

JOLANTA DĄBROWSKA, ANNA KAJURA

Instytut Elektroenergetyki
i Sterowania Układów
Politechniki Śląskiej

WPLYW TECHNOLOGII PRZYGOTOWANIA POWIERZCHNI STYKOWYCH POŁĄCZEŃ SZYNOWYCH NA ICH POCZĄTKOWĄ REZYSTANCJĘ ZESTYKOWĄ

Streszczenie. Praca zawiera wyniki badań dotyczących wpływu obróbki mechanicznej oraz rodzaju powłok metalicznych powierzchni stykowych na rezystancję początkową połączeń śrubowych szyn płaskich aluminiowych i miedzianych. Wynikiem pracy jest określenie technologii pozwalającej na spełnienie wymagań stawianych ww. połączeniom.

1. Wstęp

Pod wpływem otaczającego środowiska, powierzchnie stykowe pokrywają się warstwami nalotowymi (tlenki, zanieczyszczenia). Wpływają one wydatnie na zwiększenie rezystancji zestykowej połączenia. Niekorzystne kształtowanie się wartości rezystancji zestykowej w warunkach początkowych¹⁾ wpływa na systematyczne pogarszanie się własności zestyku w toku eksploatacji. Zjawisko to jest szczególnie niekorzystne w przypadku zestyków nierozłącznych, do jakich zalicza się połączenia śrubowe szyn płaskich. Może ono stanowić jedną z przyczyn poważnego zakłócenia w pracy toru elektrycznego.

Wymagania stawiane zestykom nierozłącznym szyn sztywnych [11] powinny być spełnione nie tylko w warunkach początkowych ale również w czasie eksploatacji.

W tym celu podjęto badania zmierzające do określenia technologii przygotowania powierzchni stykowych połączeń śrubowych szyn płaskich Al-Al, Cu-Cu pozwalającej na spełnienie stawianych wymagań.

1) Przez warunki początkowe (w odróżnieniu od warunków eksploatacyjnych) rozumie się tutaj warunki, w jakich znajduje się zestyk od chwili wykonania do czasu obciążenia go prądem roboczym.

2. Podstawowe wymagania dla technologii przygotowania powierzchni stykowych połączeń śrubowych

Dążąc do zmniejszenia rezystancji zestykowej należy oddziaływać na rezystancję warstw nalotowych oraz zwiększyć rzeczywistą powierzchnię przewodzenia. Można to osiągnąć poprzez zastosowanie odpowiedniej siły docisku działającej na zestyk i obróbkę powierzchni stykowych. Jednakże zwiększanie siły docisku celem zapewnienia dobrej styczności jest ograniczone zjawiskiem peźzania aluminium. Z tego względu dużego znaczenia nabiera obok siły docisku odpowiednie przygotowanie powierzchni stykowych.

Tlenki powstałe na powierzchniach stykowych szyn aluminiowych i miedzianych są przewodnikami wyraźnie gorszymi od tych metali. Zjawisko utleniania zachodzi szczególnie szybko w przypadku aluminium, które oczyszczone w atmosferze otaczającego powietrza pokrywa się prawie natychmiast warstwą tlenku, który charakteryzuje się dużą rezystywnością (około $10^{12} \Omega \text{cm}$) jest twardy, trudnotopliwy, silnie przylega do podłoża [9].

Stosowane technologie powinny więc zapewnić usunięcie warstwy tlenków oraz zapobiegać ponownemu utlenianiu powierzchni stykowych.

W praktyce spotykane są różne metody przygotowania powierzchni stykowych połączeń śrubowych szyn sztywnych. Wątpliwości, czy wszystkie ze stosowanych technologii, pozwalają osiągnąć odpowiednie właściwości ww. połączeń, skłoniły do przeprowadzenia badań z zastosowaniem technologii przedstawionych w tabeli 1.

Do sposobów poprawy własności elektrycznych połączeń śrubowych szyn aluminiowych zalicza się (jak wymieniono w tabeli 1) również uszlachetnianie powierzchni stykowych. Polega ono na nałożeniu powłoki metalicznej, która powinna się charakteryzować takimi właściwościami, jak:

- małą wytrzymałością na ściskanie. Dzięki temu zachodzi szybkie formowanie "punktów styczności",
- stosunkowo małą podatnością na utlenianie,
- dobrą przyczepnością do podłoża,
- możliwie małą rezystywnością.

Wpływ wymienionych własności na rezystancję przejścia dla zestyków punktowych wynika m.in. z dyskusji zależności (1):

$$R_p = \frac{C}{F^n} \quad (1)$$

przy czym:

$$C = \frac{C}{2} \cdot \sqrt{\pi \cdot \sigma_0}$$

Technologie przygotowania powierzchni stykowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Oznaczenie technologii obróbki	Sposób przygotowania powierzchni stykowych złącza	Złącza szyn		
		Al-Al	Cu-Cu	Al-Cu
1	<u>surowe</u> (nieobrobione)	x	x	x
2	<u>oczyszczone na sucho</u> - szczotka stalowa tzn. bez użycia środków zabezpieczających przed ponownym utlenieniem, poddano utlenianiu w czasie 3 min.	x	-	-
3	jw., poddano utlenianiu w czasie 1 godz.	x	x	-
4	<u>oczyszczone</u> - szczotka stalowa z zastosowaniem wazeliny przemysłowej (substancja zabezpieczająca przed ponownym utlenieniem), usunięcie powstałego smaru i ponowne pokrycie cienką warstwą wazeliny	x	x	-
5	<u>oczyszczone</u> - szczotka stalowa z zastosowaniem wazeliny i pozostawienie powstałego smaru	x	x	-
6	<u>szlifowane</u>	x	-	-
7	<u>cynowane</u> (próby po upływie 1 miesiąca od wykonania technologii)	x	x	x
8	<u>cynowane</u> (próby po upływie 1 roku od wykonania technologii)	x	x	x
9	połączenie powierzchni <u>cynowanej</u> z <u>surową</u>	x	x	-
10	<u>miedziowane</u>	x	-	-

gdzie:

R_p - rezystancja przejścia zestyku punktowego,

C - stała materiałowa,

F - siła docisku,

n - dla zestyków punktowych wynosi 0,5,

ϱ - rezystywność materiału stykowego,

σ_0 - naprężenie odpowiadające odkształceniu plastycznemu. Dla zestyków punktowych przyjmuje wartości:

$$\sigma_0 = 6 \text{ wg [1, 5, 6],}$$

$$\sigma_0 = 0,46 \text{ wg [2].}$$

W celu zastosowania podanej zależności (1) dla zestyków powierzchniowych należy do wzoru na stałą C wprowadzić dodatkowy współczynnik $k < 1$ [5]. Oprócz tego należy uwzględnić zmianę wartości wykładnika potęgowego n oraz naprężenia σ_0 . Dla zestyków powierzchniowych przyjmuje się $n = 1$ a natomiast naprężenie odpowiadające odkształceniu plastycznemu σ_0 przyjmuje wartości:

$$\sigma_0 = 0,5\sigma \quad \text{wg [1, 5, 6],}$$

$$\sigma_0 = \sigma \quad \text{wg [2].}$$

Z relacji (1) wynika, że rezystancja przejścia ulega zmniejszeniu, gdy maleje wartość rezystywności ρ oraz naprężenia σ . Małą rezystywnością przy niewielkiej wartości σ (w porównaniu do aluminium) charakteryzują się srebro i miedź. Ponadto rezystywność ich jest wielokrotnie mniejsza niż tlenków aluminium. Natomiast cyna przy stosunkowo dużej rezystywności posiada bardzo niską granicę odkształceń plastycznych oraz cechuje się małą podatnością na utlenianie. Uwzględniając wymienione własności ustalono, że powłoki wykonane na bazie srebra, miedzi, cyny powinny wpłynąć na zmniejszenie się początkowej rezystancji zestykowej połączeń szynowych. W dalszych badaniach podjęto próby miedziowania i cynowania. Ze względów ekonomicznych zrezygnowano z prób srebrzenia.

3. Program badań i wyniki pomiarów

Badaniom poddano połączenia śrubowe szyn aluminiowych płaskich AP-50x5 i miedzianych płaskich P-50x5. Powierzchnie stykowe badanych połączeń przygotowano wg technologii przedstawionych w tabeli 1.

Pobielania szyn aluminiowych dokonano lutom cynowym. Proces ten składa się z trzech etapów:

- mechanicznego przygotowania powierzchni szyn przeznaczonych do pokrycia (usunięcie zanieczyszczeń i tlenków),
- nałożenia warstwy pośredniej ze stopu lutowicznego "Lutal 2", w skład którego wchodzi cyna, cynk oraz kadm,
- nałożenia zewnętrznej warstwy z lutu cynowego (90% cyny i 10% cynku).

Miedziowania szyn aluminiowych dokonano metodą elektrolityczną. Efekty uzyskiwane tą metodą zależą od wielu czynników co wpływa na dużą pracochłonność i nie daje spodziewanych rezultatów.

Złącza szyn o powierzchniach stykowych przygotowanych wg technologii k ($k = 1, 2, \dots, 10$) poddawano działaniu siły docisku F_j , którą zmieniano następująco:

$$F_j = \begin{cases} 1000 \div 3000 \text{ N co } 500 \text{ N} \\ 3000 \div 10000 \text{ N co } 1000 \text{ N} \\ 10000 \div 20000 \text{ N co } 2000 \text{ N} \\ 20000 \div 30000 \text{ N co } 5000 \text{ N} \end{cases},$$

gdzie:

$$j = 1, 2, \dots, 19.$$

Siłę F_j w podanym zakresie zmieniano w kierunku rosnącym a następnie w kierunku malejącym. Odpowiadało to ciśnieniu $4 \div 120 \left[\times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$. Dla każdej k-tej technologii wybrano losowo $n = 10$ złączy. Przy zadanej sile docisku F_j dla każdego i-tego złącza ($i = 1, 2, \dots, n$) dokonano pomiaru początkowej rezystancji zestykowej R_{p_i} , która jest tzw. wartością zaobserwowaną w wyniku przeprowadzonego pomiaru. Wynika stąd, że badana j-ta próbka losowa stanowiąca zbiór wartości R_{p_i} jest podzbiorem populacji wartości początkowych rezystancji zestykowych przy działaniu siły F_j , która to populacja podlega badaniu statystycznemu. Przy ustalonej k-tej technologii dla każdej j-tej próbki określono wartość średnią w próbce:

$$(\bar{R}_p)_j^k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{p_i}, \quad (2)$$

gdzie:

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j, k = \text{const}$$

przy czym:

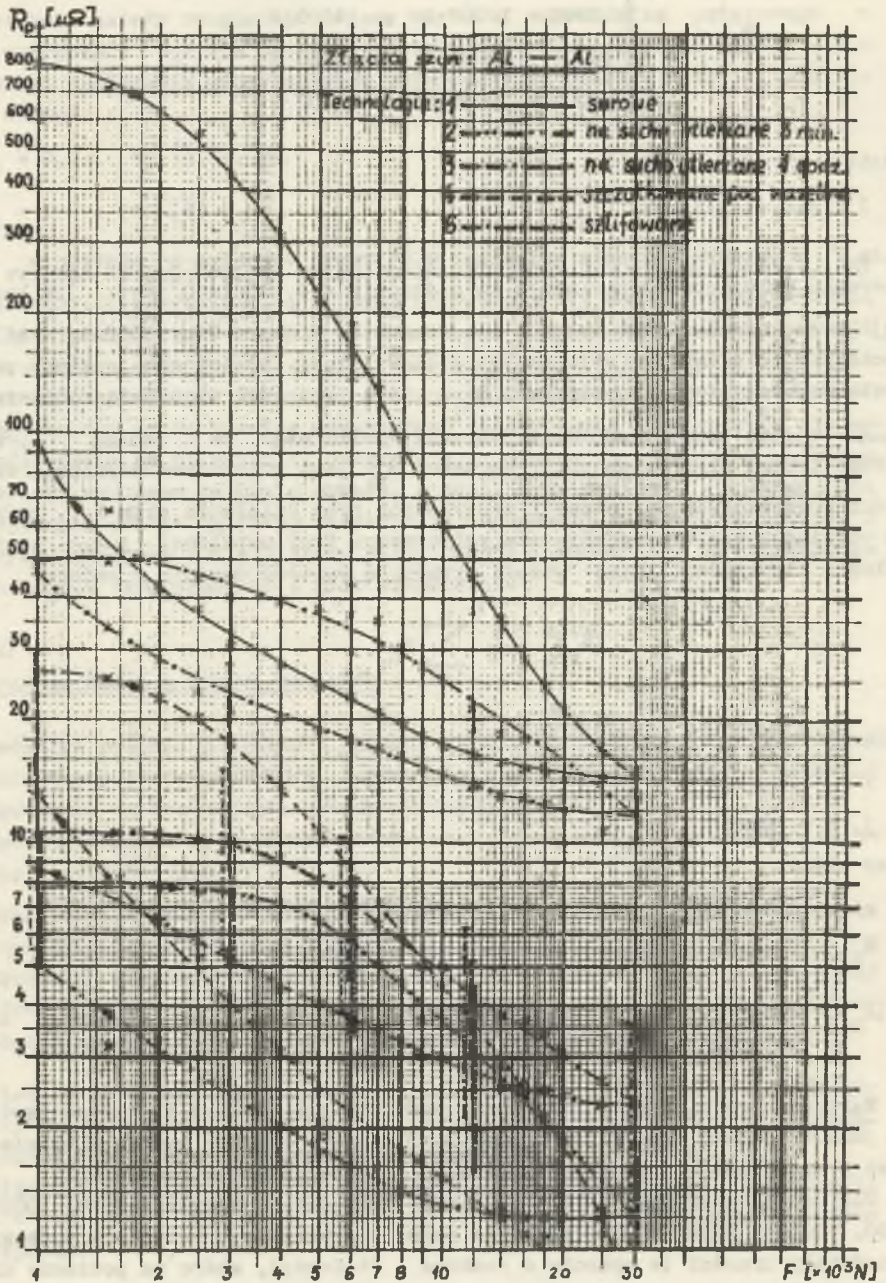
n - liczebność próbki,

R_{p_i} - wartość zaobserwowana dla i-tego złącza,

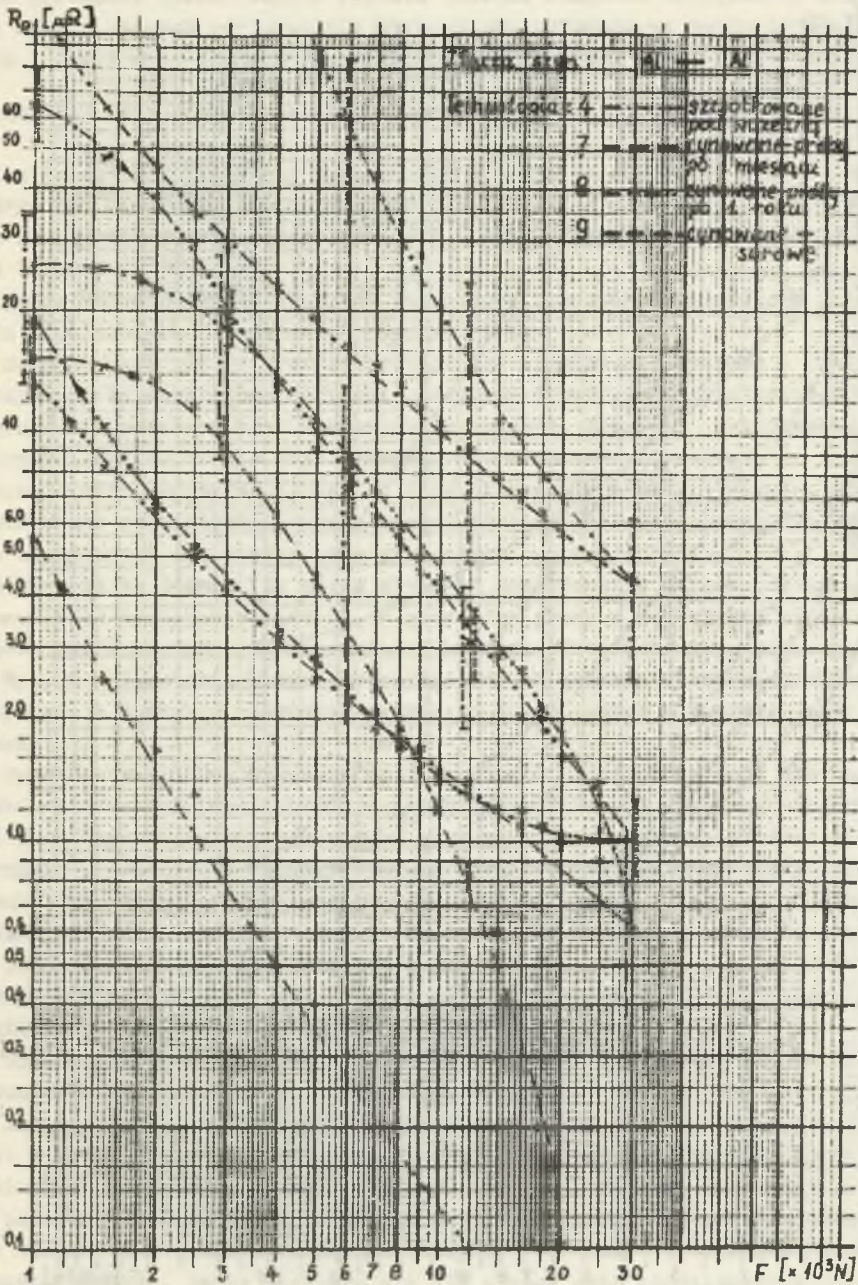
$(\bar{R}_p)_j^k$ - wartość średnia j-tej próbki przy zadanej sile F_j i badanej k-tej technologii.

Wartości średnie $(\bar{R}_p)_j^k$ dla poszczególnych sił docisku F_j przedstawiono jako zależność $R_p = f(F)$ na rys. 1, 2 i 3 dla złączy szyn aluminiowych i miedzianych poddanych obróbce wg poszczególnych k technologii.

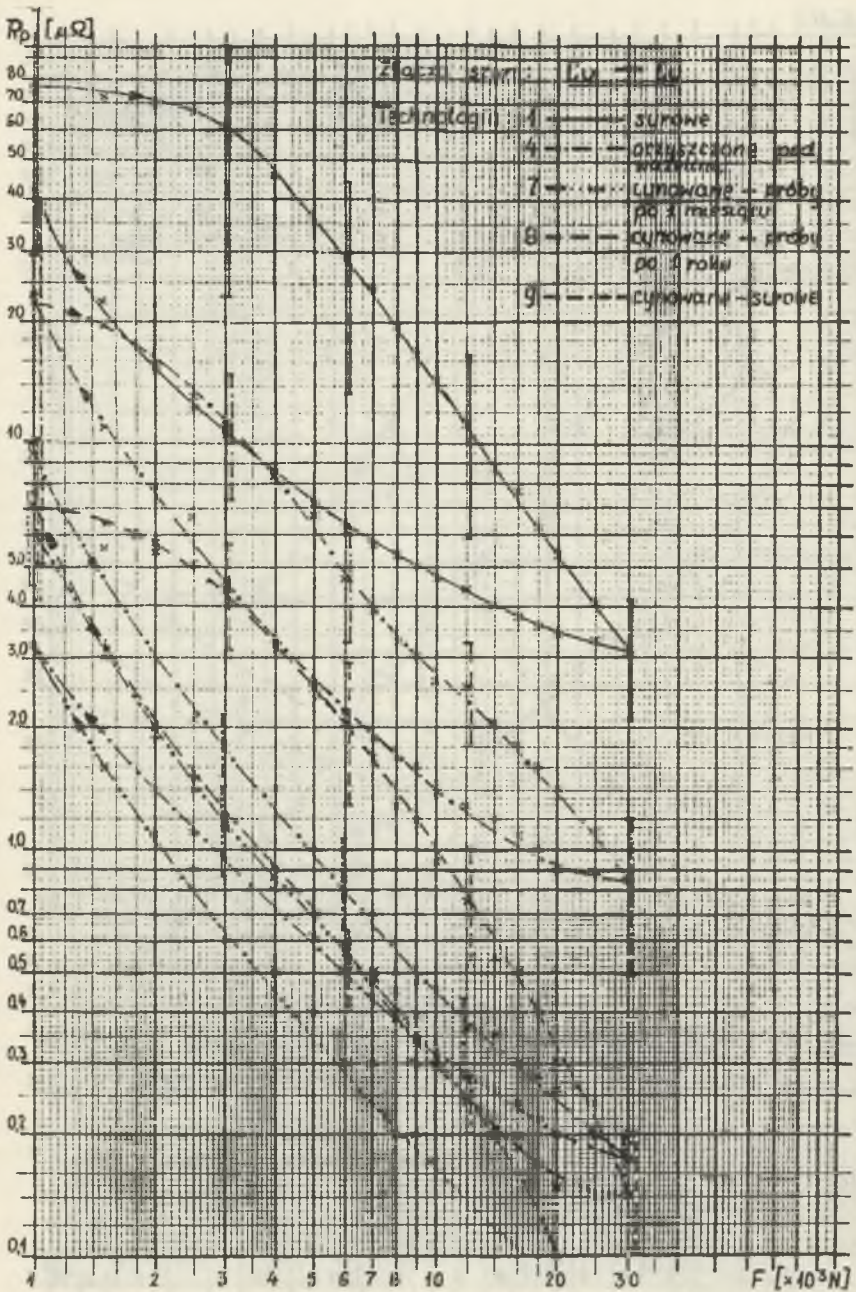
Dla każdej charakterystyki $R_p = f(F)$ przy siłach docisku: 1000, 3000, 6000, 12000 i 30000 N obliczono, na podstawie wyników badania próbek, przedziały ufności (w oparciu o rozkład t Studenta), które na poziomie ufności 0,95 pokrywają prawdziwą, nieznaną wartość średnią populacji. Przedziały ufności otrzymane w oparciu o rozkład t Studenta posiadają w róż-



Rys. 1. Rezystancje zestykowe w funkcji siły docisku w zależności od rodzaju obróbki mechanicznej powierzchni stykowych szyn aluminiowych



Rys. 2. Charakterystyki $R_c = f(F)$ dla złączy szyn aluminiowych z uwzględnieniem wpływu powłoki wykonanej na bazie cyny



Rys. 3. Wpływ siły docisku na rezystancję zestykową w zależności od rodzaju obróbki mechanicznej i powłoki metalicznej dla złączy spaw miedzianych

nych próbkach, oprócz końców również zmienną długość. Przykładowo dla złączy Al-Al, których powierzchnie stykowe przygotowano wg technologii 4 (tabela 1) przy sile docisku $F_{13} = 12000$ N działającej na zestyk, obliczony przedział ufności wynosi na poziomie ufności $0,95: 1,9 < (\overline{R_p})_{j=13}^{k=4} < 5,2$.

Zatem przedział liczbowy o końcach $1,9$ i $5,2 \mu\Omega$ z ufnością 95% pokrywa prawdziwą, nieznaną średnią wartość początkowej rezystancji zestykowej dla złączy o zastosowanej technologii 4 przy działaniu siły docisku równej 12000 N.

Wpływ obróbki mechanicznej na początkową rezystancję zestykową złączy szyn aluminiowych przedstawiono na rys. 1.

Na podstawie rys. 1 oraz statystycznego opracowania wyników pomiarów otrzymano, że największe wartości początkowej rezystancji zestykowej występują dla połączeń nieobrobionych (surowych). Również szlifowanie powierzchni stykowych nie daje korzystnych rezultatów ze względu na zmniejszenie liczby współpracujących ze sobą mikropowierzchni stykowych. Nie zaobserwowano zasadniczych różnic między wartościami początkowych rezystancji zestykowych dla złączy szyn przygotowanych wg technologii 2, 3 i 4. Nie oznacza to jednak, że można stosować powierzchnie stykowe niezabezpieczone przed dostępem powietrza. W przypadku pracy w agresywnej atmosferze złącza takie mogłyby ulec działaniu korozji elektrochemicznej.

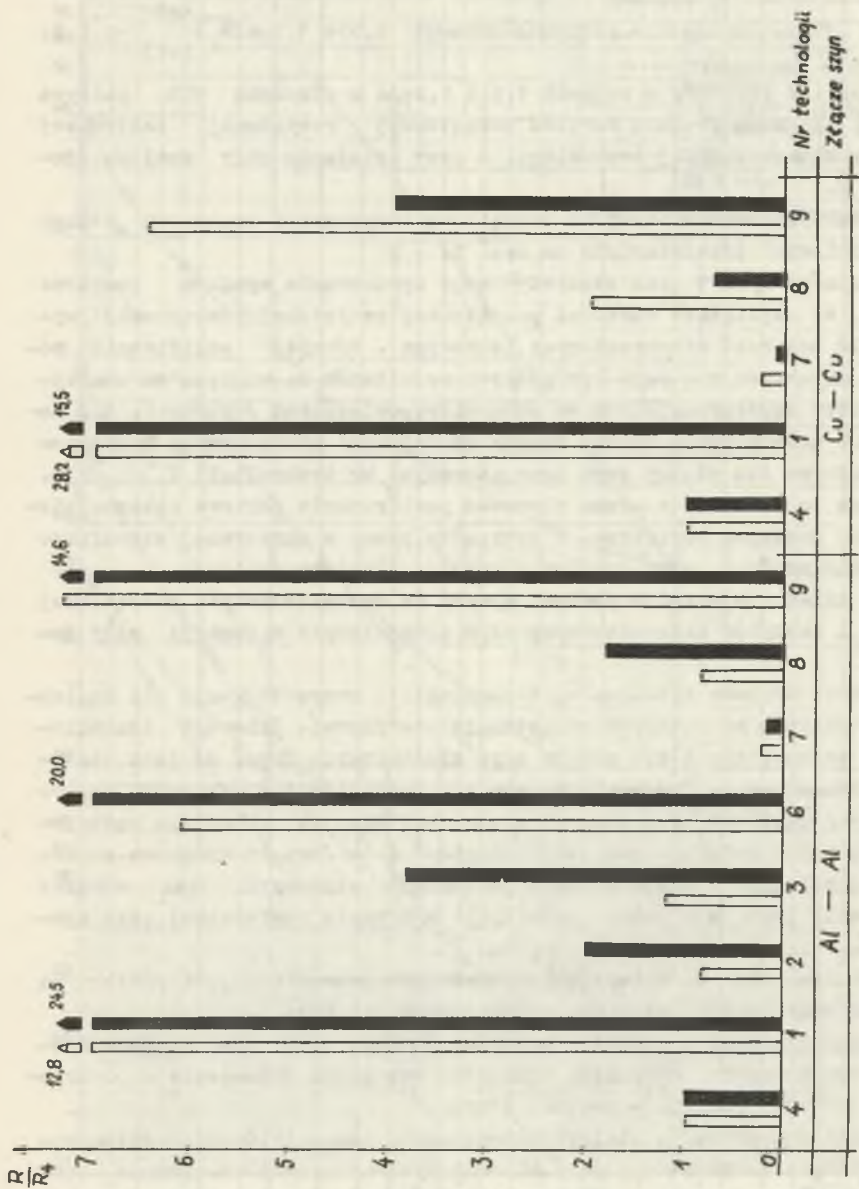
Rys. 2 przedstawia wpływ powłoki z cyny na charakterystykę początkowej rezystancji zestyków nierozłącznych szyn aluminiowych w funkcji siły docisku.

Połączenia śrubowe wykonane wg technologii 7 charakteryzuje się najlepszymi wartościami początkowej rezystancji zestykowej. Przewaga technologii 7 nad technologią 4 dla złączy szyn aluminiowych (rys. 2) jest statystycznie uzasadniona. Pomiaru wykonane dla technologii 8 wykazały pogorszenie się początkowej rezystancji zestykowej wskutek czego nie zaobserwowano znacznych różnic między technologią 8 a 4. Jest to wynikiem zarówno procesu utleniania nieskręconych powierzchni stykowych, jak również nieopanowania jeszcze w pełni technologii cynowania powierzchni szyn aluminiowych.

Dla połączeń szyn miedzianych wpływ obróbki mechanicznej i powłok na początkową rezystancję zestykową przedstawiono na rys. 3.

Analogiczne zjawiska zachodzą w odniesieniu do szyn miedzianych. Również i w tym przypadku najlepsze własności posiadają połączenia o powierzchniach stykowych pokrytych powłoką z cyny.

Na podstawie wnioskowania statystycznego można stwierdzić, że zastosowanie technologii 7 dla złączy szyn aluminiowych umożliwia otrzymanie tak dobrych wyników, jakie uzyskuje się dla złączy szyn miedzianych z zastosowaniem technologii 7 lub 4. Wynika stąd celowość cynowania aluminium a natomiast cynowanie miedzi nie jest konieczne.



Rys. 4. Względna zmiana początkowej rezystancji zestykowej R dla badanej technologii w odniesieniu do początkowej rezystancji R₀ (technologia 4) złączy przy siłach docisku:

□ - 12 kN
 ■ - 30 kN

Dla zestyków o powierzchniach pokrytych powłoką z miedzi (technologia 10) nie przeprowadzono szczegółowych badań. Powłoki miedziane na szynach aluminiowych charakteryzowały się dużą nietrwałością. Już w krótkim czasie po ich wykonaniu zaobserwowano złuszczenia, pęcherze, odpryski. Zjawiska te sprzyjają utlenianiu się powierzchni stykowych oraz rozwojowi korozji elektrochemicznej. Nie oznacza to jednak, że należy zrezygnować z dalszych badań nad miedziowaniem szyn aluminiowych. Dla przykładu firma japońska Hitachi wykonała szyny aluminiowe pokryte warstwą miedzi, które nie wykazywały powyższych wad. Nałożenie powłoki miedzianej wykonano przez prasowanie.

Rys. 4 przedstawia zbiorczo wpływ badanych technologii na początkową rezystancję złączy szyn Al-Al i Cu-Cu.

Ujmuje on względną zmianę początkowej rezystancji zestykowej do początkowej rezystancji połączeń wykonanych według technologii 4. Porównanie dokonano dla dwóch sił docisku a mianowicie: 12 000 i 30 000 N.

4. Wnioski

Nie należy wykonywać połączeń szynowych, których powierzchnie stykowe nie zostały uprzednio oczyszczone z warstw nalotowych.

Szybkość procesu utleniania oraz dążenie do łatwego formowania się zestyku eliminują szlifowanie jako metodę obróbki powierzchni stykowych szyn aluminiowych.

Zaleca się usuwanie warstw nalotowych przy pomocy szczotki stalowej. Powierzchnie stykowe należy przy tym uprzednio pokryć wazeliną przemysłową.

Celowym jest cynowanie powierzchni stykowych połączeń śrubowych szyn aluminiowych. Warunkiem stosowania na szerszą skalę jest dobre opanowanie technologii cynowania szyn aluminiowych.

W celu określenia zachowania się badanych połączeń w toku eksploatacji należy przeprowadzić odpowiednie badania modelowe.

LITERATURA

1. Dzierzbicki St.: Aparaty elektryczne - PWN, Warszawa, 1967.
2. Erk A., Schmelzle M.: Grundlagen der Schaltgerätetechnik - Springer-Verlag Berlin - Heidelberg New York 1974.
3. Holm R.: Electric Contact - Handbook, Berlin, 1958.
4. Iwancenko O.I.: O bołtowym sojedineni szin - Elektricheskie stancji, nr 8, 1961.

5. Kryński J.: Elektryczne aparaty rozdzielcze - PWN - Łódź - 1964, Warszawa.
6. Maksymiuk J.: Aparaty elektryczne - skrypt Politechniki Warszawskiej 1973.
7. Pankert J.: Vliv technologie na přechodový odpor kontaktů - Elektrotechnický časopis nr 3, 1968.
8. Polowiec M.: Powłoki ochronne powierzchni aluminiowych - Wiadomości elektrotechniczne nr 8, 1973.
9. Praca zbiorowa: Aluminium - poradnik, WNT, 1971.
10. Sacharow P.W.: Technologia aparatów elektrycznych - WNT, 1970.
11. PN-72/E-05025 - Dobór i układanie przewodów szynowych sztywnych.
12. PN-72/E-90038 - Elektroenergetyczne przewody gołe. Szyny miedziane sztywne.
13. PN-72/E-90038 - Elektroenergetyczne przewody gołe. Szyny aluminiowe sztywne.

Przyjęto do druku w listopadzie 1974 r.

ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ШИНОВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ НА ИХ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЕ АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Р е з ю м е

В работе изложены результаты исследований влияния механической обработки и вида металлического покрытия контактных поверхностей на первоначальное активное сопротивление болтовых соединений плоских алюминиевых и медных шин.

В результате этой работы разработана технология, отвечающая требованиям, предъявляемым к вышеупомянутым соединениям.

INFLUENCE OF TECHNOLOGY OF FAYING SURFACES PREPARATION OF RAIL CONNECTIONS ON THEIR INITIAL CONTACT RESISTANCE

S u m m a r y

The paper contains the results of investigations relating to the influence of mechanical working and the kind of metallic ceating of the faying surfaces on the initial resistance of bolted joints of flat aluminium and copper rails. The result of this work is the determination of technology allowing to meet the requirements to these connections.