

Ewa DZIEDZIC¹, Tadeusz KNYCH², Andrzej MAMALA², Artur KAWECKI²

Tele-Fonika Kable S.A. (1), Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych (2)

Walory eksploatacyjne przewodu jezdnego DjpS 100 mm² z miedzi srebrowej CuAg0,10

Streszczenie. W referacie zaprezentowano wyniki badań porównawczych własności mechanicznych i elektrycznych przewodów jezdnych z miedzi w gat. Cu ETP i Cu Ag0,10. Stwierdzono, że przewody z miedzi srebrowej posiadają wysoką odporność na ścieranie oraz na działanie podwyższonych temperatur przy zachowaniu wymaganych własności elektrycznych i mechanicznych. Badania odporności przewodów na ścieranie zostały przeprowadzone na specjalnym urządzeniu umożliwiającym osiągnięcie parametrów eksploatacyjnych zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy przewodu. Nowoczesne urządzenie (własność Tele-Foniki Kable S.A.) zostało zaprojektowane przez zespół specjalistów z AGH, CNTK i Tele-Foniki Kable S.A.

Abstract. (Properties of CuAg0.10 silver copper trolley wires of DjpS 100 mm² type) The results of comparative examinations on the mechanic and electric properties of CuETP and CuAg0.10 copper trolley wires were presented in the article. It was stated that silver copper wires have high abrasion resistance and resistance to raised temperatures with the maintenance of required electric and mechanic properties. Examinations on abrasion resistance were carried out on a special device enabling to reach exploitation parameters similar to the wire's real working conditions. The modern device (property of Tele-Fonika Kable S.A.) was designed by a team of experts from AGH, CNTK and Tele-Fonika Kable S.A.

Słowa kluczowe: przewody jezdne z miedzi srebrowej, trakcja elektryczna, odporność na ścieranie, odporność na działanie podwyższonych temperatur

Keywords: silver copper wires, electric railway traction, abrasion resistance, resistance to raised temperature

Wprowadzenie

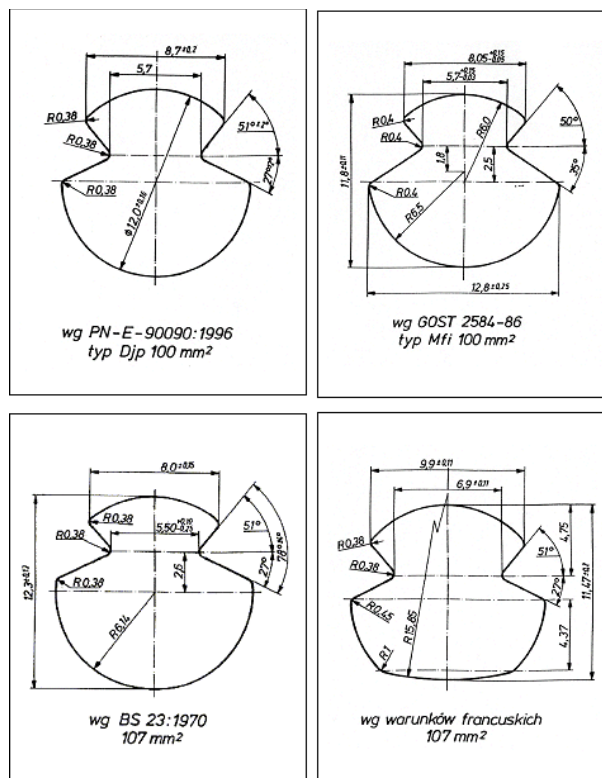
Wysokie wymagania stawiane przez Energetykę Kolejową przewodom jezdnym przeznaczonym do zasilania elektrycznych pojazdów trakcyjnych o dużej prędkości jazdy spowodowały podjęcie przez KFK S.A i AGH prac badawczych realizowanych w ramach projektu celowego dofinansowywanego przez Komitet Badań Naukowych. Badania nad nowymi gatunkami materiału oraz technologią ich przetwarzania umożliwiły uruchomienie produkcji przewodów o wysokich własnościach eksploatacyjnych, a w szczególności wytrzymałości na rozciąganie oraz odporności na ścieranie i działanie podwyższonych temperatur, przy zachowaniu wymaganych własności elektrycznych.

Wymagania stawiane przewodom jezdnym

Wymagania techniczne stawiane przewodom jezdnym definiowane są siłą zrywającą oraz wydłużeniem przy zrywaniu, twardością i odpornością na ścieranie, technologiczną plastycznością kontrolowaną w testach na skręcanie, przeginanie i nawijanie, wysoką przewodnością oraz w niektórych przypadkach podwyższoną wartością temperatury rekrytalizacji. Wymagania te są ściśle określone w normie PN-E-90090:96, a także w odpowiednich normach zagranicznych. Istnieje duże zróżnicowanie parametrów kształtu i wymiarów oraz własności przewodów jezdnych opracowanych przez różne zagraniczne wydawnictwa normalizacyjne. Nie ujęty przepisami jest natomiast zgłaszany przez użytkowników problem ścieralności przewodu, który decyduje o jego żywotności. Przekrój poprzeczny różnych rodzajów przewodów przedstawiono na rys. 1.

Technologia wytwarzania przewodów jezdnych

Nowoczesna 5-cio stopniowa linia ciągnicza f-my HENRICH wyposażona w trawersującą nawijarkę, pozwala na produkcję szerokiego asortymentu przewodów jezdnych okrągłych i profilowych w zakresie przekrojów 16 - 150 mm² wg norm polskich i zagranicznych. Wysokie wymagania stawiane przewodom jezdny przez szybkie linie nie są



Rys. 1. Wybrane przykłady różnych rodzajów przewodów jezdnych

W procesie ciągnięcia przewodu jezdny profilowego, bardzo ważnym czynnikiem jest właściwy dobór odkształceń uwarunkowanych konstrukcją maszyny. Zastosowanie do produkcji przewodów walcówek z odlewu ciągłego o masie 4 do 5 Mg i wysokim przekroju poprzecznym pozwoliło w dużej mierze na wyeliminowanie zgrzewania kręgów (w porównaniu z prasówką w kręgach o

masie 180 - 200 kg) jak również znaczne podwyższenie własności wytrzymałościowych przez zwiększenie stopnia zgniotu. Na podstawie wyników długotrwałych i szczegółowych badań ustalono optymalne parametry procesu przeróbki plastycznej na zimno z jednoczesnym wyselekcjonowaniem gatunków materiałów, które pozwoliły na uzyskanie przewodów jezdnych o wysokich własnościach eksploatacyjnych.

Materiały

Podstawowymi materiałami przewodzącymi do produkcji przewodów jezdnych jest walcówka Cu w gat. Cu-ETP (miedź elektrolityczna) oraz walcówka z miedzi srebrowej oznaczona wg. PN-EN 1977:1998 jako CuAg0,10 (skład chemiczny w tabeli 1) o przewodności elektrycznej właściwej co najmniej 58 MS/m (100% IACS).

Tabela 1. Skład chemiczny walcówki z miedzi srebrowej w gat. CuAg 0,10

Skład chemiczny [%]								
Gatunek	Pierwiastek	Cu	Ag	Bi	O	P	Inne pierwiastki	
							Razem	z wyłączeniem Ag, O
CuAg 0,10	min. max.	Reszta -	0,08 0,12	- 0,0005	- 0,040	-	- 0,03	

Wymagania

Podstawowe wymagania dotyczące własności mechanicznych i elektrycznych przewodów jezdnych typu DjP i DjP S precyzują polskie normy: PN-E-90090:1996 oraz ZN-KFK-019:2000.

Tabela 2. Własności przewodów jezdnych

Rodzaj przewodu	Rezystancja max. [Ω /km]	Wytrzymałość na rozciąganie R_{mmin} [MPa]	Wydłużenie całkowite min. [%]	Twardość [HB]	Ilość przegięć min.	Ilość skręceń min.	Podatność na nawijanie wg. przepisu
DjP 100	0,182	345	3	-	6	5	bez pęknięć
DjP S 100	0,182	365	3	100	6	5	bez pęknięć

Podstawowe problemy technologiczne

Technologia otrzymywania przewodu jezdnego polega na ogół na przekształceniu na drodze przeróbki plastycznej profilu okrągłego w profil zbliżony do trolejowego, a następnie redukcji i kalibrowaniu przekroju poprzecznego do wymaganego kształtu i wymiarów. Kształtowanie przewodu (najczęściej metodą ciągnięcia lub kombinacji ciągnięcia i walcowania) odbywa się zawsze przy braku kołowej symetrii procesu co prowadzi do niepożądanego niejednorodności odkształcenia na przekroju odkształcanego materiału, a w skutku do niepożądanego zróżnicowania jego struktury i własności użytkowych, stanów naprężeń własnych w wyrobie gotowym, a także wzrostu siły ciągnięcia.

Przewód przeznaczony do nowoczesnych linii charakteryzujących się dużymi prędkościami jazdy musi być wykonany z miedzi o specjalnie przygotowanej strukturze, a w niektórych przypadkach z miedzi stopowej. Odpowiedni

dobór rodzaju i zawartości składników stopowych ma na celu:

1. podwyższenie stopnia umocnienia materiału,
2. podwyższenie temperatury rekrytalizacji,
3. zagwarantowanie wystarczającej odporności na ścieranie.

Działania powyższe mogą prowadzić do obniżenia przewodności materiału, co jest ściśle określone w odpowiednich normach przedmiotowych.

Przy opracowywaniu technologii produkcji przewodu jezdnego należy wziąć pod uwagę takie kształty narzędzi i schemat odkształceń, aby doprowadzić w każdym przypadku do jak największego umocnienia tej części przewodu, która posiada kontakt ze ślizgaczem odbieraka prądu. Jest to zagadnienie bardzo trudne z technologicznego punktu widzenia i wymaga eksperymentalnego określenia stanu początkowego materiału wsadowego i sposobu jego przetwarzania na przewody jezdne.

Mechaniczne warunki pracy przewodu

Podstawowy problem stanowi zużywanie się przewodu w wyniku tarcia (ślizgania się po nim) nakładki stykowej ślizgacza odbieraka prądu. Ograniczanie tego procesu polega w praktyce na wdrażaniu coraz to nowszych metod obniżania współczynnika tarcia pary przewod jezdny-nakładka ślizgacza jak również na wprowadzaniu materiałów o wyższej odporności na ścieranie przy zachowaniu walorów elektrycznych miedzi w gat. CuETP. Większa część pracy tarcia zamienia się na ciepło, które wraz z ciepłem Joule'a powoduje wzrost temperatury przewodu jezdnego, a to pogarsza warunki pracy styku, zwiększa moc procesów reologicznych oraz zmniejsza wytrzymałość przewodu na rywanie. Procesy, o których mowa zależą od gatunku materiału z którego jest

przewód wykonany, jego własności fizycznych i mechanicznych oraz jakości powierzchni. Intensywność wymieniowych procesów zależy od prędkości jazdy, wielkości i charakteru sił nacisku odbieraka prądu na przewód oraz od warunków otoczenia i sposobu eksploatacji taboru kolejowego.

Cel i zakres badań

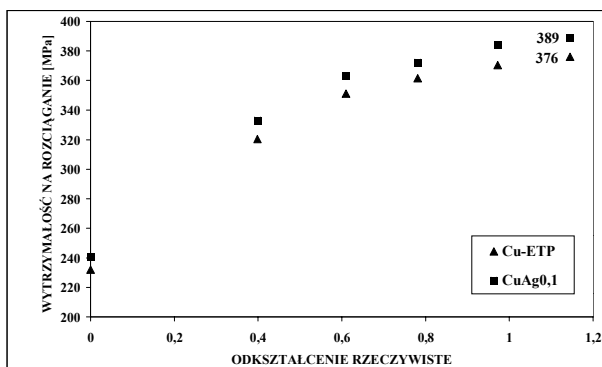
W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań własności przewodów jezdnych wykonanych z dwóch gatunków miedzi, a mianowicie z miedzi elektrolitycznej w gat. ETP (DjP100) i z miedzi srebrowej z dodatkiem srebra w ilości 1000 ppm (DjP S 100). Szerszy program badań obejmował przewody z miedzi beztlenuowej (OFC) oraz z miedzi o zawartości srebra 400 ppm. Głównym celem badań było porównanie własności mechanicznych przewodów, ich odporności na działanie podwyższonych temperatur oraz odporności na ścieranie. Odporność na działanie podwyższonych temperatur określono poprzez porównanie charakterystyk rozciągania przewodów jezdnych po testach wygrzewania w różnych temperaturach w czasie 1 h. Badania odporności na ścieranie przeprowadzono na specjalnie do tego celu zaprojektowanych urządzeniach badawczych przedstawionym w dalszej części artykułu.

Wyniki badań i ich analiza

Własności mechaniczne

Na rys. 2 przedstawiono zależność wytrzymałości na rozciąganie próbek miedzi w gat. CuETP i CuAg0,1 w funkcji odkształcenia rzeczywistego. Przedstawione na wykresie punkty oznaczają wartości wytrzymałości na rozciąganie materiału po kolejnych etapach procesu przeciągania walcówki o średnicy początkowej 20 mm na przewody jezdne o przekroju 100 mm². Zauważamy kilkuprocentową różnicę wytrzymałości na rozciąganie na korzyść walcówki w gat. CuAg0,1 (przewód DjpS 100: R_m=389 MPa; przewód Djp 100: R_m=376 MPa). Wyższe własności wytrzymałościowe badanych przewodów jezdnych posiadają swoje odzwierciedlenie w ich twardości określonej na ich przekroju poprzecznym (przewód Djp 100: HB_{sr}=112,4; odchylenie standardowe 2,92, przewód DjpS 100: HB_{sr}=115,4; odchylenie standardowe 1,0). Dane liczbowe przedstawionej analizy zamieszczono na poglądowym rys. 3, który przedstawia mapę twardości przekroju poprzecznego przewodów jezdnych wykonanych z miedzi CuETP i CuAg0,1. Obserwowane zróżnicowanie twardości na przekroju jest wynikiem niejednorodności odkształcenia jaka zachodzi podczas zmiany profilu materiału wsadowego z okrągłego na profilowy zwłaszcza w pierwszych etapach procesu kształtowania.

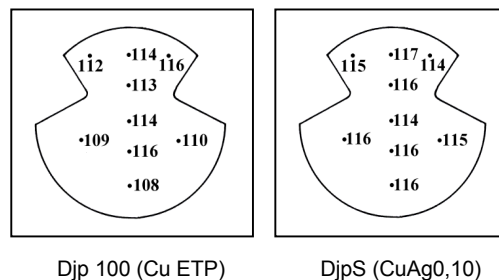
Na rys. 4 i 5 przedstawiono wykresy rozciągania próbek przewodów jezdnych wygrzewanych w różnych temperaturach w czasie 1 h (próba wprowadzona za testem sprawdzania poprawności modyfikacji struktury miedzi cyną, niklem i tytanem w miedzi gat. M1M w celu podwyższenia temperatury rekrytalizacji). Zauważamy istotnie wyższą odporność na działanie podwyższonych temperatur przewodów w gat. CuAg0,1. Przewody wykonane z miedzi elektrolitycznej (CuETP) podlegają całkowitemu wyzerzeniu już w temp. 280°C po czasie jednej godziny przebywania w komorze cieplnej, podczas gdy przewody z miedzi srebrowej osiągają własności miedzi w stanie miękkim dopiero w temperaturze 360°C po tym samym czasie. Przewody z dodatkiem srebra charakteryzują się stopniowym spadkiem własności mechanicznych wraz ze wzrostem temperatury w zakresie (280 – 360)°C (por. rys. 5). Cecha ta posiada oczywiste przeniesienie na wnioskowanie praktyczne dotyczące pracy przewodów w warunkach rzeczywistych, w których mamy do czynienia z permanentnymi zmianami temperatury przewodu w zależności od wielkości płynącego prądu oraz warunków otoczenia.



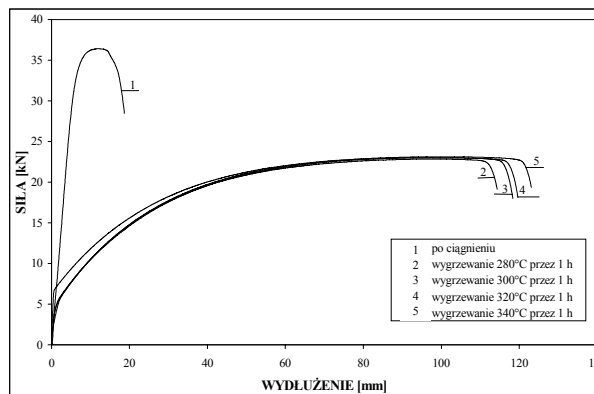
Rys.2. Zależność wytrzymałości na rozciąganie materiału w funkcji odkształcenia uzyskana na podstawie próbek wyjętych z maszyny. Ciągnięcie w warunkach przemysłowych

Na rys. 6 przedstawiono zbiorcze zestawienie zależności wytrzymałości na rozciąganie przewodów jezdnych po

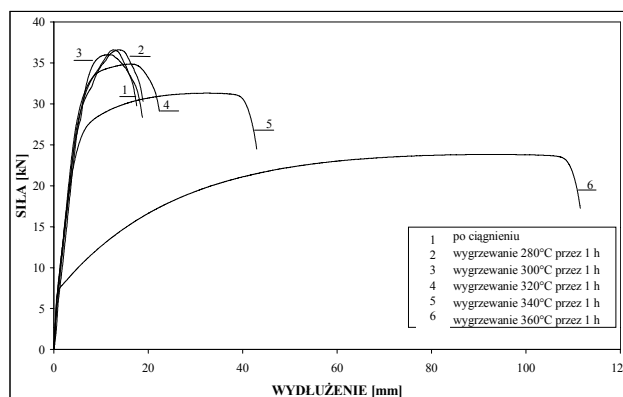
ciągnięciu i wygrzewaniu w różnych temperaturach w czasie 1 h wykonanych z różnych gatunków miedzi, a w szczególności z miedzi elektrolitycznej (ETP), beztlenuowej (OFC), srebrowej z dodatkiem 400 ppm srebra (CuAg0,04) i 1000 ppm srebra (CuAg0,1). Za miarę wrażliwości na działanie temperatury przyjęto spadek wytrzymałości na rozciąganie. Zauważamy wyraźne zróżnicowanie odporności cieplnej badanych przewodów, przy czym przewody z miedzi z dodatkiem srebra w ilości 1000 ppm posiadają najwyższą odporność termiczną, natomiast przewody tradycyjne wykonane z miedzi w gat. ETP charakteryzują się najniższą odpornością na działanie podwyższonych temperatur.



Rys.3. Mapa twardości przekroju poprzecznego przewodów jezdnych



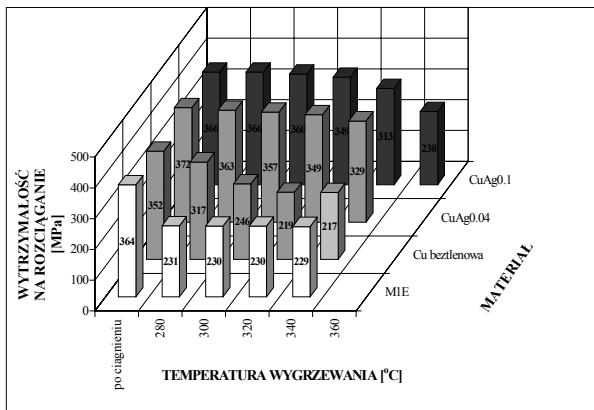
Rys.4. Wykresy rozciągania przewodów Djp100 w gat. Cu-ETP po wygrzewaniu w różnych temperaturach



Rys.5. Wykresy rozciągania przewodów DjpS 100 z miedzi w gat. Cu-Ag0,1 po wygrzewaniu w różnych temperaturach

Badane przewody były poddane takiemu samemu schematowi odkształcenia, co pozwala na bezpośrednie porównanie charakterystyk badanych gatunków miedzi. Przewody z miedzi srebrowej posiadają taką samą przewodność jak przewody miedziane. Chociaż srebro tworzy z miedzią układ równowagi charakterystyczny dla

stopów utwardzalnych wydzieleniowo, to ilość 1000 ppm zmienia własności elektryczne w stopniu mieszczącym się w zakresie dokładności przyrządów pomiarowych. Istotnemu wzrostowi ulegają natomiast takie właściwości jak odporność na działanie podwyższonych temperatur oraz na ścieranie.



Rys.6. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przewodów jezdnych po ciągnięciu i wygrzewaniu w różnych temperaturach w czasie 1 h wykonanych z różnych gatunków materiału.

Zużycie mechaniczne (ścieranie)

Problem ścieralności przewodu ważny dla użytkowników z racji prognozowania jego żywotności nie jest uregulowany wymaganiami norm krajowych i zagranicznych ani też ujęty odpowiednimi przepisami. Dotychczas stosowane metody badań ścieralności pozwalały jedynie na porównanie odporności na ścieranie (ubytek masy) różnych materiałów testowanych w tych samych warunkach jednakże daleko odbiegających od warunków eksploatacyjnych. W tej sytuacji powstała koncepcja budowy prototypowego laboratoryjnego stanowiska do badań odporności na ścieranie przewodów jezdnych umożliwiającego realizację badań w warunkach jak najbardziej zbliżonych do warunków rzeczywistych. Zasadniczą koncepcją stanowiska zaprojektowanego przez specjalistów z AGH, CNTK i Tele-Foniki KFK S.A. jest obracająca się tarcza (koło) na obwodzie której umocowany jest przewód jezdny współpracujący z pantografem wykonującym posuwisto zwrotny ruch poprzeczny względem przewodu. Przy takim rozwiązaniu poślizg wzdużny współpracujących powierzchni wynika z ruchu obrotowego przewodu umieszczonego na obwodzie koła, a poślizg poprzeczny z prostoliniowego ruchu pantografu. W przyjętym do realizacji rozwiązaniu koło napędowe obraca się w płaszczyźnie poziomej, a pantograf wykonuje ruch pionowy. Widok ogólny stanowiska przedstawiono na fot. 1. Nowoczesne urządzenie badawcze, pozwala m. innymi na określenie żywotności przewodów jezdnych oraz ocenę ich przydatności do kolejowych sieci trakcyjnych przystosowanych do dużych prędkości jazdy.

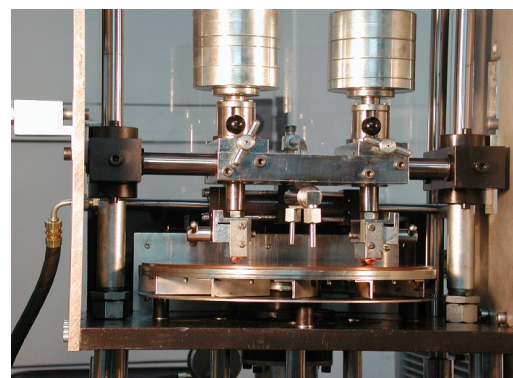
Badania umożliwiające określenie podstawowych zależności z obszaru dotyczącego współpracy pary trącej przewód jezdny – nakładka stykowa ślizgacza odbieraka prądu, a w szczególności wpływu nacisku jednostkowego oraz powierzchni tarcia na ubytek masy badanej próbki przeprowadzono na specjalistycznym stanowisku, którego widok ogólny ilustruje fot. 2.

Na rys. 7 i 8 przedstawiono przykładowe charakterystyki zużycia mechanicznego próbek przewodów w gat. CuETP i CuAg0,1 o stałej powierzchni tarcia w funkcji wielkości nacisku i powierzchni czynnej (powierzchni tarcia). Badania przeprowadzono na stanowisku przedstawionym na fot. 2. Z ich analizy wynikają dwie grupy dość oczywistych wniosków

mówiących o wzroście ubytku masy wraz ze wzrostem nacisku jednostkowego przy stałej powierzchni tarcia oraz o wzroście ubytku masy wraz ze wzrostem powierzchni tarcia przy stałym nacisku jednostkowym.



Fot.1. Widok ogólny stanowiska do badań odporności na ścieranie przewodów jezdnych w warunkach eksploatacyjnych

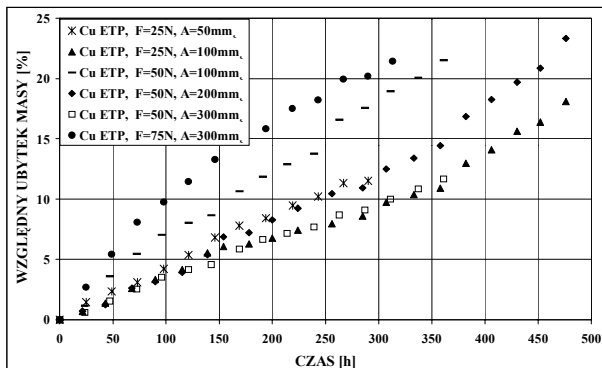


Fot.2. Widok części roboczej stanowiska do badań ścieralności

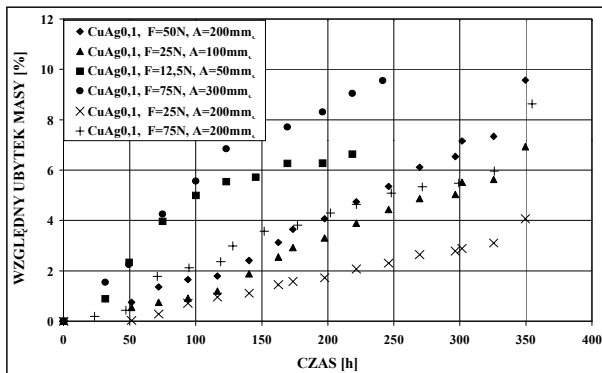
W zamierzeniu chodziło o to, aby określić niezależnie wpływ nacisku jednostkowego, a następnie powierzchni tarcia na zużycie mechaniczne przewodów i stworzyć ilościowe podstawy do oceny stopnia eksploatacyjnego zużycia przewodu jezdny, podczas którego powierzchnia tarcia ulega ciągłemu wzrostowi wraz z przebiegiem procesu ścierania, a nacisk jednostkowy permanentnemu spadkowi. Można przyjąć, że przedstawione na rys. 7 i 8 zależności są liniowe, co świadczyć może nie tylko o stabilności warunków tarcia na powierzchni przewód jezdny – nakładka ślizgacza, ale także o niezmienności w czasie własności trących powierzchni. Na pierwszy rzut oka wydawać by się mogło, że zgodnie z mechanizmem procesu ścierania warstwy przypowierzchniowe powinny podlegać umocnieniu. W analizowanym przypadku takiej prawidłowości nie obserwujemy co może świadczyć o nieistotnej skali praktycznej skutków tego zjawiska.

Na rys. 9-11 zamieszczono wybrane wyniki badań zużycia przewodów jezdnych na stanowisku przeznaczonym do badań w warunkach eksploatacyjnych (por. fot. 1). Rys. 9 przedstawia porównanie zużycia mechanicznego przewodów Djp100 i DjpS100 przy prędkości obwodowej koła 100 km/h i braku prądu. Rys. 10 przedstawia porównanie zużycia przewodów z miedzi srebrowej przy różnych siłach nacisku odbieraka prądu na przewód i różnych wartościach prądu natomiast rys. 11 ilustruje wpływ względnej prędkości koła (a więc także przewodu jezdny) na względny ubytek masy przewodu. Stwierdzono prawie

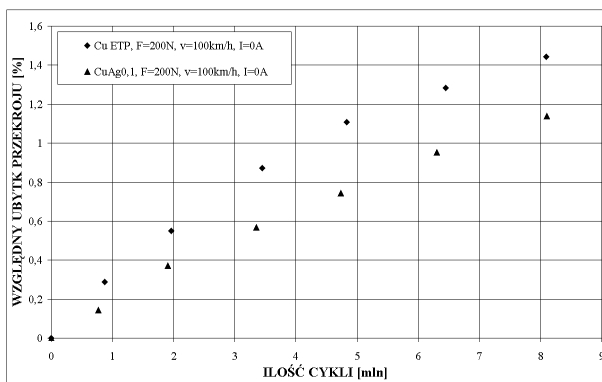
trzydziestoprocentowo wyższą odporność na ścieranie przewodów wykonanych z miedzi srebrowej, co pozostaje w zgodzie z wynikami badań podstawowych. Istotny wpływ na wzrost zużycia przewodu posiada przepływ prądu na styku przewód – nakładka odbieraka (por. rys. 10).



Rys.7. Wykres zestawieniowy względnego ubytku masy w funkcji czasu podczas ścierania materiału Cu ETP, prędkość $v=60\text{km/h}$



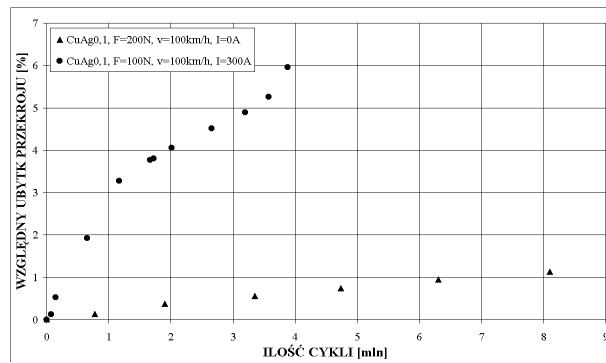
Rys.8. Wykres zestawieniowy względnego ubytku masy w funkcji czasu podczas ścierania materiału CuAg0,1, prędkość $v=60\text{km/h}$



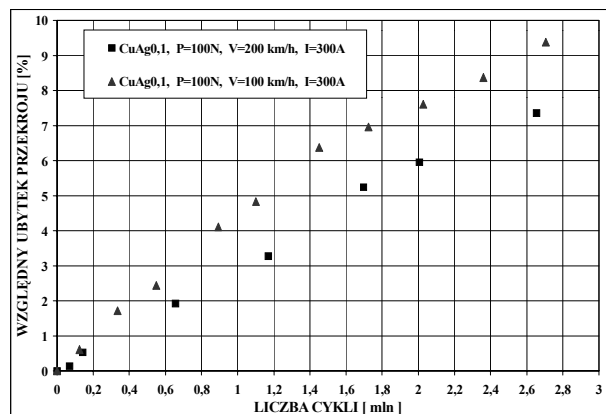
Rys.9. Względny ubytek przekroju podczas ścierania przewodów z miedzi w gat. Cu ETP i CuAg0,1. Prędkość $v=100\text{km/h}$, nacisk $F=200\text{N}$, prąd $I_1=0\text{A}$

Urywanie się łuku (wysoka temperatura) powoduje degradację i wypalanie się smaru, a w konsekwencji wzrost współczynnika tarcia i temperatury trących powierzchni, a następnie wzrost zużycia przewodu. Zmniejszenie stopnia zużycia następuje natomiast podczas wzrostu prędkości koła (por. rys. 11) co może być dowodem korzystniejszych warunków tarcia na powierzchni przewód – nakładka. Przedstawione wstępne wyniki badań stanowiąc mogą dowód na to, że przewody z miedzi z dodatkiem srebra posiadają atrakcyjne własności eksploatacyjne w porów-

naniu z tradycyjnymi przewodami z miedzi elektrolitycznej, zwłaszcza jeśli chodzi o odporność na ścieranie i działanie podwyższonych temperatur.



Rys.10. Względny ubytek przekroju podczas ścierania przewodów z miedzi w gat. CuAg0,1.



Rys.11. Względny ubytek przekroju podczas ścierania przewodów z miedzi w gat. CuAg0,1 z prądem i przy różnych prędkościach jazdy.

Wnioski

1. Stwierdzono wyższą odporność na działanie podwyższonych temperatur oraz wyższą wytrzymałość mechaniczną (R_m , HB) przewodów z miedzi srebrowej w porównaniu z przewodami tradycyjnymi z miedzi elektrolitycznej.
2. Przewody wykonane z miedzi w gat. CuAg0,10 charakteryzują się prawie 2-krotnie wyższą odpornością na ścieranie w stosunku do przewodów miedzianych (CuETP) co przekłada się na zwiększenie żywotności tej klasy przewodów.
3. Istnieje możliwość podwyższenia temperatury pracy przewodów srebrowych w warunkach ciągłych do $320\text{ }^\circ\text{C}$ bez ryzyka spadku własności wytrzymałościowych w stopniu zagrażającym pracy sieci trakcyjnych.
4. Nie stwierdzono różnicy własności elektrycznych przewodów w gat. CuAg0,10 w porównaniu z przewodami w gat. CuETP.

Przedstawione charakterystyki czynią przewody z miedzi srebrowej atrakcyjną ofertą dla energetyki kolejowej zwłaszcza w zastosowaniach do sieci trakcyjnych o dużej prędkości i częstotliwości jazdy.

Autorzy: Ewa Dziedzic, Tele-Fonika Kable S.A.; Tadeusz Knych, Andrzej Mamala, Artur Kawecki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, al. Mickiewicza 30, 30-059-Kraków; e-mail: amamala@agh.edu.pl