

Bogusław KASPERCZYK

Brunon SZADKOWSKI

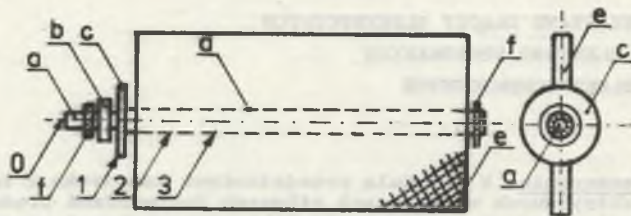
KRYTERIA OCENY STANU ZŁĄCZY ELEKTRYCZNYCH  
PRZEPONOWYCH ELEKTROD STOSOWANYCH  
W PROCESACH ELEKTROCHEMICZNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono konstrukcję typowych złączy elektrycznych w miejscach głównych doprowadzeń prądowych rozważanych elektrod. Zaproponowano elektryczne schematy zastępcze przedstawionych złączy - kolejno dla przypadków poprawnego ich wykonania oraz przy występowaniu typowych defektów technologicznych (powstałych na skutek niewłaściwej obróbki termicznej, niewłaściwego walcowania itp.). Wykazano, że defekty technologiczne powodują częściowe naruszenie symetrii schematu zastępczego. Przeprowadzono analizę rozkładu napięć w każdym ze schematów i wykazano, że defekty złączy powodują m.in. charakterystyczne nieliniowości rozkładu napięć. Sformułowano odpowiednie kryteria oceny stanu złączy oraz przedstawiono wyniki pomiarów kontrolnych na obiektach rzeczywistych.

Elektrody przeponowe (tytanowe, aktywowane - [1]) stosowane są w elektrolizerach do przemysłowej produkcji chloru. Poprawne wykonanie złączy elektrycznych w miejscach głównych doprowadzeń prądowych do elektrod decyduje o stratach mocy i sprawności procesu elektrolizy. Przed zainstalowaniem elektrod w elektrolizerach zalecane jest przeprowadzenie kontroli stanu złączy. W pracy [2] opisano odpowiednie stanowisko pomiarowe wykonane w IMEiE Politechniki Śląskiej, które umożliwia badanie rozkładu napięć wzdłuż kontrolowanego złącza. Przedmiotem niniejszej pracy jest określenie kryteriów oceny stanu złącza na podstawie wyników pomiarów otrzymanych za pomocą opracowanego w IMEiE stanowiska pomiarowego.

Na rys. 1 przedstawiono schemat konstrukcji elektrody; badaniom podlega złącze pomiędzy tytanową tuleją (d) i umieszczonym w niej rdzeniem miedzianym (a). Konstrukcję samego złącza Cu-Ti przedstawiono na rys. 2. Stosowane są dwa sposoby łączenia rdzenia Cu z tuleją Ti: (a) - przez zalanie stopem Wooda oraz (b) przez bezpośrednie walcowanie Cu z Ti. Dobrze wykonane złącze powinno charakteryzować się równomiernym rozkładem rezystancji wzdłuż połączenia Cu - Ti oraz odpowiednio małą wartością rezystancji przejścia przez to połączenie (mniejszą od wartości dopuszczalnej, ustalonej doświadczalnie dla danego typu elektrody). Stosując opisane w pracy [2] stanowisko pomiarowe, doprowadzamy do badanego złącza (tzn. do zacisków f-f zaznaczonych na rys. 1) prąd stały o znanej wartości

ci (max 1200 A) i mierzymy spadki napięć wzdłuż tytanowej tulei (d) w kolejnych punktach 0 - 1, 2, 3 ... Dokonanie oceny rozkładu oraz wartości rezystancji badanego złącza na podstawie zmierzonych charakterystyk napięciowych wymaga jednak pewnych wyjaśnień. Rozważmy w tym celu elektryczny schemat zastępczy badanego złącza, przedstawiony na rys. 3.

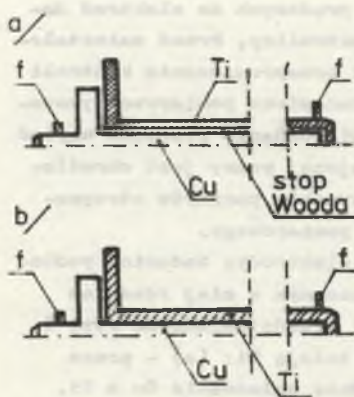


Rys. 1. Schemat konstrukcji elektrody przeponowej:

a - gwintowany fragment miedzianego rdzenia, b - kołnierz rdzenia, c - kołnierz tytanowej tulei, d - tytanowa tuleja, e - siatka zgrzewana do tytanowej tulei, f - zaciski przewodów doprowadzających prąd pomiarowy, 0, 1, 2, 3, ... punkty przyłożenia napięciowych sond pomiarowych

Fig. 1. Construction diagram of the diaphragm electrode:

a - threaded fragment of the copper core, b - flange of the core, c - flange of the titanic sleeve, d - titanic sleeve, e - wire net welded to the titanic sleeve, f - terminals of measuring current supply conduit 0, 1, 2, 3, ... - contact points for voltage measuring probes



Rys. 2. Konstrukcja złącza Cu-Ti elektrody:

a - połączenie Cu-Ti stopem Wooda, b - bezpośrednie walcowanie Cu z Ti

Fig. 2. Construction of the Cu-Ti junction of the electrode:

a - Cu-Ti joint with the Wood's alloy, b - direct rolling Cu-Ti joint

Na podobnym schemacie badane złącze reprezentuje łańcuch elementarnych rezystancji rozłożonych na drodze przepływu prądu pomiarowego  $I_p$ :

$R_{Ti}$  - elementarna rezystancja tytanowej tulei,

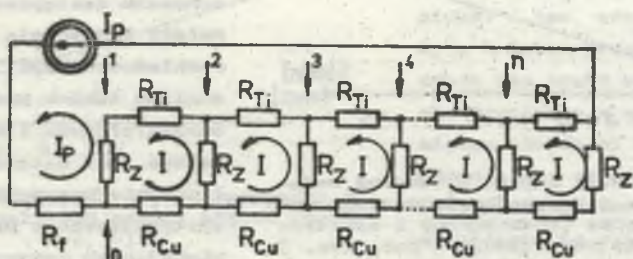
$R_{Cu}$  - elementarna rezystancja miedzianego rdzenia,

$R_z$  - elementarna rezystancja złącza Cu-Ti (por. rys. 2),

$R_f$  - rezystancja doprowadzeń prądowych.

Założony równomierny i symetryczny rozkład rezystancji na schemacie z rys. 3 odpowiada poprawnemu wykonaniu badanego złącza. W łańcuchu identycznych oczek (utworzonych przez rezystancje  $R_{Cu}$  -  $R_z$  -  $R_{Ti}$  -  $R_z$ ) płyną identyczne prądy oczkowe  $I$ . Oznacza to, że przez rezystancje  $R_z$  (oprócz występujących na początku i końcu złącza) prądy nie płyną.

Zatem przy założonej symetrii schemat zastępczy można uprościć do struktury przedstawionej na rys. 4.

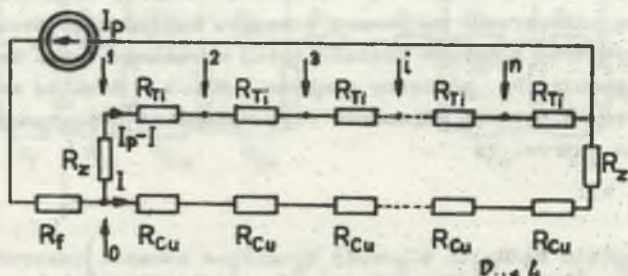


Rys. 3. Elektryczny schemat zastępczy badanego złącza:

0, 1, 2, 3, ... - punkty przyłożenia napięciowych sond pomiarowych - por. rys. 1

Fig. 3. Electric equivalent diagram of the tested junction:

0, 1, 2, 3, ... - contact points for measuring voltage probes



Rys. 4. Uproszczony schemat zastępczy badanego złącza:

0, 1, 2, 3, ... - punkty przyłożenia napięciowych sond pomiarowych

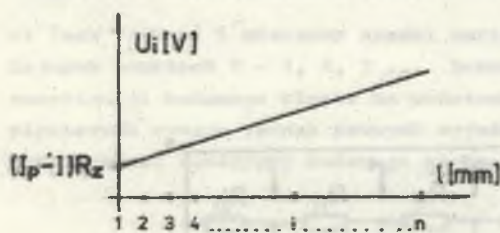
Fig. 4. Simplified substitute diagram of the tested junction:

0, 1, 2, 3, ... - contact points for measuring voltage probes

Dla schematu z rys. 4, napięcie w  $i$ -tym punkcie przyłożenia sondy pomiarowej (względem punktu początkowego - 0) można opisać zależnością:

$$U_i = (I_p - I) [R_Z + (i - 1) R_{Ti}]. \quad (1)$$

Odpowiedni wykres rozkładu napięć  $U_i$  wzdłuż badanego złącza przedstawiono na rys. 5. Istotną cechą omawianego przypadku poprawnego wykonania złącza jest liniowość rozkładu napięcia  $U_i$ .



Rys. 5. Rozkład napięć  $U_i$  wzdłuż badanego złącza w przypadku poprawnego wykonania złącza (równomierny i symetryczny rozkład rezystancji - por. rys. 3 i 4)

Fig. 5. Voltage distribution  $U_i$  along the correctly made tested junction (uniform and symmetric distribution of resistance - see fig. 3 and fig. 4)

wej obróbki termicznej, niewłaściwego walcowania itp.

Wadliwe wykonanie początkowej części złącza (przy kołnierzach b, c - rys. 1) można zilustrować za pomocą schematu zastępczego przedstawionego na rys. 6. Symetria schematu została tutaj naruszona tylko częściowo: - - brak rezystancji  $R_z$  pomiędzy punktami 0 - k. Rozkład napięć  $U_i$  dla schematu z rys. 6 opisuje zależność (2), natomiast odpowiedni wykres przedstawiono na rys. 7.

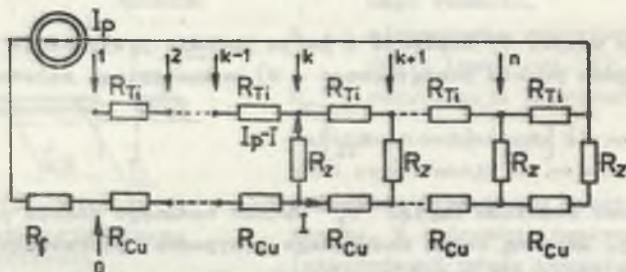
Dla  $i \in (1, k)$ :

$$U_i = I_p(k-1)R_{Cu} + (I_p - I)R_z = U_c = \text{const}$$

dla  $i \in (k+1, n)$ :

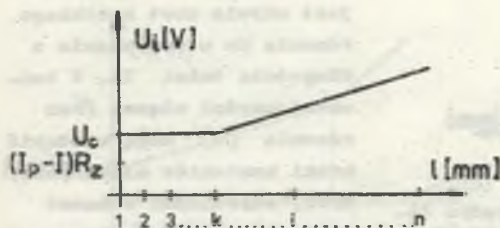
$$U_i = U_c + (I_p - I)(i - k)R_{Ti}$$

(2)



Rys. 6. Elektryczny schemat zastępczy złącza z defektem w części początkowej (przy kołnierzach b, c - rys. 1)

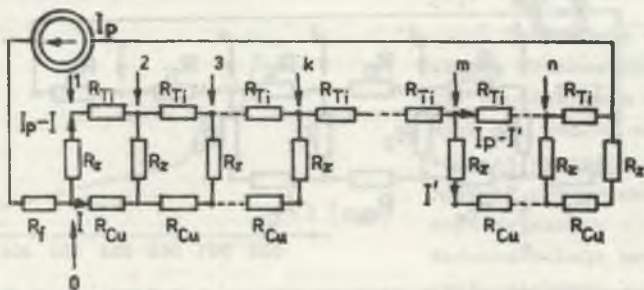
Fig. 6. Electric equivalent diagram of the junction with a defect in its front part (near the flanges b and c - fig. 1)



Rys. 7. Rozkład napięć  $U_i$  w przypadku defektu w początkowej części złącza (por. rys. 6)

Fig. 7. Voltage distribution  $U_i$  in case of a defect in the initial part of the junction (see fig. 6)

Złącza Cu-Tl wykonuje się stosując składany rdzeń miedziany (np. z dwóch odcinków - tzw. rdzeń dzielony). W takim przypadku zdarzają się braki kontaktu elektrycznego w obszarze między odcinkami dzielonego rdzenia, co odpowiada schematowi zastępczemu przedstawionemu na rys. 8. Rozkład napięć  $U_i$  schematu z rys. 8 opisuje równanie (3), natomiast wykres przedstawiono na rys. 9.



Rys. 8. Elektryczny schemat zastępczy złącza z defektem między odcinkami dzielonego rdzenia Cu (między punktami k-m)

Fig. 8. Electric equivalent diagram of the junction with a defect between sections of the divided Cu core (between points k-m)

Dla  $i \in (1, k)$ :

$$U_i \approx (I_p - I) [R_z + (i - 1) R_{Ti}]$$

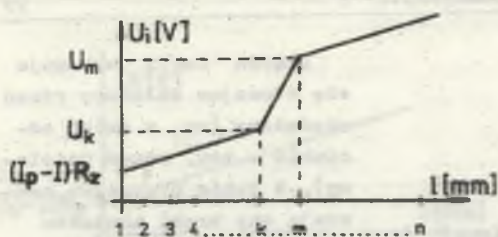
dla  $i \in (k + 1, m)$ :

$$U_i = U_k + (i - k) I_p R_{Ti}$$

dla  $i \in (m + 1, n)$ :

$$U_i = U_m + (I_p - I') (i - m) R_{Ti}$$

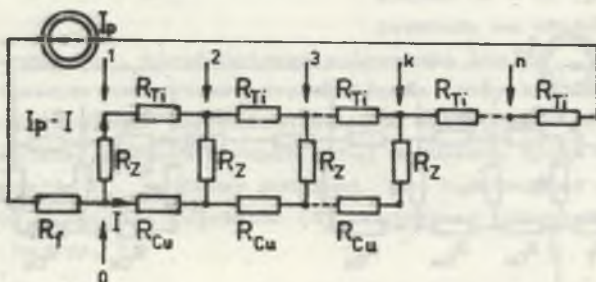
(3)



Rys. 9. Rozkład napięć  $U_i$  w przypadku defektu w obszarze podziału rdzenia Cu (por. rys. 8)

Fig. 9. Voltage distribution  $U_i$  in case of a defect in the area of the Cu core division (see fig. 8)

Innym przykładem wadliwego wykonania złącza Cu-Ti jest użycie zbyt krótkiego rdzenia Cu w porównaniu z długością tulei Ti. W końcowej części złącza (bez rdzenia Cu) mogą wystąpić braki kontaktów elektrycznych, odpowiedni schemat zastępczy przedstawiono na rys. 10. Rozkład napięć  $U_i$  dla schematu z rys. 10 opisuje równanie (4), natomiast wykres przedstawiono na rys. 11.



Rys. 10. Elektryczny schemat zastępczy złącza z defektem w końcowej części złącza (krótka rdzeń Cu)

Fig. 10. Electric equivalent diagram of the junction with a defect in its rear part (short Cu core)

Dla  $i \in (1, k)$ :

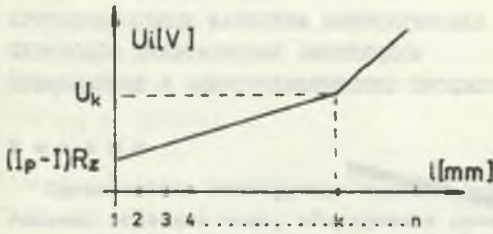
$$U_i = (I_p - I) [R_z + (i - 1) R_{Ti}]$$

dla  $i \in (k + 1, n)$ :

$$U_i = U_k + I_p (i - k) R_{Ti}.$$

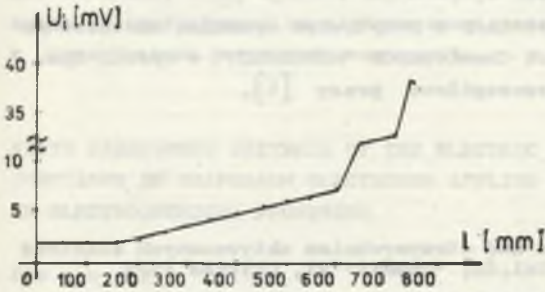
(4)

Zasadniczą konkluzją z przeprowadzonych rozważań jest stwierdzenie, że na podstawie pomiarów rozkładu napięć  $U_i$  wzdłuż badanego złącza można wnioskować o poprawności wykonania złącza, o rozkładzie rezystancji w złączu lub o występujących w nim defektach. Doświadczalne potwierdzenie



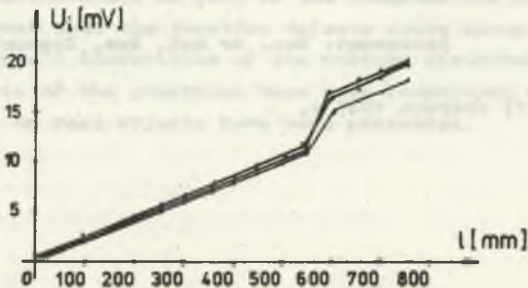
Rys. 11. Rozkład napięć  $U_i$  w przypadku defektu w końcowej części złącza (por. rys. 10)

Fig. 11. Voltage distribution  $U_i$  in case of a defect in the rear part of the junction (see fig. 10)



Rys. 12. Rozkład napięć  $U_i$  wzdłuż tulei elektrody typu POLEL 3050 z defektami na początku i końcu złącza (złącza walcowane:  $I_p = 400$  A)

Fig. 12. Voltage distribution  $U_i$  along the sleeve of the POLEL 3050 electrode with defects at the origin and at the end of the junction (rolled junction:  $I_p = 400$  A)



Rys. 13. Rozkład napięć  $U_i$  wzdłuż tulei elektrod typu POLEL 3050 z dzielonymi rdzeniami ( $I_p = 400$  A)

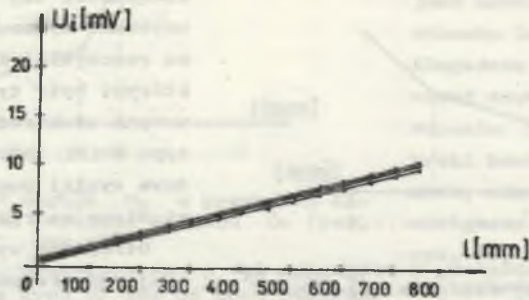
Fig. 13. Voltage distribution  $U_i$  along the sleeves of the POLEL 3050 electrodes with the divided cores ( $I_p = 400$  A)

śluszności tej konkluzji uzyskano wykonując pomiary na rzeczywistych obiektach, którymi były tytanowe, aktywowane elektrody przeponowe typu POLEL 3050 [3]. Przykładowe wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 12-14.

Otrzymane wyniki upoważniają do sformułowania następujących kryteriów oceny stanu złączy elektrycznych elektrod przeponowych przy posługiwaniu się stanowiskiem do pomiaru rozkładu napięć [2]:

1) Prawidłowo wykonane złącze powinno charakteryzować się liniowym rozkładem napięcia wzdłuż złącza, natomiast wartości napięć nie powinny przekraczać wartości dopuszczalnych - określonych doświadczalnie przez producenta elektrod.

2) Wadliwie wykonane złącze charakteryzuje się nieliniowym rozkładem napięcia wzdłuż złącza lub wartościami napięć większymi niż dopuszczalne (por. p.1).



Rys. 14. Rozkład napięć  $U_1$  wzdłuż tulei elektrod typu POLEL 3050 ze złączami wykonanymi metodą walcowania ( $I_p = 400$  A)

Fig. 14. Voltage distribution  $U_1$  along the sleeves of the POLEL 3050 electrodes with the rolled junctions ( $I_p = 400$  A)

Przedstawione kryteria oceny zostały z pozytywnym wynikiem zastosowane do testowania elektrod w Zakładach Chemicznych "METALCHEM" w Opolu. Sposób testowania elektrod opisano szczegółowo pracy [4].

#### LITERATURA

- [1] Korczyński A. i inni: Badania nad otrzymywaniem aktywowanych elektrod tytanowych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. "Chemia" 91, Gliwice 1979.
- [2] Kasperczyk B., Tomasik R.: Stanowisko pomiarowe do badania elektrod stosowanych w procesach elektrochemicznych. Materiały konferencyjne "Metrologia elektryczna w służbie przemysłu", Gliwice 1984.
- [3] Szadkowski B., Kasperczyk B., Tomasik R.: Opracowanie kryteriów oceny właściwości elektrycznych aktywowanych elektrod tytanowych. Sprawozdanie z pracy nauk.-bad. realizowanej w IMEiE Pol.Śl., Gliwice 1985.
- [4] Kasperczyk B., Szadkowski B., Tomasik R.: Sposób testowania złączy elektrycznych elektrod stosowanych w przemyśle elektrochemicznym. Materiały konferencyjne "DIAG 86", Kielce 1986.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Zygmunt Kuśmierk

Wpłynęło do Redakcji 15 czerwca 1987 r.



КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ПЕРЕХОДОВ ДИАФРАГМОВЫХ ЭЛЕКТРОДОВ  
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Р е з ю м е

Представлена конструкция типичных электрических переходов на местах главных подводов тока, обсуждаемых электродов. Предложены электрические заменяющие схемы представленных переходов - поочередно для правильно исполненных и тех, которые характеризуются типичными технологическими дефектами (связанными с неправильной термомеханической обработкой, неправильной вальцовкой и др.). Доказано, что технологические дефекты вызывают нарушение симметрии заменяющей схемы. Проанализировано распределение электрического напряжения в каждой из представленных схем и доказано, что дефекты переходов вызывают, между прочим, характерную нелинейность распределения напряжения. Сформулированы соответствующие критерии оценки качества переходов и представлены результаты измерений.

STATE ASSESSMENT CRITERIA OF THE ELECTRIC  
JUNCTIONS IN DIAPHRAGM ELECTRODES APPLIED  
IN ELECTROCHEMICAL PROCESSES

S u m m a r y

Construction of typical electric junctions in places of the main current leads of considered electrodes has been presented in the article. Some electric equivalent diagrams of the presented junctions have been suggested successively, for the cases of their correct quality of work and for typical technological defects (due to improper heat treatment, improper rolling, etc.). It has been proved that technological defects cause partial disturbance of the equivalent diagram symmetry. An analysis of voltage distribution in each of the diagrams has been carried out it has been proved that the junction defects cause among other things characteristic non-linearities of the voltage distribution. Suitable assessment criteria of the junctions have been formulated and results of check measurements on real objects have been presented.