



(54)

**Druty ze stopu aluminium do przewodów elektroenergetycznych
oraz kabli elektroenergetycznych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

06.06.2016 BUP 12/16

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

31.08.2017 WUP 08/17

(73) Uprawniony z patentu:

TELE-FONIKA KABLE SPÓŁKA AKCYJNA, Kraków, PL

(72) Twórca(y) wynalazku:

TADEUSZ KNYCH, Kraków, PL

ANDRZEJ MAMALA, Kraków, PL

BEATA SMYRAK, Bulowice, PL

ARTUR KAWECKI, Kraków, PL

PAWEŁ KWAŚNIEWSKI, Kraków, PL

MICHAŁ JABŁOŃSKI, Tarnobrzeg, PL

GRZEGORZ KISIEWICZ, Kraków, PL

WOJCIECH ŚCIEŻOR, Kraków, PL

KINGA KORZEŃ, Kraków, PL

ELIZA SIEJA-SMAGA, Dobra, PL

MAREK GNIEŁCZYK, Chełmek, PL

RADOSŁAW KOWAL, Pilica, PL

JUSTYNA GRZEBINOĞA, Przytkowice, PL

JAKUB SIEMIŃSKI, Wieliczka, PL

MARIUSZ TOKARSKI, Kraków, PL

MAREK KACZKOWSKI, Kraków, PL

DARIUSZ KORBUT, Śledziejowice, PL

JANUSZ MAĆZEK, Kraków, PL

ROBERT KULMA, Kraków, PL

SŁAWOMIR DZIADKOWIEC, Krzeczów, PL

ZBIGNIEW MICHAŁ EICHLER, Myślenice, PL

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Anna Górka

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku są druty ze stopu aluminium do przewodów elektroenergetycznych oraz kabli elektroenergetycznych o niskim współczynniku temperaturowym rezystancji.

Nieizolowane przewody elektroenergetyczne oraz żyły przewodzące kabli i izolowanych przewodów elektroenergetycznych wytwarzane są z aluminium, miedzi lub ich stopów. Przewody i żyły mogą być jednodrutowe lub wielodrutowe, przy czym najczęściej stosuje się rozwiązania wielodrutowe. Przewody i żyły wielodrutowe gwarantują właściwą elastyczność technologiczną i eksploatacyjną. Przewody i żyły wielodrutowe wykonywane mogą być z drutów o przekroju okrągłym lub profilowym. Często stosowanym w praktyce zabiegiem jest zagęszczanie przewodów i żył prowadzone w linii technologicznej skręcania. W efekcie procesu zagęszczania dochodzi do lokalnych deformacji kształtu przekroju poprzecznego drutów o początkowym przekroju okrągłym i do zmniejszenia pustych przestrzeni między-drutowych.

Podstawową funkcją przewodów i kabli jest przesył energii elektrycznej, który odbywa się przez przewodzenie prądu elektrycznego o określonym natężeniu. Natężenie prądu przepływającego podczas normalnej eksploatacji w przewodzie lub w kablu jest ograniczone ogólnie. Maksymalne dopuszczalne natężenie prądu, jaki przepływa długotrwale przez przewód, które nosi nazwę znamionowej (długoczasowej) obciążalności prądowej, powoduje, że przy określonych warunkach otoczenia przewód lub kabel osiąga maksymalną dopuszczalną długotrwale temperaturę określaną mianem temperatury granicznej roboczej przewodu.

Istnieją różne metody wyznaczania obciążalności prądowej przewodów lub kabli. Znane są metody wyznaczania obciążalności prądowej opisane m.in. w normie IEC 61597, w broszurze CIGRE 207 (Thermal behaviour of overhead conductors), czy w standardzie IEEE 738. Metody te opierają się o stacjonarny bilans cieplny, tzn. zakładają stan równowagi w wymianie ciepła między przewodem a otoczeniem. Po stronie źródeł ciepła w bilansie występuje nagrzewanie powodowane przepływem prądu elektrycznego (efekt Joule'a), nagrzewanie przez promieniowanie słoneczne oraz opcjonalnie nagrzewanie przez cyklicznie zmienny strumień magnetyczny (występujące przy prądzie przemiennym głównie w ferromagnetycznych rdzeniach przewodów bimetalowych i najczęściej zanedbywalne w stosunku do innych czynników w bilansie). Po stronie strat ciepła w bilansie występuje utrata ciepła przez promieniowanie i konwekcję naturalną lub wymuszoną oraz opcjonalnie utrata ciepła na zmianę stanu skupienia – odparowania wilgoci występującej w przewodzie i na jego powierzchni (czynnik na ogół pomijany w analizach jako mało znaczący).

W bilansie cieplnym umożliwiającym szacowanie obciążalności prądowej przewodu występują parametry o charakterze środowiskowym, takie jak temperatura otoczenia, prędkość i turbulencja strugi wiatru, intensywność promieniowania słonecznego, parametry reprezentujące budowę geometryczną przewodu, takie jak średnica zewnętrzna czy powierzchnia zewnętrzna oraz parametry fizyczne składników przewodu, które wespół z parametrami konstrukcyjnymi przewodu determinują jego parametry, takie jak: rezystancja liniowa przewodu w temperaturze otoczenia, współczynnik temperaturowy rezystancji, emisyjność i absorpcyjność powierzchni. Szczególnie ważne dla bilansu cieplnego są rezystancja liniowa przewodu w temperaturze otoczenia oraz współczynnik temperaturowy rezystancji, które umożliwiają przy znanym natężeniu przepływającego prądu oszacowanie ciepła od efektu Joule'a w bilansie cieplnym.

Nagrzewanie prądem elektrycznym przewodu (efekt Joule'a) w bilansie cieplnym opisywane jest zależnością:

$$P_j = I^2 k_1 k_2 \frac{l}{\sigma_{293} S} (1 + \alpha_R (T - 293))$$

gdzie:

- P_j moc od efektu Joule'a wygenerowana w przewodzie o długości l [W]
- I natężenie prądu – znamionowa obciążalność prądowa przewodu [A]
- k_1 współczynnik przyrostu rezystancji przewodu przy prądzie przemiennym w odniesieniu do rezystancji przy prądzie stałym [-]
- k_2 współczynnik przyrostu rezystancji przewodu wynikający ze skrętu drutów [-]
- l długość przewodu (zazwyczaj długość jednostkowa np. 1 m [m])
- σ_{293} przewodność elektryczna materiału przewodu w części przewodzącej w temperaturze otoczenia (293K) [MS/m]

- S przekrój znamionowy części przewodzącej przewodu [mm²]
 α_R współczynnik temperaturowy rezystancji materiału przewodu [K⁻¹]
 T temperatura przewodu – temperatura graniczna robocza [K]

Pozostałe składowe bilansu cieplnego determinują ściśle wartość mocy P_j , dla której występuje stan równowagi. Znamionowa obciążalność prądowa I przewodu o ustalonym przekroju znamionowym części przewodzącej S , w ustalonej temperaturze granicznej roboczej T może być zatem tym większa im większa jest przewodność elektryczna materiału przewodu w temperaturze otoczenia σ_{293} oraz im niższy jest współczynnik temperaturowy rezystancji materiału przewodu α_R . W celu analizy porównawczej materiałów przewodowych na osnowie aluminium zastosować można umowny współczynnik porównawczy efektywności W opisany wzorem:

$$W = \frac{\sigma_{293}}{\alpha_R}$$

gdzie

W umowny współczynnik porównawczy efektywności [MSK/m]

Generalnie charakter zmian przewodności elektrycznej metali w funkcji temperatury jest znany. Metale mają najwyższą przewodność elektryczną w zakresie temperatur kriogenicznych (temperatura ciekłego helu). W tym zakresie przewodność elektryczna nie zależy od temperatury, a jej wartość zależy od rodzaju metalu oraz zawartości dodatków stopowych i zanieczyszczeń oraz ich rozlokowania w mikrostrukturze. W temperaturach wyższych przewodność elektryczna metali maleje monotonicznie wraz ze wzrostem temperatury aż do osiągnięcia temperatury topnienia. Zależność przewodności elektrycznej od temperatury jest nieliniowa, ale w pewnych ograniczonych zakresach temperatur, np. w zakresie temperatur roboczych przewodów może być zadowalająco przybliżona aproksymacją liniową. Z kąta nachylenia relacji rezystancja materiału – temperatura pomiaru rezystancji można oszacować współczynnik temperaturowy rezystancji materiału w rozpatrywanym zakresie temperatur.

Znanym i powszechnie stosowanym materiałem przewodowym jest aluminium. Aluminium wysokiej czystości (min. 99,99%) w stanie zrekrytalizowanym posiada przewodność elektryczną w temperaturze otoczenia (tj. przy 293 K) 37,74 MS/m oraz współczynnik temperaturowy rezystancji 0,0048 K⁻¹ (źródło publikacja: P.D. Desai, H.M. James, C.Y.Ho: Electrical resistivity of aluminium and manganese, J. Psych Chem Ref. Data, Vol. 13, No. 4, 1985, str. 1131–1172). Aluminium o czystości technicznej, które jest stosowane na cele przewodowe w stanie umocnionym odkształceniowo zgodnie z normą EN 60889 posiada przewodność elektryczną nie niższą niż 35,38 MS/m w temperaturze otoczenia oraz współczynnik temperaturowy rezystancji 0,00403 K⁻¹. Na cele przewodowe stosowane jest również aluminium w stanie zrekrytalizowanym, które zgodnie z normą EN 50540 posiada przewodność elektryczną w stanie zrekrytalizowanym nie niższą niż 35,85 MS/m. Na przewody elektroenergetyczne stosowane są również stopy AlMgSi (seria 6XXX wg. normy EN 573-3), które zgodnie z normą EN 50183 posiadają przewodność elektryczną w temperaturze otoczenia nie niższą niż 30,45 MS/m – 33,33 MS/m i współczynnik temperaturowy rezystancji 0,0036 K⁻¹.

Znane są również stopy AlZr stosowane w przewodach wysokotemperaturowych. Ich przewodności elektryczne w temperaturze otoczenia i współczynniki temperaturowe rezystancji zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Przewodności elektryczne i współczynniki temperaturowe rezystancji stopów AlZr wg normy EN 62004

typ drutu	AT1	AT2	AT3	AT4
przewodność elektryczna w 293 K [MS/m]	34,8	31,9	34,8	33,64
współczynnik temperaturowy rezystancji [K ⁻¹]	0,0040	0,0036	0,0040	0,0038

Znany jest również standard amerykański ASTM B 193, w którym zestawiono współczynniki temperaturowe rezystancji dla typowych materiałów przewodowych na osnowie aluminium, przy uwzględnieniu ich przewodności elektrycznej. Dla czystego technicznie aluminium (min. 99,5%) o przewodnościach minimalnych 35,84 MS/m – 35,38 MS/m współczynniki temperaturowe rezystancji wynoszą 0,00403 K⁻¹ – 0,00408 K⁻¹ i są tym wyższe im wyższa jest przewodność materiału w temperaturze otoczenia.

Dla stopów aluminium serii 5XXX (AlMg) o przewodności elektrycznej w temperaturze otoczenia wynoszącej 31,03 MS/m współczynnik temperaturowy rezystancji wynosi 0,00353 K⁻¹. Dla stopów serii

6XXX o przewodnościach z zakresu 34,51 MS/m – 30,74 MS/m współczynniki temperaturowe rezystancji wynoszą odpowiednio: $0,00393 \text{ K}^{-1}$ – $0,0035 \text{ K}^{-1}$ i są tym wyższe im wyższa jest wymagana przewodność elektryczna materiałów w temperaturze otoczenia. Dla stopów serii 8XXX o przewodności elektrycznej w temperaturze otoczenia 35,84 MS/m – 35,15 MS/m współczynniki temperaturowe rezystancji wynoszą odpowiednio $0,00408 \text{ K}^{-1}$ – $0,00400 \text{ K}^{-1}$ i są tym wyższe im wyższa jest wymagana przewodność elektryczna.

Obok znormalizowanych i powszechnie stosowanych na przewody materiałów na osnowie aluminium znane są stopy specjalne aluminium posiadające ponadstandardowe właściwości użytkowe.

Z opisu patentowego EP 0 787 811 znany jest stop aluminium na cele przewodowe zawierający 0,2% Zr – 0,8% Zr, 0,1% Mn – 0,8% Mn, 0,1% Cu – 0,4% Cu, 0,16% Si – 0,3% Si oraz 0,1%–0,3% pierwiastków z grupy: V, Co, Cr, Mo. Stop taki posiada przewodność elektryczną w temperaturze otoczenia nie gorszą niż 29 MS/m i ponadstandardową odporność cieplną umożliwiającą jego zastosowanie do przewodów wysokotemperaturowych.

Z opisu patentowego EP 2 383 357 znany jest stop aluminium na cele przewodowe zawierający 0,1% Fe – 0,4% Fe, 0,1% Cu – 0,3% Cu, 0,02% Mg – 0,2% Mg, 0,02% Si – 0,2% Si oraz 0,001% – 0,010% Ti i V. Stop ten posiada przewodność elektryczną w temperaturze otoczenia nie gorszą niż 31,9 MS/m i podwyższoną odporność na pełzanie.

Z opisu patentowego US 8,653,374 znany jest stop aluminium na cele przewodowe zawierający 0,2% Mg – 1,0% Mg, 0,1% Si – 1,0% Si, 0,1% Cu – 0,5% Cu o przewodności elektrycznej w temperaturze otoczenia nie gorszej niż 33,64 MS/m i podwyższonej udarność oraz polepszonych parametrach współpracy ze złączami elektrycznymi.

Znane są również stopy aluminium z dodatkami metali szlachetnych czy półszlachetnych.

Z opisu patentowego US 4,042,424 znany jest stop serii 6XXX (AlMgSi) z dodatkiem miedzi na przewody elektroenergetyczne, w którym poprzez odpowiednią obróbkę cieplno-mechaniczną i dodatek Cu uzyskuje się podwyższoną wytrzymałość mechaniczną przy zachowaniu dobrej przewodności elektrycznej materiału.

Z publikacji Oglodkova Y.S., Vakhromov R.O., Lukina E.A. and Ryabov D.K: The effect of artificial aging on the structure and properties of the heat-resistant alloy V-1213 of Al-Cu-Mg-Ag system, Materials Science Forum Vols. 794–796 (2014) pp 515–519 znany jest wpływ dodatku srebra na kinetykę i morfologię wydzielenia faz podczas utwardzania wydzieleniowego stopów aluminium serii 2XXX, co przekłada się na podwyższone własności mechaniczne materiału, jednakże stopy tego typu nie znajdują aplikacji w elektroenergetyce. Znane są również, np. z pracy K. Hirano: Metastable State in Aluminum-Silver Alloys Formed during Quenching, Transactions of the Japan Institute of Metals, Vol. 10 No. 2 (1969), str. 132–139, stopy AlAg o zawartości srebra od jednego do kilkudziesięciu procent. Stopy tego typu są wykorzystywane w celach naukowych do identyfikacji mechanizmów wydzielenia się faz z przesyconego roztworu stałego i nie znalazły aplikacji praktycznych z uwagi na wysoką cenę srebra w stosunku do innych typowych dla aluminium dodatków stopowych.

Stosowane obecnie konwencjonalne materiały przewodowe na osnowie aluminium posiadają właściwości fizyczne skutkujące niewystarczającą obciążalnością prądową przewodów wskutek znacznego pogorszenia się przewodności elektrycznej materiału przewodu wraz z podwyższaniem się jego temperatury wskutek nagrzewania prądem elektrycznym. Umowne współczynniki porównawcze efektywności tych materiałów W generalnie dla materiałów przewodzących na osnowie aluminium są niższe niż 9×10^3 MSK/m. Jedynie wyselekcjonowane rodzaje wysoko-przewodzących stopów AlMgSi posiadają umowny współczynnik porównawczy efektywności na poziomie maksimum $9,3 \times 10^3$ MSK/m. Analizując znane rozwiązania materiałów przewodowych na osnowie aluminium można stwierdzić, że przewodność elektryczna materiału w temperaturze otoczenia jest tym niższa im większa jest zawartość dodatków stopowych i zanieczyszczeń. Spadek przewodności elektrycznej zależy również od rodzaju dodatku lub domieszki. W zależności od rodzaju pierwiastki metali obcych mogą lokować się w roztworze stałym aluminium lub tworzyć odrębne fazy. W przypadku, gdy atomy pierwiastków obcych tworzą odrębne fazy spadek przewodności elektrycznej jest mniejszy niż w przypadku, w którym atomy te znajdowałyby się w roztworze stałym. Przewodność elektryczna materiałów przewodowych na osnowie aluminium spada również wraz ze wzrostem ich odkształcenia na zimno. Współczynnik temperaturowy rezystancji jest tym większy im większa jest przewodność elektryczna materiału (a więc i czystość chemiczna materiału). Oba parametry z punktu widzenia kształtowania znamionowej obciążalności prądowej przewodu działają przeciwnie.

Celem wynalazku jest stworzenie drutów na osnowie aluminium do przewodów elektroenergetycznych i kabli elektroenergetycznych zapewniających wyższą obciążalność prądową przewodów (lub kabli) w odniesieniu do obecnie stosowanych materiałów przewodowych na osnowie aluminium przy zachowaniu tej samej temperatury granicznej roboczej przewodu (lub kabla).

W rozwiązaniu według wynalazku efekt ten osiągnięto w ten sposób, że do aluminium dodano specjalnie wyselekcjonowany dodatek stopowy, który przy zastosowanym stężeniu jedynie nieznacznie obniża przewodność elektryczną materiału w temperaturze otoczenia, a równocześnie znacząco zmniejsza spadek przewodności elektrycznej materiału wraz ze wzrostem temperatury. W efekcie uzyskano materiał o wyższej przewodności elektrycznej w temperaturze granicznej roboczej przewodu (lub kabla) niż czyste aluminium lub stosowane dotychczas stopy przewodowe na osnowie aluminium.

Istotą rozwiązania według wynalazku jest to, że do aluminium o odpowiedniej dla zaawansowanych aplikacji elektrycznych czystości wprowadzono dodatek srebra w ilości od 0,05% wag do 0,1% wag, przy czym atomy srebra zgodnie z układem równowagi Ag-Al lokują się w osnowie aluminiowej i nie tworzą odrębnych faz, lecz materiał posiada strukturę roztworu stałego. Poprzez odpowiednią zawartość srebra w aluminium, właściwe jego ulokowanie w strukturze (w roztworze stałym) nieoczekiwanie uzyskano materiał o nadzwyczajnie niskim współczynniku temperaturowym rezystancji w porównaniu do znanych materiałów przewodowych na osnowie aluminium. Równocześnie dodatek srebra do aluminium nie spowodował znaczącej degradacji przewodności elektrycznej przy temperaturze otoczenia.

Według wynalazku druty ze stopu aluminium uzyskane poprzez ciągłe odlewanie, opcjonalną przeróbkę plastyczną na gorąco na drodze walcowania oraz opcjonalną homogenizację i przeróbkę plastyczną na zimno na drodze ciągnięcia i walcowania lub ciągnięcia wykonane są ze stopu AlAg o zawartości srebra od 0,05% do 0,1% wag oraz wykazują przewodność elektryczną w temperaturze 293 K niższą od 0,22 MS/m do 0,43 MS/m od aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania oraz umowny współczynnik porównawczy efektywności stanowiący iloraz przewodności elektrycznej w temperaturze 293 K oraz współczynnika temperaturowego rezystancji w zakresie od $9,85 \times 10^3$ MSK/m do $12,05 \times 10^3$ MSK/m.

Korzystnie druty według wynalazku po procesie przeróbki plastycznej na zimno poddane zostaną wygrzewaniu w temperaturze likwidującej skutki umocnienia odkształceniowego i posiadają umowny współczynnik porównawczy efektywności stanowiący iloraz przewodności elektrycznej w temperaturze 293 K oraz współczynnika temperaturowego rezystancji wyższy w stosunku do aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania.

Korzystnie druty wykonane ze stopu AlAg 0,1 wykazują temperaturę początku rekrytalizacji o 50°C wyższą niż druty wytworzone aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania.

Korzystnie druty według wynalazku wykazują 15%–30% wyższe wydłużenie przy zerwaniu w próbie jednoosiowego rozciągania w stosunku do badanych w identyczny sposób drutów z aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania.

Korzystnie przewody lub kable wykonane z drutów według wynalazku mają wyższą znamionową obciążalność prądową w stosunku do przewodów wykonanych z aluminium o identycznej konstrukcji przy pozostałych identycznych parametrach bilansu cieplnego, a w szczególności temperatury granicznej roboczej przewodu lub kabla.

Rozwiązanie według wynalazku zostanie bliżej objaśnione na podstawie przykładów realizacji przedstawionych w tablicach 2–5 oraz rys. 1–4. W tablicy 2 przedstawiono wpływ dodatku srebra o wysokiej czystości (4N) do aluminium wysokiej czystości (4N) na przewodność elektryczną materiału. W tablicy 3 przedstawiono analogicznie wpływ dodatku srebra o wysokiej czystości (4N) na przewodność elektryczną aluminium o czystości technicznej (99,85%). W tablicy 3 przedstawiono przykład obliczenia obciążalności prądowej wg. procedury skwantyfikowanej w IEC 61597 dla przewodów z drutami z Al oraz AlAg 0,1% w stanie umocnionym odkształceniowo i w stanie miękkim. Na rys. 1 przedstawiono wyznaczone współczynniki temperaturowe rezystancji stopów AlAg oraz Al jako materiału odniesienia, a na rys. 2 zależność tych współczynników od zawartości srebra. Na rys. 3 przedstawiono charakterystyki rozciągania drutów z Al i stopów AlAg, a na rys. 4 krzywe mięknięcia Al i stopu AlAg.

Zgodnie z rozwiązaniem według wynalazku, którego przykład realizacji ukazano w tabl. 2. dokonano syntezy stopów AlAg o zawartościach 0,10% Ag, 0,25% Ag, 0,54% Ag oraz czystego Al jako materiał referencyjny, wykorzystując aluminium o czystości 99,99% oraz srebro o czystości 99,99%.

Materiały stopiono w szczelnych tyglach grafitowych w temperaturze 750°C po roztopieniu wytrzymały metal przez 1 h, mieszano, wytrzymały przez 1 h, mieszano, wytrzymały przez 0,25 h i krystalizowano. Na materiałach w stanie po odlewaniu, zbadano przewodności elektryczne w temperaturze otoczenia, a następnie materiały te poddano homogenizacji przez 100 h w temp 600°C i schłodzono w wodzie. Na próbkach po ochłodzeniu zbadano przewodność elektryczną, a następnie odkształcono je na zimno z odkształceniem 80% i ponownie zbadano własności elektryczne. Inne próbki poddano z kolei przeróbce plastycznej na gorąco z odkształceniem całkowitym 50% i schłodzono w wodzie, a następnie poddano badaniom przewodności elektrycznej w temperaturze otoczenia. Na bazie uzyskanych wyników zaprezentowanych w tabl. 2. stwierdzono, że spadek przewodności elektrycznej materiałów w funkcji zawartości srebra w stopie jest quasi-liniowy i wynosi 0,4 MS/m – 0,43 MS/m na 0,1% wag dodatku srebra w stanie po odlewaniu, po homogenizacji oraz po odkształceniu na gorąco. W przypadku materiałów poddanych odkształceniu na zimno spadek przewodności materiału w funkcji zawartości srebra jest mniejszy i wynosi ok. 0,31 MS/m na 0,1% wag dodatku srebra.

Tablica 2
Wyniki badań przewodności elektrycznej aluminium i stopów Al-Ag o zawartości srebra do 0,54% w temperaturze otoczenia w różnych stanach struktury

Nr	Materiał	Przewodność elektryczna w temperaturze otoczenia			
		w stanie po odlewaniu	w stanie po odlewaniu, homogenizacji (parametry homogenizacji: 600°C przez 100 h) i chłodzeniu do wody	w stanie po odlewaniu, odkształceniu na gorąco (wielkość odkształcenia względnego 50%) i chłodzeniu do wody	w stanie po odlewaniu, homogenizacji (parametry homogenizacji: 600°C przez 100 h) i chłodzeniu do wody oraz po odkształceniu na zimno (wielkość odkształcenia względnego 80%)
1	aluminium o czystości 99,99%	37,8	37,7	37,7	37,1
2	aluminium o czystości 99,99% + 0,1% wag. srebra o czystości 99,99%	37,3	37,4	37,3	36,9
3	aluminium o czystości 99,99% + 0,25% srebra o czystości 99,99%	36,8	36,6	36,7	36,5
4	aluminium o czystości 99,99% + 0,54% srebra o czystości 99,99%	35,5	35,5	35,5	35,4

Zgodnie z rozwiązaniem według wynalazku, którego inny przykład realizacji ukazano w tablicy 3. dokonano syntezy stopów AlAg o zawartościach 0,025% Ag, 0,05% Ag, 0,1% Ag oraz Al o czystości technicznej jako materiał referencyjny. Do syntezy wykorzystano aluminium o czystości 99,85% oraz srebro o czystości 99,99%. Materiały stopiono w temperaturze 750°C po roztopieniu wytrzymały metal przez 1 h, mieszano, wytrzymały przez 1 h, mieszano, wytrzymały przez 0,25 h i odlewano w sposób ciągły. Na materiałach w stanie po ciągłym odlewaniu oraz po homogenizacji przez 100 h w temp 600°C i chłodzeniu w wodzie zbadano przewodności elektryczne w temperaturze otoczenia, a następnie materiały w stanie po ciągłym odlewaniu poddano ciągnięciu na zimno na druty. Na drutach zbadano zależność zmian rezystancji materiału w funkcji przyrostu temperatury, co ukazano na rys. 1. W tym celu przygotowano próbki drutów o długości ok. 0,6 m, które zamocowano

w szczękach pomiarowych mostka do pomiaru rezystancji Kelvina i umieszczono w komorze badań cieplnych z wymuszonym obiegiem powietrza. Na początek zmierzono rezystancję w temperaturze otoczenia, a następnie podwyższano temperaturę w komorze badań cieplnych z krokami co ok. 20°C i wytrzymywano przez okres konieczny do stabilizacji temperatury drutu. W każdej z zadanych temperatur mierzono rezystancję drutu, a następnie wyznaczono iloraz rezystancji w określonych temperaturach badania i rezystancji w temperaturze otoczenia. Wyznaczono liniową relację między ilorazem rezystancji a różnicą między temperaturą badania i temperaturą otoczenia (przyrost temperatury). Tangens kąta nachylenia rozpatrywanej relacji odpowiada współczynnikowi temperaturowemu rezystancji.

Na podstawie danych zamieszczonych w tabl. 3 łatwo stwierdzić, że w materiałach nieodkształconych lub w materiałach po wygrzewaniu, gdzie skutki umocnienia odkształceniowego zostały usunięte, spadek przewodności elektrycznej w temperaturze otoczenia w funkcji zawartości srebra w stopie jest quasi-liniowy i wynosi 0,37 MS/m – 0,43 MS/m na 0,1% wag. W przypadku materiałów poddanych odkształceniowi na zimno spadek przewodności materiału w funkcji zawartości srebra jest mniejszy i wynosi ok. 0,24 MS/m na 0,1% wag. dodatku srebra. Uzyskane rezultaty są zbliżone do obserwowanych w wariantach zaprezentowanych w tabl. 2. Na rys. 1 ukazano wyniki badań współczynnika temperaturowego rezystancji dla materiałów przedstawionych w tabl. 3. Jak wynika z rys. 2 współczynnik temperaturowy rezystancji spada o ok. 0,0015 K⁻¹ na 0,1% wag Ag. Na tej podstawie współczynnik porównawczy efektywności stopów AlAg dla materiałów w stanie po ciągłym odlewaniu i ciągnięciu na zimno oraz po ciągłym odlewaniu, ciągnięciu na zimno i wygrzewaniu o zawartości Ag w zakresie 0,05%–0,1% wynoszą od 9,85x10³ MSK/m do 12,05x10³ MSK/m i są wyższe od współczynników dla znanych dotychczas stopów przewodowych.

Umowny współczynnik porównawczy efektywności W dla drutów według wynalazku opisać można zależnością reprezentującą dolną obwiednię możliwych do osiągnięcia wartości współczynnika porównawczego efektywności materiału w funkcji zawartości srebra:

$$W = \frac{\sigma_{293Al} - 4,3X}{\alpha_{RAI} - 0,015X}$$

gdzie:

- W umowny współczynnik porównawczy efektywności drutu wg wynalazku [MSK/m]
- σ_{293Al} przewodność elektryczna w 293 K aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania [MS/m]
- α_{RAI} współczynnik temperaturowy rezystancji aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania [K⁻¹]
- X zawartość Ag w stopie AlAg [%wag] w zakresie objętym wynalazkiem (tj. od 0,05% wag do 0,1% wag)

Przykład korzyści wynikającej z zastosowania stopów AlAg objętych wynalazkiem przedstawiono w tabl. 4. Z przedstawionych wyników obliczeń wynika, że zastosowanie stopu AlAg 0,1 przy zachowaniu pozostałych parametrów przewodu możliwe jest podwyższenie obciążalności prądowej o ponad 4% w przypadku zastosowania drutów umocnionych odkształceniowo oraz ponad 1% w przypadku drutów w stanie miękkim (po wygrzewaniu).

Ponadto zbadano w próbie jednoosiowego rozciągania własności mechaniczne wybranych drutów (Al, AlAg 0,05, AlAg 0,1) w stanie po ciągnięciu, co ukazano na rys. 3. Dla Al i AlAg 0,1 zbadano krzywe mięknienia, co ukazano na rys. 4. W tym celu materiały umocnione odkształceniowo wygrzewano w temperaturach 100°C, 150°C, 200°C, 250°C, 275°C, 300°C, 350°C i 400°C przez 1 h. Następnie materiały schłodzono na powietrzu do temperatury otoczenia i poddano badaniom twardości Vickersa. Druty po ciągnięciu na zimno poddano wygrzewaniu w temperaturze 450°C przez 2 h i zbadano ich przewodności elektryczne.

Stopy AlAg o zawartości srebra w zakresie 0,05% do 0,1% umożliwiają uzyskanie materiałów w stanie umocnionym odkształceniowo o porównywalnych własnościach wytrzymałościowych i 15%–30% wyższym wydłużeniu przy zerwaniu w próbie jednoosiowego rozciągania w odniesieniu do aluminium bazowego poddanego identycznej ścieżce technologicznej przetwarzania, co ukazuje rys. 3. Ponadto stop AlAg 0,1 wykazuje o ok. 50°C wyższą temperaturę początku rekrytalizacji w odniesieniu do aluminium bazowego poddanego identycznej ścieżce technologicznej przetwarzania, co ukazuje rys. 4.

T a b l i c a 3

Wyniki badań przewodności elektrycznej aluminium i stopów Al-Ag o zawartości srebra do 0,1% w temperaturze otoczenia w różnych stanach struktury

Nr	Materiał	Przewodność elektryczna w temperaturze otoczenia			
		w stanie po ciągłym odlewaniu	w stanie po ciągłym odlewaniu, homogenizacji (parametry homogenizacji: 600°C przez 100 h) i chłodzeniu do wody	w stanie po ciągłym odlewaniu, i odkształceniu na zimno (wielkość odkształcenia względnego 90%)	w stanie po ciągłym odlewaniu, i odkształceniu na zimno (wielkość odkształcenia względnego 90%) i po wygrzewaniu
1	aluminium o czystości 99,85% (Al)	36,20	36,15	36,03	36,18
2	aluminium o czystości 99,85% + 0,025% wag. srebra o czystości 99,99% (AlAg 0,025)	36,12	36,06	35,98	36,13
3	aluminium o czystości 99,85% + 0,05% srebra o czystości 99,99% (AlAg 0,05)	36,05	35,86	35,96	36,06
4	aluminium o czystości 99,85% + 0,1% srebra o czystości 99,99% (AlAg 0,1)	35,83	35,72	35,79	35,80

T a b l i c a 4

Przykład konstrukcji przewodów i obliczona wg normy IEC 61597 znamionowa obciążalność prądowa

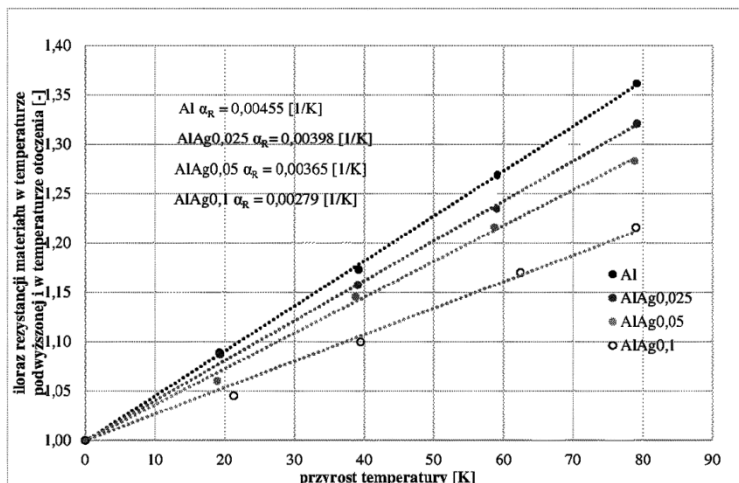
nr przewodu	I	II	III	IV
materiał rdzenia	stal	stal	stal	stal
konstrukcja rdzenia (ilość drutów w warstwach)	1+6	1+6	1+6	1+6
średnica drutu rdzenia [mm]	2,67	2,67	2,67	2,67
średnica rdzenia [mm]	8,01	8,01	8,01	8,01
przekrój poprzeczny rdzenia [mm ²]	39,2	39,2	39,2	39,2
materiał warstw przewodzących	Al umocniony odkształceniowo	AlAg 0,1 umocniony odkształceniowo	Al miękki	AlAg 0,1 miękki
konstrukcja warstw przewodzących (ilość drutów w warstwach)	10+16	10+16	10+16	10+16
średnica drutów warstw przywodzących [mm]	3,44	3,44	3,44	3,44
średnica przewodu [mm]	21,77	21,77	21,77	21,77
przekrój części przewodzącej [mm ²]	241,7	241,7	241,7	241,7

przewodność materiału na warstwy przewodzące [MS/m]	36,0	35,8	36,2	35,8
współczynnik przyrostu rezystancji wynikający ze skrętu drutów [%]	2,2	2,2	2,2	2,2
rezystancja liniowa przewodu w temperaturze otoczenia [Ω/km]	0,1175	0,1181	0,1168	0,1181
współczynnik temperaturowy rezystancji [1/K]	0,0046	0,0028	0,0046	0,0028
temperatura graniczna robocza [K]	353	353	423	423
temperatura otoczenia [K]	293	293	293	293
prędkość wiatru [m/s]	0,5	0,5	0,5	0,5
natężenie promieniowania słonecznego [W/m^2]	900	900	900	900
emisyjność względna powierzchni przewodu [-]	0,6	0,6	0,6	0,6
absorbcyjność powierzchni przewodu [-]	0,5	0,5	0,5	0,5
znamionowa obciążalność prądowa [A]	652	680	869	936

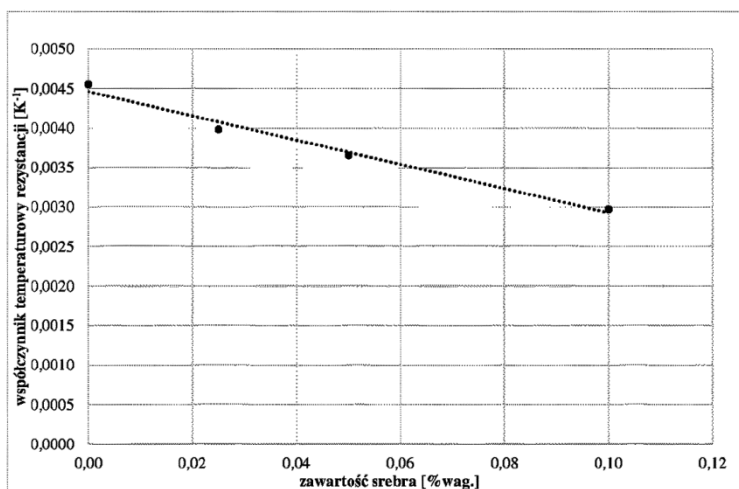
Zastrzeżenia patentowe

1. Druty ze stopu aluminium uzyskane poprzez ciągłe odlewanie oraz przeróbkę plastyczną na zimno, **znamiennie tym**, że wykonane są ze stopu AlAg o zawartości srebra od 0,05% wag do 0,1% wag oraz wykazują przewodność elektryczną w temperaturze 293 K niższą od 0,22 MS/m do 0,43 MS/m w stosunku do aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania oraz umowny współczynnik porównawczy efektywności stanowiący iloraz przewodności elektrycznej w temperaturze 293 K oraz współczynnika temperaturowego rezystancji w zakresie od $9,85 \times 10^3$ MSK/m do $12,05 \times 10^3$ MSK/m.
2. Druty według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że po procesie przeróbki plastycznej na zimno poddane zostają wygrzewaniu w temperaturze likwidującej skutki umocnienia odkształceniowego i posiadają umowny współczynnik porównawczy efektywności stanowiący iloraz przewodności elektrycznej w temperaturze 293 K oraz współczynnika temperaturowego rezystancji wyższy w stosunku do aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania.
3. Druty według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że druty wykonane ze stopu AlAg 0,1 wykazują temperaturę początku rekrytalizacji o 50°C wyższą niż druty wytworzone aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania.
4. Druty według zastrz. 1, **znamiennie tym**, że wykazują 15%–30% wyższe wydłużenie przy zerwaniu w próbie jednoosiowego rozciągania w stosunku do badanych w identyczny sposób drutów z aluminium bazowego, z którego wykonano druty AlAg i które poddano identycznej ścieżce przetwarzania.
5. Druty według zastrz. 1 albo 2, **znamiennie tym**, że wykonane z nich przewody lub kable mają wyższą znamionową obciążalność prądową w stosunku do przewodów wykonanych z aluminium o identycznej konstrukcji przy pozostałych identycznych parametrach bilansu cieplnego.

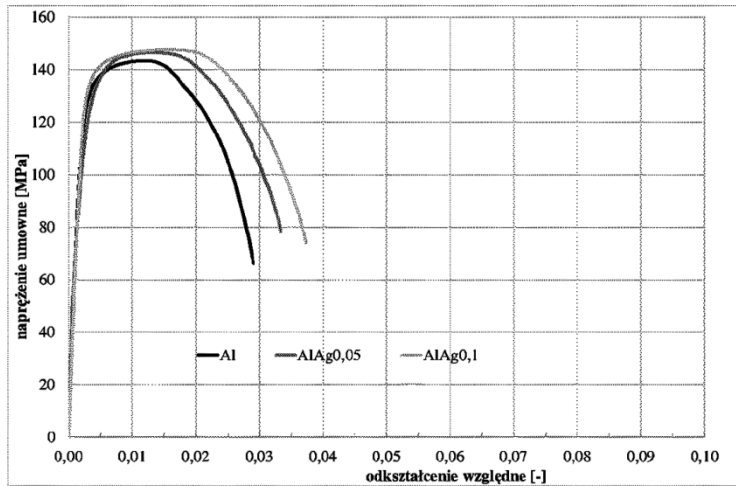
Rysunki



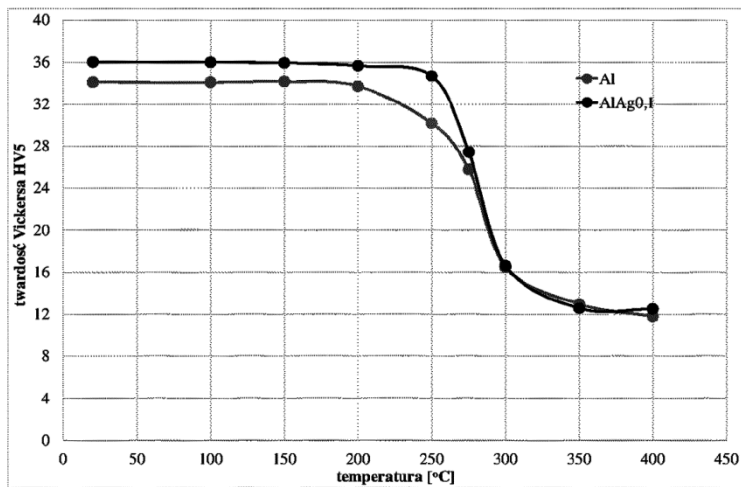
Rys. 1. Wartości współczynnika temperaturowego rezystancji drutów z aluminium oraz ze stopu AlAg0,025, AlAg0,05 i AlAg0,1



Rys. 2. Zależność współczynnika temperaturowego rezystancji stopów AlAg w funkcji zawartości srebra



Rys. 3. Charakterystyki rozciągania drutów z aluminium oraz ze stopu AlAg0,05 i AlAg0,1



Rys. 4. Krzywe mięknięcia na podstawie zmian twardości Vickersa aluminium oraz stopu AlAg0,1

