

# Zastosowanie wiązek aluminiowych do budowy instalacji elektrycznych w pojazdach samochodowych

**Streszczenie.** Artykuł przedstawia warunki techniczne jakie muszą spełnić przewody aluminiowe do budowy nowych instalacji elektrycznych w pojazdach samochodowych. W artykule porównano parametry mechaniczne i elektryczne przewodów aluminiowych oraz miedzianych. Przedstawiono proces łączenia przewodów aluminiowych ze złączami. Opracowano porównanie instalacji elektrycznej zbudowanej w oparciu o przewody miedziane i aluminiowe na podstawie analizy instalacji elektrycznej pojazdu BMW 750i.

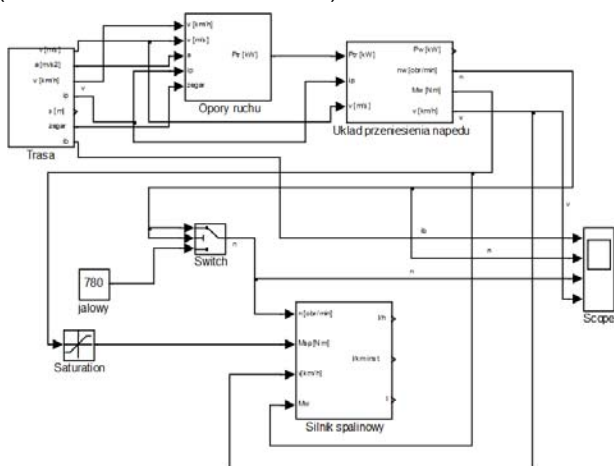
**Abstract.** This article presents the use of aluminum conductors for the construction of electrical installations in vehicles. The article compares the mechanical and electrical parameters of aluminum and copper wires. The process of joining aluminum wires with connectors has been also presented. A comparison of the electrical installation based on copper and aluminum harness was made based on the analysis of the BMW 750i electric system. (**Application of aluminum wires for the construction of automotive electric system**)

**Słowa kluczowe:** Instalacje elektryczne w pojazdach samochodowych, Przewody aluminiowe, Redukcja masy instalacji elektrycznej, Optymalizacja kosztów instalacji elektrycznej

**Keywords:** Automotive Electric Systems, Aluminum wires, Reduction of the weight of the electrical installation, Optimisation of electric installation costs

## 1. Wstęp

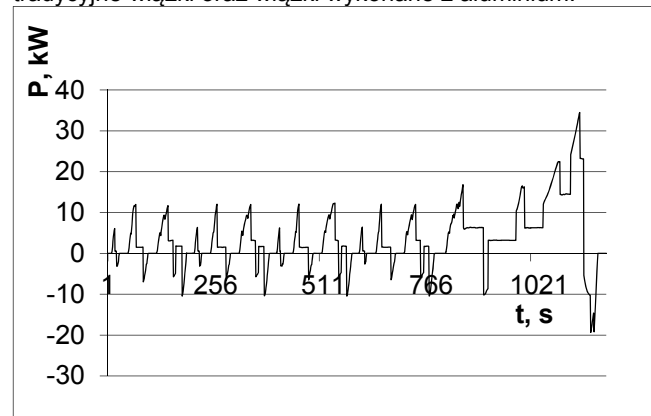
W ostatnich latach względy ekonomiczne (koncerny samochodowe ciągle wywierają naciski na poddostawców wiązek na ciągłe obniżanie kosztów) oraz względy środowiskowe (zaostżanie i zmieniona metodyka określania emisji CO<sub>2</sub> - testy WLTP zamiast NEDC + testy w ruchu rzeczywistym RDE) zmuszają inżynierów projektujących instalacje elektryczne dla motoryzacji do poszukiwania nowych rozwiązań i nowych surowców jako alternatywy dla powszechnie stosowanej w instalacjach elektrycznych miedzi [1]. Dodatkowo zmieniają się na globalnych rynkach ceny metali, z których wykonuje się przewody elektryczne co wpływa na to, że pewne nieoptymalne dla motoryzacji rozwiązania stają się obecnie perspektywiczne finansowo-biorąc dodatkowo pod uwagę, że nakładane przez UE kary finansowe są skorelowane z emisjami CO<sub>2</sub> sprzedawanych pojazdów a emisja CO<sub>2</sub> wynika z zużycia paliwa, która jest zależna także od masy pojazdu [2]. Dla potrzeb oszacowania możliwej redukcji zużycia energii przez pojazd opracowano modele matematyczne (Rys. 1) dwóch pojazdów z różnych klas (BMW 750i oraz Suzuki Baleno).



Rys. 1. Model matematyczny pojazdów BMW i Suzuki – test NEDC

Za pomocą stworzonych modeli i danych technicznych obu samochodów wykonano obliczenia możliwej redukcji zużycia energii w wytypowanych fazach testu NEDC (faza UDC miejska o długości 4052 m, EUDC pozamiejska o długości 6955 m, NEDC mieszana o długości 11007 m) dla

obu pojazdów, w przypadkach kiedy pojazdy mają tradycyjne wiązki oraz wiązki wykonane z aluminium.



Rys. 2. Przykładowy przebieg mocy na kołach podczas symulacji jazdy w teście NEDC obu pojazdów

Tabela 1. Zestawienie wyników zużycia energii przez dwa pojazdy poruszające się w teście NEDC w przypadku zastosowania przewodów aluminiowych i miedzianych

Faza testu	Jednostka	Suzuki Baleno - Cu	Suzuki Baleno - Al	BMW 750i xDrive - Cu	BMW 750i xDrive - Al
$E_{UDC}$	kWh	0,478	0,472	0,853	0,845
$E_{EUDC}$	kWh	0,941	0,933	1,525	1,515
$E_{NEDC}$	kWh	1,419	1,406	2,378	2,36

W przypadku pojazdu BMW redukcja zużycia energii w wytypowanych modułach testu NEDC wynikająca z zastąpienia wiązek miedzianych aluminiowymi była nie wyższa niż 1% a w przypadku pojazdu Suzuki Baleno nie wyższa niż 1,3%. Należy zaznaczyć, że test NEDC cechował się niską dynamiką przyspieszeń i niskimi prędkościami fazy. W ruchu rzeczywistym zatem te uzyski będą wyższe.

Ciągła presja na redukcję masy wiązek elektrycznych i presja ograniczenia kosztów wytwarzania to główne czynniki przemawiające za szerokim stosowaniem przewodów aluminiowych w instalacjach elektrycznych pojazdów.

Głównymi przyczynami ograniczającymi zastosowanie przewodów aluminiowych w motoryzacji jest problem odkształcania i gorszych właściwości mechanicznych

przewodów aluminiowych w stosunku do przewodów miedzianych. Mają na to wpływ wysoki współczynnik tarcia, przyczepność materiału do powierzchni narzędzia i zbyt niska plastyczność wynikająca z naturalnego występowania krzemionki w boksycie. Silikon powoduje pękanie materiału, w wyniku czego na jego powierzchni tworzy się sieć mikropęknięć ograniczająca możliwości kształtowania przestrzennego przewodów aluminiowych, co jest znaczącym ograniczeniem ze względu na skomplikowane struktury przestrzenne prowadzenia instalacji elektrycznych we współczesnych samochodach. Eliminację lub znaczące zmniejszenie tego negatywnego zjawiska można uzyskać przez wprowadzenie stopu żelaza do aluminium, które poprzez tworzenie twardych i wysokotopliwych związków chemicznych, takich jak  $Al_3Fe$ , umożliwi samooczyszczenie powierzchni matrycy [3]. Dodatkowo wiążąc silikon, żelazo poprawia przewodność elektryczną materiału, a także jego plastyczność likwidując punkty koncentracji naprężeń, szczególnie niebezpieczne w przypadku drutu hartowanego.

## 2. Budowa instalacji elektrycznych we współczesnych pojazdach samochodowych

Wiązki elektryczne stosowane we współczesnych pojazdach budowane są z przewodów miedzianych, ponieważ miedź charakteryzuje się bardzo dobrym przewodnictwem elektrycznym i cieplnym oraz nadal akceptowalną ceną. Do wad tego rozwiązania należy jednak wysoka masa przewodów i wiązek co powoduje, że w przypadku wielu pojazdów konieczne jest płacenie kar za emisję  $CO_2$  każdego sprzedanego pojazdu - klienci bowiem nie godzą się na rezygnację z komfortu pojazdów dla obniżania ilości odbiorników energii elektrycznej. Według raportu Deutsches Kupferinstitut 2016 [4] w instalacji elektrycznej samochodów spalinowych obecnie średni ciężar wiązki wynosi około 35 kg.

Ciężar wzrasta w przypadku samochodów hybrydowych i wynosi dla nich średnio około 43,5 kg oraz aż 73,6 w przypadku pojazdów hybrydowych typu Plug-In [3] co jest porównywalne z ciężarem jednego pasażera.

Większość obecnie stosowanych w pojazdach przewodów miedzianych ma pole przekroju w przedziale 2.5-6  $mm^2$ . Aby zapewnić tę samą obciążalność prądową długotrwałą przewodu dla instalacji aluminiowych pole przekroju musi zostać powiększone analogicznie do 4-10  $mm^2$ . W tabeli 2 porównano właściwości przewodów aluminiowych i miedzianych (przy porównywalnej przewodności elektrycznej i cieplnej) pod kątem masy i przekroju przewodów.

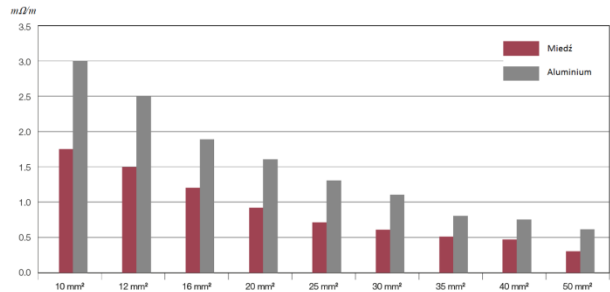
Tabela 2. Zestawienie wybranych parametrów technicznych przewodów aluminiowych i miedzianych

Parametr techniczny	Przewód miedziany	Przewód aluminiowy
Długość [m]	1	1
Przekrój przewodu [ $mm^2$ ]	0,5	0,85
Masa [kg]	0,0476	0,0019

Tak proste porównanie wskazuje, że dzięki zastosowaniu przewodów aluminiowych można ograniczyć w znacznym stopniu masę instalacji elektrycznej - co przyczyni się do redukcji masy pojazdu, a więc emisji  $CO_2$ . Jednak w tak prostym porównaniu nie widać wad przewodów aluminiowych, np., że wytrzymałość przewodów aluminiowych jest niewystarczająca dlatego, nie można ich stosować przy stosowaniu przewodów o małych przekrojach, takich jak 0,35  $mm^2$  lub 0,5  $mm^2$ . To powoduje, że nie całe wiązki mogą być wykonywane jako aluminiowe

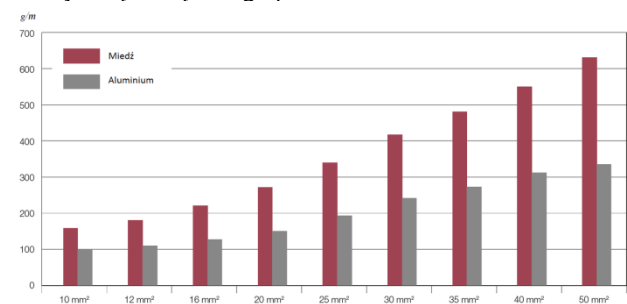
co powoduje powstanie kolejnych problemów technicznych opisanych w dalszej części artykułu.

Na rys. 3 pokazano porównanie rezystancji przewodów miedzianych i aluminiowych. W przypadku każdego typoszeregu przewodów rezystancja przewodów aluminiowych jest wyższa o około 50% w stosunku do przewodów miedzianych co jest niekorzystne ze względu na straty mocy [5].



Rys.3. Porównanie rezystancji przewodów miedzianych i aluminiowych

Na rys. 4 pokazano zestawienie masy przewodów aluminiowych i miedzianych dla poszczególnych typoszeregów [6]. Wraz ze wzrostem typoszeregu różnica masy pomiędzy przewodami aluminiowymi i miedzianymi wzrasta, jest to związane z tym, że wraz ze wzrostem średnicy przewodu masa izolacji ma mniejszy wpływ na sumaryczną masę całego przewodu.



Rys.4. Porównanie masy przewodów miedzianych i aluminiowych

## 3. Analiza parametrów mechanicznych przewodów aluminiowych

Ważne z punktu widzenia projektanta instalacji elektrycznych w pojazdach, parametry fizyczne przewodów aluminiowych i miedzianych zestawiono w tabeli 3. Przewody miedziane charakteryzują się lepszą przewodnością elektryczną (wyższa o ok. 37%) w porównaniu do przewodów aluminiowych. Parametr ten jest kluczowy i zastępując przewody miedziane aluminiowymi należy proporcjonalnie zwiększyć średnicę przewodów-co implikuje pewne problemy dla projektantów ze względu na konieczność zapewniania większych objętości na prowadzenie wiązek czy większe zużycie tworzyw sztucznych na budowę osłon wiązek. Gęstość aluminium jest niższa w stosunku do miedzi aż o 70% co przekłada się w głównej mierze na masę przewodów co jest najważniejszą zaletą przewodów aluminiowych.

Współczynnik rozszerzalności termicznej przewodów aluminiowych jest większy niż przewodów miedzianych. Jest to niekorzystna właściwość, zwłaszcza, że pojazdy podczas projektowania są dzielone na strefy pracy w różnych temperaturach (komora silnika, kabina pasażerska). Ten fakt należy uwzględnić przy projektowaniu specjalnych kontaktów i sposobu łączenia kontaktów dla przewodów aluminiowych. Temperatura topnienia aluminium jest niższa o 39% w stosunku do

miedzi. Jest to parametr, który ma szczególne niekorzystne znaczenie w sytuacji, kiedy może dojść do przegrzania styków bądź przy połączeniu przewodu aluminiowego z miedzianym kontaktem.

Przewodność cieplna przewodów miedzianych jest wyższa o 41% w stosunku do aluminiowych co ma istotne znaczenie podczas projektowania wiązek elektrycznych dla odbiorników dużej mocy, w których mogą płynąć prądy nominalne o wysokich natężeniach. Potencjał odniesienia w przypadku aluminium może oscylować w okolicach -1,6V co jest parametrem niepożądanym szczególnie podczas wykorzystywania takich przewodów w obwodach z układami sensorycznymi w których jako nośnik informacji wykorzystywany jest poziom napięcia elektrycznego [6].

Przewody miedziane są bardziej odporne na rozciąganie co ma istotny wpływ na trwałość całych wiązek w miejscach narażonych na ruch/przemieszczanie instalacji elektrycznej (np. przejście wiązek ze słupków drzwiowych do połączy drzwi uchylnych czy przesuwnych). Przewody aluminiowe można zatem stosować w miejscach, gdzie nie będą narażone na ruch, poza tym należy projektować kontakty o większej powierzchni styku z rdzeniem przewodu. Również wytrzymałość na zginanie przewodów miedzianych jest większa w stosunku do przewodów aluminiowych. Wiązki elektryczne w komorze silnika składają się z elastycznych przewodów miedzianych i nie należy ich zastępować aluminiowymi odpowiednikami [9].

Tabela 3. Zestawienie i porównanie parametrów fizycznych przewodów aluminiowych względem miedzianych traktowanych jako odniesienie

Parametr surowca	Jednostka	Przewód miedziany	Przewód aluminiowy	Różnica ( $\Delta$ ) Al. wzgl. Cu
Przewodność elektryczna	S	$59,1 \cdot 10^6$	$37,1 \cdot 10^6$	-37%
Gęstość materiału	$\frac{g}{cm^3}$	8,92	2,7	-70%
Współczynnik rozszerzalności	$\frac{1}{K}$	$16,5 \cdot 10^{-6}$	$23,0 \cdot 10^{-6}$	+40%
Temperatura topnienia	$^{\circ}C$	1084,62	660,32	-39%
Przewodność cieplna	$\frac{W}{(m \cdot K)}$	400	235	-41%
Potencjał odniesienia	V	0,34	-1,676	
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	200	49	-75%
Wytrzymałość na zginanie	Liczba cykli	500	300	-40%
Koszt surowca	$\frac{\text{€}}{kg}$	6,95	1,85	-73%

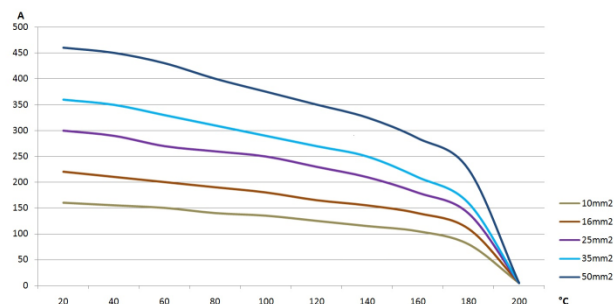
Podczas obróbki mechanicznej przewodów aluminiowych problematyczne są odkształcenia i gorsze właściwości mechaniczne niż w przypadku przewodów miedzianych. Mają na to wpływ wysoki współczynnik tarcia, przyczepność materiału do powierzchni narzędzia i zbyt niska plastyczność wynikająca z naturalnego występowania krzemionki w boksycie, która powoduje mikro pęknięcie materiału na jego powierzchni co ogranicza możliwość wielokrotnego odkształcania przewodów aluminiowych. Eliminację lub znaczące zmniejszenie tego negatywnego zjawiska uzyskuje się przez wprowadzenie stopu żelaza do aluminium, które poprzez tworzenie twardych i wysokotopliwych związków chemicznych, takich jak  $Al_3Fe$ , umożliwia samooczyszczenie powierzchni matrycy [3]. Dodatkowo wiążąc silikon, żelazo poprawia przewodność elektryczną materiału, a także jego plastyczność likwidując

punkty koncentracji naprężeń, szczególnie niebezpieczne w przypadku drutu hartowanego.

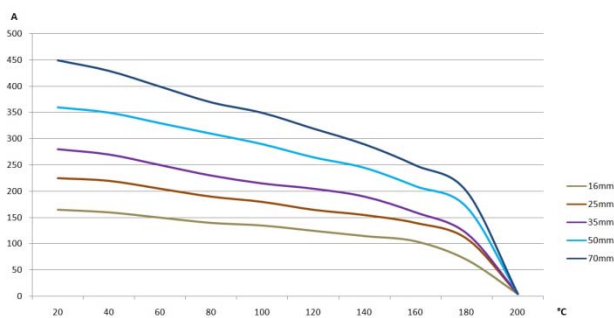
Najważniejszym jednak z punktu widzenia atrakcyjności rynkowej rozwiązań wiązek elektrycznych dla pojazdów jest koszt surowca, z którego podwykonawcy wykonują wiązki elektryczne. W przypadku przewodów aluminiowych koszt surowca (za kg) jest o ok. 73% niższy od kosztów przewodów miedzianych.

#### 4. Analiza parametrów elektrycznych przewodów aluminiowych

Na rys. 5 pokazano przebieg wartości prądu maksymalnego w funkcji temperatury dla przewodów miedzianych. Na rys. 6 pokazano przebieg wartości prądu maksymalnego w funkcji temperatury dla przewodów aluminiowych. Oba przebiegi są porównywalne analizując wartość prądu maksymalnego dla typoszeregów przewodów.



Rys.5. Krzywe wartości maksymalnej prądu w nieekranowanych miedzianych przewodach w zależności od temperatury pracy



Rys.6. Krzywa wartości maksymalnej prądu w nieekranowanych aluminiowych przewodach

Zmniejszenie masy przewodów o 30 do 40% przy tej samej obciążalności prądowej długotrwałej jest możliwe dzięki trzykrotnie niższej gęstości przewodów aluminiowych. Rezystancja przewodów aluminiowych zwiększa się 1,6 raza w stosunku do przewodów miedzianych oraz przewody aluminiowe wymagają o ok. 27% więcej izolacji ze względu na zwiększoną średnicę przekroju czynnego przewodów.

#### 5. Proces łączenia przewodów aluminiowych i złącz

Przeciętna wiązka współczesnego samochodu ma długość 4000 m i posiada przeciętnie 1000 złączy. Każdy przewód musi być wyposażony w dedykowany konektor zgodny z dokumentacją zamawiającego (w bazach danych podwykonawców wiązek znajduje się między 200 tyś do 400 tyś wzorów różnych terminali i dedykowanych osłon). Niekorzystnym zjawiskiem występującym w miejscach połączeń przewodów aluminiowych jest tzw. płynięcie aluminium, które dyskwalifikuje konwencjonalne technologie zaciskania złączy na przewodach aluminiowych. Szybkie utlenianie powierzchni aluminium również nie pozwala na łączenie kontaktów metodą zagniatania. Konieczne są zatem dedykowane techniki łączenia kontaktów, które

podczas procesu łączenia pozwalają przynajmniej chwilowo zniszczyć warstwę tlenku aluminium na powierzchni przewodu aluminiowego co umożliwi prawidłowe i trwałe połączenie ze złączem [8].

Aluminium ma wysoką rozszerzalność cieplną przy niskim poziomie przewodnictwa cieplnego w porównaniu do miedzi. Rozszerzalność termiczna powoduje, że problematyczne lub nawet niemożliwe jest zaciskanie przewodów aluminiowych z miedzianymi kontaktami. W tabeli 4 zestawiono metody łączenia przewodów aluminiowych ze złączami i konektorami.

Tabela 4. Sposoby połączeń przewodów aluminiowych i złączy

Typ połączenia	Główne cechy
Spawanie złącza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zgrzewanie tarciove między metalami, które ogrzewa i łączy różne rodzaje stopów metali.</li> <li>- Należy usunąć warstwę tlenku podczas spawania (przygotowanie materiału).</li> <li>- Technika rekomendowana do przewodów CSA wykorzystywana przy współpracy z akumulatorami.</li> <li>- Technika stosowana do łączenia przewodów CSA powyżej średnicy 17mm<sup>2</sup>.</li> <li>- Zgrzewanie tarciove orbitalne wykorzystywane jest dla płaskich zacisków aluminiowych o średnicy większej niż 42mm<sup>2</sup>.</li> <li>- Zgrzewanie tarciove (FSW) nadaje się do łączenia miedzi z aluminium, skutkuje wysoką wytrzymałością połączenia.</li> </ul>
Spawanie ultradźwiękowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Typ zgrzewania wykorzystywany w przypadku płaskich przewodów lub szyn zbiorczych.</li> <li>- Typ zgrzewania umożliwia łączenie różnych stopów aluminium z miedzianym kontaktem.</li> <li>- Nie wymaga stosowania dodatkowych komponentów ani dodatków do zgrzewania.</li> </ul>
Lutowanie ultradźwiękowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Energia potrzebna do łączenia kontaktu z aluminiowym rdzeniem przewodzącym dostarczana jest za pomocą ultradźwięków.</li> <li>- Technika łączenia wykorzystywana jest dla wszystkich połączeń przewodów CSA.</li> <li>- Lutowanie ultradźwiękowe wymaga utrzymania połączenia lutowanego w czystości, aby obniżyć ryzyko wystąpienia korozji na łączonym elemencie.</li> <li>- Lutowanie zapewnia dobre połączenie elektryczne, podczas gdy połączenie spawane (zgrzewane) zapewnia dobre połączenie mechaniczne.</li> </ul>
Inne metody łączenia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Spawanie laserowe bez atmosfery gazu obojętnego.</li> <li>- Spawanie impulsowe sprzężone z zaciskaniem przewodów samochodowych o małych przekrojach przewodu.</li> <li>- Spawanie oporowe w środowisku gazu obojętnego.</li> </ul>

## 6. Analiza właściwości mechanicznych przewodów aluminiowych

Aluminium jest podatne na korozję powodowaną bezpośrednim kontaktem miedz-aluminium w obecności elektrolitu (np. słona woda).

Tworząc stopy aluminium ingeruje się we właściwości fizyczne i mechaniczne przewodów. Poprawa właściwości elektrycznych powoduje zazwyczaj pogorszenie właściwości mechanicznych, takich jak wytrzymałość na rozciąganie, ograniczenie plastyczności materiału. Sam przewód może zostać wzmocniony poprzez obróbkę termiczną poprzez zastosowanie stopu aluminium z magnezem, krzemem, miedzią i innymi pierwiastkami. Przykładowe stopy aluminium stosowane w przewodach aluminiowych oraz ich cechy przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Zestawienie stopów aluminium do budowy przewodów

Typ stopu	Cechy stopu
Al-Fe-Mg	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dobre właściwości elektryczne i mechaniczne przewodu.</li> <li>- Duża przewodność (61,1% IACS).</li> <li>- Wytrzymałość na rozciąganie: 130-145MPa.</li> <li>- Zastosowanie: przemysł lotniczy, przewody samochodowe, ekranowanie przewodów.</li> </ul>
AlMgSi-0.5 Fe AlSiFe Al0.45Fe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bardzo dobre parametry mechaniczne przewodu,</li> <li>- Duża elastyczność wykazana w testach rozciągania.</li> <li>- Poprawiona odporność termiczna w stosunku do niedomieszkowanych przewodów aluminiowych.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zastosowanie: AlSiFe w wiązkach samochodowych, Al0.45Fe był stosowany jako uzwojenie w silnikach elektrycznych i transformatorach.</li> </ul>
AlFeMg	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bardzo dobra odporność na zginanie.</li> <li>- Możliwość zastosowania w przewodach o małych przekrojach (0,75mm<sup>2</sup>-2,5mm<sup>2</sup>).</li> <li>- Duża przewodność (60% IACS).</li> <li>- Wytrzymałość na rozciąganie 120MPa.</li> <li>- Najbliższy odpowiednik przewodów miedzianych w przemyśle samochodowym.</li> </ul>
AlFeCu	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stop najlepszy w obróbce mechanicznej.</li> <li>- Zadowalające parametry pod kątem odporności na skracanie, odporności na zginanie i odporności na ciepło.</li> <li>- Wysokie przewodnictwo elektryczne i zadowalająca wytrzymałość na rozciąganie (110 MPa).</li> </ul>

Dodatkowo w tabeli w tabeli 6 przedstawiono procesy technologiczne mające na celu poprawę właściwości elektrycznych i mechanicznych przewodów aluminiowych [10].

Tabela 6. Procesy technologiczne zastosowane przy produkcji przewodów aluminiowych

Proces technologiczny	Cechy
Wyżarzanie wsadowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wyżarzanie 350°C przez 4 godziny, a następnie powolne chłodzenie.</li> <li>- Wysoka wartość przewodnictwa 60% IACS.</li> <li>- Kompromis pomiędzy wytrzymałością mechaniczną i przewodnością elektryczną.</li> <li>- Możliwość wykonywania przewodów o małych przekrojach.</li> </ul>
Hartowanie i obróbka cieplna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zwiększona wytrzymałość na rozciąganie 240 MPa.</li> <li>- Przewodność elektryczna 40% IACS.</li> </ul>
Gaszenie oparte na stopie Al-Fe	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wytrzymałość na rozciąganie większa niż 110 MPa.</li> <li>- Przewodność elektryczna większa niż 58% IACS.</li> </ul>

Dla przewodów elektrycznych, wymagana jest przewodność aluminium na poziomie nie mniejszym niż 60% w stosunku do przewodów z miedzi wyżarzanej (wartość odniesienia). Precyzuje to międzynarodowy standard IACS [11].

Poniższe równanie (1) pokazuje obliczenia parametru IACS, gdzie jako  $k_{Al}$  jest oznaczona przewodność aluminium w MS/m. Parametr  $k_{Cu}$  jest wyrażony jako przewodność miedzi (58,0 MS/m).

$$(1) \quad IACS = \frac{k_{Al}}{k_{Cu}} * 100\%$$

Według normy ASTM B-398 [12] przewodnictwo aluminium powinno wynosić nie mniej niż 52,5% IACS. Oznacza to, że aluminium może zawierać niewielkie ilości innych pierwiastków, takich jak żelazo i krzem, aby osiągnąć wzmocnienie mechaniczne. Inną możliwością wzmocnienia przewodu jest skrócenie przewodu przez stalowy rdzeń.

Badania mechaniczne przewodów aluminiowych wykazały, że są one mniej odporne na wibracje i gięcie [3].

## 7. Przykład zastosowania przewodów aluminiowych w instalacji elektrycznej współczesnego pojazdu wyższej klasy

Na podstawie danych z literatury i materiałów z seminariów eksperckich opracowano teoretycznie porównanie instalacji elektrycznej zabudowanej w oparciu o przewody miedziane i aluminiowe. Wykorzystano dane techniczne z serwisu A2MAC1 [13] opisujące instalację elektryczną rzeczywistego pojazdu BMW 750i 4.4 xDrive. Na podstawie danych pojazdu oraz po uwzględnieniu uwarunkowań technologicznych i środowiskowych (zwłaszcza elastyczność i zmienność temperatur z miejsca zabudowy wiązki) wytypowano wiązki elektryczne które

mogą zostać wykonane w oparciu o przewody aluminiowe. To pozwoliło porównać masę wiązek elektrycznych oraz masę elementów mocujących. Podczas tej klasyfikacji wzięto pod uwagę konstrukcję i rozmieszczenie poszczególnych wiązek w odniesieniu do wymaganych parametrów elektrycznych i fizycznych.

Masę instalacji aluminiowej obliczono na podstawie danych z tabeli 2. Nie wszystkie wiązki elektryczne można zastąpić odpowiednikami aluminiowymi, dlatego w tabeli 7 oznaczono te wiązki jako BZ (Bez zastosowania). Są to wiązki, które narażone są na ruchy mechaniczne i są zastosowane w miejscach, gdzie mogą być narażone na szkodliwe czynniki atmosferyczne czy zbyt duże amplitudy temperatur. Po przeanalizowaniu masy poszczególnych wiązek określono sumaryczną masę instalacji elektrycznej zbudowanej z wykorzystaniem przewodów aluminiowych i miedzianych.

Tabela 7. Porównanie instalacji elektrycznej zbudowanej w oparciu o przewody miedziane z proponowaną instalacją zbudowaną w oparciu o przewody aluminiowe

Typ wiązki	Masa elementów mocujących [kg]	Masa wiązek miedzianych [kg]	Masa wiązek aluminiowych [kg]
Wiązka przewodów nadwozia	0,177	28,937	11,681
Wiązka silnika	0,090	3,743	BZ
Wiązka przyrodziowa	0,003	1,453	0,583
Wiązka sterownika BCM	0	0,354	BZ
Wiązka konsoli centralnej	0	0,369	0,148
Wiązka konsoli tylnej	0	0,025	BZ
Wiązka koła kierownicy	0	0,046	BZ
Wiązka części tylnej nadwozia	0	0,055	BZ
Wiązka układu poduszek powietrznych	0	0,029	BZ
Wiązki układów sensorycznych nadwozia	0,001	0,082	BZ
<b>Łączna masa</b>	<b>0,271</b>	<b>35,093</b>	<b>12,412</b>
<b>Łączna masa wiązek[kg]</b>		<b>35,093</b>	<b>16,967</b>

Masa wiązek elektrycznych w przypadku instalacji miedzianej wynosi ok. 35kg. Wykorzystując wiązki aluminiowe masę kompletnej instalacji można zredukować do poziomu około 17kg. Objętość wiązek wzrasta, ponieważ średnica przewodów aluminiowych wzrasta po zastosowaniu przewodów aluminiowych.

Główna wiązka montowana w podwoziu nie jest narażona na ruch i wibracje, dlatego może zostać wykonana w oparciu o przewody aluminiowe. Dodatkowo wiązka ta montowana jest w kabinie pasażerskiej przez co nie jest narażona na szkodliwy wpływ czynników atmosferycznych.

## 8. Podsumowanie

Przewody aluminiowe oprócz wielu wad posiadają dwie bardzo istotne zalety. Pierwszą zaletą jest koszt surowca, który jest niższy w stosunku do miedzi. Obecnie budowane instalacje elektryczne zawierają wiele wiązek elektrycznych w których zastosowanie przewodów miedzianych znacząco zwiększa koszt kompletnej instalacji.

Do zalet przewodów aluminiowych zaliczyć można przede wszystkim niższą masę w porównaniu do przewodów miedzianych przy tej samej obciążalności prądowej długotrwałej. Zaleta ta pozwala ograniczyć masę kompletnej instalacji co jest bardzo ważnym aspektem w pojazdach klasy średniej i wyższej, gdzie masa instalacji istotnie wpływa na sumaryczną masę pojazdu.

Przewody aluminiowe posiadają wiele wad, które skutkują tym, że instalacje aluminiowe nie są nadal rozpowszechnione w przemyśle motoryzacyjnym. Przewody aluminiowe są bardziej podatne na uszkodzenia mechaniczne, dlatego należy je stosować w miejscach, gdzie wiązki elektryczne nie są narażone na ruch i wibracje.

Ze względu problemy w procesie krimpowania (zaciskania) kontaktów, konektory należy łączyć z przewodami w procesie lutowania bądź spawania. Przewody aluminiowe podczas kontaktu z elektrolitem mogą ulec korozji. Ogranicza to zastosowanie tych przewodów w komorze silnika, gdzie panują niesprzyjające warunki atmosferyczne.

Stosowanie stopów aluminium wpływa na polepszenie parametrów mechanicznych, ale negatywnie wpływa na elektryczne. Rozwój inżynierii materiałowej w najbliższym czasie może pozwolić na polepszenie parametrów elektrycznych i fizycznych przewodów aluminiowych, jednak obecnie przewody aluminiowe nie są powszechnie stosowane do budowy kluczowych wiązek elektrycznych w pojazdach samochodowych.

**Autor:** mgr inż. Bartłomiej Tworek, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: [bartlomiej.tworek@polsl.pl](mailto:bartlomiej.tworek@polsl.pl)

dr inż. Rafał Setlak, Politechnika Śląska, Instytut Elektrotechniki i Informatyki, Zakład Maszyn Elektrycznych i Inżynierii Elektrycznej w Transporcie, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: [rafal.setlak@polsl.pl](mailto:rafal.setlak@polsl.pl)

## LITERATURA

- [1] Pavlovic J., Tansini A., *The Impact of WLTP on the Official Fuel Consumption and Electric Range of Plug-in Hybrid Electric Vehicles in Europe*, SAE International 2017, 09/04/2017,
- [2] Dornoff J., Miller J., *The European Commission regulatory proposal for post-2020 CO2 targets for cars and vans: A summary and evaluation*, ICCT 2018,
- [3] Babel G., *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*, Springer, Dortmund 2014,
- [4] Babel G., *Bordnetze und Powermanagement*, Springer, Dortmund 2013,
- [5] Okada A., *Innovative Materials for Automotive Industry*, Nova Science Publishers, Tokyo 2010,
- [6] Bertsche B., *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*, VDI, Stuttgart 2009,
- [7] Sumioka T., *Review of Automotive Engineering JSAE Vol.29*, JSAE, Tokyo 2007,
- [8] Drake N., *Thermoplastics and Thermoplastic Composites in the Automotive Industry*, RAPRA, Shawbury 1998,
- [9] Mellard T., *Automotive Electronic Systems*, Newnes, Bodmin 2014,
- [10] Lipowsky H., *Copper in the automotive industry*, Wiley, Berlin 2007,
- [11] Copper wire tables, <http://www.archive.org/stream/copperwiretables31unitoft#page/n5/mode/2up>
- [12] ASTM B398, <https://www.astm.org/Standards/B398.htm>
- [13] A2MAC1, <http://portal.a2mac1.com>