



Ewa Dzedzic<sup>\*</sup>, Tadeusz Knych<sup>\*\*</sup>

## **CHARAKTERYSTYKI WYTRZYMAŁOŚCIOWE I REOLOGICZNE PRZEWODU STOPOWEGO AAL 400 PRZEZNACZONEGO DO LINII WYSOKIEGO NAPIĘCIA**

**Streszczenie:** Celem referatu jest przedstawienie i analiza wyników badań własności wytrzymałościowych przewodów ze stopu AlMgSi wykonanych w Krakowskiej Fabryce Kabli S.A. oraz badań procesów reologicznych (pełzania i relaksacji naprężeń) pod kątem pokazania możliwości sterowania potencjałem reologicznym przewodu. W szczególności chodzi o porównanie parametrów charakterystyk pełzania przewodu nieprzepięzanego z parametrami funkcji pełzania przewodów po różnych sposobach „przepięzania”. Efektem końcowym pracy ma być określenie sposobu postępowania umożliwiającego ograniczenie skuteczności potencjału reologicznego materiału.

**Słowa kluczowe:** napowietrzne przewody samonośne, pełzanie, przepięzanie przewodów

### **1. Wstęp**

Charakterystyki pełzania i relaksacji naprężeń są istotą i miarą reologicznego zachowania się wiszącego przewodu. Parametry tych funkcji (dla ustalonego naprężenia i temperatury) zależą od własności wytrzymałościowych drutu, a te z kolei są determinowane jego strukturą. W praktyce chodzi o to, aby moc potencjału reologicznego przewodu wyczerpać zanim zostanie on umieszczony na trwale w przęśle. Zasadniczo można to przeprowadzić albo przed albo w trakcie montażu przewodu. Postępowanie o którym mowa sprowadza się m.in. do tzw. „przepięzania przewodu”. Przedstawione w pracy wyniki badań przeprowadzone na stopowym przewodzie AAL 400 pozwalają na przeprowadzenie analizy procesów reologicznych zachodzących

---

<sup>\*</sup> Krakowska Fabryka Kabli S.A., Kraków ul. Wielicka 114

<sup>\*\*</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków Al. Mickiewicza 30

w naprężonym przewodzie pod kątem sterowania ich potencjałem. Cel naukowy pracy polega na dowodzeniu tezy o wyczerpywaniu się potencjału reologicznego materiału; celem praktycznym jest stworzenie danych do budowy technologii montażu przewodu ograniczającej jego pełzanie, a w konsekwencji zwiis.

## 2. Cel, zakres, metoda i program badań

Celem badań jest wyznaczenie charakterystyk wytrzymałościowych i reologicznych przewodów stopowych. Badania przeprowadzono na przewodach typu AAL 400 wykonanych z drutów ze stopu AlMgSi oznaczonego symbolem 6101B o zawartości składników stopowych [%]: Si 0,52; Mg 0,53; Fe 0,23 i Ti 0,003. Druty na przewody wykonano z walcówki w stanie T4 po długotrwałym wyżarzaniu ujednorodniającym w temperaturze 525°C, a następnie przesyconej do wody i wygrzewanej w temperaturze ok. 100°C. Przewody wykonano w KFK S.A., a badania przeprowadzono w Laboratorium Badań Procesów Reologicznych i Własności na Wydziale Metali Nieżelaznych AGH.

### 2.1. Charakterystyka przewodu

Przewód AAL 400 jest nowoczesnym ekwiwalentnym pod względem eksploatacyjnym zamiennikiem przewodu aluminiowo-stalowego AFL-8 350 o parametrach przedstawionych w tabeli 1.

**Tabela 1.** Charakterystyka geometryczna badanego przewodu

Przekrój obliczeniowy	Średnica obliczeniowa	Ilość warstw	Skok skrętu			
			Warstwa 1	Warstwa 2	Warstwa 3	Warstwa 4
[mm <sup>2</sup> ]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
402,9	26,1	4	137	219	293	312

### 2.2. Rodzaj badań

1. Badania sił zrywania drutów wplecionych z przewodów i określenie na tej podstawie wartości obliczeniowej siły zrywania przewodu.
2. Charakterystyki zrywania przewodów w celu określenia rzeczywistej siły zrywania.
3. Charakterystyka siła–wydłużenie przewodu wykonana zgodnie z zaleceniami PN-IEC 1089 i określenie na tej podstawie wartości początkowego i końcowego modułu sprężystości przewodu.
4. Charakterystyka pełzania przewodu nieprzeprężanego wykonana zgodnie z zaleceniami IEC 61395 i określenie wartości pełzania dziesięcioletniego.
5. Relaksacja naprężeń w przewodzie.

6. Charakterystyka pełzania przewodu po relaksacji naprężeń i określenie wartości pełzania dziesięcioletniego.
7. Trenowanie przewodu tzn. wielokrotne obciążanie i odciążanie w celu określenia stopnia osiadania przewodu.
8. Charakterystyka pełzania przewodu po trenowaniu i określenie wartości pełzania dziesięcioletniego.

Wartości parametrów badań procesów reologicznych przewodów przedstawiono w tabeli 2.

**Tabela 2.** Parametry badań procesów reologicznych przewodu AAL 400

Parametr	Obciążenie	Czas, [h]
Pełzanie przewodu nieprzepięzanego	$0,2 F_{obl}$	1000
Relaksacja naprężeń	$0,2 F_{obl}$	1
Pełzanie po relaksacji naprężeń	$0,2 F_{obl}$	630
Trenowanie przewodu	$0,2 F_{obl}$ $0,4 F_{obl}$ $0,6 F_{obl}$	krótkotrwałe trzykrotne obciążenie i odciążenie przewodu kolejno do wartości 0,2; 0,4; $0,6 F_{obl}$
Pełzanie po trenowaniu	$0,2 F_{obl}$	1000

### 3. Wyniki badań

#### 3.1. Wyniki badań sił zrywania drutów

Siła zrywania przewodu wyznaczona jako suma sił zrywania poszczególnych drutów wynosi 126,34 kN. Średnia siła zrywania drutu wynosi 2,07 kN przy odchyleniu standardowym równym 0,028 kN.

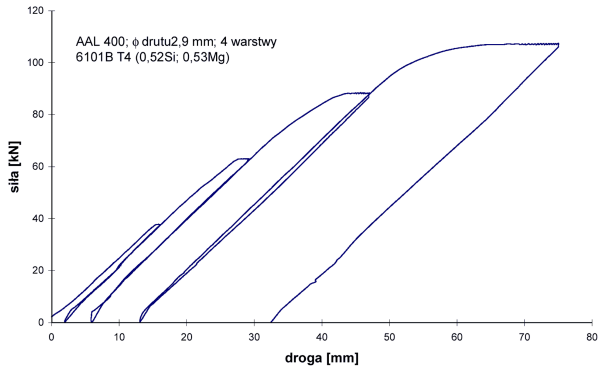
#### 3.2. Charakterystyka wytrzymałościowa przewodu wg IEC 61089

Charakterystykę wytrzymałościową przewodu przedstawiono na rys. 1.

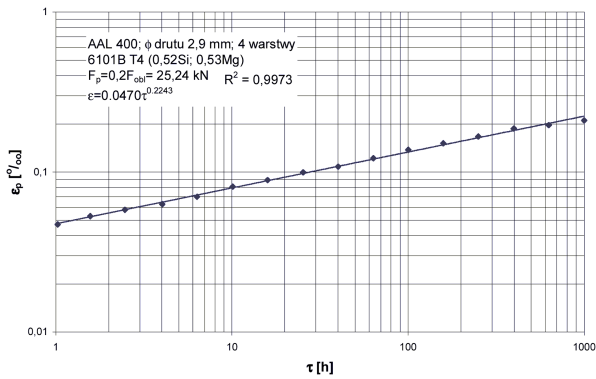
#### 3.3. Charakterystyki reologiczne przewodów wg IEC 61395

Charakterystyki reologiczne przedstawiono dla:

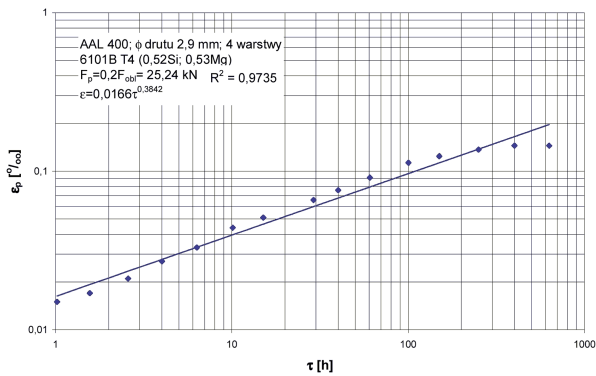
- przewodu nieprzepięzanego na rys. 2,
- przewodu po relaksacji naprężeń na rys. 3,
- przewodu po trenowaniu na rys. 4.



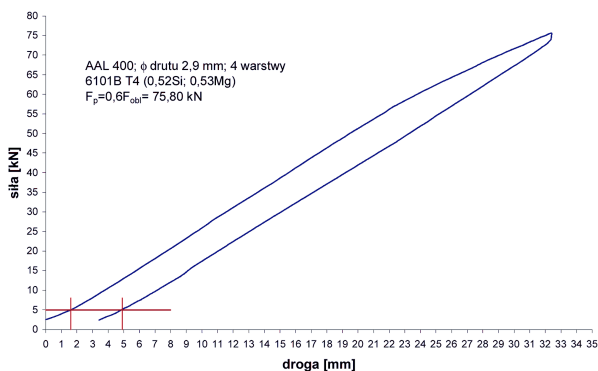
**Rys. 1.** Charakterystyka zrywania przewodu wg procedury IEC 61089 (zależność siła–przemieszczenie)



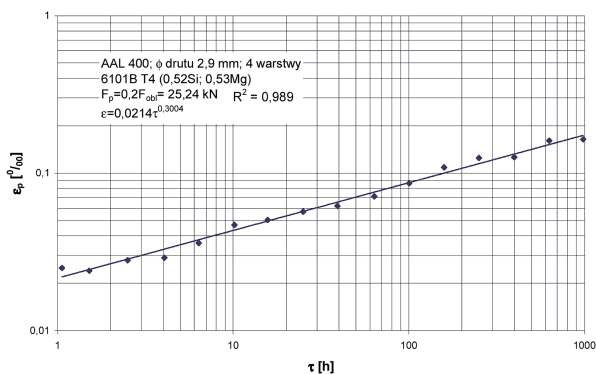
**Rys. 2.** Charakterystyka pelzania przewodu nieprzeprężanego; zbieranie danych wg IEC (dane do analizy od 1 h)



**Rys. 3.** Charakterystyka pelzania przewodu po relaksacji naprężeń; zbieranie danych wg IEC (dane do analizy od 1 h)



Rys. 4. Charakterystyka osiadania przewodu po obciążeniu chwilową siłą o wartości  $0,6 F_{obl}$



Rys. 5. Charakterystyka pełzania przewodu po trenowaniu; zbieranie danych wg IEC (dane do analizy od 1 h)

#### 4. Analiza wyników

Wartości parametrów wytrzymałościowych oraz modułów sprężystości przewodów zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Parametry wytrzymałościowe i moduły sprężystości przewodu

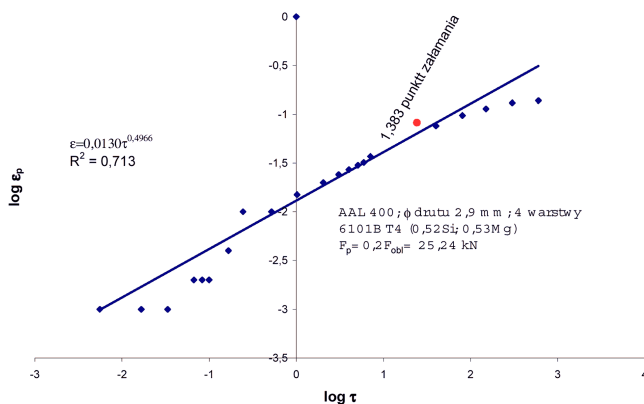
$F_{obl}$	$F_{rz}$	$F_{rz}/F_{obl}$	$E_I$	$E_{II}$	$E_{III}$	$E_{IV}$	$E_{kmin}$
[kN]	[kN]	[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	(wymagane przez IEC61089) [MPa]
126,3	120,4	0,95	58461	58769	61588	61871	58300

Z zamieszczonych w tabeli 3 danych wynika, że moduły sprężystości przewodu ulegają zmianie w czasie trwania procedury wyznaczania charakterystyki siła-wydłużenie i osiągają wartości wyższe od wymaganej normą. Niepoprawnie oszacowa-

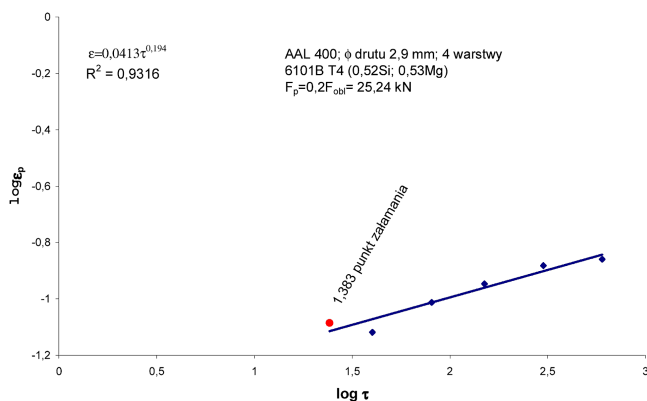
na wartość modułu sprężystości prowadzić może do błędnych obliczeń wartości naprężenia wzdłużnego w przewodzie podczas zmian jego temperatury. Moduł sprężystości występuje bowiem w równaniu stanu wiszącego przewodu, które pozwala właśnie na obliczanie zmian naprężeń na skutek zmian temperatury. Sytuacja taka będzie mieć miejsce również wtedy gdy przyjmujemy, że spadek mocy potencjału reologicznego materiału nastąpi na drodze relaksacji naprężeń w zawieszonym przewodzie. Oznacza to, że część przyrostu zwisu przewodu od pełzania będzie zlikwidowana na samym początku „życia” zawieszonoego przewodu. Aby to mogło nastąpić należy przewód naprężyć wstępnie do wyższej wartości siły. W praktyce oznacza to przyjęcie, że w dniu montażu przewodu istnieje niższa temperatura. Przyjęcie niepoprawnej wartości modułu sprężystości spowoduje także niepoprawne oszacowanie wartości przepięcia.

Druga grupa wyników dotyczy charakterystyk pełzania przewodu nieprzeprężanego i po różnych sposobach przepięcia, a w szczególności po wstępnym procesie relaksacji naprężeń w pierwszym przypadku i po tzw. trenowaniu przewodu, czyli cyklu krótkotrwałych obciążeń przewodu siłami o wartościach nie przekraczających 60% obliczeniowej siły zrywania w drugim przypadku. Generalnie można stwierdzić, że zależności  $\log \varepsilon_p - \log \tau$  dla przewodów nie są od samego początku liniowe. Dopiero po pewnym czasie następuje załamanie się charakterystyki, po którym przyjmuje ona postać prostej. Przedstawiony problem jest znany w literaturze przedmiotu i wynika z tzw. osiadania przewodu pozostającego pod obciążeniem.

O ile odkształcenie pełzania przewodu nieprzeprężanego można opisać ogólnie znaną funkcją potęgową w zakresie przyjętej do badań temperatury przewodu (współczynnik regresji  $> 0,99$ ) to w przypadku przewodów przepiętych metodą relaksacji osiąga on wartości niższe przez co zafałszowuje szacowane parametry  $\alpha$  i  $\beta$  funkcji pełzania. Rys. 6 i 7 przedstawiają wykresy pełzania przewodu po relaksacji naprężeń przy czym charakterystyka przedstawiona na rys. 6 obowiązuje dla danych od początku trwania procesu pełzania, a na rys. 7 po załamaniu charakterystyki. Zauważamy istotne zmiany w wartościach parametrów funkcji pełzania.



**Rys. 6.** Charakterystyka pełzania przewodu po relaksacji naprężeń; zbieranie danych wg CIGRE (dane do analizy od początku trwania procesu pełzania)



**Rys. 7.** Charakterystyka pelzania przewodu po relaksacji naprężeń; zbieranie danych wg CIGRE (dane do analizy od załamania charakterystyki  $\log \varepsilon_p - \log \tau$ )

W tabelach 3 i 4 zamieszczono wartości współczynników  $\alpha$  i  $\beta$  funkcji pelzania dla różnych sposobów zbierania danych oraz szacowane na ich podstawie pelzanie dziesięcioletnie.

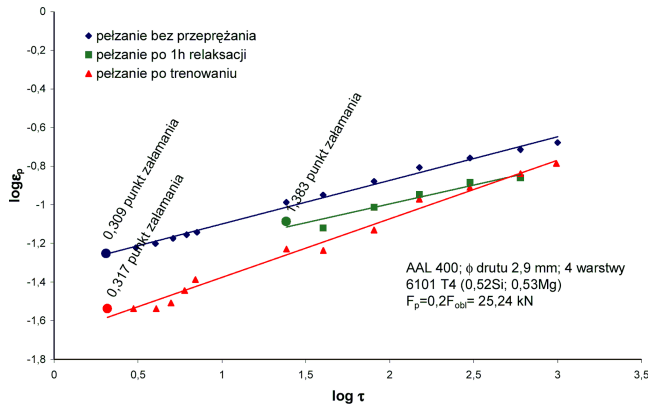
**Tabela 4.** Parametry charakterystyczne procesu pelzania przewodu opisanego funkcją  $\varepsilon_p = \alpha \tau^\beta$  dla różnych sposobów zbierania danych

Rodzaj danych	Stan przewodu								
	nieprzepiężany			po relaksacji naprężeń			po trenowaniu		
	$R^2$	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	$\alpha$	$\beta$	$R^2$	$\alpha$	$\beta$
CIGRE	0,96	0,0402	0,2743	0,71	0,0130	0,4966	0,89	0,0149	0,4134
CIGRE po zał.	0,99	0,0470	0,2260	<b>0,93</b>	<b>0,0413</b>	<b>0,1944</b>	0,98	0,0208	0,3066
CIGRE po 1 h	0,99	0,0481	0,2223	0,97	0,0168	0,3731	<b>0,98</b>	<b>0,0216</b>	<b>0,2972</b>
IEC po 1 h	<b>0,99</b>	<b>0,0470</b>	<b>0,2243</b>	0,97	0,0166	0,3842	0,98	0,0214	0,3004

**Tabela 5.** Porównanie wartości pelzania dziesięcioletniego (87600 h) po różnym sposobie wstępnego postępowania oraz wg różnych sposobów zbierania danych

Rodzaj danych	Stan przewodu		
	nieprzepiężany	po relaksacji naprężeń	po trenowaniu
	$\varepsilon_{87600}$ , [%]	$\varepsilon_{87600}$ , [%]	$\varepsilon_{87600}$ , [%]
CIGRE – od początku	1,11	4,14	1,68
CIGRE – po załamaniu	0,75	<b>0,37</b>	0,70
CIGRE – po 1 h	0,73	1,31	<b>0,64</b>
IEC – po 1 h	<b>0,73</b>	1,46	0,67

Wynika z nich jednoznacznie, że trenowanie przewodu nie zmienia charakteru procesu pełzania. Staje się to jasne, jeśli zauważymy, że trenowanie przewodu to kilkunastosekundowy proces obciążenie–odciążenie, podczas którego nie dochodzi do istotnego pomniejszenia potencjału reologicznego materiału. Następuje natomiast istotne pomniejszenie wartości współczynnika  $\alpha$ , który jest odpowiedzialny za osiadanie przewodu. Zupełnie inaczej wygląda sytuacja w przypadku, gdy przepiężanie odbywa się na drodze procesu relaksacji naprężeń. Z badań wynika jednakże, że już jednogodzinny proces relaksacji naprężeń z poziomu startowego wynoszącego dwadzieścia procent obliczeniowej siły zrywania przewodu prowadzi do takiego wyczerpania potencjału reologicznego materiału (spadku mocy potencjału reologicznego), że wartość odkształcenia pełzania po 10 latach zmniejsza się z poziomu 0.75‰ do wartości 0.37‰. W tym przypadku obserwuje się natomiast istotne zmniejszenie wartości współczynnika  $\beta$ , który jest miarą mocy reologicznej materiału. W tabelach 4 i 5 opisano czerwonym kolorem te wyniki, które wskazują na właściwy sposób postępowania wstępnego z przewodem. Graficzną ilustrację charakterystyk pełzania przewodu po różnym sposobie wstępnego postępowania przedstawiono na rys. 8.



**Rys. 8.** Charakterystyki pełzania przewodu po różnym sposobie przepiężania w układzie logarytmicznym (dane zbierane wg CIGRE, aproksymacja od punktu załamania)

Przeanalizujmy jeszcze na koniec proces osiadania przewodu. Stwierdzono eksperymentalnie, że osiadanie przewodu nie jest jednokrotne i istotnie zależy od wartości siły do jakiej naprężamy chwilowo przewód. W analizowanym w pracy przykładzie trwałe wydłużenie przewodu po obciążeniu go siłami o wartości 20, 40 a następnie 60% obliczeniowej siły zrywania wynosi odpowiednio 0,08; 0,15 i 0,32‰. Przypomnijmy, że te trwałe odkształcenia **nie pochodzą od pełzania przewodu, lecz wynikają głównie ze zmiany położenia drutów w obrębie warstwy i pomiędzy warstwami!** i ujawnią się zawsze podczas odciążania przewodu, które następuje każdorazowo przy wzroście temperatury otoczenia, a mówiąc dokładniej wzroście temperatury przewodu. Przewód poddany procedurze trenowania po procesie 1000-godzinnego pełzania nie wykazuje już trwałego wydłużenia tak jak poprzednio. W przedstawionym wyniku ukryty jest niezwykle ważny sens praktyczny przepiężania przewodu;



mianowicie taki, że przed ostatecznym utwierdzeniem przewodu w przeszle korzystnie jest go poddać krótkotrwałemu kilkukrotnemu obciążeniu w celu oddalenia lub przynajmniej obniżenia trwałego wydłużenia się przewodu pochodzącego od czynnika geometrycznego (osiadanie), a następnie procesowi relaksacji naprężeń w celu pomniejszenia mocy potencjału reologicznego materiału. Jak wcześniej nadmieniono po trenowaniu przewodu zauważamy mianowicie spadek wartości współczynnika  $\alpha$ , zaś po relaksacji naprężeń spadek współczynnika potęgowego  $\beta$  funkcji pełzania. Dla przykładu przytoczmy za tabelą 4, że współczynnik  $\alpha$  zmienia się z poziomu 0,04 przed trenowaniem do poziomu 0,02 po trenowaniu przewodu, natomiast współczynnik  $\beta$  z wartości 0,2260 dla przewodu przed relaksacją do wartości 0,1944 dla przewodu po relaksacji naprężeń co sprawia z kolei, że szacowana wartość pełzania dziesięcioletniego badanego przewodu zmniejsza się z poziomu 0,75 do 0,37 [%] (por. tabela 5).

## 5. Wnioski

1. Przewody wykonane ze stopów AlMgSi podlegają procesom reologicznym.
2. Ograniczenie niekorzystnego dla pracy linii elektroenergetycznej procesu pełzania jest możliwe na drodze częściowego wyczerpania potencjału reologicznego materiału oraz osiadania przewodu przed ostatecznym utwierdzeniem przewodu w przeszle lub sekcji.
3. Zmniejszenie mocy potencjału reologicznego materiału (przewodu) można przeprowadzić na drodze tzw. przepiężania przewodu, które można przeprowadzić albo na drodze wstępnej relaksacji naprężeń albo na drodze krótkotrwałych stanów obciążeń przewodu, albo z wykorzystaniem obydwóch metod.
4. Celem takiego postępowania jest zahamowanie wzrostu zwisu przewodu.

### THE MECHANICAL AND RHEOLOGIC CHARACTERISTICS OF ALLOY CONDUCTOR AAL 400 DESIGNED FOR HIGH VOLTAGE LINE

In the article the results and analysis of mechanical properties and rheologic process (creeping and stress relaxation) of conductors of AlMgSi alloy were presented. The tests made taking into account the creep characteristics of non-prestressed conductor and the different ways of prestressing. The conclusion was drawn to the point of technology of conductors assembling.