

GERARD BARTODZIEJ
Katedra Urządzeń Elektrycznych

JAN GUZIK
Katedra Maszyn Elektrycznych

ZŁĄCZA STYKOWE W URZĄDZENIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie. Przedstawiono zjawiska zachodzące w złączach stykowych. Przeprowadzono analizę wpływu właściwości materiałów złącza i warunków pracy na jakość złącza. Podano sposoby poprawienia jakości złączy.

1. Wprowadzenie

Złącza stykowe stanowiące połączenie stykowe dwóch lub więcej przewodników są odpowiedzialną częścią każdego urządzenia elektrycznego. Podstawowe wymaganie stawiane łączom stykowym to nieprzekraczanie przy przepływie prądu elektrycznego przez złącze temperatur dopuszczalnych dla wiodących prąd elektryczny przewodników. Złącze winno więc mieć obciążalność nie mniejszą od przewodników, które łączy.

Spełnienie tego wymagania sprowadza się do warunku (1):

$$R_z \leq k_1 R_d \quad (1)$$

gdzie:

R_z - oporność złącza,

R_d - oporność odcinka przewodnika bez złącza o długości równej długości złącza,

k_1 - współczynnik uwzględniający zwiększenie powierzchni wymiany ciepła złącza w stosunku do odcinka przewodnika tej samej długości.

Dla złączy przewodów szynowych wykonanych z płaskowników $k \approx 1,1$. Warunek (1) winien być spełniony w całym okresie eksploatacji urządzenia. Wiąże się to z zapewnieniem odpowiedniego stanu powierzchni złącza oraz z zachowaniem określonej siły docisku złącza. Jakość złącza pogarszają przemiany chemiczne i zanieczyszczenia na powierzchniach zetknięcia przewodników. Siła docisku złącza może ulec obniżeniu wskutek odkształceń i zmian struktury mechanicznej łączonych przewodników oraz elementów łączących pod wpływem działań prądów zwarciovych, a nawet roboczych. Uwidacznia się to szczególnie silnie przy złączach stykowych przewodników aluminiowych, ze względu na specyficzne właściwości aluminium.

2. Czynniki wpływające na oporność złącza stykowego

Przyleganie łączonych przewodników nie następuje na całej geometrycznej powierzchni zetknięcia, nawet przy najstarszej obrobionych powierzchniach przewodników (rys. 1). Połączenie elektryczne następuje w wielkiej liczbie "punktów" (ściślej - bardzo małych płaszczyzn) na powierzchni zetknięcia.

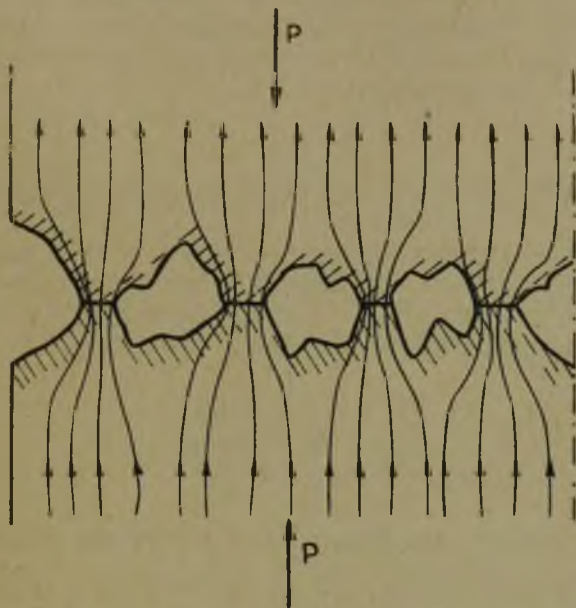
Od wielkości wypadkowej powierzchni punktów zetknięcia zależy oporność złącza. Przy przepływie prądu elektrycznego przez punkty zetknięcia następuje w nich zagęszczenie linii prądu. Gęstości prądu mogą osiągać wartość rzędu 10^7 A/cm^2 [52]. Zmniejszenie rzeczywistego przekroju, przez który przepływa prąd elektryczny w płaszczyźnie zetknięcia przewodników odpowiada wystąpieniu tzw. oporności przejścia złącza R_p . Całkowitą oporność odcinka złącza R_z określa zależność (2)

$$R_z = R_o + R_p \quad (2)$$

gdzie:

R_o - oporność jednolitego przewodnika o ukształtowaniu geometrycznym i długości jak odcinek złącza.

Oporność przejścia złącza decydująca o jakości złącza, zależy od wypadkowej wielkości powierzchni punktów zetknięcia oraz od stanu tych powierzchni. Powszechnie stosowane



Rys. 1. Struktura przekroju złącza stykowego

przewodniki pokryte są warstwą tlenków i monomolekularną warstwą gazów o właściwościach izolacyjnych lub półprzewodzących. Powoduje to wystąpienie dodatkowej oporności w złączu:

$$R_p = R_{pm} + R_w \quad (3)$$

R_{pm} - oporność przejścia przewodników czystych,

R_w - dodatkowa oporność przejścia od warstwy tlenków i zanieczyszczeń.

Oporność R_w ma decydujące znaczenie dla złączy pracujących przy małych siłach docisku. Ze wzrostem siły docisku złącza następuje naruszenie ciągłości warstwy tlenków i zanieczyszczeń oraz zmniejszenie jej oporności. Siła docisku decyduje o wielkości rzeczywistej powierzchni zetknięcia przewodników wpływając w decydujący sposób na oporność złącza. Ukształtowanie geometryczne złącza decyduje o wpływie siły docisku na wielkość rzeczywistej powierzchni zetknięcia przewodników.

2.1. Wpływ siły docisku i materiału przewodników

Przyjmując uproszczony model "punktu" zetknięcia dwóch przewodników wykonanych z tego samego materiału w postaci płaszczyzny o średnicy $2r$ (rys. 2) można określić jego powierzchnię w zależności od siły docisku:

$$S_1 = \pi r^2 = \frac{P_1}{\sigma} \quad (4)$$

P_1 - siła docisku przypadająca na jeden punkt,

σ - doraźna wytrzymałość materiału na zgniecenie.

Oporność przejścia pojedynczego punktu jest określona zależnością (5) $[L_1]$

$$R_{P_1} = \frac{\rho}{r} \quad (5)$$

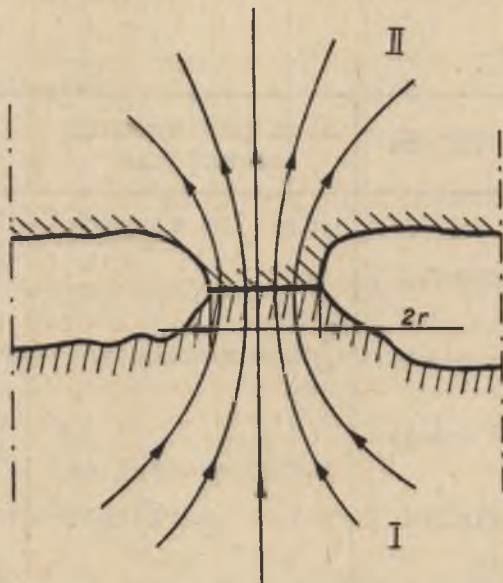
gdzie:

ρ - oporność właściwa materiału $[\Omega \text{ cm}]$

Na podstawie (4) i (5), biorąc pod uwagę, że wytrzymałość doraźna na zgniecenie σ jest zbliżona do twardości materiału przewodników H badanej wg Brinella otrzymano:

$$R_{P_1} \approx 0,89 \rho \sqrt{\frac{H}{P_1}} \quad (6)$$

Otrzymana zależność (6) ilustruje wpływ oporności właściwej materiału przewodników, ich twardości i siły dociśku na oporność przejścia pojedynczego punktu zetknięcia.



Rys. 2. Model punktu zetknięcia dwóch przewodników

Dla określenia oporności przejścia złączy różnych typów korzysta się z zależności (7), w której

$$R_p = \frac{k_p}{p^n} [\Omega] \quad (7)$$

$$p - [\text{kG}]$$

współczynnik k_p ujmuje wpływ rodzaju materiału przewodników, stanu powierzchni, zaś wykładnik potęgowy n ujmuje wpływ ukształtowania geometrycznego złącza na oporność przejścia. Wykładnik ten zależy ponadto w niewielkim stopniu od wartości siły docisku.

Wartości tych współczynników określono doświadczalnie. Dla zorientowania we wpływie różnych czynników na oporność złącza ustawiono w tabelicy I wartości współczynników k_p dla niektórych materiałów oraz wartość n dla różnych ukształtowań złączy.

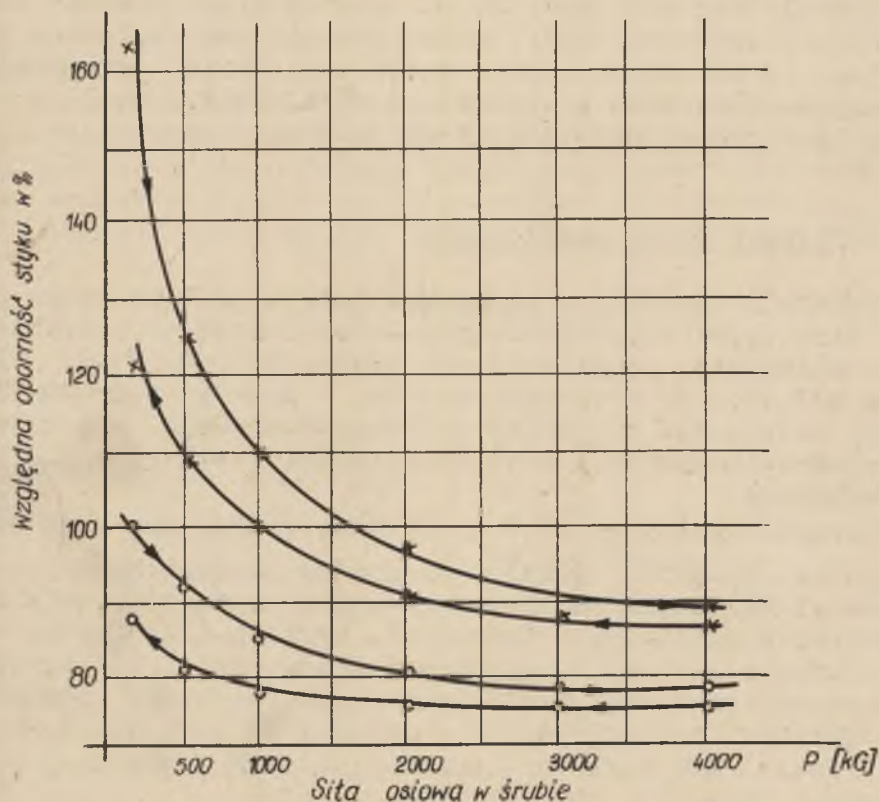
Tabelica I

Material przewodników	Stan powierzchni zetknięcia	$k_p \cdot 10^{-3}$
Miedź - miedź	wolne od tlenków	0,08-0,14
Miedź - miedź cynowana	"	0,07-0,1
Miedź cynowana - miedź cynowana	powierzchnie suche	0,1
Miedź cynowana - miedź cynowana	pokryte wazeliną	0,07
Aluminium - aluminium	wolne od tlenków	3-6,7
Aluminium - miedź	"	0,98

Tabelica II

Typ złącza	n
Płaszczyzna - płaszczyzna	1
Ostrze - płaszczyzna	0,5
Krawędź - płaszczyzna	0,5
Szczotka - płaszczyzna	1
Złącze szyn płaskich	0,5-0,7

Zależność (7) nie ujmuje zjawiska formowania styku. Oporność przejścia styku zależy od wielkości siły docisku i kierunku zmiany, przy którym siłę ustalono (rys. 3).



Rys. 3. Zależność oporności świeżo przygotowanych styków dwóch szyn aluminiowych od siły docisku

x - powierzchnie zetknięcia szyn świeżo czyszczone pod wazeliną, o - powierzchnie zetknięcia cynowane

Przy rosnącej sile docisku złącza następuje formowanie "punktów" zetknięcia, przy czym część tych punktów pracuje przy naprężeniach przekraczających granicę odkształceń sprężystych. Zmniejszenie siły docisku złącza powoduje przerwanie połączenia w części punktów, które pracowały przy naprężeniach w obszarze odkształceń sprężystych, zachowane

zostaje natomiast połączenie w znacznej części punktów odkształconych plastycznie. Wynika stąd przebieg zależności oporności przejścia $R_p = f(P)$ przedstawiony na rys. (3). Niewielkie nawet przesunięcie łączonych przewodników włączu uformowanym powoduje wzrost oporności do wartości określonej daną siłą docisku dla złącza nieuformowanego.

Praktycznie stosowane złącza pracują przy zmiennej sile docisku, w warunkach występowania przesunięć przewodników w złączu. Zmienność siły docisku może wynikać np. z odkształceń elementów złącza przy zmianach temperatury.

2.2. Wpływ zjawisk chemicznych

Podstawowym zjawiskiem chemicznym wpływającym na pracę złącza jest utlenianie materiałów przewodników na powierzchni ich zetknięcia. Jedynie tlenki srebra mają oporność właściwą zbliżoną do oporności metalu, z którego pochodzą. Produkty utleniania innych metali charakteryzują się wysoką opornością właściwą i mają właściwości izolacyjne lub półprzewodzące.

Tlenki aluminium (Al_2O_3) charakteryzują się opornością właściwą rzędu 10^{12} [Ωcm] i tworzą na powierzchni przewodników aluminiowych warstwę o grubości rzędu $2 \div 10 \cdot 10^{-6}$ mm o wysokiej szczelności i twardości. Grubość i spistość warstwy tlenków zależy od czystości aluminium. Ze wzrostem zawartości domieszek w aluminium rośnie grubość powstającej warstwy tlenków, jednakże warstwa ta jest mniej spista i twarda niż warstwa tlenków aluminium o większej czystości.

Skruszenie warstwy tlenków na powierzchni przewodników w złączu następuje przy ciśnieniu ok. $0,5 \text{ kg/mm}^2$. Rozwiązanie konstrukcyjne złącza musi zapewnić zachowanie ciśnień większych od $0,5 \text{ kg/mm}^2$ przez cały okres eksploatacji złącza. Proces utleniania aluminium przebiega w początkowej fazie bardzo szybko, tak że w temperaturze pokojowej już po kilku sekundach tworzy się warstewka o grubości ok. $2 \cdot 10^{-6}$ mm nie przekraczająca nawet po dłuższym okresie czasu grubości $10 \cdot 10^{-6}$ mm. Dopiero w temperaturze ok. 400°C następuje krystalizacja bezpostaciowego Al_2O_3 , tworzą się rysy w warstwie i następuje dalsze szybkie utlenianie.

Ze względu na wysoką oporność właściwą tlenków aluminium, powierzchnie zetknięcia przewodników aluminiowych winny być oczyszczone przed montażem z tlenków. Czyszczenie winno odbywać się w warunkach zabezpieczających przed ponownym utlenieniem np. po uprzednim pokryciu przewodników wazeliną, bezkwasową. Zmontowane złącze winno być również chronione przed utlenieniem warstwą wazeliny lub lakiery.

Proces utleniania metali związany jest z dyfuzją cząstek tlenu przez warstwę tlenku. Szybkość procesu i ustalona grubość warstwy tlenku będzie więc silnie uzależniona od temperatury. Dla miedzi określono doświadczalnie [12] zależność grubości warstwy tlenku od czasu i temperatury:

$$\Delta = 30 \cdot e^{0,013 t} (\sqrt{\tau} + 1) A \quad (8)$$

Δ - grubość warstwy tlenku [Å]

t - temperatura [°C]

τ - czas [godz.]

Tlenki miedzi mają oporność około 10^2 [Ω cm]. Warstwa tlenku osiąga w temperaturze 18°C grubość około $2 \div 3 \cdot 10^{-6}$ mm po kilku minutach i ok. $8,5 \cdot 10^{-6}$ mm po 5 godzinach. W temperaturze 62°C grubość warstwy tlenku po 5 godzinach wynosi ok. $14 \cdot 10^{-6}$ mm. Intensywność utleniania miedzi rośnie w temperaturze wyższej od 70-75°C i nasila się gwałtownie w temperaturach wyższych od ok. 120°C.

Zjawisko intensywnego utleniania w wyższych temperaturach pociąga za sobą znaczny wzrost oporności przejścia złączy, co z kolei może powodować dalszy wzrost temperatury złącza i intensyfikacji utleniania. Miedź jest wrażliwa na wpływy atmosfery zawierającej amoniak lub związki siarki, podlegając przy tym intensywnej korozji. Dlatego w atmosferach takich należy zastępować przewodniki miedziane aluminium, o znacznie większej odporności.

Przy łączeniu przewodników wykonanych z różnych metali istnieje niebezpieczeństwo korozji elektrolitycznej. Intensywność korozji zależy od różnicy potencjałów elektroli-

tycznych przewodników. Największe różnice potencjałów wykazują pary metali:

aluminium - srebro - 2,25 [V]

aluminium - miedź - 1,8 [V]

aluminium - cyna - 1,2 [V]

Uszkodzeniom ulegać będzie aluminium.

Stosunkowo mało podatne na korozję jest aluminium w zetknięciu z cynkiem lub kadmem. Wynika stąd celowość cynkowania lub kadmowania elementów współpracujących z przewodnikami aluminiowymi (np. śrub i in.). Dla zapobieżenia korozji elektrolitycznej złącza przewodników wykonanych z różnych metali stosuje się często przekładki dwumetalowe, platerowanie powierzchni zetknięcia lub pokrywanie galwaniczne miedzią, srebrem, cynowaniem i in. W złączach takich może jednakże wyniknąć korozja elektrolityczna szczelinowa między materiałem przewodnika a pokryciem. Stąd wynika konieczność ochrony przed wilgocią krawędzi styku przez lakierowanie lub natłuszczenie. Wielkość siły docisku złącza mająca istotny wpływ na pory i szczeliny w złączu decyduje również o procesie utleniania lub korozji elektrolitycznej złącza.

2.3. Wpływ temperatury

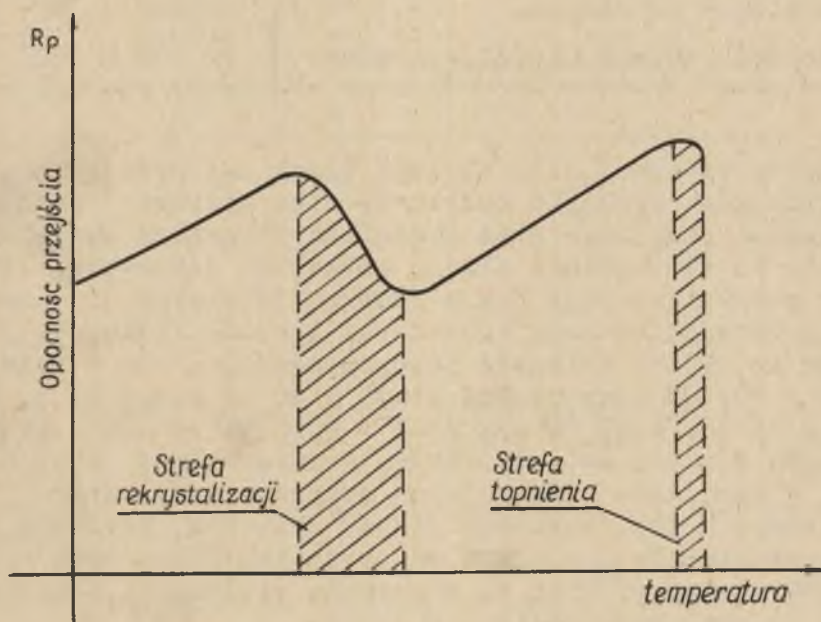
Ze wzrostem temperatury rośnie oporność właściwa przewodników łączonych, maleje zaś oporność tlenków i zanieczyszczeń. Całkowitą oporność przejścia złącza w zależności od temperatury można ująć wzorem przybliżonym (9):

$$R_{P_t} = R_{P_0} \left[1 + \frac{2}{3} \alpha(t-t_0) \right] \quad (9)$$

ważnym dla niezbyt wysokich temperatur (dla miedzi do ok. 200°C). Wpływ temperatury uwidacznia się ponadto w procesie utleniania złączy o czym już wspomniano w p.2.2.

Metale ulegają w podwyższonej temperaturze rekryształizacji powodującej obniżenie ich wytrzymałości mechanicznej. Aluminium rekryształizuje się w temperaturach wyższych od 120-150°C (wyższa temperatura dla aluminium utwardzone-

go mechanicznie). Miedź elektrolityczna zmienia swe właściwości mechaniczne w temperaturach powyżej 100°C , a miedź twarda w temperaturach powyżej 250°C . Proces rekrytalizacji zależy ponadto od czasu działania podwyższonej temperatury. Znaczne obniżenie wytrzymałości następuje przy długotrwałym działaniu minimalnej temperatury rekrytalizacji lub też w krótszym czasie przy działaniu wysokich temperatur. Zmniejszenie wytrzymałości materiału przewodników (obniżenie twardości) powoduje zwiększenie rzeczywistej powierzchni zetknięcia przewodników przy założeniu stałej siły docisku. Proces rekrytalizacji powoduje więc obniżenie oporności przejścia złącza. Ilustruje to rys. 4.



Rys. 4. Zależność oporności przejścia R_p od temperatury złącza przy stałej sile docisku

Znaczny spadek oporności przejścia występuje przy temperaturach bliskich temperatury topnienia materiału przewodników, spowodowany rozpoczęciem stapiania się przewodników.

3. Złącza śrubowe

Złącza śrubowe to najczęściej spotykany typ złączy stykowych rozbiernych. Siłę docisku złącza uzyskuje się przy pomocy śrub. Określone na podstawie doświadczeń średnie optymalne ciśnienia $p_{\text{śr}}$ na powierzchni złącza śrubowego [3] podaje tablica III.

Tablica III

Złącze	$p_{\text{śr}}$ kg/cm ²
Miedź - miedź	60 - 120
Aluminium - aluminium	900 - 300
Miedź ocynowana - miedź ocynowana	20 - 100

Oprócz wstępnej siły docisku uzyskanej przy pomocy śrub w złączu mogą wystąpić dodatkowe siły docisku pochodzące od działań cieplnych oraz dynamicznych prądów zwarciovych. Dotyczy to szczególnie złączy przewodów szynowych. Naprężenia powstające przy tym w śrubach łączących i materiałach przewodników mogą spowodować ich odkształcenie. Ilustrują to wyniki obliczeń przeprowadzonych dla złącza 2 szyn AP 10x100 łączonych śrubami M 16 ze stali St 5. Założono przyrost temperatury śrub i szyn $\Delta t = 180^{\circ}\text{C}$ (od temperatury montażu do temperatury dopuszczalnej przy zwarciu). W warunkach praktycznych przyrost temperatury śrub przy zwarciu jest znacznie niższy niż szyn. Założone warunki są więc łagodniejsze od warunków, które mogą praktycznie wystąpić. Mimo to otrzymano wielkości odkształceń (rys. 5) oraz naprężenie w śrubach:

$$\Delta_{\text{st}} = 1,07 \mu$$

$$\Delta_{\text{Al}} = 3,21 \mu$$

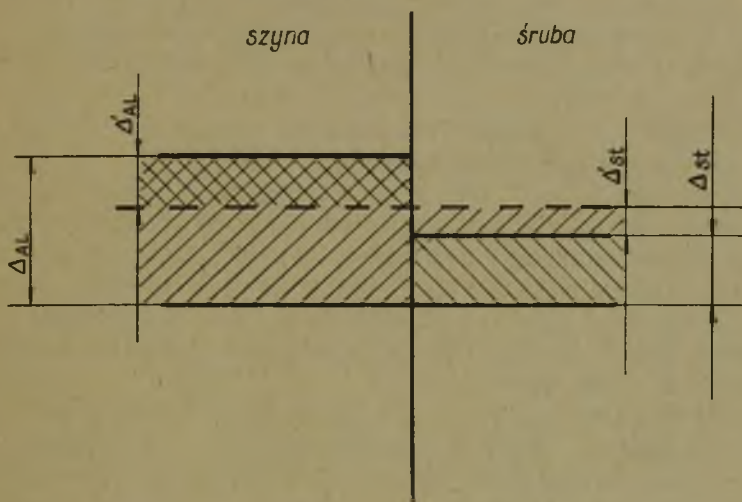
$$\Delta_{\text{st}} = 4,28 \mu$$

$$\Delta = 5,35 \mu$$

$$\sigma_{\text{st}} = 10,7 \text{ [kg/mm}^2\text{]}$$

Wielkość całkowitych naprężeń określono przyjmując dokręcenie nakrętki kluczem o ramieniu 25 cm siłą 30 kG, co wyzwała siłę osiową w śrubie o wielkości 1100 kG i naprężenie wstępne

$$\sigma_{wst} = 7,1 \text{ kG/mm}^2$$



Rys. 5. Schemat odkształceń złącza śrubowego przy zmianie temperatury

Oznaczenia: Δ_{Al} - swobodne wydłużenie szyny od Δt , Δ_{st} - swobodne wydłużenie śruby od Δt , Δ'_{Al} - zmiana wydłużenia szyny spowodowana działaniem nakrętki, Δ'_{st} - zmiana wydłużenia śruby spowodowana przez Δ'_{Al}

Całkowite naprężenie w śrubie przy nagrzananiu złącza wyniesie:

$$\sigma_c = \sigma_{wst} + \sigma_{st} = 17,8 \text{ [kG/mm}^2\text{]}$$

wobec dopuszczalnego naprężenia:

$$\sigma_{k_{rj}} \approx 9 \left[\text{kG/mm}^2 \right]$$

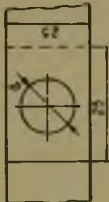
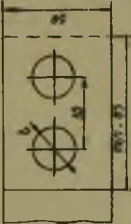
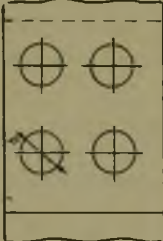
Zachodzi konieczność zastosowania elementu sprężystego, który mógłby przejąć odkształcenia pochodzące od sił dodatkowych w złączu, nie wywołując przy tym znacznego zwiększenia naprężeń w śrubach i łączonych przewodnikach. Powszechnie stosowane podkładki sprężyste (rozcięte) spełniają jedynie rolę zabezpieczenia przed odkręcaniem się nakrętek.

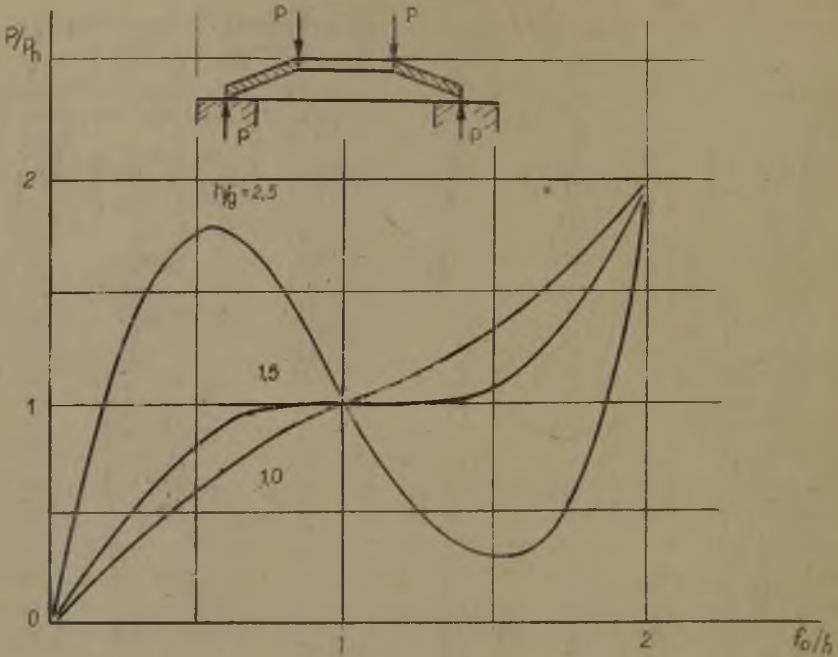
Spośród wielu możliwych elementów sprężystych najlepszą charakterystykę posiadają sprężyny talerzowe o stosunku wysokości do grubości $h/g = 1,5$ (rys. 6) zapewniające praktycznie stałą siłę docisku złącza przy jego podgrzaniu pod warunkiem odpowiedniego dobrania docisku wstępnego. Zastosowanie podkładek sprężystych talerzowych o charakterystyce określonej na (rys. 6) pozwoliłoby na opanowanie zjawiska pogarszania pracy złączy śrubowych wskutek odkształceń elementów tych złączy.

Dla najczęściej spotykanych przewodów szynowych aluminiowych zestawiono tablicę montażową IV. Z przeprowadzonych obliczeń, ze względu na naciski dopuszczalne dla aluminium wynika konieczność zastosowania podkładek zwykłych dokładnych o stosunku średnic zewnętrznej do wewnętrznej $D/d \geq 2$. Wstępne obciążenie śrub podane w tablicy IV obliczono zakładając dokręcenie nakrętek M 16 momentem 75 kGm i nakrętek M 12 momentem 3,75 kGm.

Uzyskanie dobrej jakości złączy śrubowych związane jest ze spełnieniem wielu wymagań montażowych i materiałowych, co napotyka w praktyce nieraz na wiele trudności. Z tego względu warto zwrócić uwagę na inne sposoby łączenia przewodników jak spajanie na zimno, nitowanie połączone ze spajaniem na zimno oraz klejenie. Z braku miejsca ograniczono się do krótkiego omówienia ostatniego sposobu łączenia przewodników.

Tablica IV

Ip.	Szkic złącza	Wymiar szyny	Gruba		Podkładka		Srebrzysta tulejka		Siła wt. w śr. kG		
			Ilość	Wymiary	Mat.	Wymiary	Mat.	Ilość			
1		25x3	1	M12x1x30	st5	24/13x4	st3	1	22/13x2 h = 3	PS1	800
2		50x5	2	M12x1x30	st5	30/13x4	st3	2	22/13x2 h = 3	PS1	800
3		80x8 80x10 100x10	4	M16x1x40	st5	30/17x5 40/17x5	st3	4	28/17x2 h = 3 35/17x2 h = 3	PS1	1100



Rys. 6

P - obciążenie robocze, P_h - obciążenie powodujące zupełne spłaszczenie sprężyny, f_0 - ugięcie sprężyny

4. Złącze klejone

Pozytywne wyniki prób klejenia metali, realna możliwość zestawienia klejów o dobrych właściwościach elektrycznych stwarzają perspektywę wykonywania złączy klejonych.

Dotychczas badane kleje zestawione były na bazie żywic epoksydowych z proszkami niklu lub srebra. Uzyskano wyniki [15]

1. Klej ze sproszkowanym niklem (żywica Araldit)

- oporność właściwa ρ - ok. 10^{-3} [Ωcm]

- wytrzymałość R_r - ok. 85 [kg/cm^2]

2. Klej ze sproszkowanym srebrem

- oporność właściwa ρ - do ok. 10^{-5} [Ωcm]

- wytrzymałość R_r - 125-175 [kg/cm^2]

Celowe byłoby podjęcie w kraju prac nad zastosowaniem klejenia jako samodzielnego sposobu łączenia, bądź dla poprawienia jakości i pewności pracy złączy śrubowych lub nitowanych.

Rękopis złożono w Redakcji w październiku 1965 r.

LITERATURA

- [1] Jones F.L.: The physic of electrical contacts, Oxford, 1957.
- [2] Holm R.: Electric contacts, Handbook, Springer, 1958.
- [3] Babikow M.A.: Elektriczeskije aparaty. Gosenergoizdat 1952.
- [4] Keil A.: Werkstoffe für elektrische Kontakte, Springer 1960.
- [5] Elektrisch leitende Kleber, Öster Mech. 1964, Nr 8.

КОНТАКТНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Р е з ю м е

Указано на явления происходящие в контактных соединениях. Произведен анализ влияния свойств материалов соединения и условий работы на качество соединения. Приведено способ повышения качества соединений.

CONTACT JOINTS IN THE ELECTRO-ENERGETIC INSTALLATIONS**S u m m a r y**

Description of the phenomena occurring in the contact joints. Analysis of the effect of the joint materials properties and of work conditions on the joint quality. Methods of joints quality correction were pointed out.