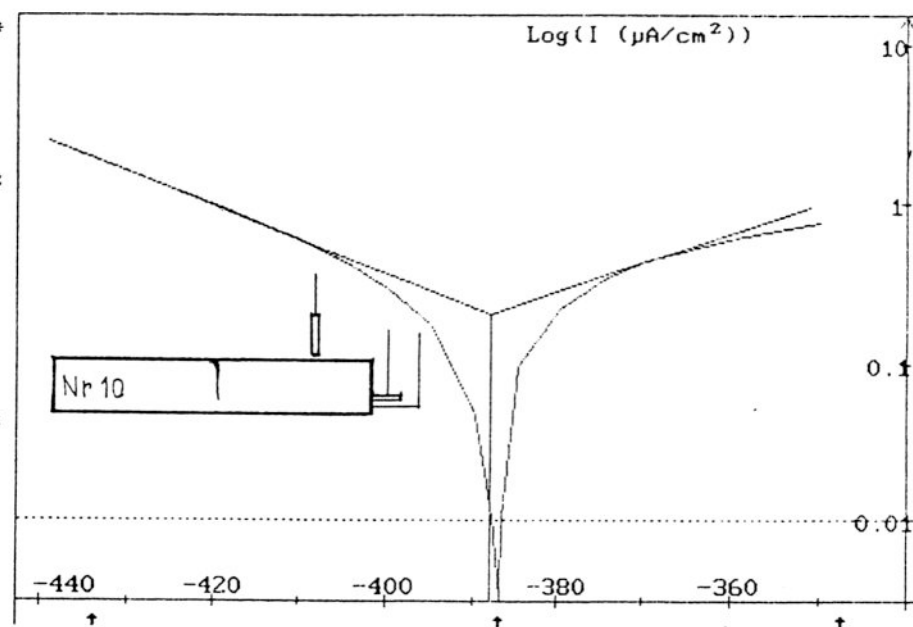
$$r^2 = 0.9985$$

$$I(i=0) = 0.20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

$$\beta_c = -47.8 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9987$$

$$\beta_a = +56.0 \text{ mV}$$



z.2.5. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 10 w 1. próbie po piątym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysy.

a) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -246.7 \text{ mV}$$

$$R_p = 2.44E+05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

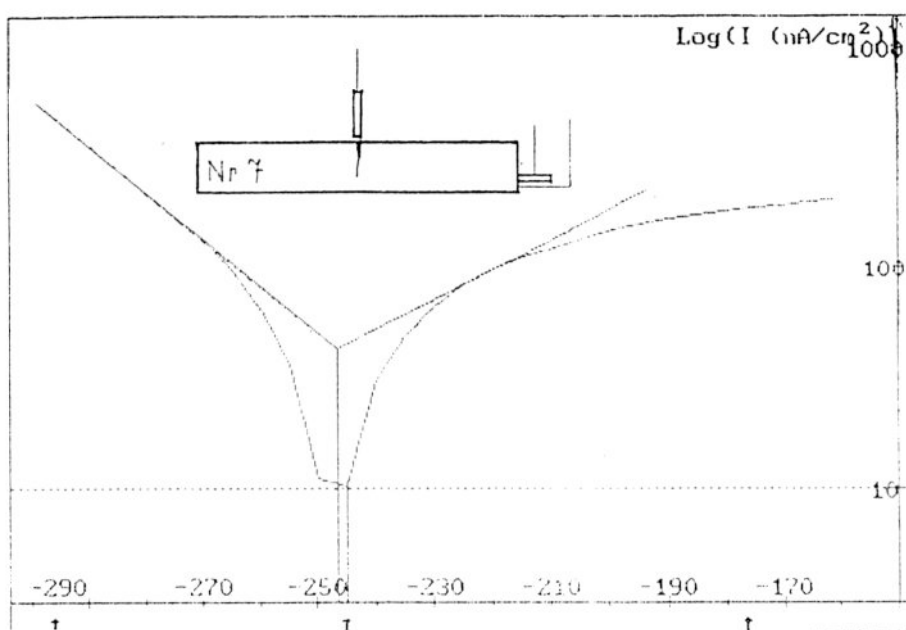
$$r^2 = 0.9929$$

$$I(i=0) = 40.23 \text{ nA/cm}^2$$

$$\beta_c = -46.7 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9987$$

$$\beta_a = +72.0 \text{ mV}$$



b) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -276.4 \text{ mV}$$

$$R_p = 4.65E+05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

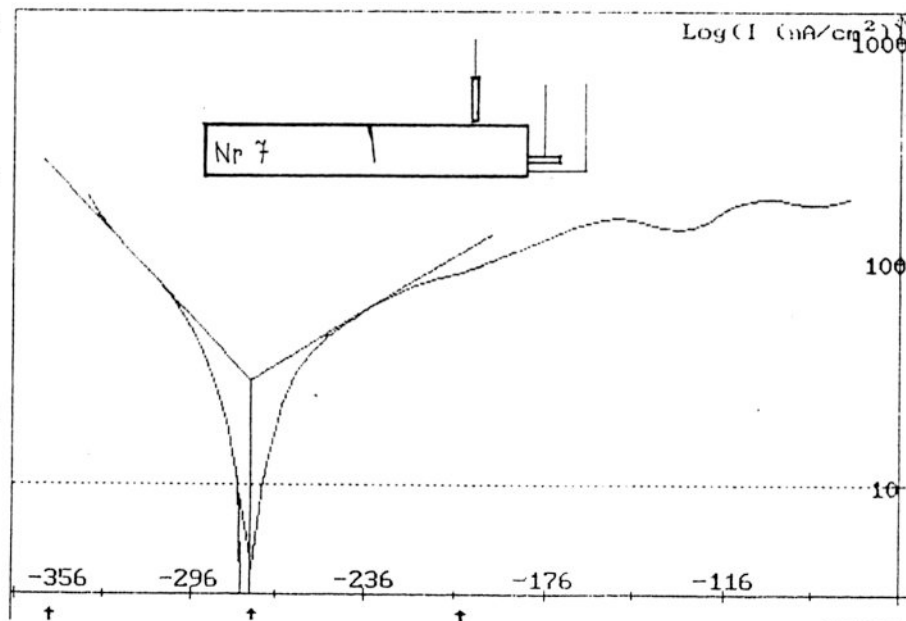
$$r^2 = 0.9988$$

$$I(i=0) = 28.00 \text{ nA/cm}^2$$

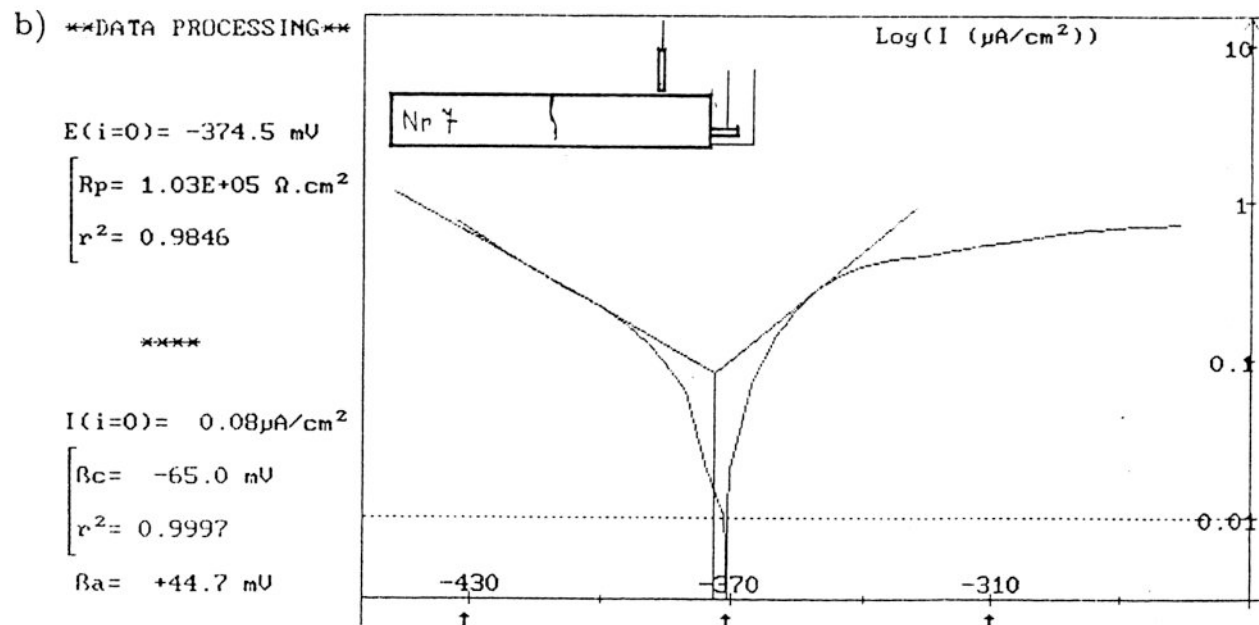
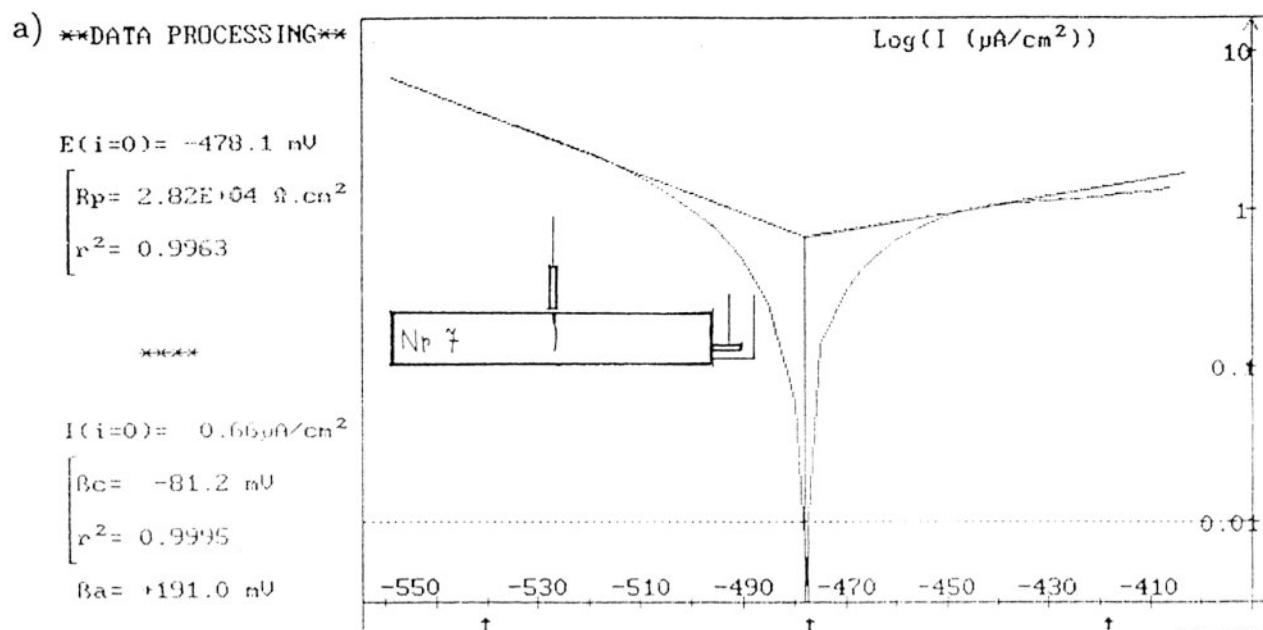
$$\beta_c = -73.8 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9983$$

$$\beta_a = +124.6 \text{ mV}$$



z.2.6. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 10 w 2. próbie przed ekspozycją w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysy.



z.2.7. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 7 w 2. próbie po pierwszym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysy.

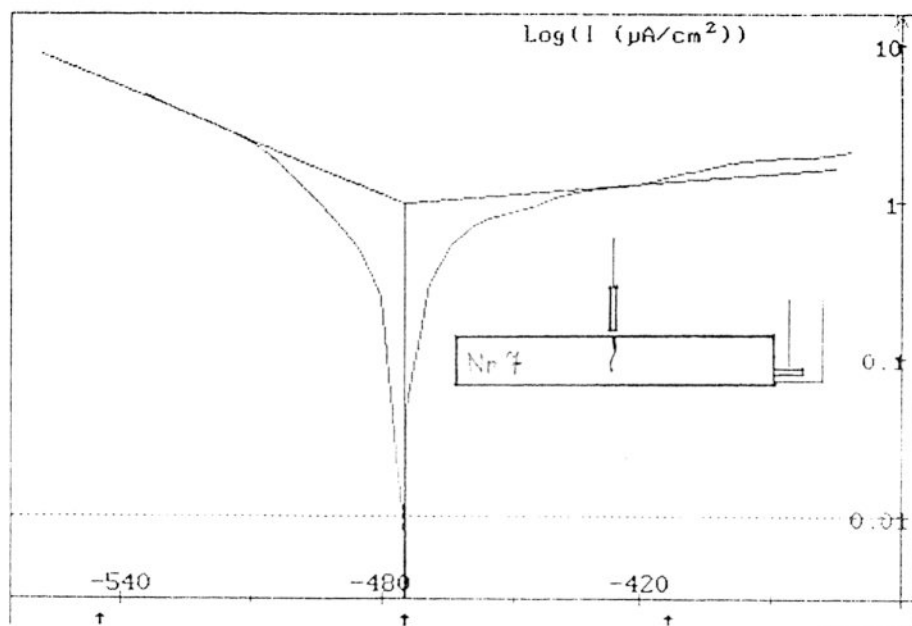
a) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -475.4 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 2.21 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9978 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 0.96 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

$$\begin{cases} \beta_c = -89.0 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9997 \\ \beta_a = +452.6 \text{ mV} \end{cases}$$



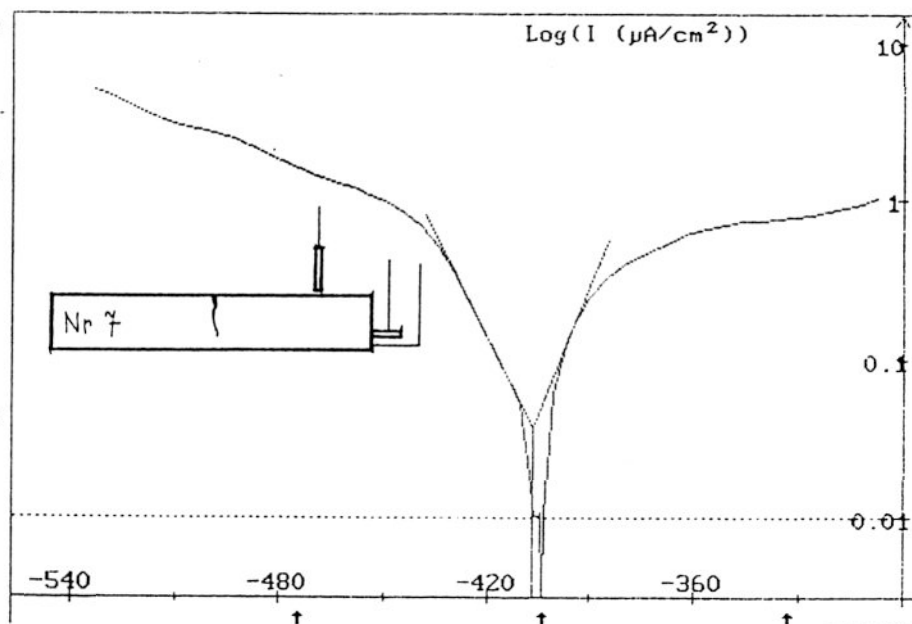
b) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -406.5 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 7.44 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9813 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 0.04 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

$$\begin{cases} \beta_c = -24.2 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9999 \\ \beta_a = +19.5 \text{ mV} \end{cases}$$



z.2.8. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 7 w 2. próbie po piątym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysy.

a) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -342.1 \text{ mV}$$

$$R_p = 1.38E+04 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$$

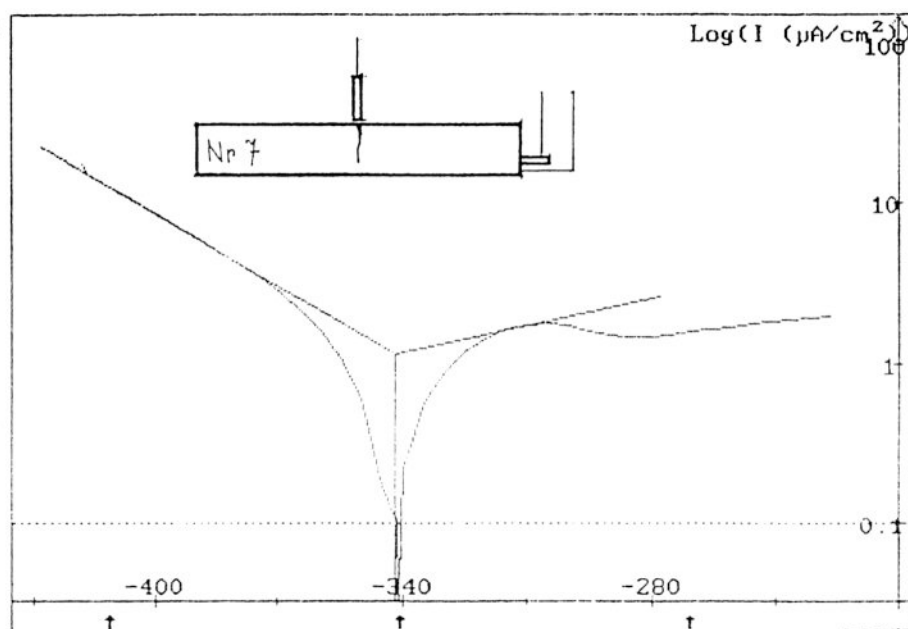
$$r^2 = 0.9928$$

$$I(i=0) = 1.12 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

$$\beta_c = -67.6 \text{ mV}$$

$$r^2 = 1.0000$$

$$\beta_a = +178.6 \text{ mV}$$



b) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -353.4 \text{ mV}$$

$$R_p = 1.04E+05 \ \Omega \cdot \text{cm}^2$$

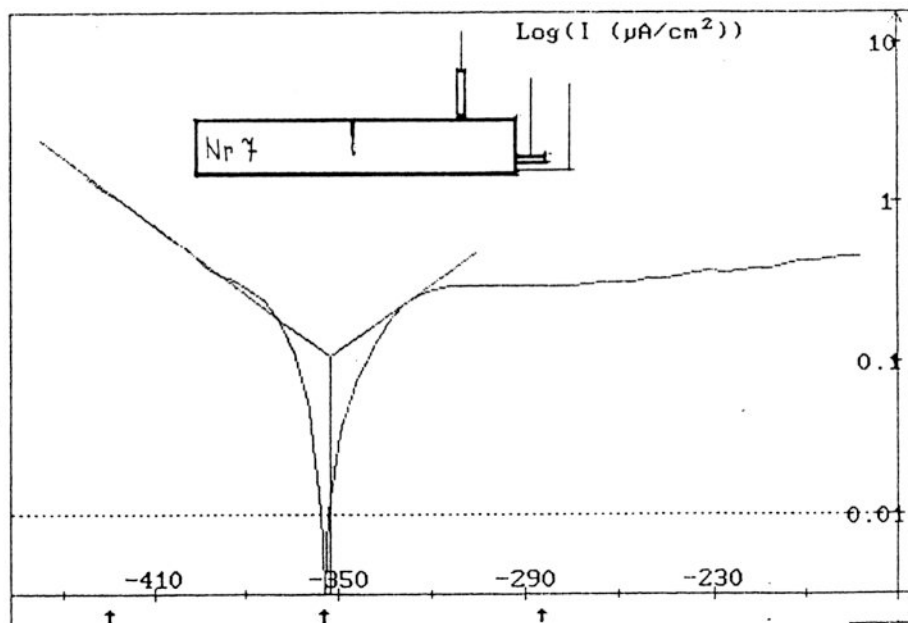
$$r^2 = 0.9780$$

$$I(i=0) = 0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

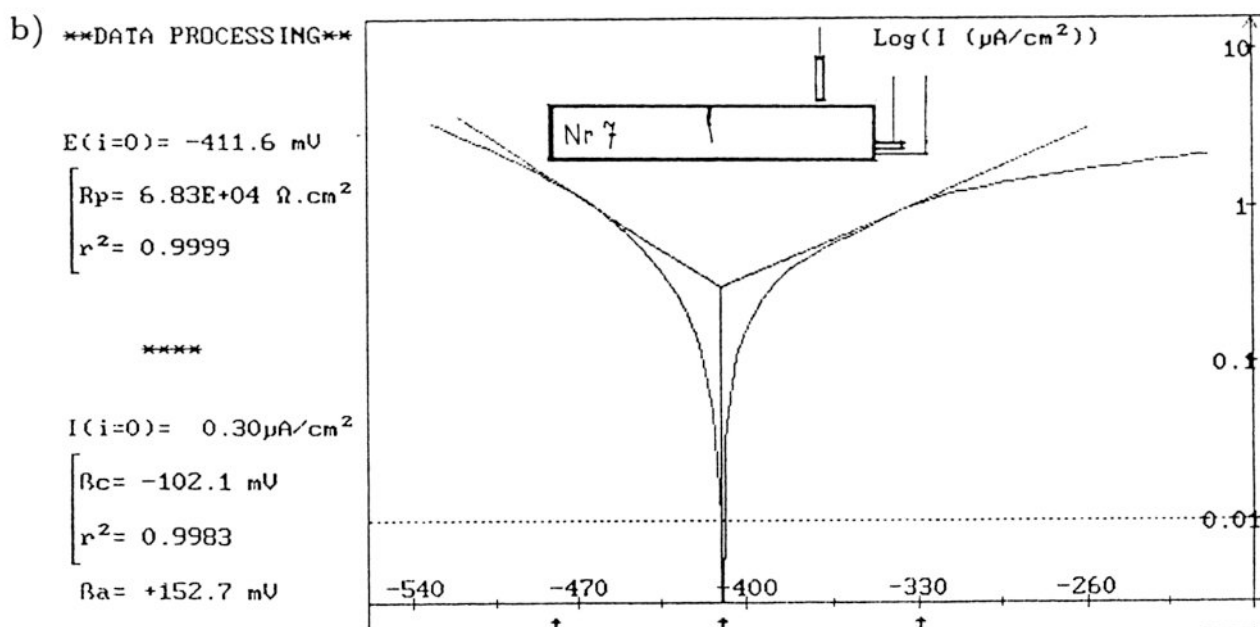
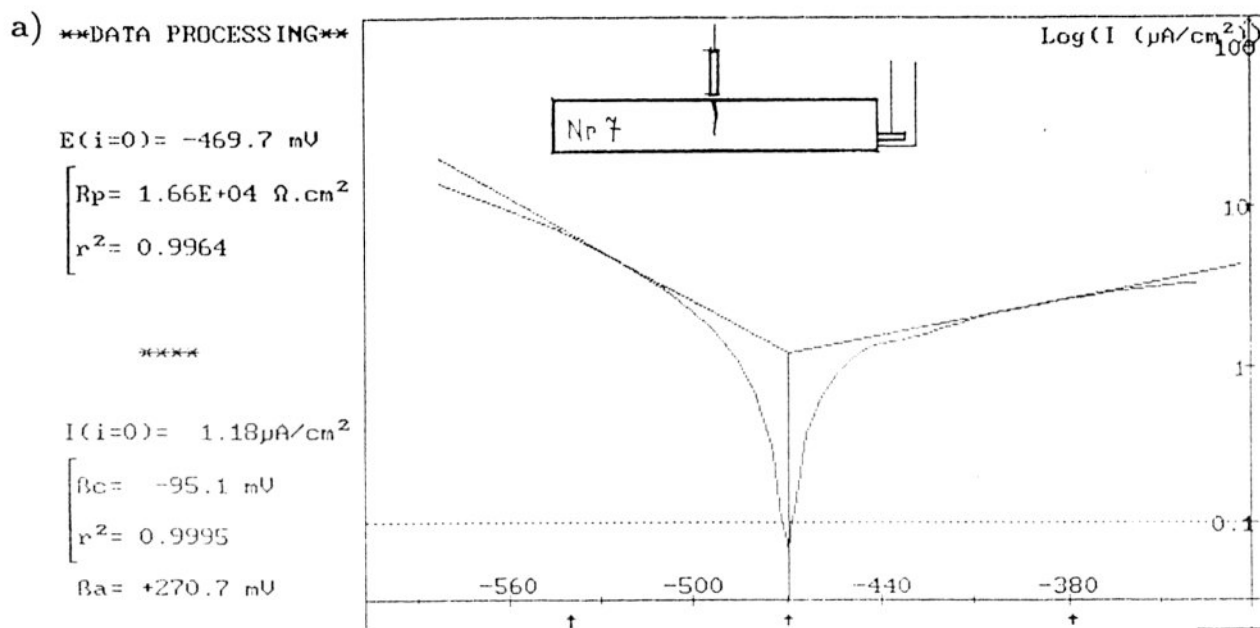
$$\beta_c = -71.3 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9963$$

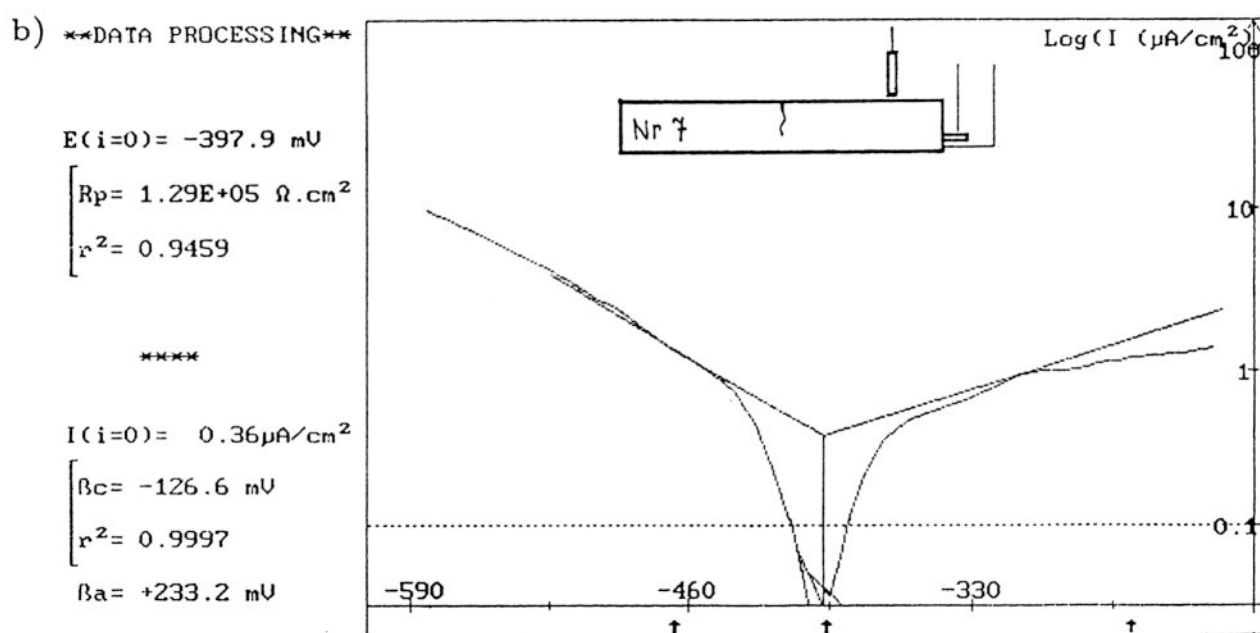
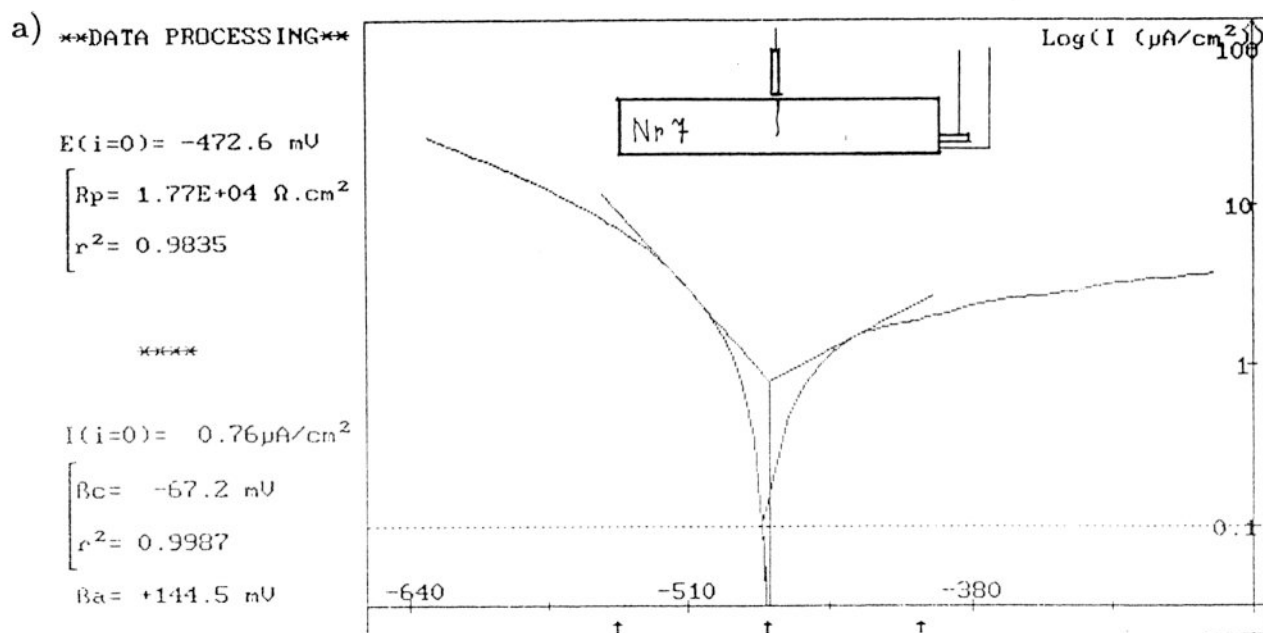
$$\beta_a = +73.6 \text{ mV}$$



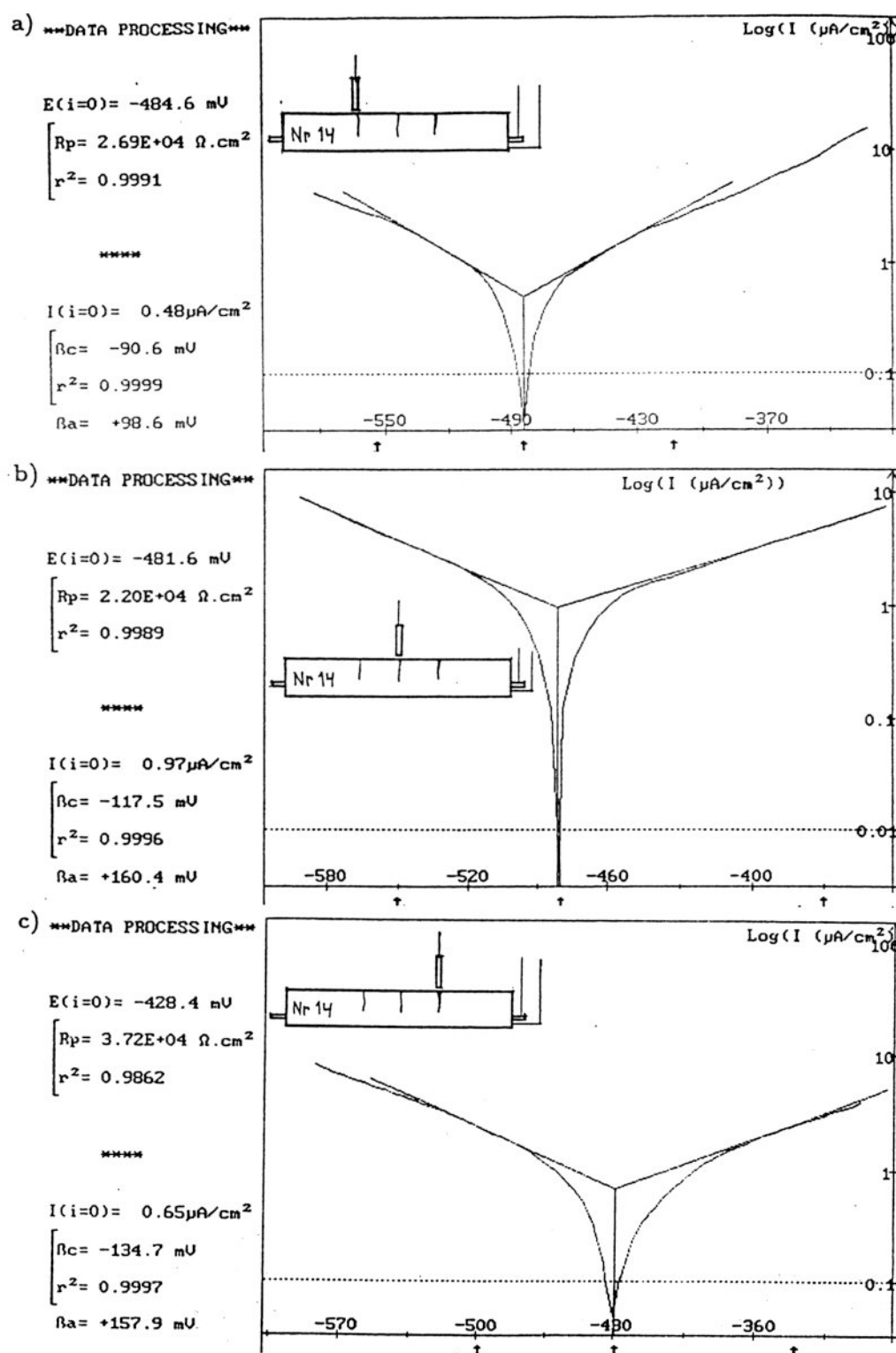
z.2.9. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 7 w 4. próbie przed ekspozycją w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysy.



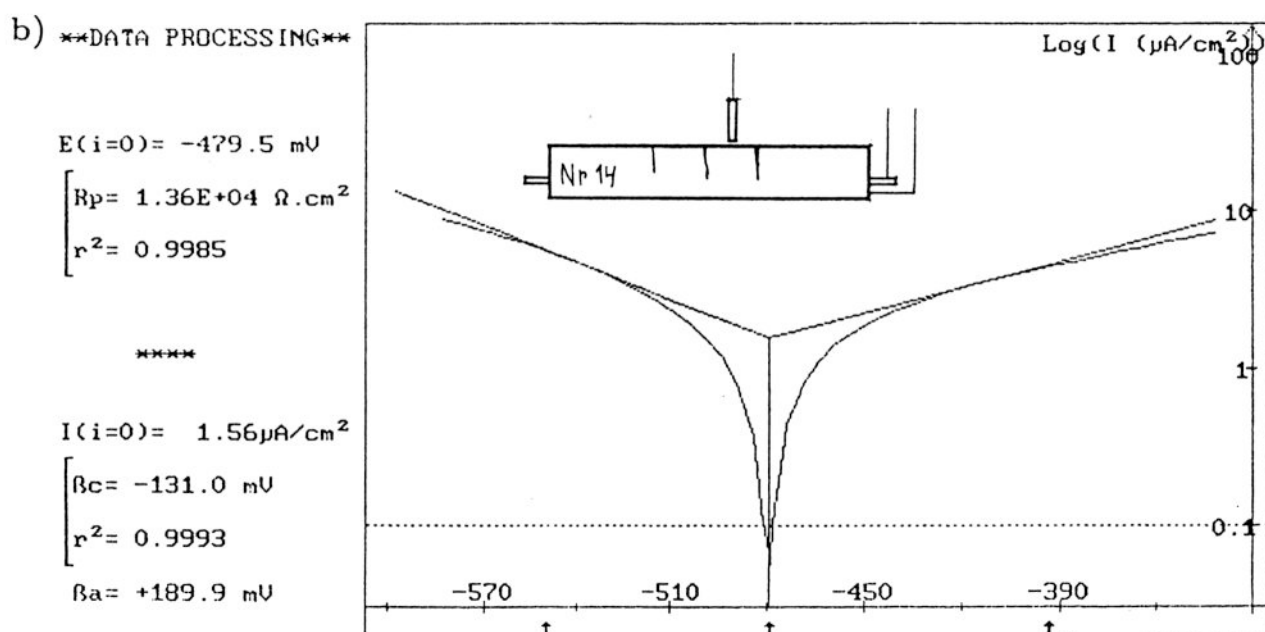
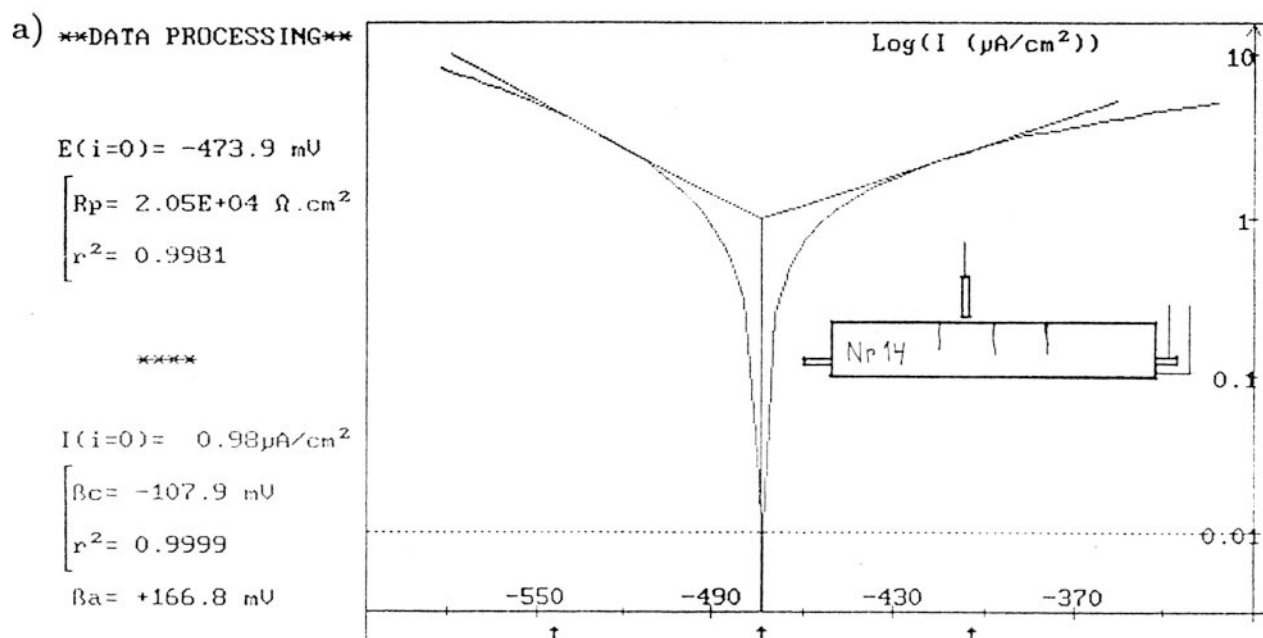
z.2.10. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 7 w 4. próbie po pierwszym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysu.



z.2.11. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 7 w 4. próbie po piątym cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w rysie, b) 20 cm od rysy.



z.2.12. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 14 w 1. próbie przed ekspozycją w roztworze NaCl i suszenia: a) w 1. rysie, b) w 2. rysie c) w 3. rysie.



z.2.13. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 14 w 1. próbie przed ekspozycją w roztworze NaCl i suszenia: a) między 1. i 2. rysą, b) między 2. i 3. rysą.

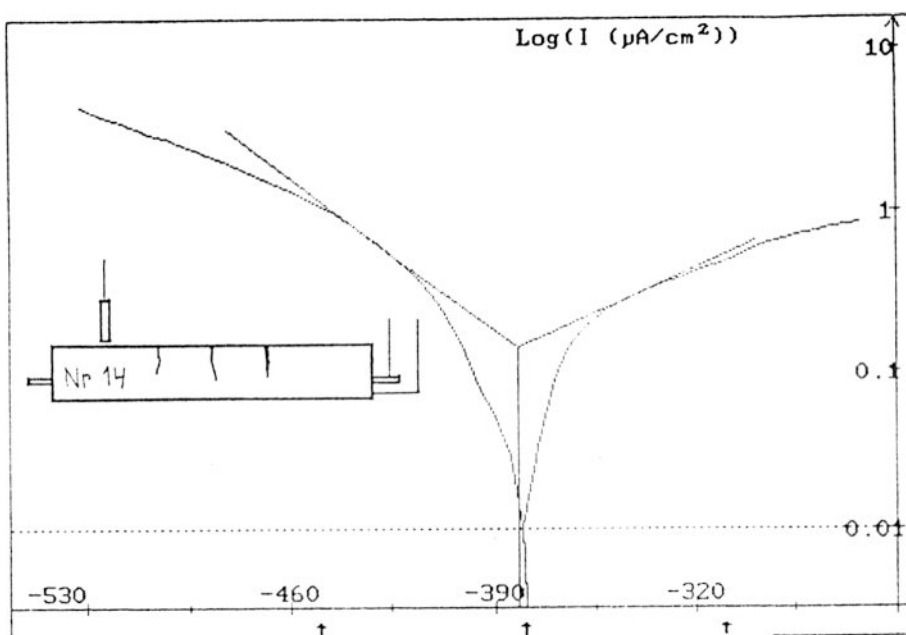
a) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -381.4 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 1.44 \times 10^5 \, \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9703 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 0.14 \, \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

$$\begin{cases} \beta_c = -75.6 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9994 \\ \beta_a = +125.8 \text{ mV} \end{cases}$$



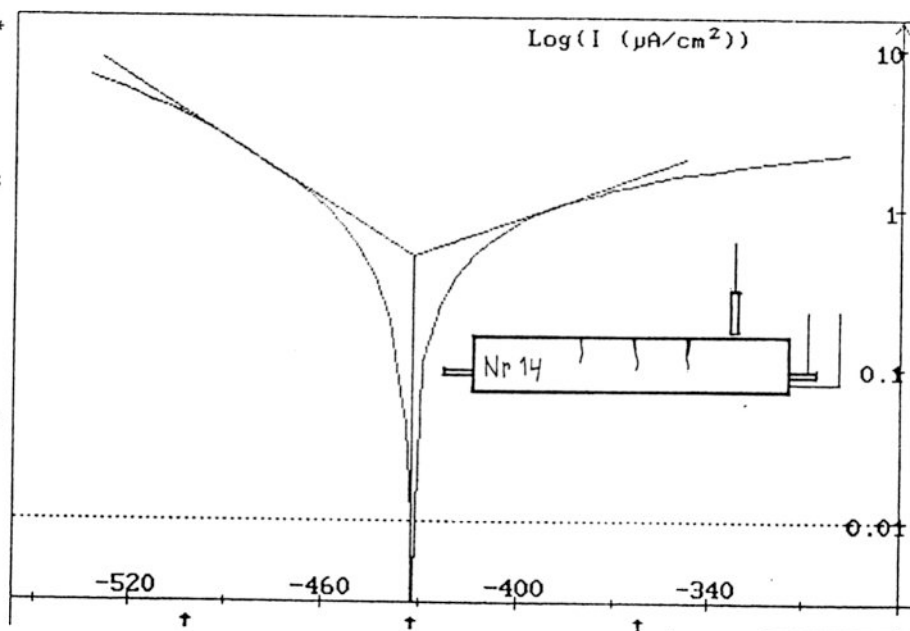
b) **DATA PROCESSING**

$$E(i=0) = -432.7 \text{ mV}$$

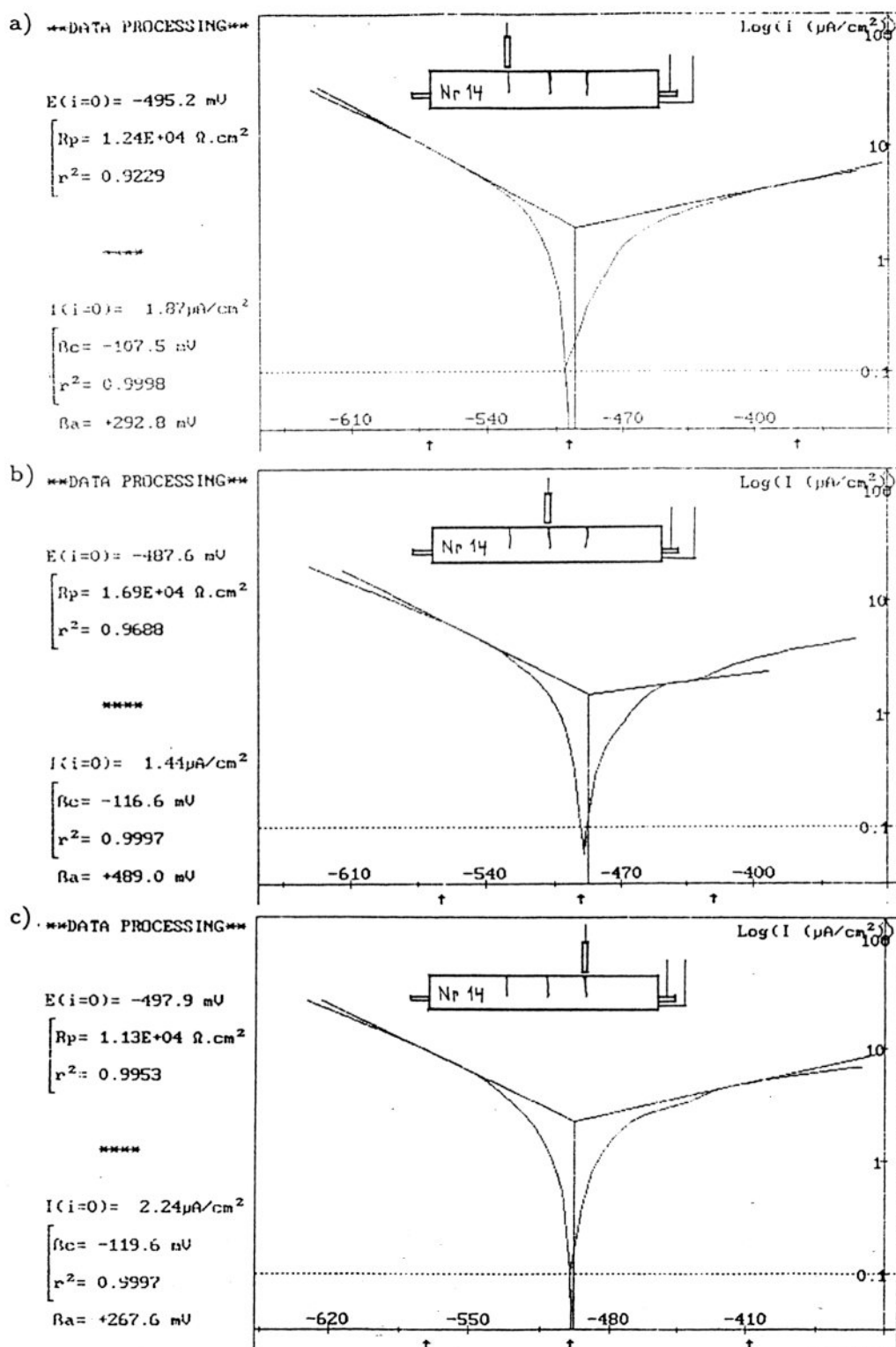
$$\begin{cases} R_p = 3.63 \times 10^4 \, \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9965 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 0.49 \, \mu\text{A}/\text{cm}^2$$

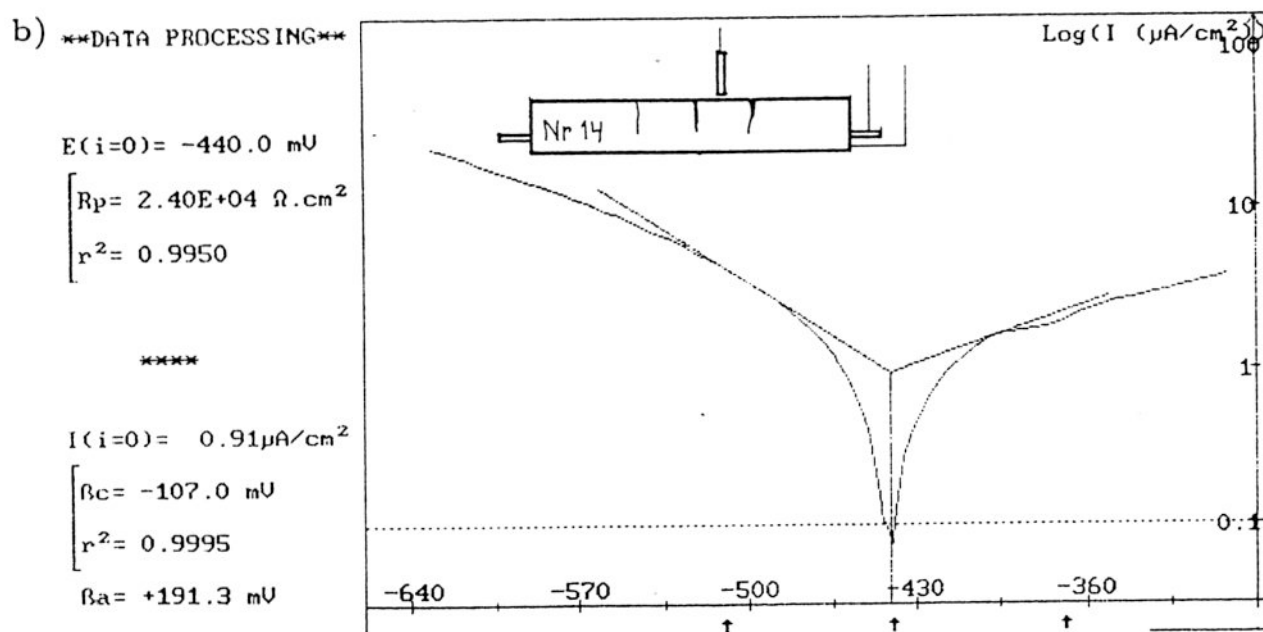
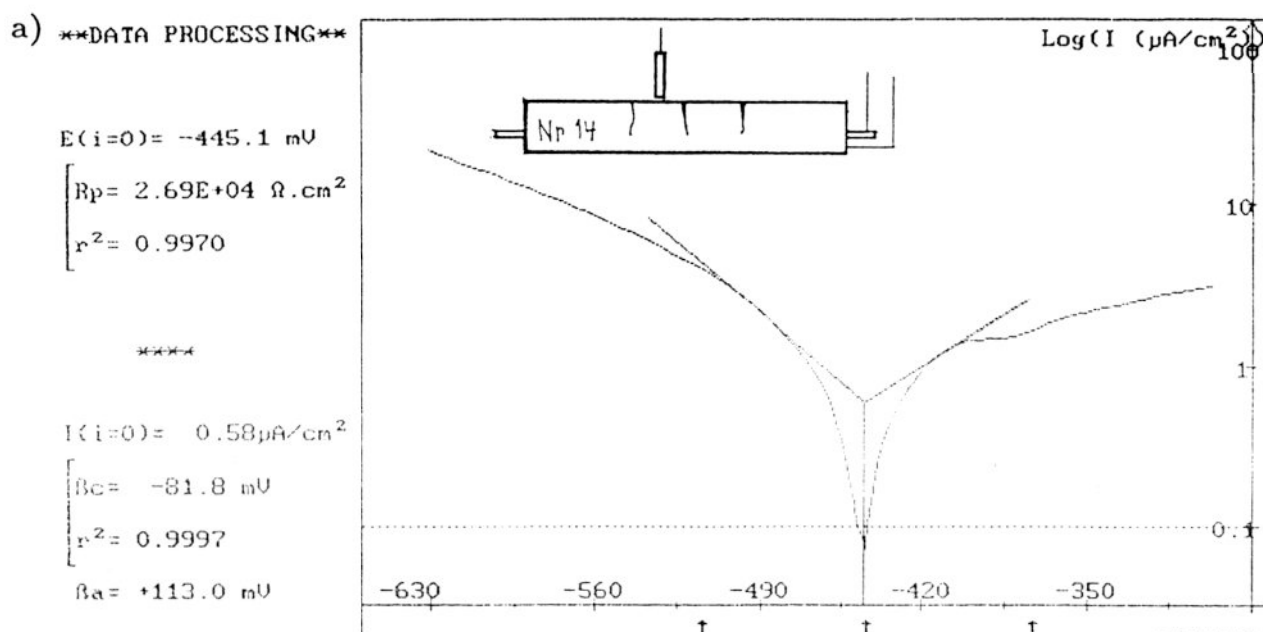
$$\begin{cases} \beta_c = -80.3 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9999 \\ \beta_a = +142.3 \text{ mV} \end{cases}$$



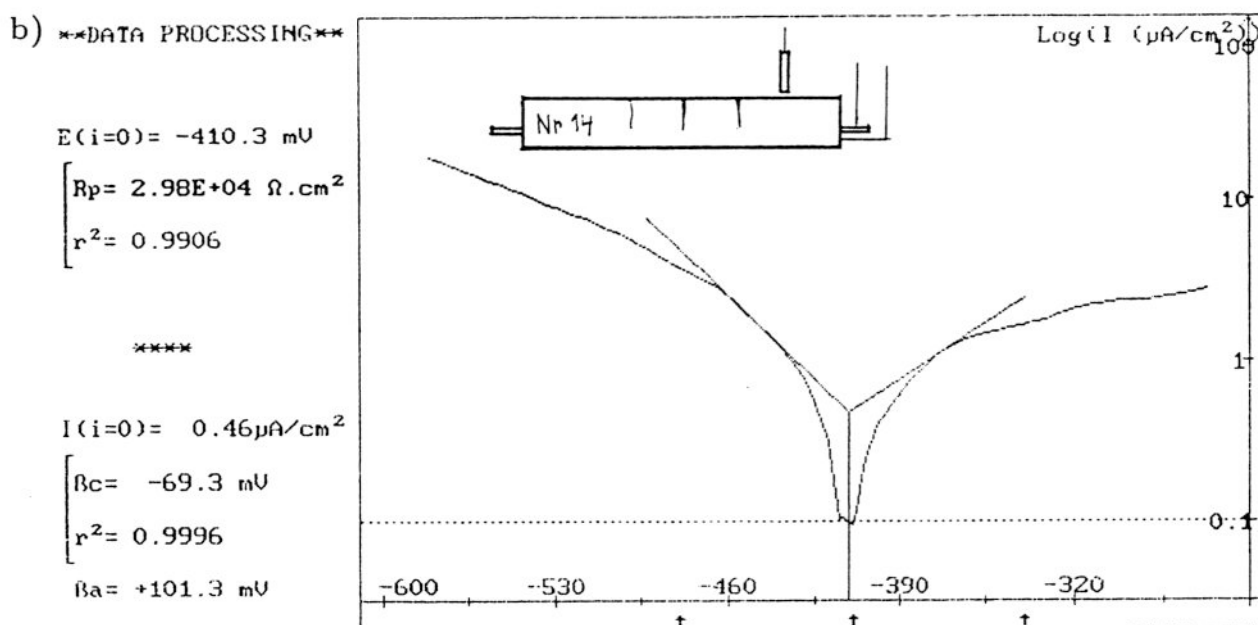
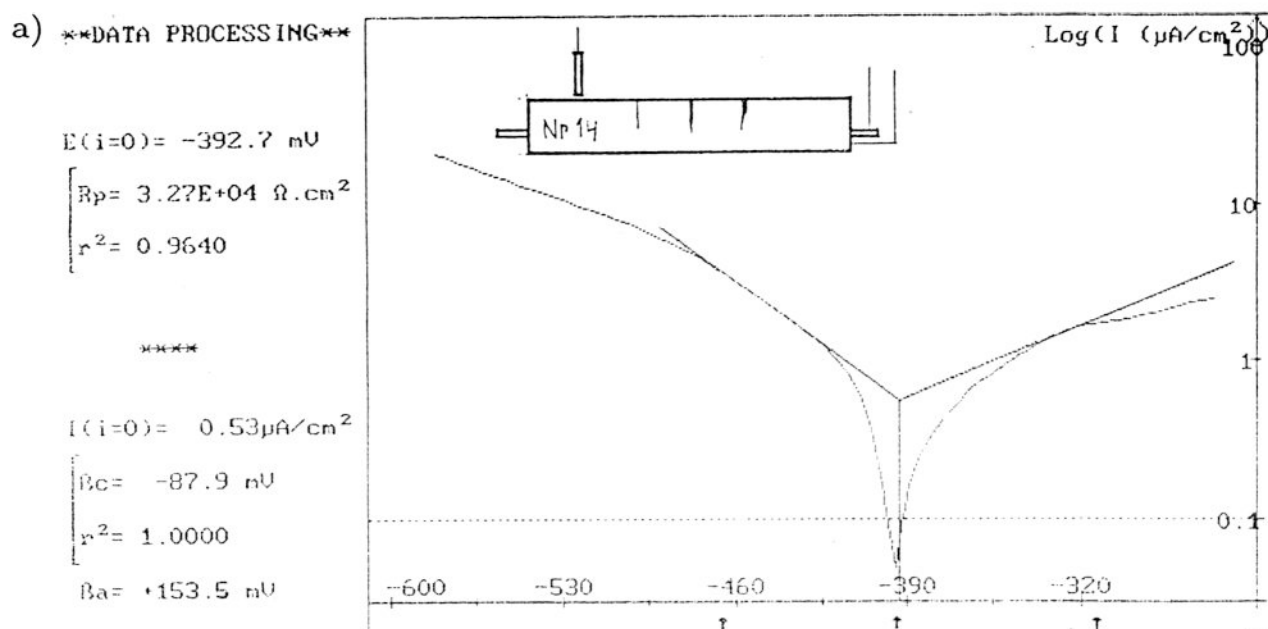
z. 2. 14. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 14 w 1. próbie przed ekspozycją w roztworze NaCl i suszenia w odległości 10 cm od: a) krawędzi skrajnej L, b) krawędzi skrajnej P.



z.2.15. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 14 w 1. próbie po 5. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w 1. rysie, b) w 2. rysie c) w 3. rysie.



z.2.16. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 14 w 1. próbie po 5. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) między 1. i 2. rysą, b) między 2. i 3. rysą.



z.2.17. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 14 w 1. próbie po 5. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia w odległości 10 cm od: a) krawędzi skrajnej L, b) krawędzi skrajnej P.

a)

DATA PROCESSING

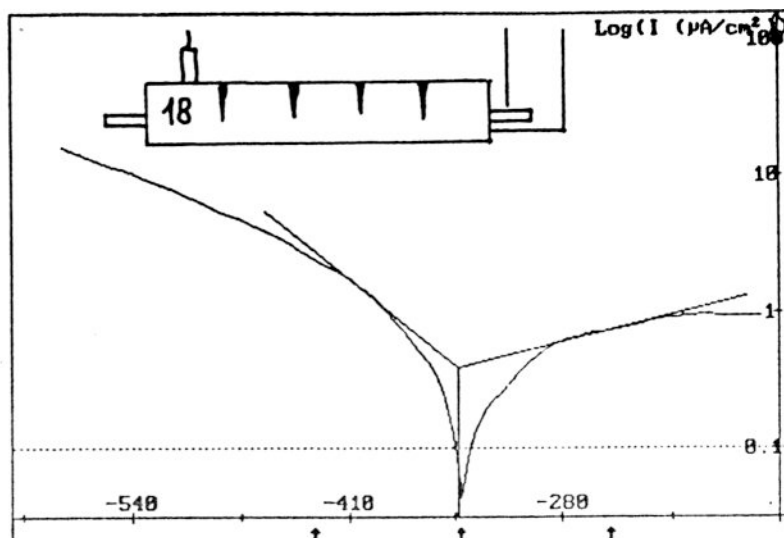
$$E(i=0) = -342.4 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 7.36 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9414 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 383.13 \text{ nA/cm}^2$$

$$\begin{cases} p_c = -183.7 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9996 \\ p_a = +348.9 \text{ mV} \end{cases}$$

DATA PROCESSING



b)

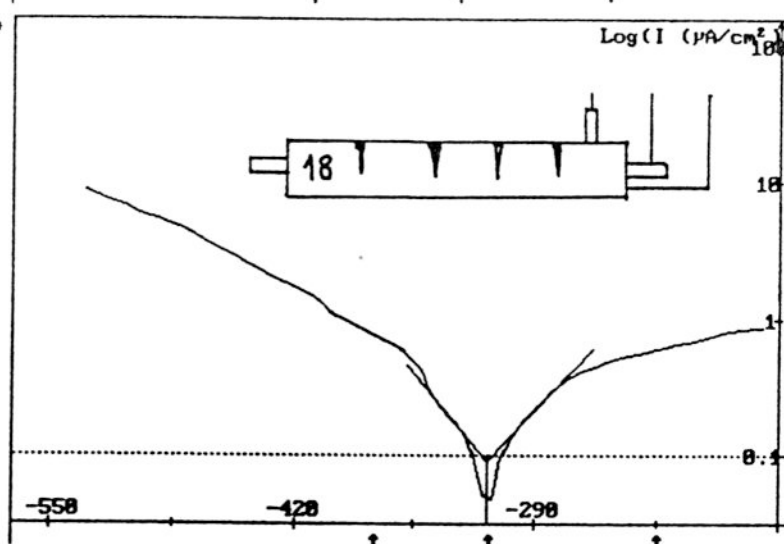
$$E(i=0) = -314.1 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 1.13 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9885 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 86.95 \text{ nA/cm}^2$$

$$\begin{cases} p_c = -63.1 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9978 \\ p_a = +68.2 \text{ mV} \end{cases}$$

DATA PROCESSING



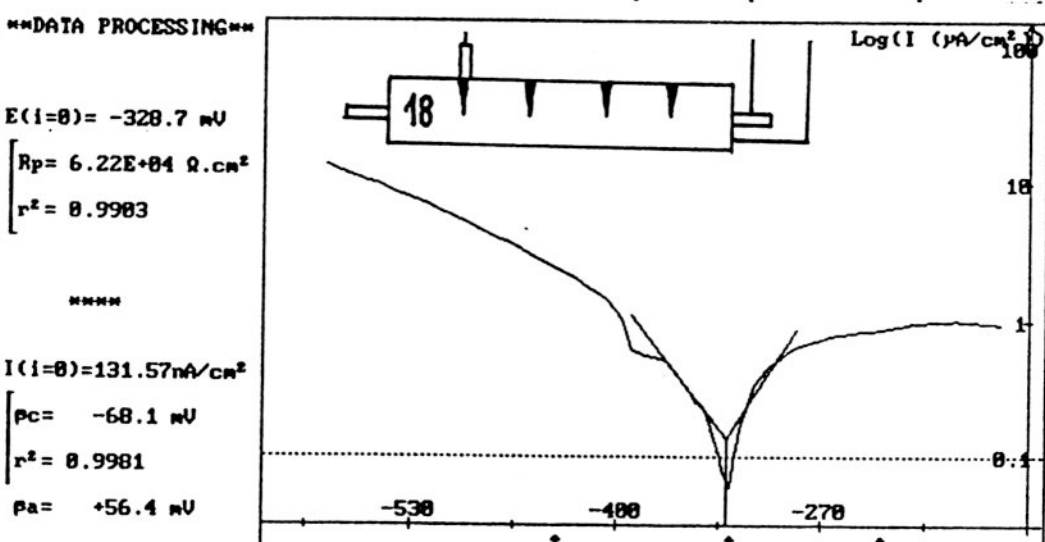
c)

$$E(i=0) = -328.7 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 6.22 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9983 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 131.57 \text{ nA/cm}^2$$

$$\begin{cases} p_c = -68.1 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9981 \\ p_a = +56.4 \text{ mV} \end{cases}$$



z.2.18. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 1. próbie po 1. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia w odległości 10 cm od: a) krawędzi skrajnej L, b) krawędzi skrajnej P oraz c) w 1 rysie.

a)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -378.2 \text{ mV}$$

$$R_p = 6.48 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

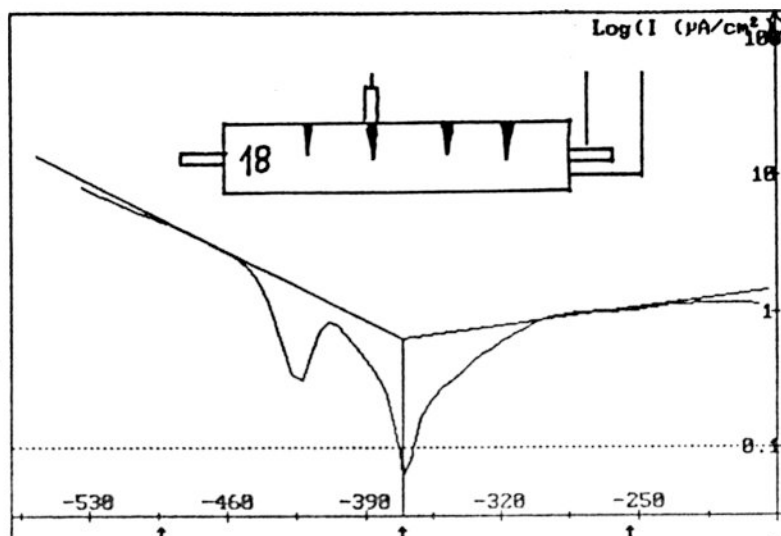
$$r^2 = 0.9515$$

$$I(i=0) = 615.68 \text{ nA/cm}^2$$

$$p_c = -142.8 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9999$$

$$p_a = +522.4 \text{ mV}$$



b)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -346.4 \text{ mV}$$

$$R_p = 8.69 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

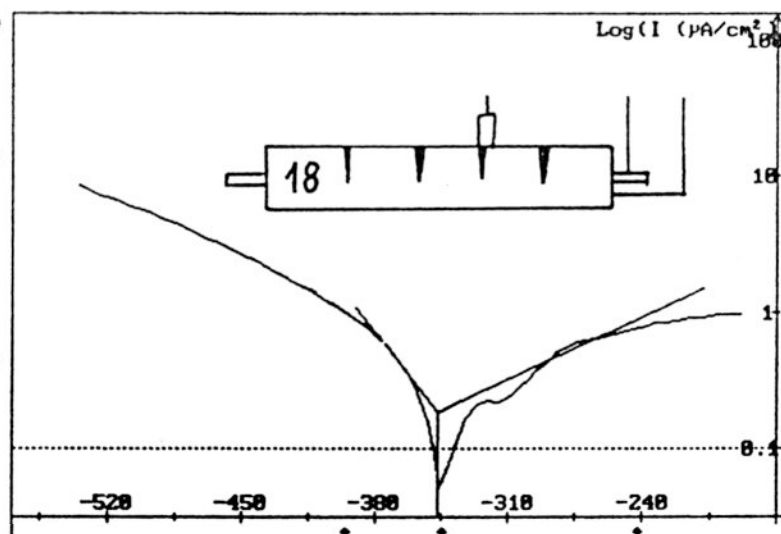
$$r^2 = 0.8975$$

$$I(i=0) = 182.27 \text{ nA/cm}^2$$

$$p_c = -58.4 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9993$$

$$p_a = +156.8 \text{ mV}$$



c)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -333.8 \text{ mV}$$

$$R_p = 7.62 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$$

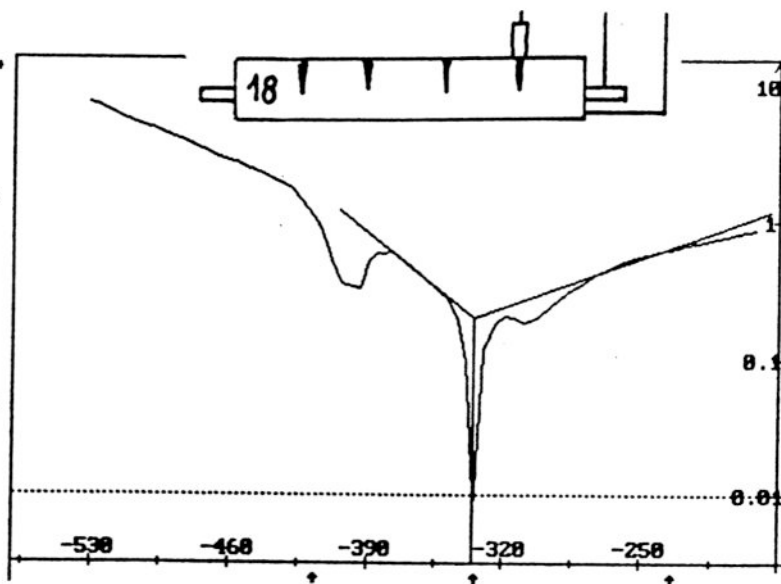
$$r^2 = 0.8798$$

$$I(i=0) = 288.76 \text{ nA/cm}^2$$

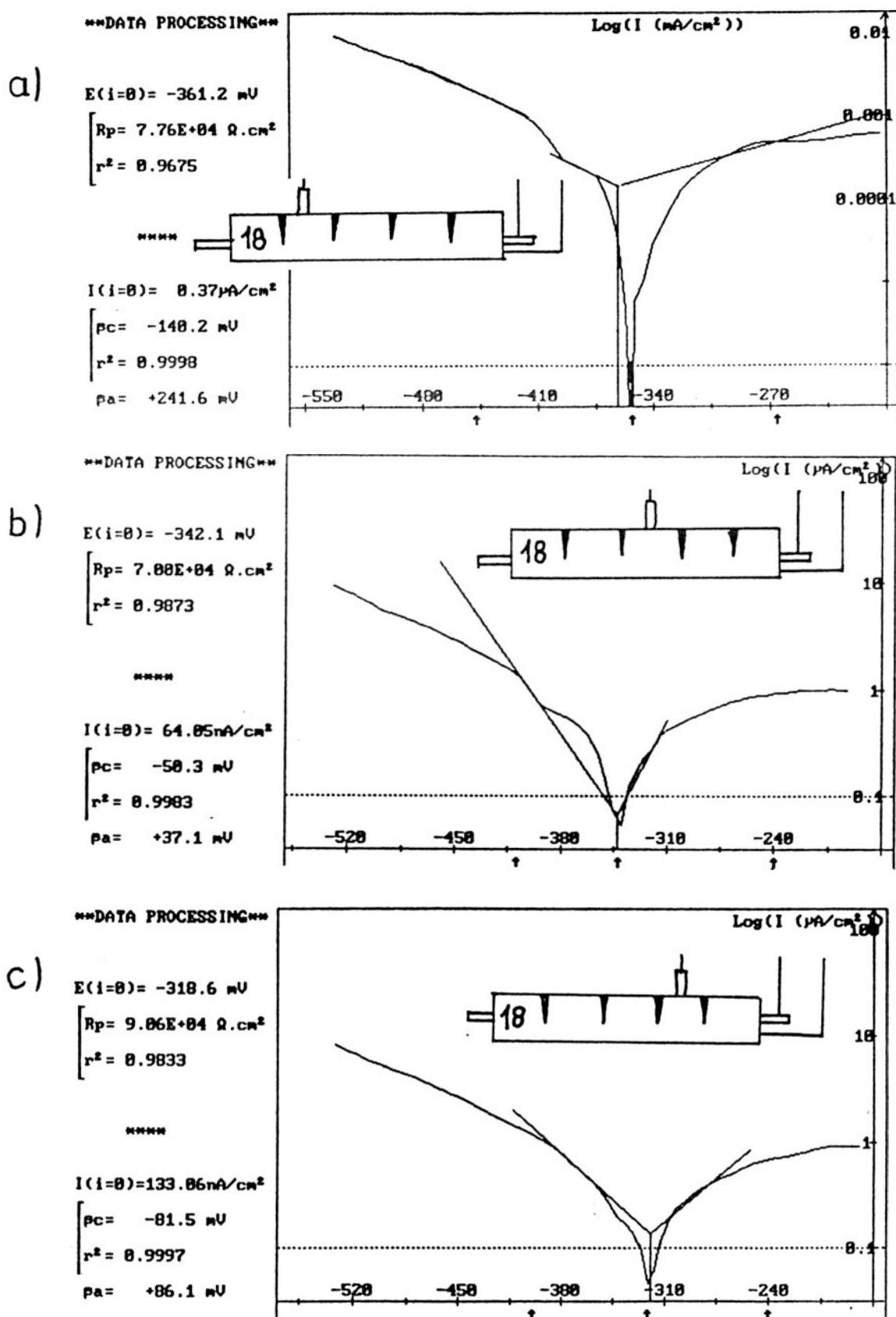
$$p_c = -91.7 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9996$$

$$p_a = +281.2 \text{ mV}$$



z. 2.19. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 1. próbie po 1. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w 2. rysie, b) w 3. rysie c) w 4. rysie.



z.2.20. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 1. próbie po 1. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) pomiędzy 1. i 2. rysą, b) pomiędzy 2. i 3. rysą c) pomiędzy 3. i 4. rysą.

a)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -223.4 \text{ mV}$$

$$R_p = 4.58E+05 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

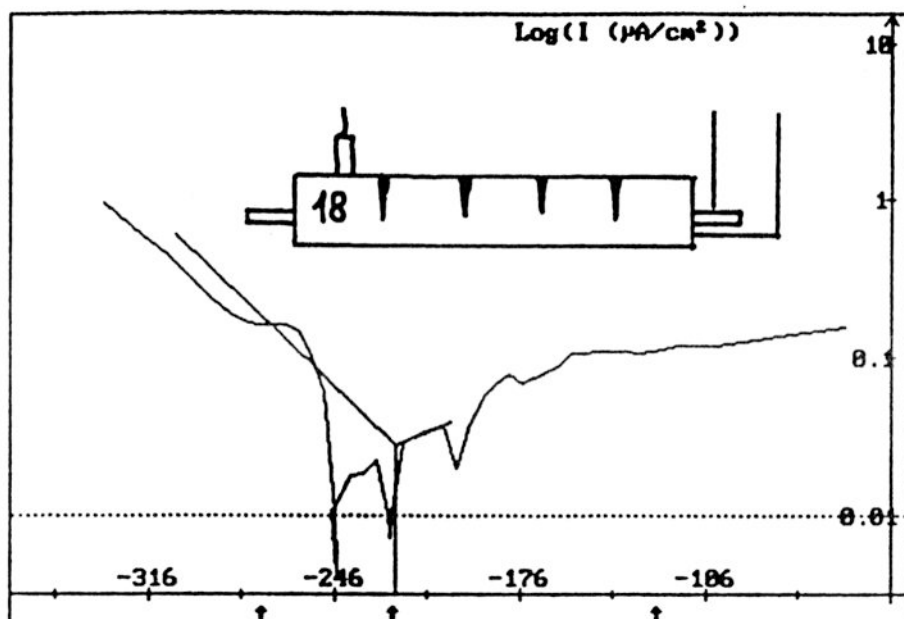
$$r^2 = 0.4978$$

$$I(i=0) = 27.15 \text{ nA/cm}^2$$

$$p_a = +144.4 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9972$$

$$p_c = -63.4 \text{ mV}$$



b)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -254.7 \text{ mV}$$

$$R_p = 9.18E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

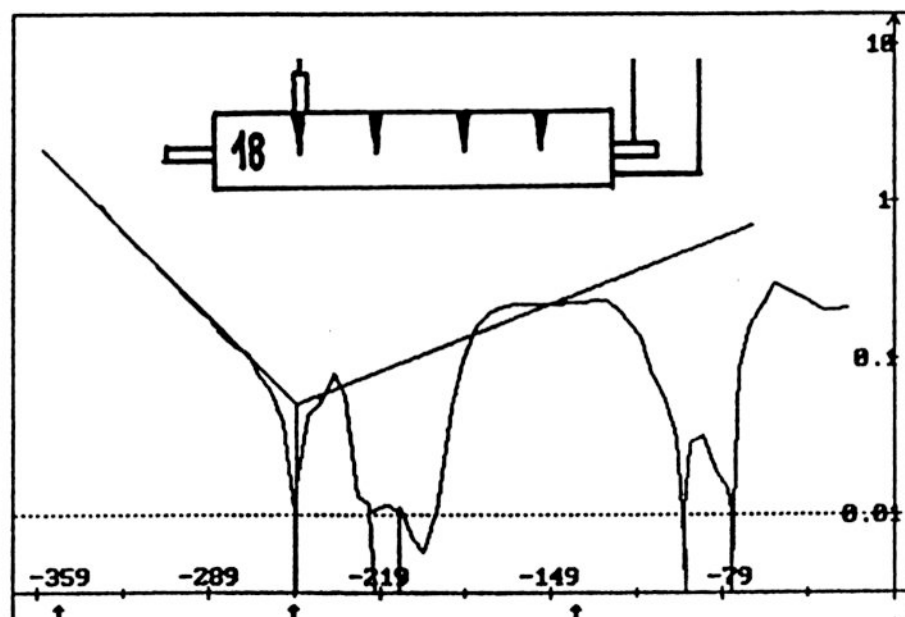
$$r^2 = 0.8524$$

$$I(i=0) = 49.38 \text{ nA/cm}^2$$

$$p_c = -65.2 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9999$$

$$p_a = +166.7 \text{ mV}$$



z.2.21. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 1. próbie po 5. cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia w odległości 10 cm od: a) krawędzi skrajnej L oraz b) w 1 rysie.

a)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -236.2 \text{ mV}$$

$$R_p = 2.11 \times 10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

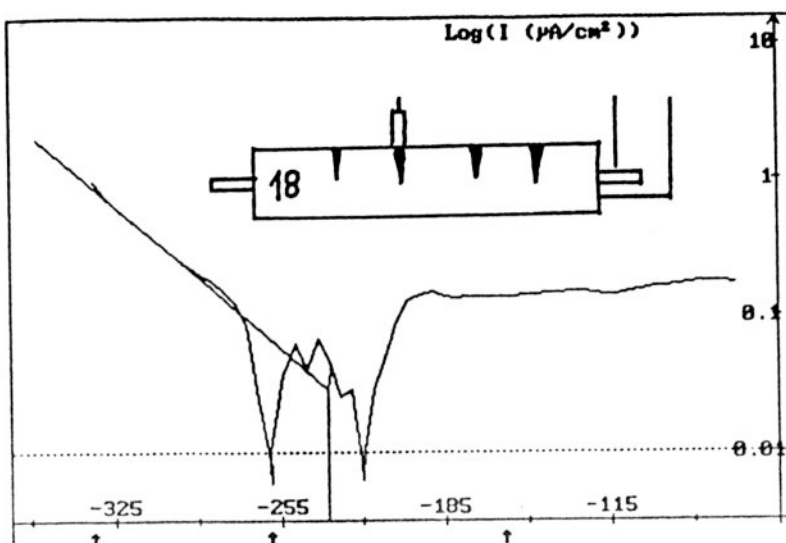
$$r^2 = 0.2993$$

$$I(i=0) = 28.33 \text{ nA/cm}^2$$

$$p_c = -67.1 \text{ mV}$$

$$r^2 = 1.0000$$

$$p_a = +10.9 \text{ mV}$$



b)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -245.6 \text{ mV}$$

$$R_p = 5.23970 \times 10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

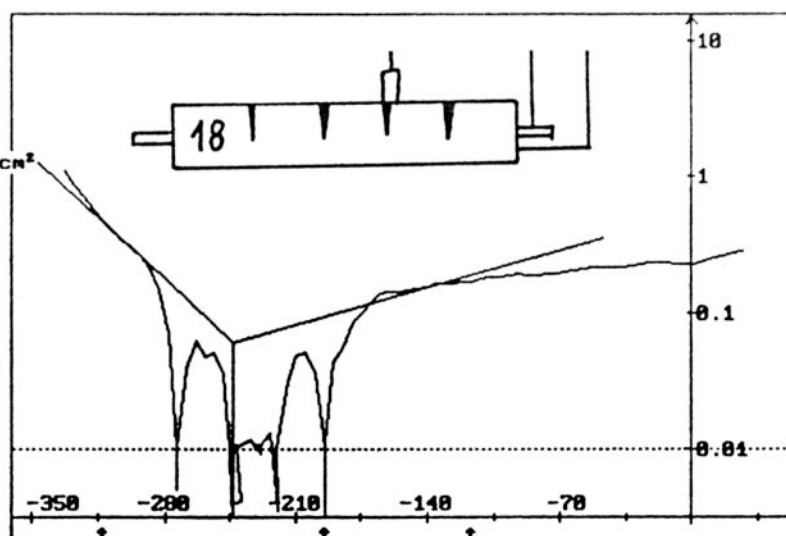
$$r^2 = 0.6556$$

$$I(i=0) = 58.85 \text{ nA/cm}^2$$

$$p_c = -79.8 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9978$$

$$p_a = +261.7 \text{ mV}$$



c)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -261.3 \text{ mV}$$

$$R_p = 3.67 \times 10^5 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

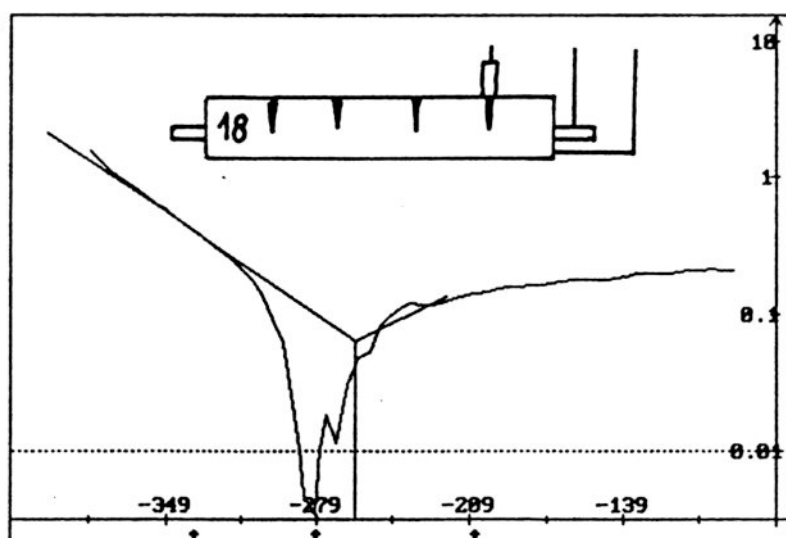
$$r^2 = 0.9437$$

$$I(i=0) = 62.87 \text{ nA/cm}^2$$

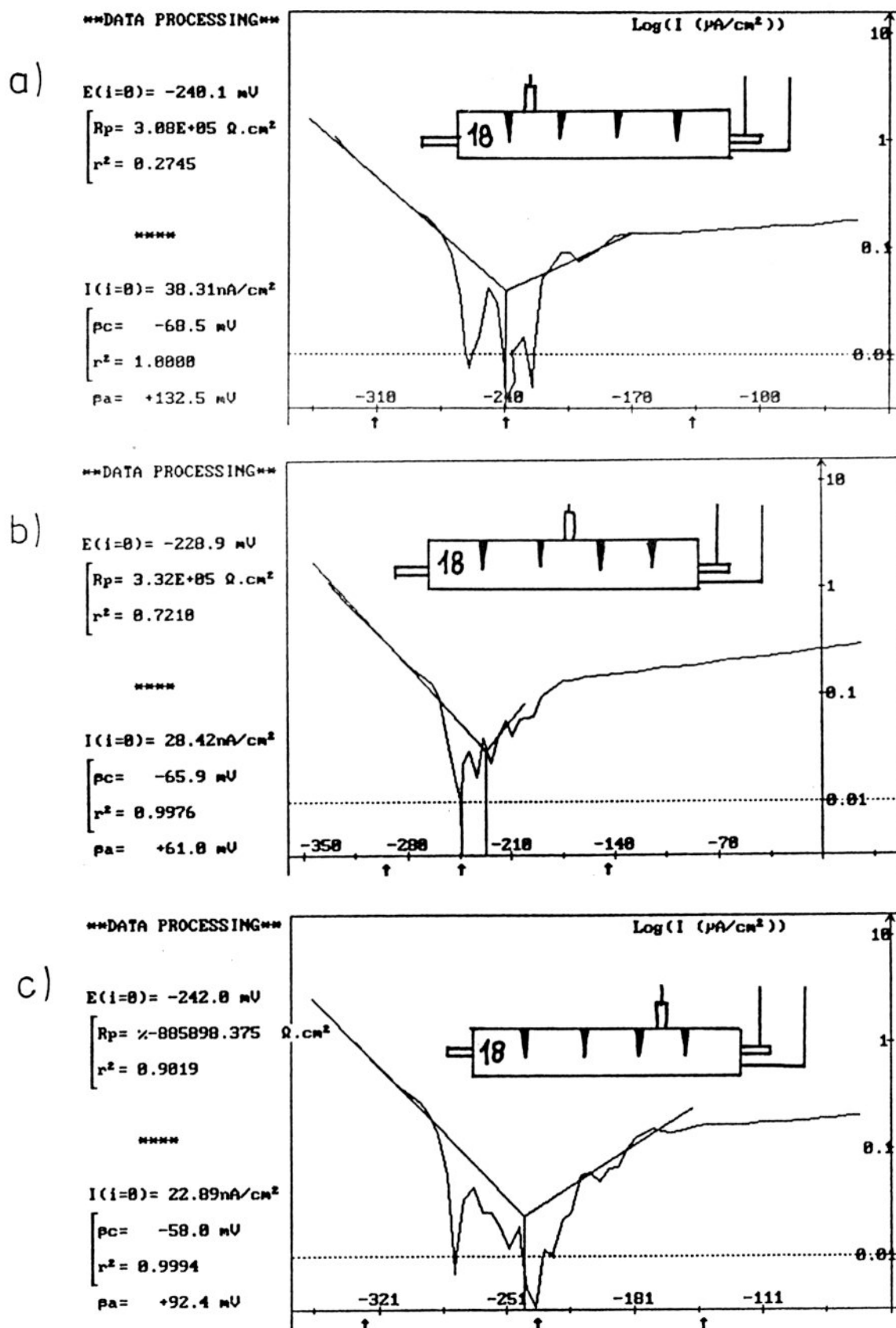
$$p_c = -94.5 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9996$$

$$p_a = +133.6 \text{ mV}$$



z.2.22. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 1. próbie po 5. cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w 2. rysie, b) w 3. rysie c) w 4. rysie.

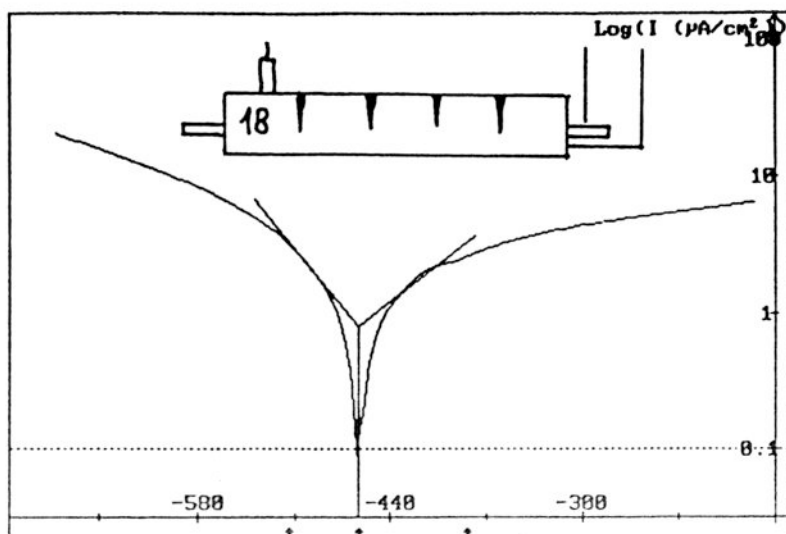


z.2.23. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 1. próbie po 1. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) pomiędzy 1. i 2. rysą, b) pomiędzy 2. i 3. rysą c) pomiędzy 3. i 4. rysą.

a)

DATA PROCESSING

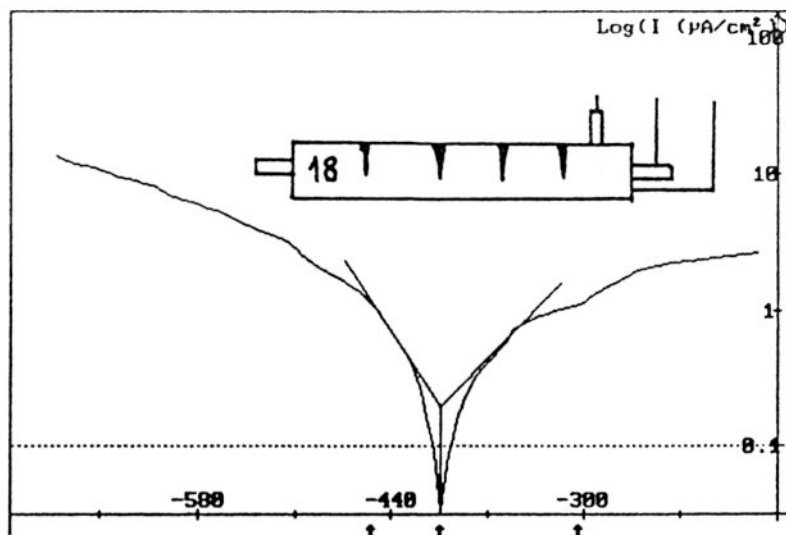
 $E(i=0) = -463.9 \text{ mV}$ $R_p = 1.93E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9921$

 $I(i=0) = 787.12 \text{ nA/cm}^2$ $p_c = -82.8 \text{ mV}$ $r^2 = 0.9986$ $p_a = +133.4 \text{ mV}$ 

b)

DATA PROCESSING

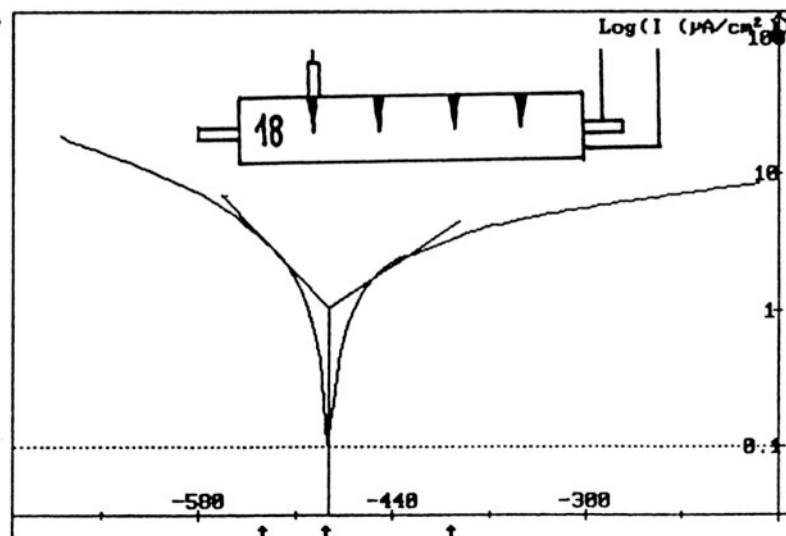
 $E(i=0) = -482.6 \text{ mV}$ $R_p = 7.47E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9892$

 $I(i=0) = 189.46 \text{ nA/cm}^2$ $p_c = -66.5 \text{ mV}$ $r^2 = 0.9988$ $p_a = +97.4 \text{ mV}$ 

c)

DATA PROCESSING

 $E(i=0) = -486.7 \text{ mV}$ $R_p = 1.68E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9960$

 $I(i=0) = 1.82 \text{ µA/cm}^2$ $p_c = -96.1 \text{ mV}$ $r^2 = 0.9971$ $p_a = +158.4 \text{ mV}$ 

z.2.24. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 2. próbie po 1. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia w odległości 10 cm od: a) krawędzi skrajnej L, b) krawędzi skrajnej P oraz c) w 1 rysie.

a)

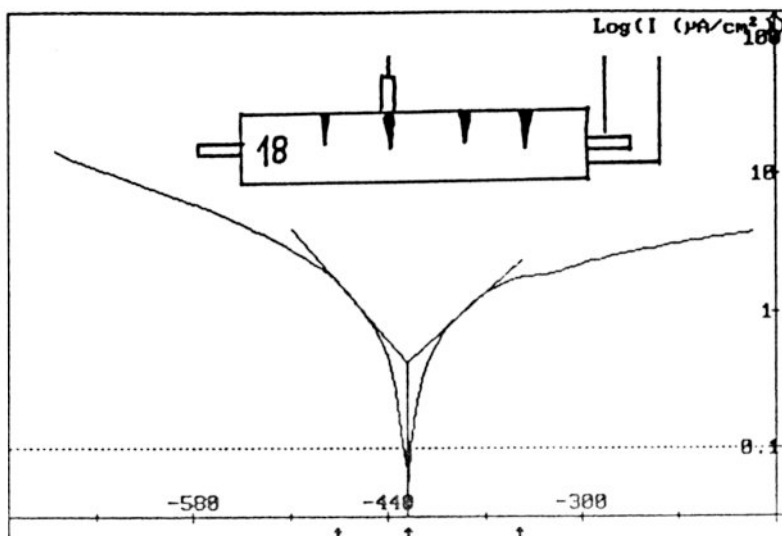
DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -426.3 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 3.62E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9930 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 410.75 \text{ nA/cm}^2$$

$$\begin{cases} p_c = -84.6 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9995 \\ p_a = +112.2 \text{ mV} \end{cases}$$



b)

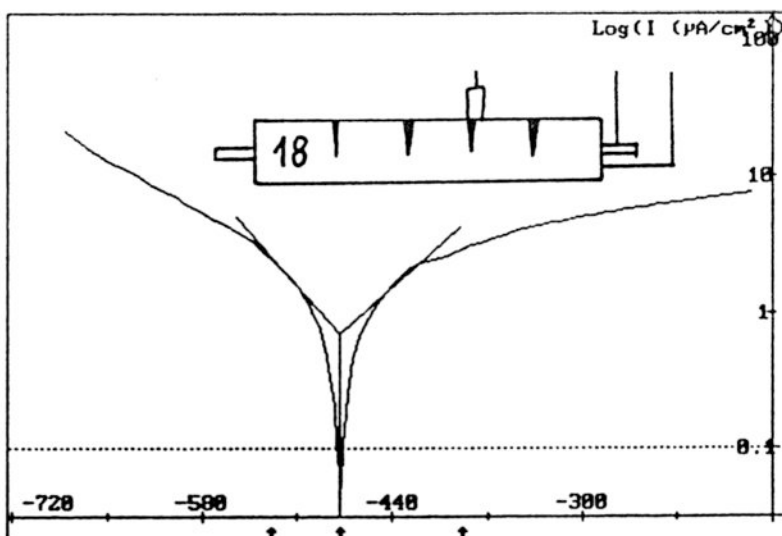
DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -479.5 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 2.30E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9955 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 679.56 \text{ nA/cm}^2$$

$$\begin{cases} p_c = -98.2 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9979 \\ p_a = +115.2 \text{ mV} \end{cases}$$



c)

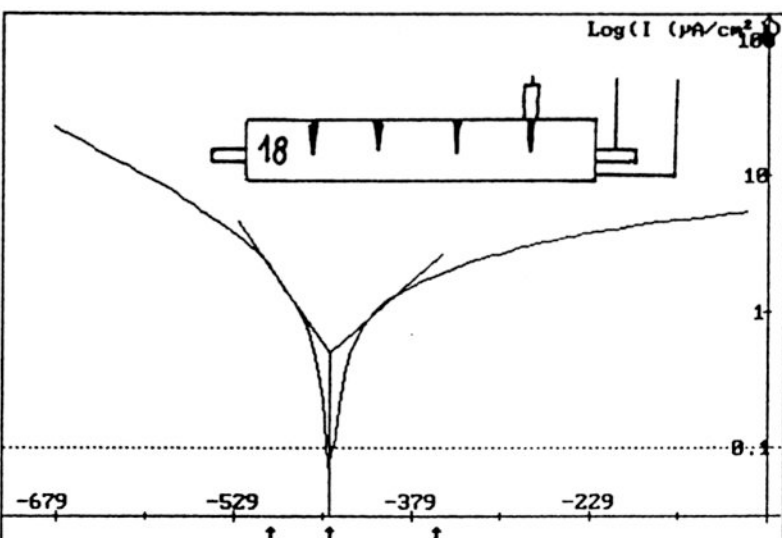
DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -449.4 \text{ mV}$$

$$\begin{cases} R_p = 3.23E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2 \\ r^2 = 0.9925 \end{cases}$$

$$I(i=0) = 480.36 \text{ nA/cm}^2$$

$$\begin{cases} p_c = -82.4 \text{ mV} \\ r^2 = 0.9994 \\ p_a = +130.6 \text{ mV} \end{cases}$$



z.2.25. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 2. próbie po 1. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w 2. rysie, b) w 3. rysie c) w 4. rysie.

a)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -455.6 \text{ mV}$$

$$R_p = 2.52E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

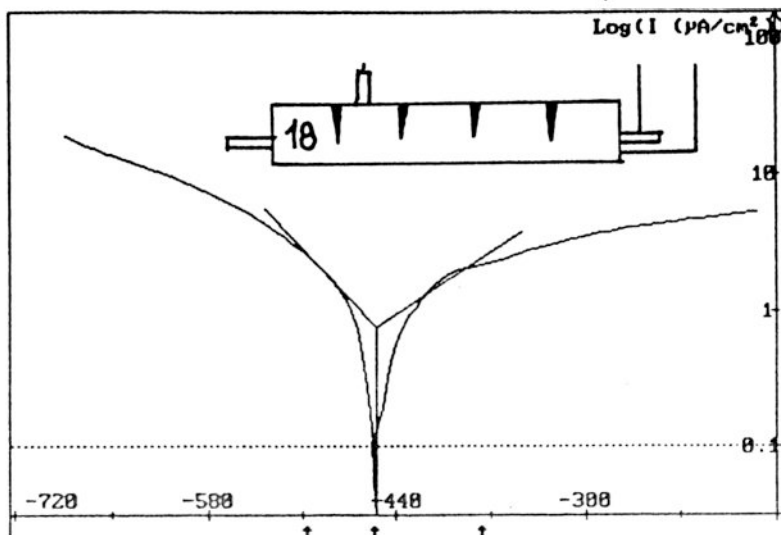
$$r^2 = 0.9983$$

$$I(i=0) = 744.74 \text{ nA/cm}^2$$

$$p_c = -97.2 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9976$$

$$p_a = +158.2 \text{ mV}$$



b)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -418.9 \text{ mV}$$

$$R_p = 3.38E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

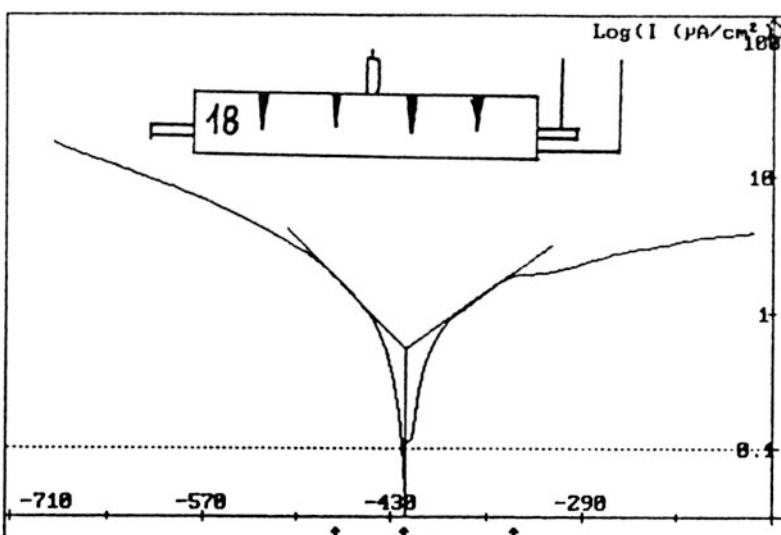
$$r^2 = 0.9972$$

$$I(i=0) = 522.18 \text{ nA/cm}^2$$

$$p_c = -101.2 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9999$$

$$p_a = +141.1 \text{ mV}$$



c)

DATA PROCESSING

$$E(i=0) = -442.7 \text{ mV}$$

$$R_p = 3.03E+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$$

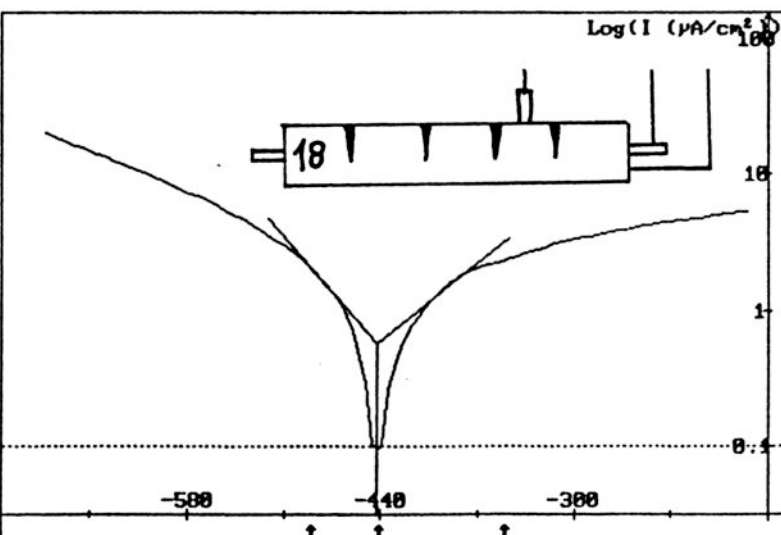
$$r^2 = 0.9938$$

$$I(i=0) = 554.69 \text{ nA/cm}^2$$

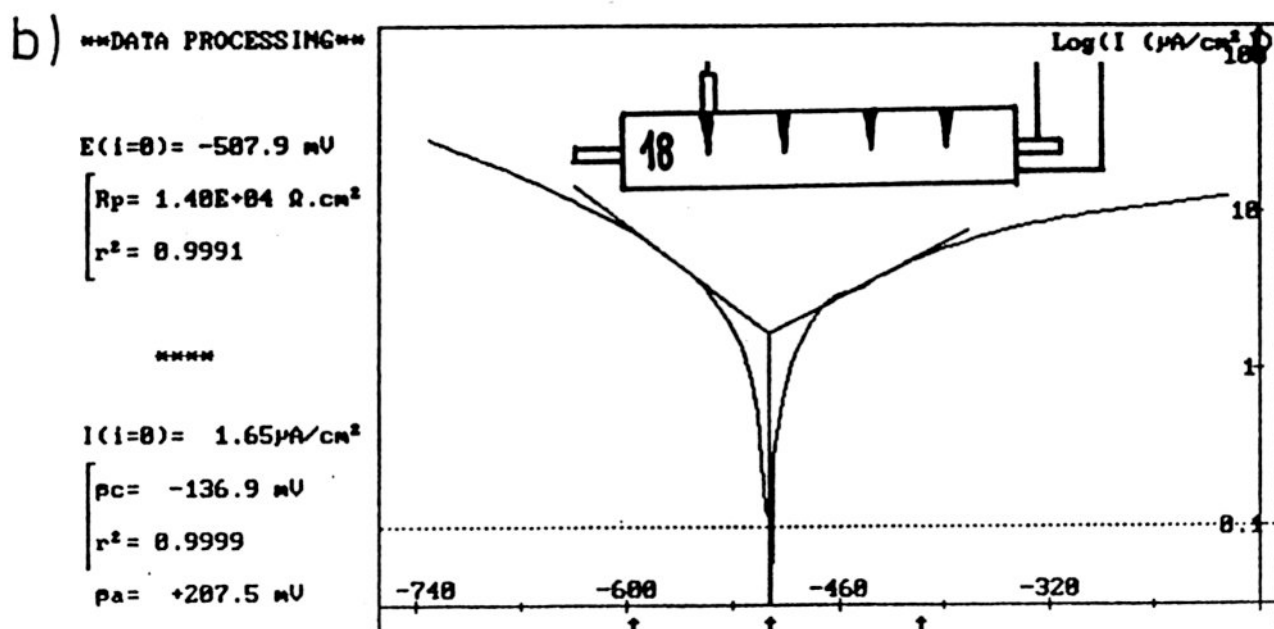
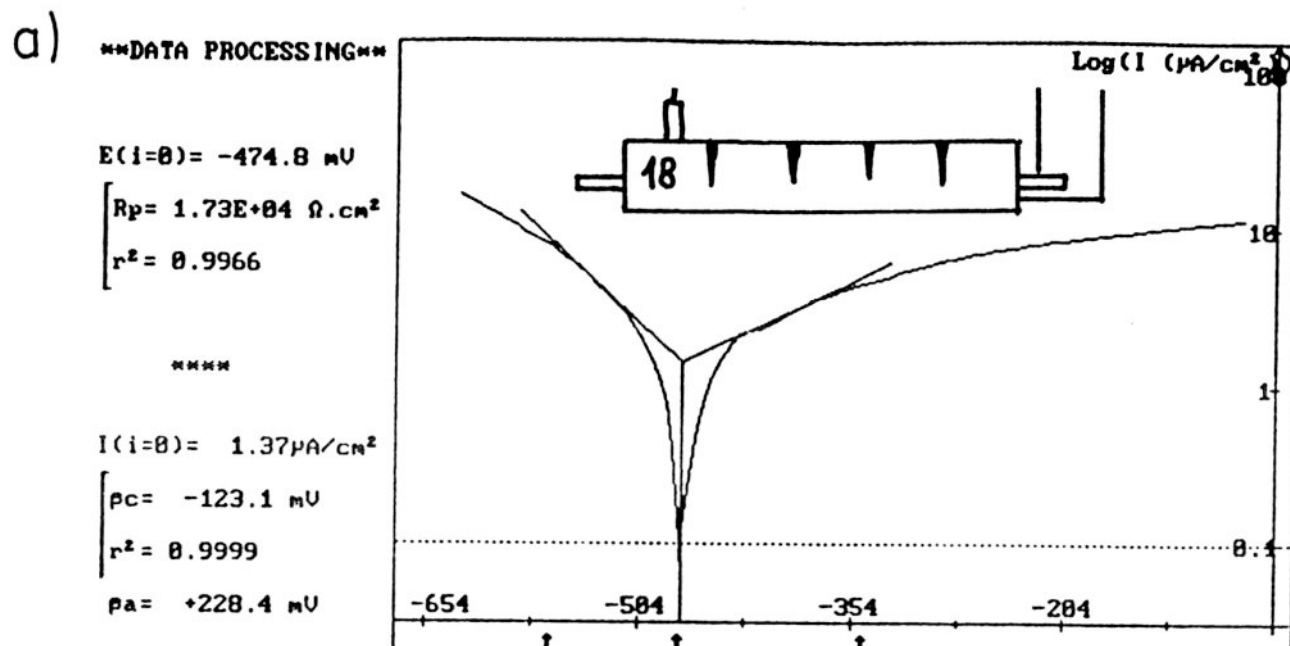
$$p_c = -86.9 \text{ mV}$$

$$r^2 = 0.9994$$

$$23.9 \text{ mV}$$



z.2.26. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 2. próbie po 1. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) pomiędzy 1. i 2. rysą, b) pomiędzy 2. i 3. rysą c) pomiędzy 3. i 4. rysą.

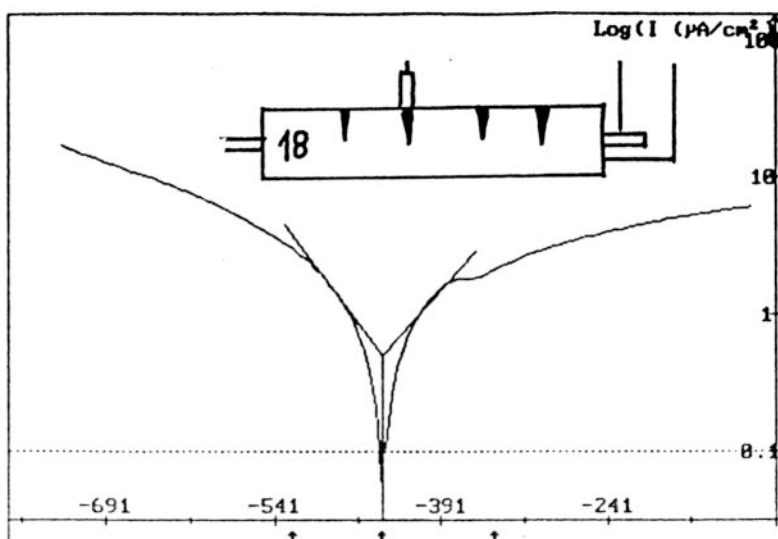


z.2.27. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 2. próbie po 5. cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia w odległości 10 cm od: a) krawędzi skrajnej L oraz b) w 1 rysie.

a)

DATA PROCESSING

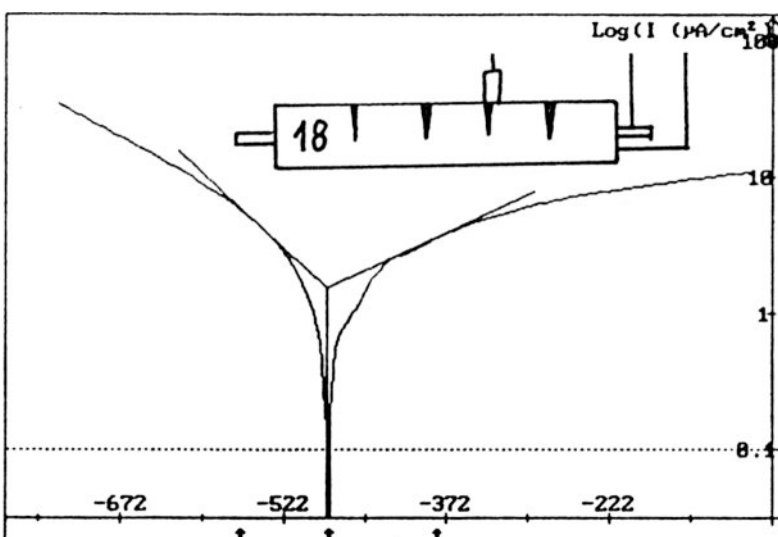
 $E(i=0) = -443.9 \text{ mV}$ $R_p = 3.32 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9989$

 $I(i=0) = 483.52 \text{ nA/cm}^2$ $p_c = -93.2 \text{ mV}$ $r^2 = 0.9997$ $p_a = +112.8 \text{ mV}$ 

b)

DATA PROCESSING

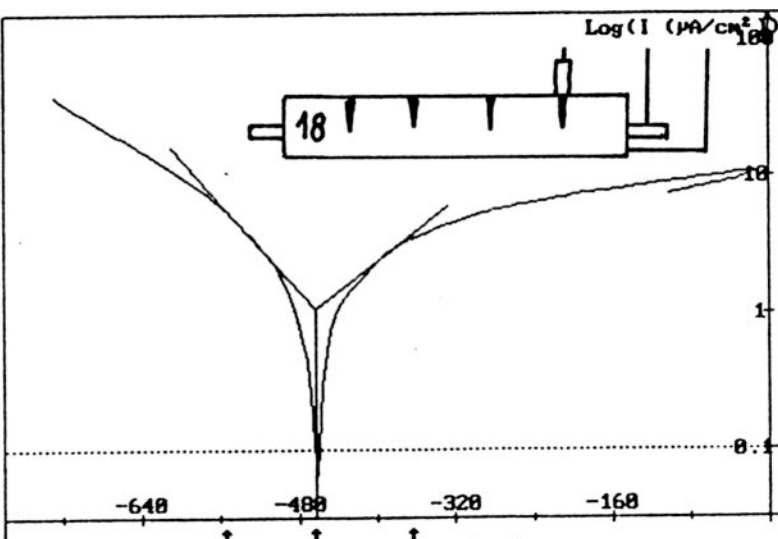
 $E(i=0) = -483.5 \text{ mV}$ $R_p = 1.86 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9494$

 $I(i=0) = 1.58 \mu\text{A/cm}^2$ $p_c = -139.1 \text{ mV}$ $r^2 = 0.9998$ $p_a = +274.9 \text{ mV}$ 

c)

DATA PROCESSING

 $E(i=0) = -464.4 \text{ mV}$ $R_p = 2.19 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9978$

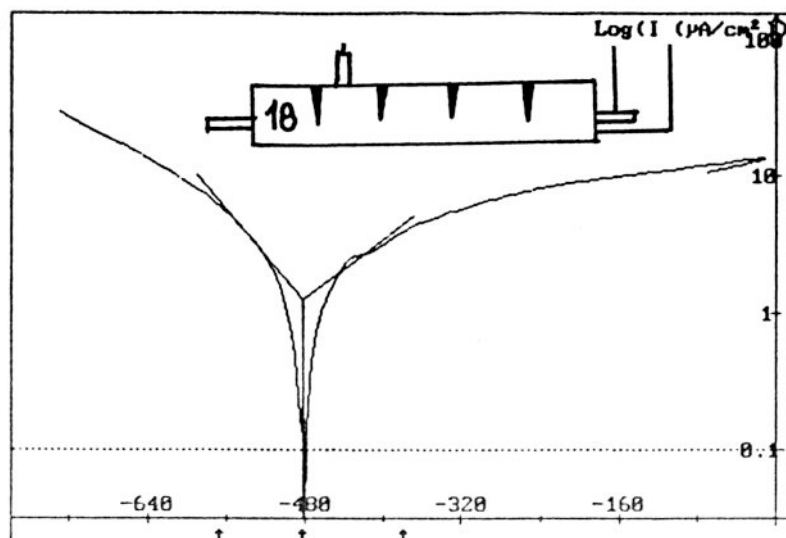
 $I(i=0) = 1.05 \mu\text{A/cm}^2$ $p_c = -125.5 \text{ mV}$ $r^2 = 0.9999$ $p_a = +182.7 \text{ mV}$ 

z.2.28. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 2. próbie po 5. cyklu zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) w 2. rysie, b) w 3. rysie c) w 4. rysie.

a)

DATA PROCESSING

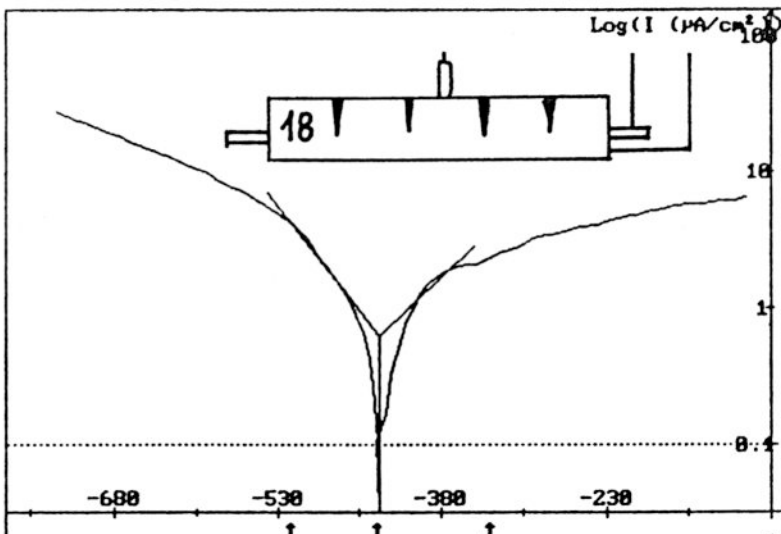
 $E(i=0) = -483.8 \text{ mV}$ $R_p = 1.81\text{E}+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9962$

 $I(i=0) = 1.22 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ $p_c = -121.3 \text{ mV}$ $r^2 = 1.0000$ $p_a = +189.7 \text{ mV}$ 

b)

DATA PROCESSING

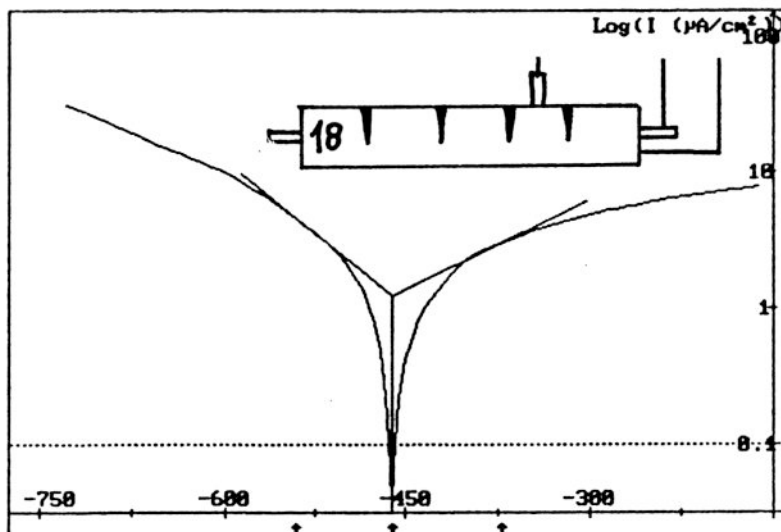
 $E(i=0) = -435.3 \text{ mV}$ $R_p = 2.98\text{E}+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9964$

 $I(i=0) = 618.97 \text{ nA}/\text{cm}^2$ $p_c = -100.3 \text{ mV}$ $r^2 = 0.9996$ $p_a = +132.3 \text{ mV}$ 

c)

DATA PROCESSING

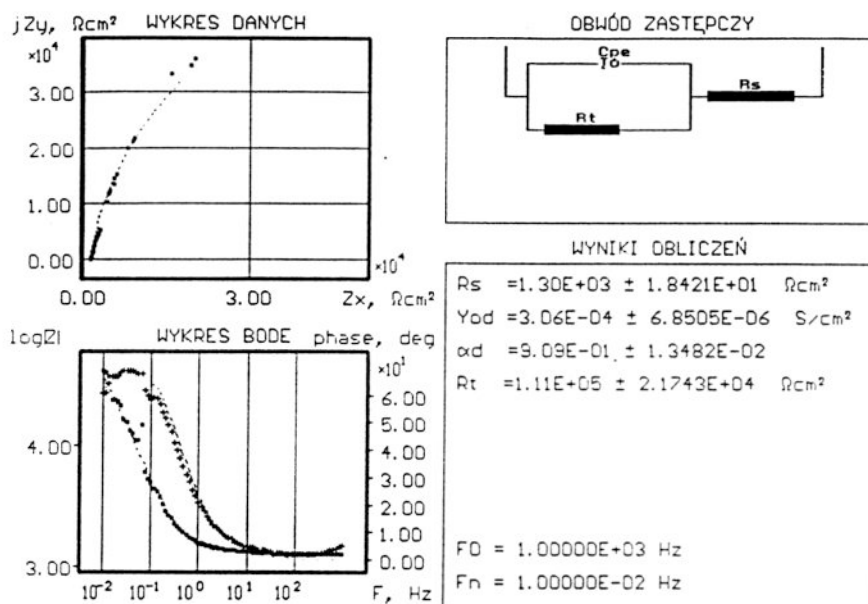
 $E(i=0) = -461.1 \text{ mV}$ $R_p = 2.42\text{E}+04 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ $r^2 = 0.9910$

 $I(i=0) = 1.21 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ $p_c = -141.7 \text{ mV}$ $r^2 = 0.9998$ $p_a = +235.3 \text{ mV}$ 

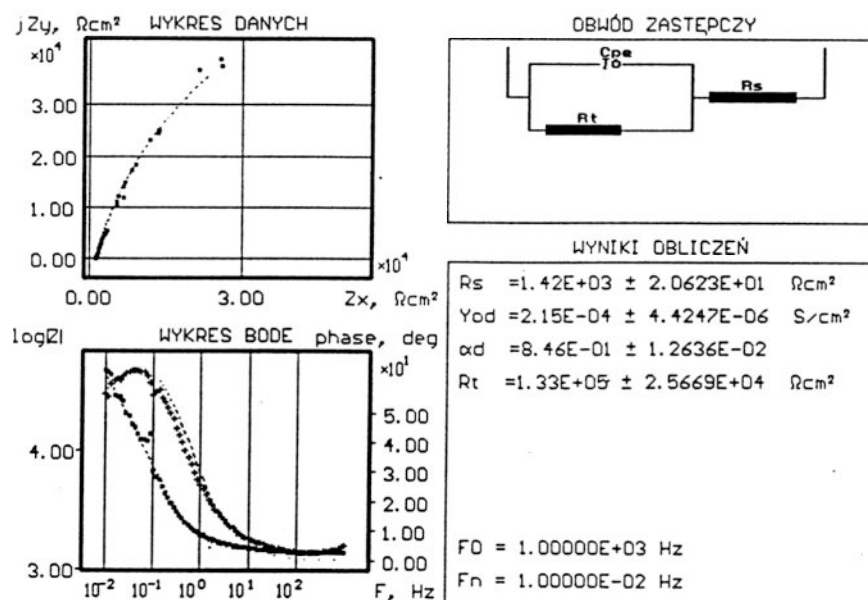
z. 2.29. Wyniki badania polaryzacji zbrojenia elementu Nr 18 w 2. próbie po 5. cyklach zwilżania w roztworze NaCl i suszenia: a) pomiędzy 1. i 2. rysą, b) pomiędzy 2. i 3. rysą c) pomiędzy 3. i 4. rysą.

ZAŁĄCZNIK Nr 3

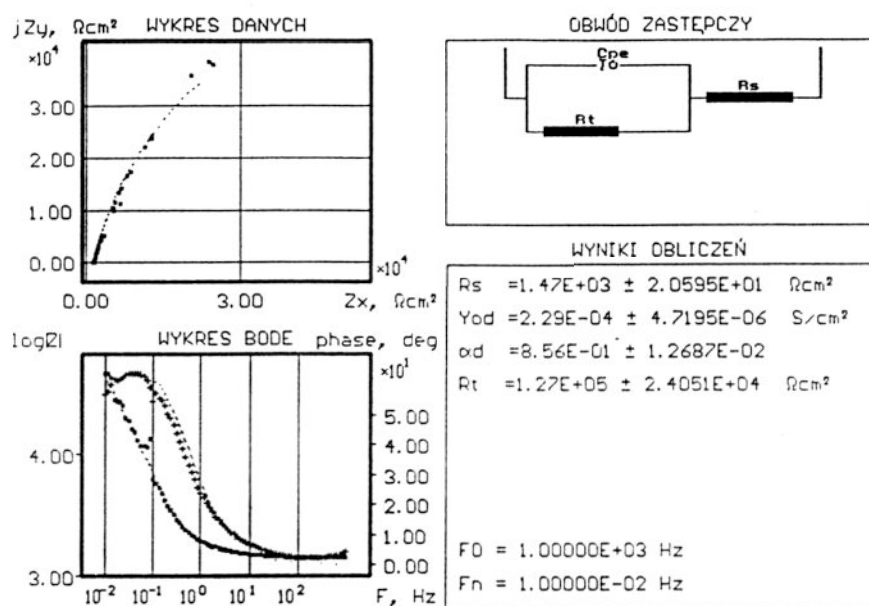
Badania impedancyjne elementu żelbetowego Nr 16



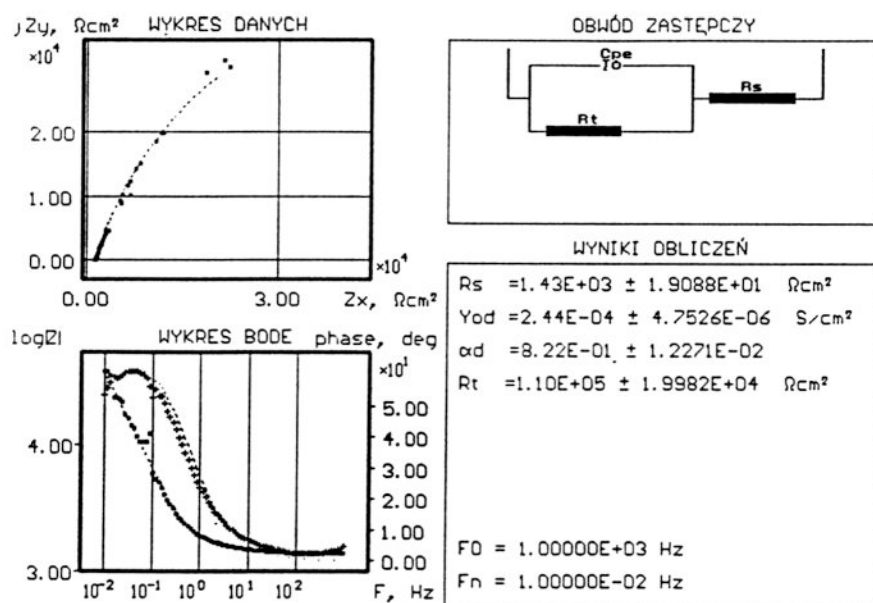
z.3.1 Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w odległości 10 cm od krawędzi prawej.



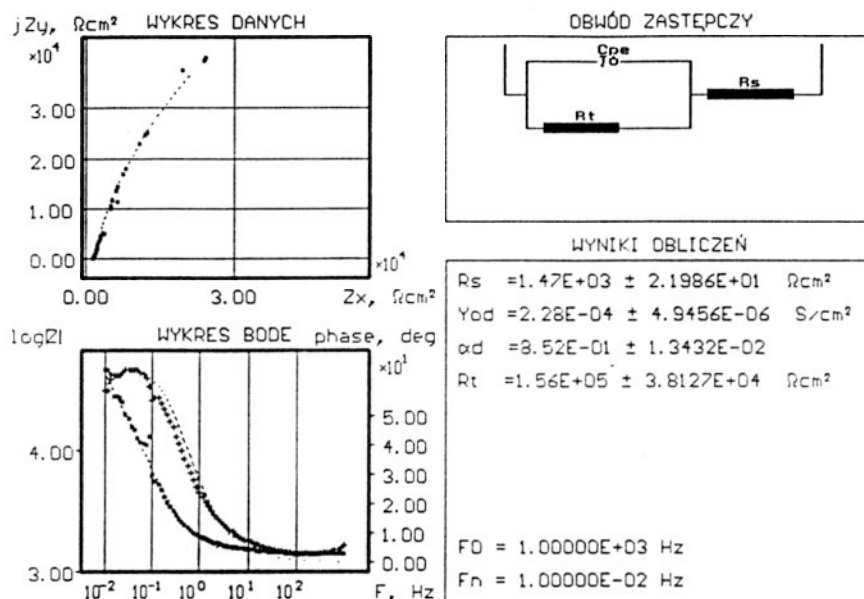
z.3.2. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w 4 rysie.



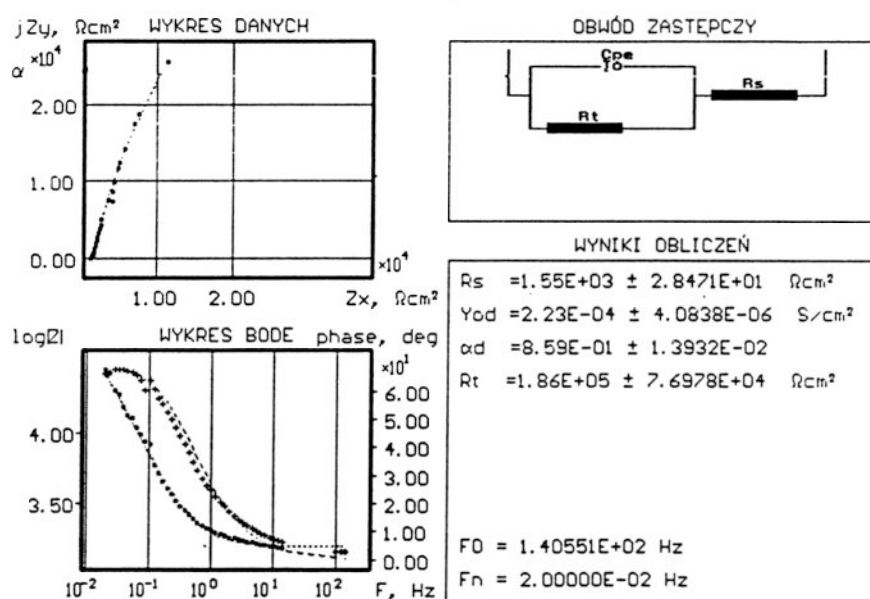
z.3.3 Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania pomiędzy 3 a 4 rysą.



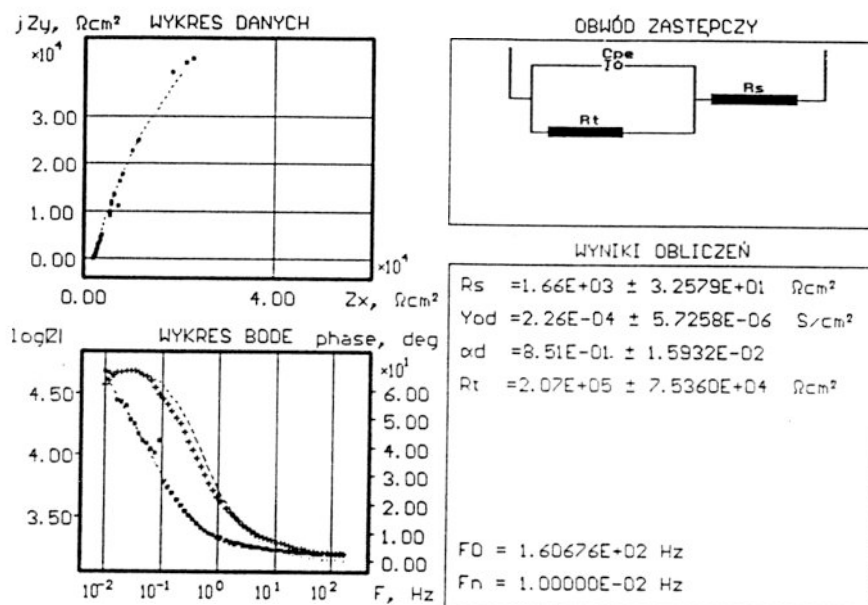
z.3.4 Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w 3 rysie.



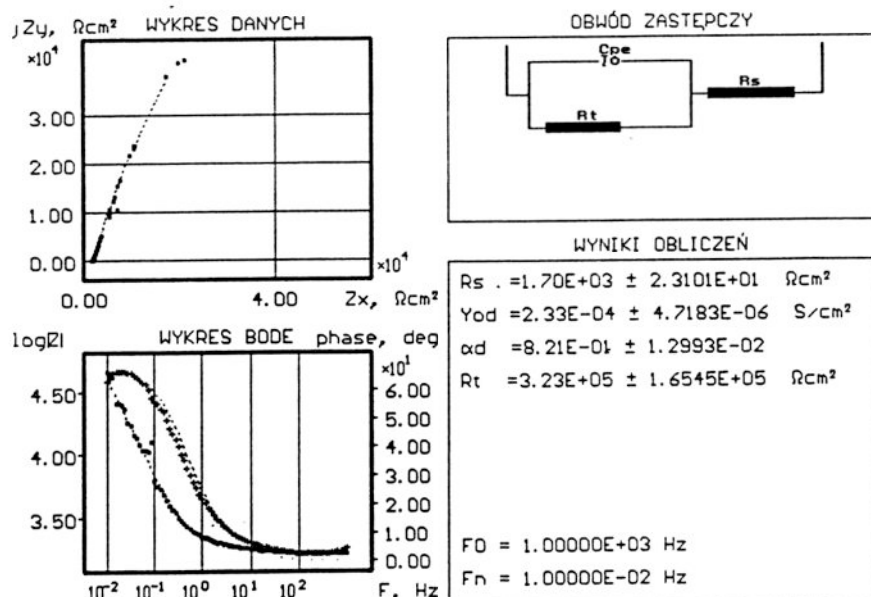
z.3.5. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania pomiędzy 2 a 3 rysą.



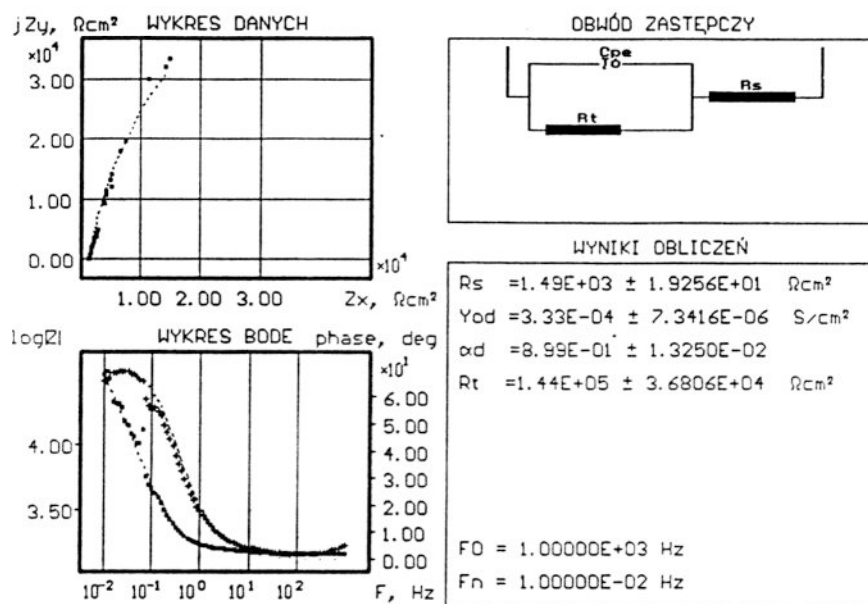
z.3.6. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w 2 rysie.



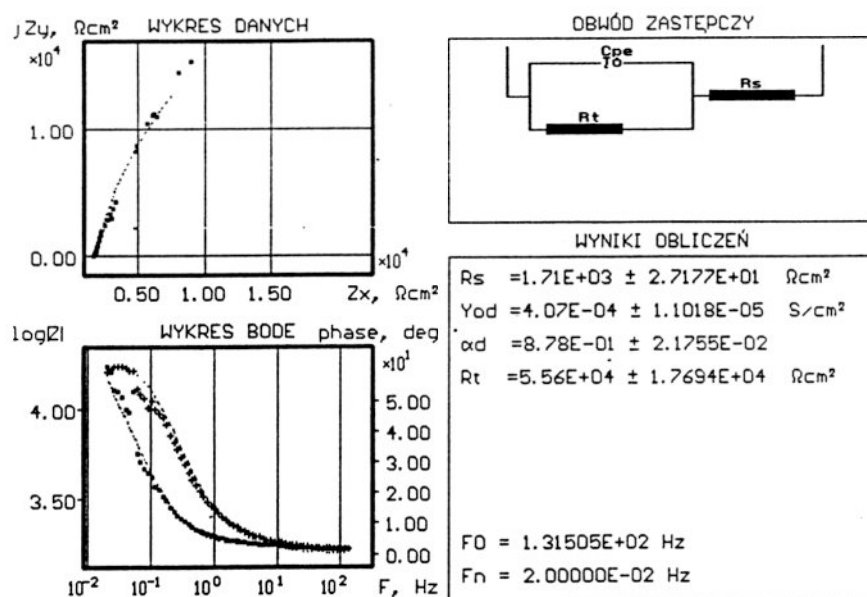
z.3.7. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania pomiędzy 1 a 2 rysą.



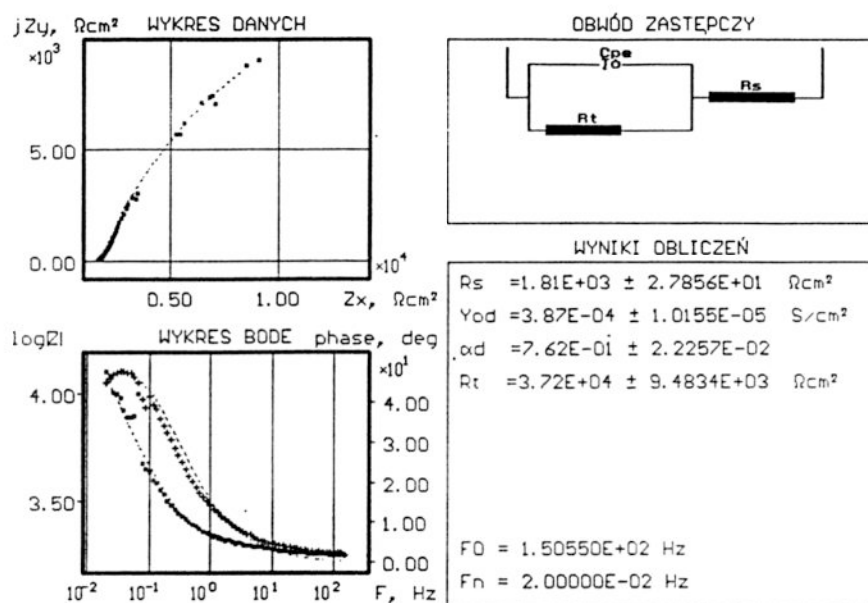
z.3.8. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w 1 rysie.



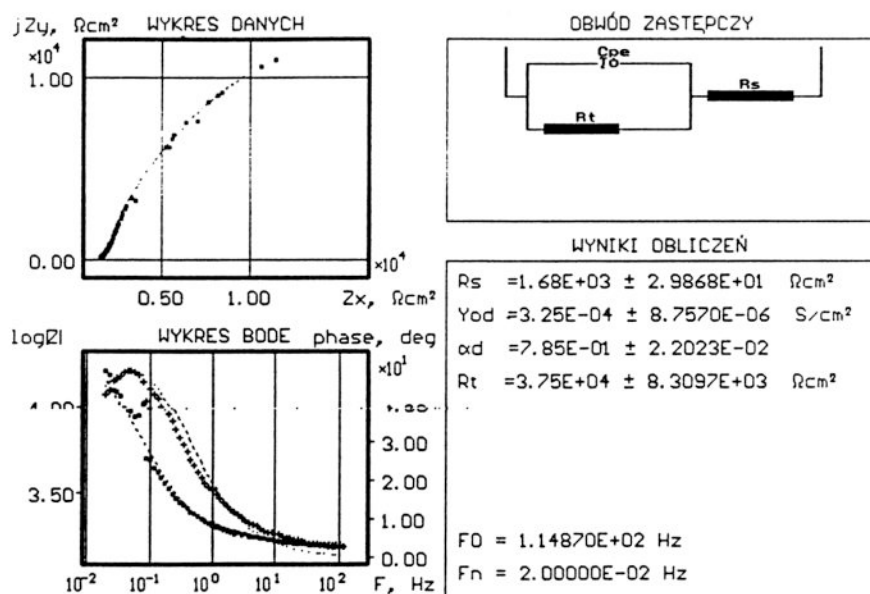
z.3.9. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 1. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w odległości 10 cm od krawędzi lewej.



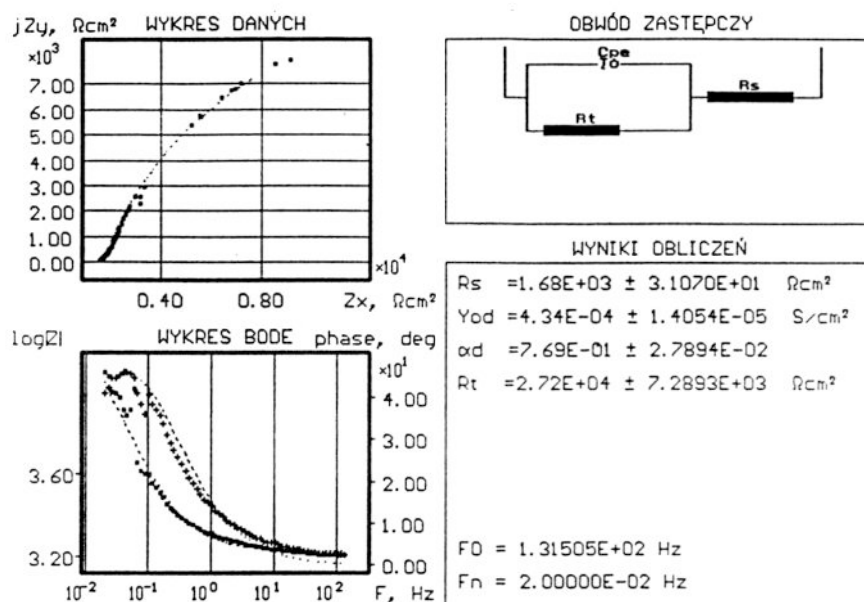
z.3.10. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w odległości 10 cm od krawędzi lewej.



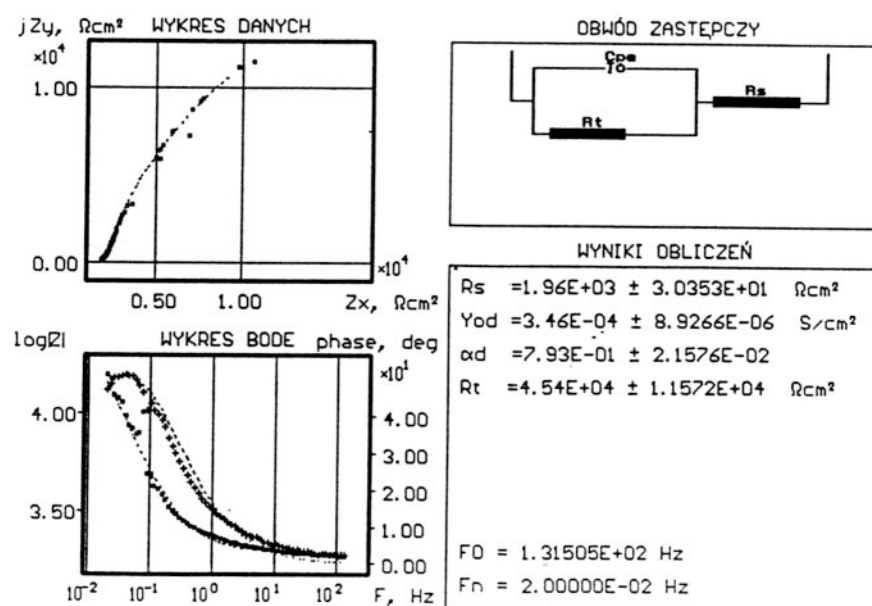
z.3.11 Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w 1 rysie.



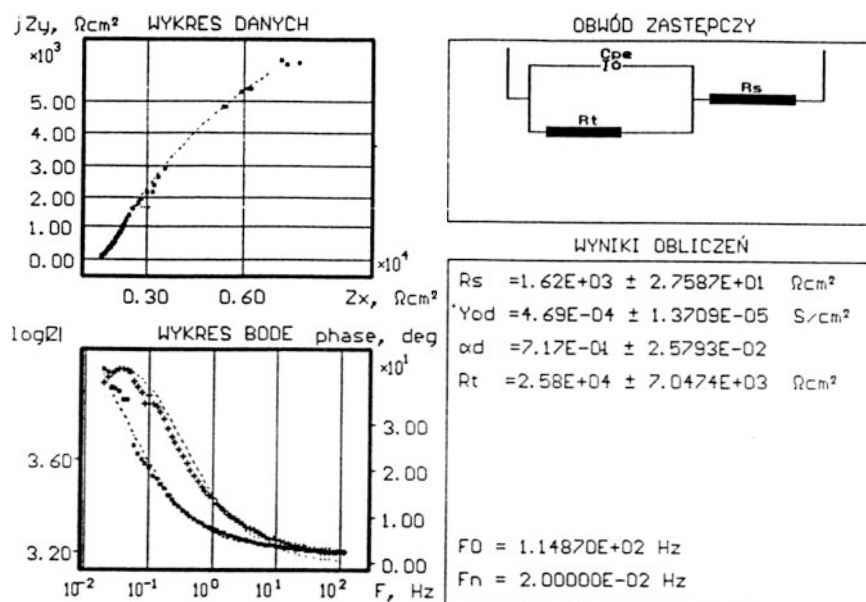
z.3.12. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania pomiędzy 1 a 2 rys



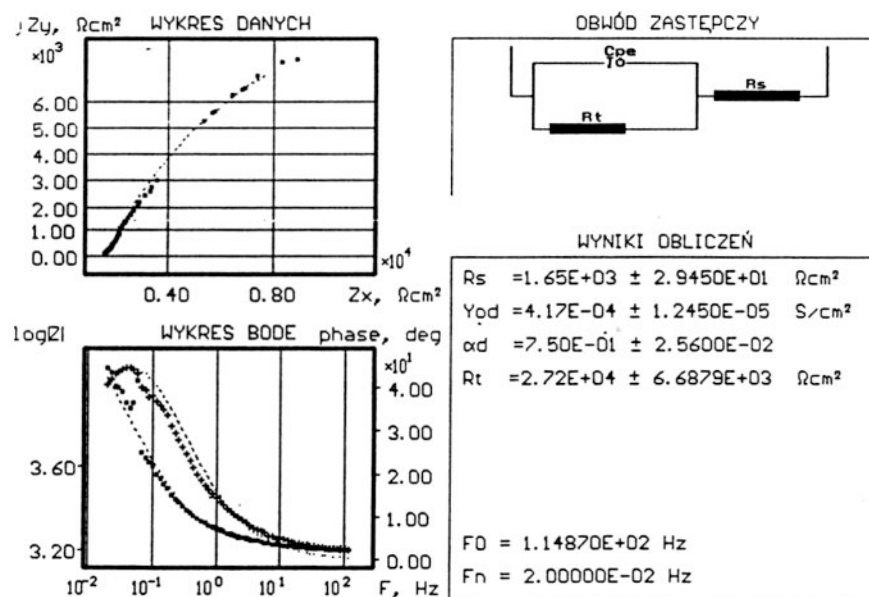
z.3.13. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w 2 rysie.



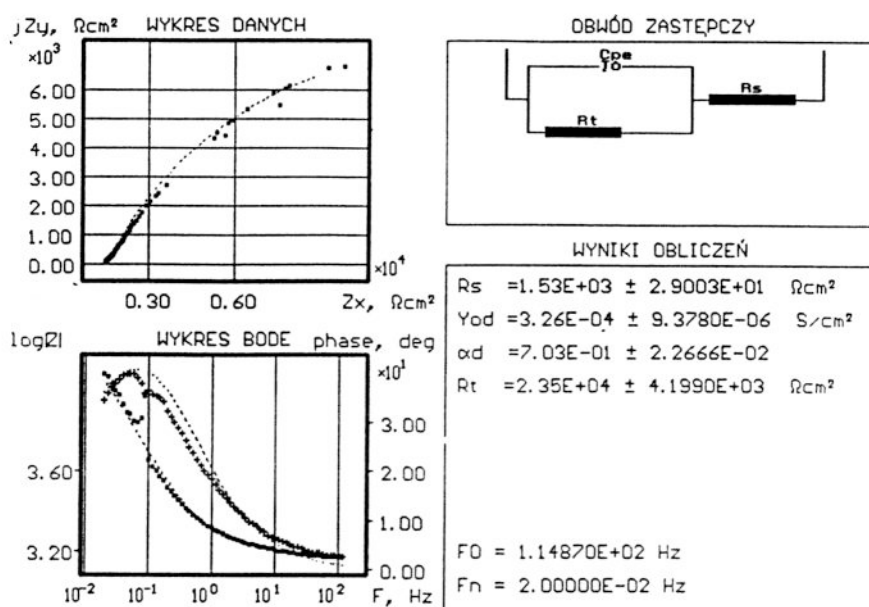
z.3.14. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania pomiędzy 2 a 3 rysą.



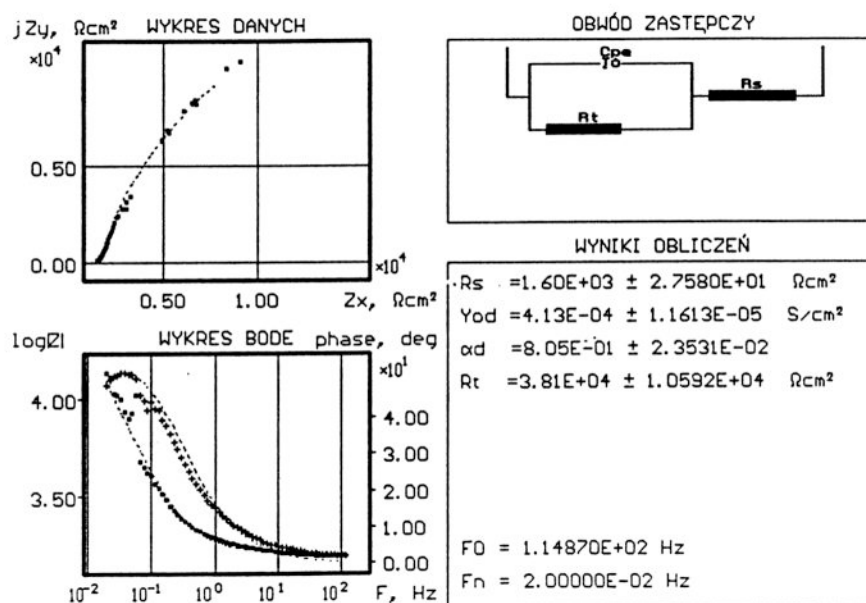
z.3.15. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w 3 rysie.



z.3.16. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania pomiędzy 3 a 4 rysą.



z.3.17. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w 4 rysie.



z.3.18. Wyniki pomiarów impedancyjnych elementu Nr 16 w po 5 cyklu nawilżania w 2. próbie pomiarowej po 5 cyklu zwilżania w odległości 10 cm od krawędzi prawej.

