

Ewa Dziędzic*

PRZEWODY GOŁE ZE STOPÓW $AlMgSi$ PRZEZNACZONE DO NAWIETRZNYCH LINII ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie: Referat przedstawia problematykę związaną z projektowaniem konstrukcji nowoczesnych przewodów gołych z aluminium stopowego $AlMgSi$ przeznaczonych do elektroenergetycznych linii napowietrznych. Szczególną uwagę zwrócono na walory użytkowe przewodów z jednorodnego materiału w porównaniu z klasycznymi przewodami aluminium-stalowymi w aspekcie techniczno-ekonomicznym.

1. Wprowadzenie

Elektroenergetyczne linie napowietrzne służą do przesyłu energii elektrycznej od źródeł wytwarzania do odbiorców. Spełniają one rolę linii przesyłowych, rozdzielczych lub dystrybucyjnych w zależności od wielkości napięcia. Polski system elektroenergetyczny wyposażony jest w linie:

- wysokich napięć 750, 400, 220 i 110 kV,
- średnich napięć 30, 20, 15, 10 i 6 kV,
- niskich napięć poniżej 1 kV.

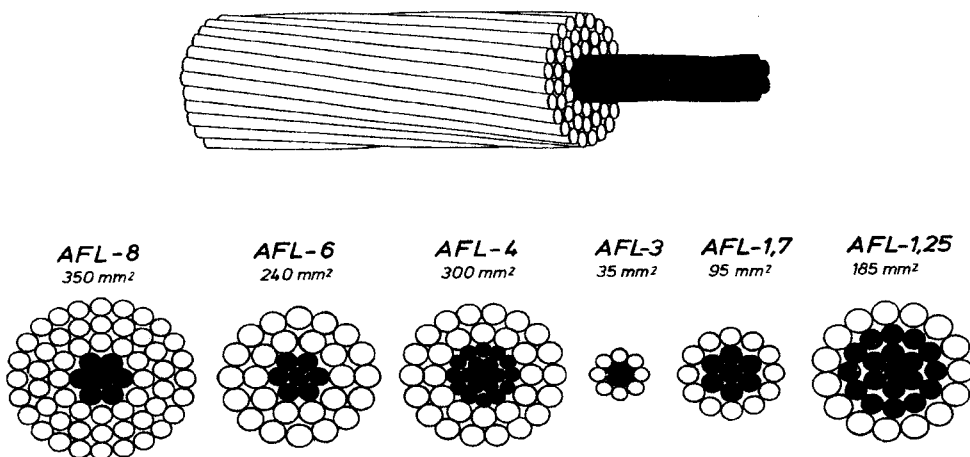
Koszty budowy i eksploatacji linii elektroenergetycznych zależą przede wszystkim od własności przewodów.

2. Konstrukcje przewodów napowietrznych stosowanych do budowy linii wysokich napięć

W polskim systemie elektroenergetycznym do budowy linii napowietrznych wysokich napięć stosuje się przewody aluminium-stalowe. Złożona, bimetaliczna kon-

* Krakowska Fabryka Kabli S.A., ul. Wielicka 114, 30-663 Kraków

struktura przewodu wynika z wysokich wymagań wytrzymałościowych stawianych przewodom pracującym w różnych warunkach atmosferycznych. Klasyczna konstrukcja przewodu aluminiowo-stalowego zawiera rdzeń jedno lub wielodrutowy z drutów stalowych ocynkowanych, na który nałożone są kolejne warstwy z drutów aluminiowych. Wielkość przekroju przewodu zależy od największego dopuszczalnego spadku napięcia, największego dopuszczalnego natężenia prądu, oraz naprężeń mechanicznych na jakie może być narażony przewód w warunkach eksploatacyjnych. Stosunkowo niska wytrzymałość drutów aluminiowych, około 200 MPa uniemożliwia ich zastosowanie na napowietrzne przewody samonośne o jednorodnej budowie. Problem ten rozwiązano w ten sposób, że wzmocniono je rdzeniami z drutów stalowych stanowiącymi element nośny przewodu. Polska norma uwzględnia 7 rodzajów przewodów o określonym stosunku przekroju części aluminiowej do części stalowej (Al/Fe): 20, 8, 6, 4, 3, 1,7 oraz 1,25.



Rys. 1. Budowa przewodów aluminiowo-stalowych

Przedstawione rozwiązania konstrukcyjne bimetalicznych przewodów podstawowych elementów sieci elektroenergetycznych posiadają zasadnicze mankamenty w porównaniu do przewodów zbudowanych z jednorodnego materiału. Zróżnicowanie właściwości materiałowych aluminium i stali w aspekcie zjawiska pełzania, powoduje wzrost obciążenia rdzenia stalowego, oraz luzowania aluminiowej części przewodu w uchwytach mocujących. Niezależnym problemem jest zjawisko korozji przewodu na powierzchni kontaktu Al-Fe, pomimo pokrywania drutów stalowych warstwą cynku, która w niesprzyjających warunkach atmosferycznych może ulec lokalnie zniszczeniu nie dając pełnych gwarancji dostatecznego zabezpieczenia. Duża masa przewodu z uwagi na udział rdzenia stalowego, oraz przewidywany ciężar sady mają znaczący wpływ na projektowanie rozpiętości i konstrukcji wsporczych na trasie linii. Omówione niedoskonałości przewodów niejednorodnych Al-Fe mają niebagatelny wpływ na koszty eksploatacji i budowy linii elektroenergetycznych wysokich napięć.

3. Przewodowe stopy AlMgSi

Rosnące zapotrzebowanie na przewody elektroenergetyczne o podwyższonej niezawodności eksploatacyjnej, zmusiło producentów do szukania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, w tym nowych materiałów przewodzących. Biorąc pod uwagę wysokie wymagania mechaniczne (maksymalne naprężenia), elektryczne (obciążalność prądowa), masę i odporność na korozję stawiane przewodom w napowietrznych liniach elektroenergetycznych, stopy AlMgSi znalazły zastosowanie do budowy nowej generacji lekkich, wysokowytrzymałych przewodów samonośnych. W krajach wysoko uprzemysłowionych do produkcji przewodów napowietrznych w szerokim zakresie stosuje się stopy aluminiowe o różnych wariantach składu chemicznego. We Francji firma Pechiney produkuje stopy AlMgSi o nazwie ALMELEC (0,44–0,60% Mg, 0,44–0,62% Si), w Niemczech produkuje się podobne stopy o nazwie ALDREY, Amerykanie stosują stopy oznaczone symbolami 6201 i 5005. Innymi gatunkami stopów aluminiowych produkowanych w świecie są stopy z dodatkiem żelaza do 0,8% lub AlFeMg o zawartości Fe do 0,9% i Mg do 0,22%. Biorąc pod uwagę charakterystykę materiału, a więc wysoką wytrzymałość, przewodność, odporność na korozję i pełzanie, oraz odporność na krótkotrwałe impulsy cieplne, najwyższą ocenę otrzymał stop AlMgSi.

Tabela 1. Nominalny skład chemiczny stopów 6101 i 6201

gat.		Cu	Fe	Si	Mn	Mg	Cr	Ti	Zn	B
6101	min.	–	0,18	0,43	–	0,48	–	0,005	–	0,01
	max.	0,01	0,23	0,50	0,005	0,55	0,005	0,01	0,01	0,06
	nom.	0,005	0,20	0,45	0,005	0,5	< 0,005	0,008	< 0,01	0,012
6201	min.	–	0,25	0,50	–	0,60	–	0,005	–	0,01
	max.	0,005	0,35	0,60	0,005	0,70	0,005	0,01	0,01	0,06
	nom.	< 0,005	0,30	0,55	< 0,005	0,65	< 0,005	0,008	< 0,01	0,015

Normy IEC nie precyzują składu chemicznego stopu AlMgSi, określając jedynie własności drutów: od drutów ze stopu typu A o średnicy <3,5 mm wymaga się R_m -min 325 MPa, ρ -max 32,841 n Ω m (52,5% IACS), A_{250} — min 3%, dla drutów o średnicy >3,5 mm R_m -min 315 MPa, niezależnie od średnicy, ρ -max 32,53 n Ω m (53% IACS), A_{250} — min 3,5%.

W warunkach przetwórczych osiągnięcie takiego poziomu żądanych własności często ze sobą sprzecznych jak wysoka wytrzymałość i wysokie wydłużenie nie jest sprawą prostą. Dopiero odpowiednia kombinacja obróbki cieplnej i przeróbki plastycznej materiału stopowego w różnych fazach procesów technologicznych może przynieść oczekiwane efekty.

Normy IEC stawiają wymagania również innym charakterystykom materiału stopowego: moduł sprężystości $E = E_{AL}$ [MPa], moduł elastyczności przewodu <58000 MPa, współczynnik wydłużenia sprężystego $\beta = 1/E = 167 \div 178$ [1/MPa], współczynnik rozszerzalności cieplnej $\alpha = \alpha_{AL} = 23 \times 10^{-6}$ [1/K], współczynnik temperaturowy rezystancji w 200°C $\alpha_R = 0,0036$ [1/K], gęstość $\gamma = \gamma_{AL} = 2,703$ [g/cm³],

odporność na pełzanie: max. 500 [$\mu\text{m}/\text{m}$] po 10 latach w 22°C, odporność na korozję, oraz istotne w czasie pracy przewodu obniżenie własności w podwyższonej temperaturze, np. dla stopu B w temp. 100°C dopuszcza się spadek własności o 8%, w temperaturze 80°C max. 2% po 1000 godzinach przebywania w tych temperaturach.

Tabela 2. Własności mechaniczne i elektryczne drutów na elektroenergetyczne przewody napowietrzne ze stopów AlMgSi (wyciąg z norm międzynarodowych)

Norma	Średnica drutu [mm]	R_m min [MPa]	A_{250} min [%]	ρ [n Ωm]	konduktywność wg IACS [%]	Uwagi
IEC 104 (1987)	<3,5	325	3,0	32,840	52,5	Typ A
	>3,5	315	3,0	32,840	52,5	Typ A
	<3,5	295	3,5	32,530	53,0	Typ B
	>3,5	295	3,5	32,530	53,0	Typ B
DIN-48200	1,5÷4,0	294	$A_r = 4,0$	32,790	52,58	
ASTM	1,5÷3,25	330	3,0	32,841	52,5	

Tabela 3. Porównanie wybranych własności aluminium i przewodowych stopów AlMgSi

Charakterystyka	Aluminium	AlMgSi
ciężar właściwy [kg/m^3]	2 700	2 700
R_m [MPa]	160÷200	260÷400
moduł sprężystości E [MPa]	70 000	70 000
rezystywność w temp. 20°C [n Ωm]	max. 28,264	32,226÷32,841
współczynnik rozszerzalności cieplnej [1/K]	23×10^{-6}	23×10^{-6}
współczynnik temp. rezystancji dla stałej masy w 20° [1/K]	0,00403	0,0036

4. Problematyka przetwórcza i projektowa

Mając do dyspozycji produkt krajowy w postaci walcówki stopowej AlMgSi produkcji ZM Skawina, KFK S.A. we współpracy z AGH, podjęto się trudnego zadania z punktu widzenia technologii przetwórczej uruchomienia produkcji przewodów napowietrznych z utwardzalnych wydzieleniowo stopów AlMgSi. Założenia projektowe nowych konstrukcji przewodów opracowano w taki sposób, aby spełniały parametry elektryczne (rezystancja 1 km przewodu) na poziomie co najmniej wymagań PN dla przewodów aluminium-stalowych, wyższą od żądanej w PN wytrzymałość, z równoczesnym zachowaniem dotychczasowej średnicy przewodu biorąc pod uwagę istniejący osprzęt.

4.1. Technologia przetwórcza

Uzyskanie własności o których mowa, możliwe było na drodze odpowiedniego doboru parametrów w całym ciągu technologicznym obejmującym zarówno proces

ciągnięcia, jak i obróbkę cieplną. Do istotnych problemów związanych z przeróbką plastyczną materiału w procesie ciągnięcia zaliczyć należy powstanie dużej ilości ciepła wydzielającego się w poszczególnych ciągniadłach na skutek oporu plastycznego materiału (dwukrotnie wyższa temperatura niż w przypadku ciągnięcia aluminium). Ciepło kumulowane w ciągnionym drucie ma wpływ na kształtowanie własności mechanicznych i elektrycznych podstawowego elementu przewodu, bowiem mamy tu do czynienia ze specyficzną obróbką cieplno-mechaniczną. Tak więc w projektowaniu procesu ciągnięcia oprócz odpowiednio dobranego materiału wejściowego, parametrów siłowych maszyny, ciągu średnic ciągań, ich geometrii, właściwości medium smarochłodziącego, prędkości ciągnięcia należy zwrócić szczególną uwagę na kształtowanie własności gotowego drutu uwzględniając warunki temperaturowe procesu.

Przeprowadzone doświadczenia wykazały, że uzyskane po ciągnięciu i obróbce cieplnej własności plastyczne drutów są odpowiednio do skręcania przewodu. W skręconych przewodach wymaga się ścisłego przylegania drutów w warstwach i poszczególnych warstw do siebie. Jest to możliwe, gdy odkształcenie powrotne po skręceniu przewodu jest dostatecznie niskie. Narzuca to wymagania na granicę plastyczności, która powinna być możliwie niska przy wysokiej wytrzymałości drutów, jak również wysoki moduł sprężystości. Spełnienie tych warunków w sposób wydatny ogranicza zdolność do rozkręcania przewodów. Innym ważnym czynnikiem, regulowanym przez normy IEC jest zachowanie wartości stosunku skoku skrętu (długość skoku: średnicy warstwy) w poszczególnych warstwach. Wartości te w warstwach wewnętrznych nie powinny być większe niż 16, w warstwie zewnętrznej max. 14.

W przewodach wielowarstwowych stosunek skoku skrętu każdej warstwy nie powinien być większy od stosunku skoku skrętu warstwy bezpośrednio do niej przylegającej.

4.2. Założenia projektowe

Przy projektowaniu jednorodnych przewodów z aluminium stopowego — zamienników przewodów aluminiowo-stalowych należało przyjąć z góry narzucone ograniczenia wynikające z geometrii przewodów, jednoznacznie opisane przez przekrój nominalny, ilości, średnice drutów jak również ilość warstw. Te parametry jednoznacznie określają przedmiotowe normy. Konstrukcja przewodu jest ściśle powiązana z siłą jego zrywania, oraz rezystancją 1 km przewodu. Zatem uzyskanie wymaganych elektrycznych i mechanicznych parametrów przewodu możliwe było przez zwiększenie przekroju elektrycznego, zastępując rdzeń stalowy stopowymi drutami przewodowymi, oraz druty aluminiowe o stosunkowo niskiej wytrzymałości, drutami z aluminium stopowego o wytrzymałości powyżej 300 MPa. W przypadku konstrukcji złożonych z dużym udziałem części stalowej, a więc przewodów AFL-1,25; AFL-1,7; AFL-3 postępowanie jak wyżej jest niemożliwe. Wynika to z określonej wysokiej wytrzymałości rdzenia stalowego (R_m dla drutu Fe — min. 1275 MPa).

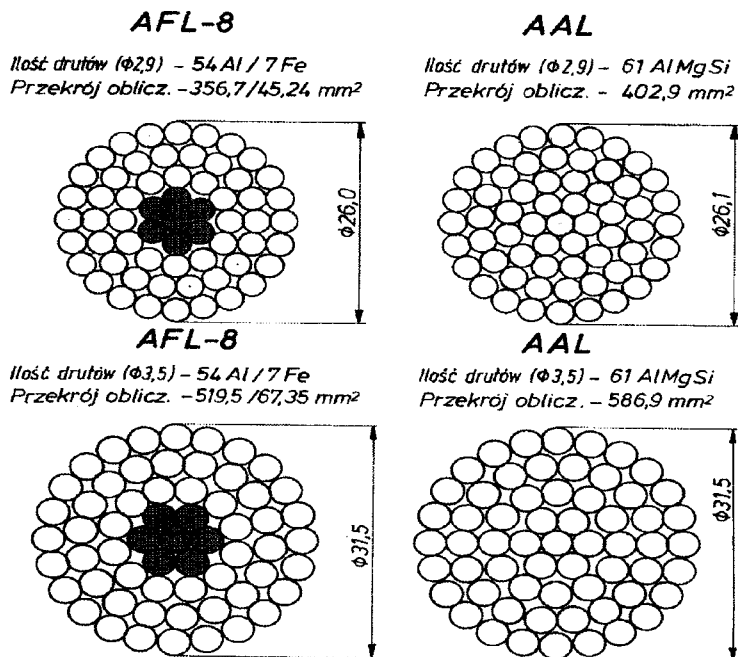
4.3. Przewody z aluminium stopowego

Prototypowe przewody z aluminium stopowego AlMgSi o przekrojach 280, 400 i 585 mm² — zamienniki przewodu aluminiowo-stalowych AFL-6 240 mm², AFL-8 350 mm² i AFL-8 525 mm² wykonane w KFK S.A. zostały przebadane w Biurze Studiów i projektów „Energoprojekt” w Krakowie.

Badania statyczne obejmowały między innymi:

- określenie rzeczywistej siły zrywającej tzw. RTS,
- wyznaczenie modułów sprężystości początkowego i końcowego,
- własności drutów.

Wyniki badań uzyskały ocenę pozytywną. Własności przewodów z aluminium stopowego i ich odpowiedników aluminiowo-stalowych podano w tabeli 4.



Rys. 2. Modele konstrukcji przewodów stopowych zamienników AFL

5. Porównanie podstawowych parametrów napowietrznych linii elektroenergetycznych z jednorodnym przewodem stopowym i klasycznym aluminiowo-stalowym

5.1. Przykładowe wyniki obliczeń

Przykładowe wyniki obliczeń parametrów linii elektroenergetycznej w obrębie pojedynczego przęsła dla przewodu aluminiowo-stalowego AFL-4350 i jego odpo-

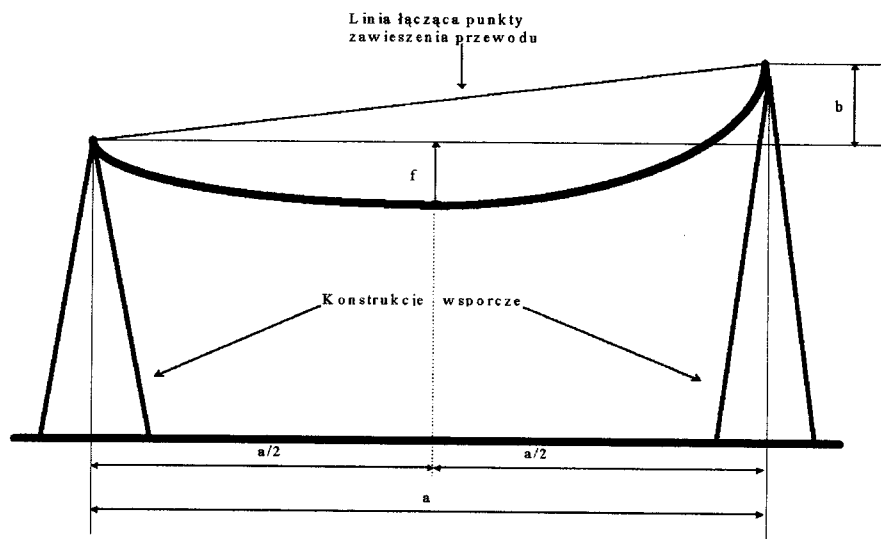
Tabela 4. Własności przewodów stopowych i ich odpowiedników aluminiowo-stalowych

Typ	Liczba warstw	Liczba drutów dr. Al/Fe	Własności ³⁾					
			Przekrój minimalny mm ²	Przekrój obliczeniowy mm ²	Średnica przewodu mm	Średnica drutów dr. Al/Fe mm	Masa kg/km	Siła zryw. N
AAL ¹⁾		61	400	403	26,1	2,90	1080	128960
AFL8 ²⁾	4	54/7	350	356,7/45,244	26,0	2,9/2,9	1352	110132
AAL		61	585	587	31,5	3,50	1580	173600
AFL8	4	54/7	525	519,5/67,37	31,5	3,5/3,5	1970	158279

1) AAL — przewód z aluminium stopowego

2) AFL — przewód aluminiowo-stalowy

3) Własności przewodów aluminiowo-stalowych wg wymagań PN

**Rys. 3.** Schemat przęsła

wiednika stopowego AAL-400, oraz dla przewodu AFL-8 525 mm² i jego zamiennika stopowego AAL 585 mm² przedstawiono w tabelach 5 i 6.

6. Wnioski

- Wyprodukowane druty ze stopów AlMgSi posiadają własności wytrzymałościowe i elektryczne pozwalające na wyeliminowanie rdzeni stalowych w przewodach aluminiowo-stalowych o stosunku powierzchni przekroju rdzenia stalowego do elektrycznie czynnego przekroju części aluminiowej wyrażonej ilorazami: 1:4 (AFL-4), 1:6 (AFL-6), 1:8 (AFL-8), 1:20 (AFL-20).

Tabela 5. Parametry linii energetycznej w obrębie pojedynczego przęśta z przewodem stalowo-aluminiowym i stopowym

Rodzaj przewodu	Przekrój znamionowy przewodu [mm ²]	g [MPa/m]	g_s [MPa/m]	g_k [MPa/m]	σ_{dop} [MPa]	σ_s [MPa]	Rozpiętość przelomowa a_p [m]
AFL-4	350	0,0363	0,0600	0,0836	135	113	256
AAL 400	400	0,0273	0,0509	0,0745	140	120	337
AFL-8	525	0,0330	0,0520	0,07181	115	94	270
AAL 585	585	0,0273	0,0467	0,0661	110	88	299

g , (g_s , g_k) — współczynnik obciążenia mechanicznego przewodu (w warunkach sady normalnej, w warunkach sady katastrofalnej)

σ_{dop} , σ_s — przyjęte naprężenie dopuszczalne i w warunkach sady normalnej

Tabela 6. Wartości współczynników obciążenia mechanicznego, naprężeń i zwisów w różnych temperaturach dla przewodów aluminiowo-stalowych i ich odpowiedników stopowych. Rozpiętość przęśta $a = 100$ m (stanem wyjściowym dla wszystkich przewodów jest temp. -25°C)

Rodzaj przewodu	g [MPa/m]	g_s [MPa/m]	$\sigma(-25^\circ\text{C})$ [MPa]	$\sigma(-5^\circ\text{C} + g_s)$ [MPa]	$\sigma(20^\circ\text{C})$ [MPa]	$\sigma(40^\circ\text{C})$ [MPa]	$f(-25^\circ\text{C})$ [m]	$f(-5^\circ\text{C} + g_s)$ [m]	$f(20^\circ\text{C})$ [m]	$f(40^\circ\text{C})$ [m]
AFL-4 350	0,0363	0,0600	135	113	74	53	0,34	0,68	0,63	0,88
AAL 400	0,0273	0,0509	140	120	80	56	0,25	0,54	0,43	0,62
AFL-8 525	0,0330	0,0520	115	94	59	41	0,37	0,71	0,72	1,03
AAL 585	0,0467	0,0467	110	88	53	35	0,32	0,67	0,65	1,00

g — współczynnik obciążenia mechanicznego przewodów nie pokrytych sadią

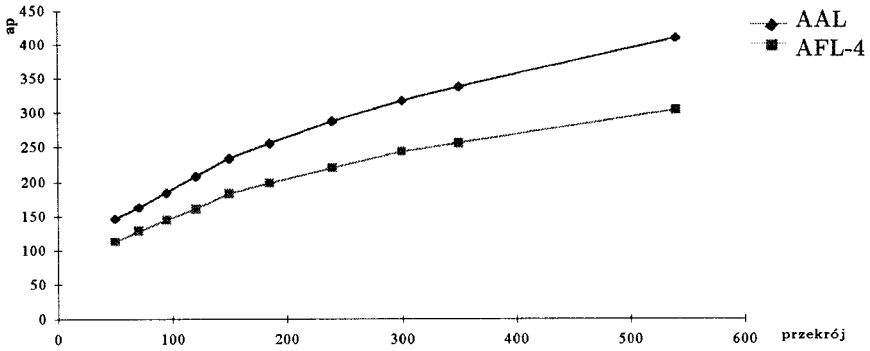
g_s — współczynnik obciążenia mechanicznego przewodów z sadią normalną

$\sigma(-25^\circ\text{C})$ — naprężenie w przewodzie w temp. mrozu równej -25°C , przyjęte jako stan wyjściowy

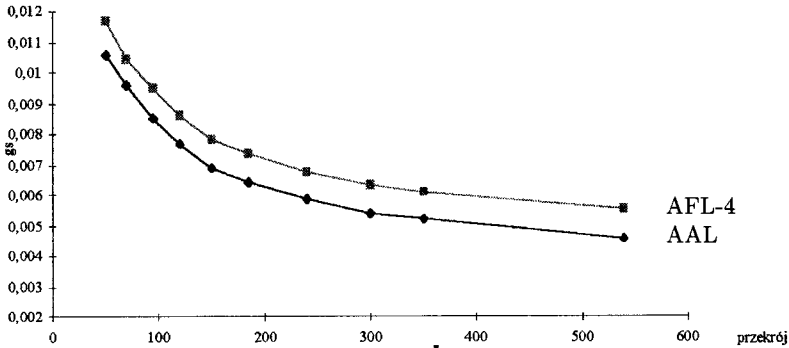
$\sigma(-5^\circ\text{C} + g_s)$ — naprężenie w przewodzie w temp. -5°C obciążonego sadią normalną

$\sigma(20^\circ\text{C})$ — naprężenie w przewodzie w temp. 20°C

$\sigma(40^\circ\text{C})$ — naprężenie w przewodzie w temp. 40°C



Rys. 4. Rozpiętość przelomowa przęsa w funkcji przekroju przewodu



Rys. 5. Współczynnik obciążenia mechanicznego przewodu g_s (w warunkach sadzi normalnej) w funkcji przekroju przewodu

- Przewody stopowe jednorodne posiadają szereg zalet w porównaniu z przewodami aluminiowo-stalowymi.
- Badania statyczne potwierdziły ich wysoką wytrzymałość na zrywanie (siła zrywająca wyższa od wymaganej dla AFL).
- W przewodach stopowych uzyskano rezystancję niższą niż całkowitą rezystancję w przewodach aluminiowo-stalowych.
- Przewody stopowe jednorodne charakteryzują się wyższą odpornością na korozję od przewodów bimetalicznych (Al-Fe).
- Mniejsza o około 20–30% masa przewodów stopowych, niski współczynnik obciążalności mechanicznej, oraz wyższe wartości rozpiętości przelomowej, stwarzają nowe możliwości budowy linii elektroenergetycznych o większych rozpiętościach przęsał. Korzyści ekonomiczne wynikające z tego faktu polegają na zmniejszeniu ilości konstrukcji wsporczych.

7. Zakończenie

Specyficzne dla każdego producenta uwarunkowania techniczne i złożona problematyka przetwórcza stopów aluminiowych często wymagają szerokiego zakresu specjalistycznych badań dla osiągnięcia zamierzonego celu. KFK SA wciąż wzbogaca się o nowe doświadczenia w oparciu o nowoczesną wiedzę techniczną, bowiem „know-how” otwiera drogę do sukcesu.

Referat opracowano w oparciu o wyniki prac badawczo-wdrożeniowych prowadzonych przez KFK SA i AGH Kraków.