CC BY NC ND

Badania własności eksploatacyjnych nowej generacji kolejowych nakładek stykowych do pantografów. Część I

Paweł KWAŚNIEWSKI[1], Krystian FRANCZAK[1], Grzegorz KIESIEWICZ[1], Tadeusz KNYCH[1], Andrzej MAMALA[1], Artur KAWECKI[1], Szymon KORDASZEWSKI[1], Wojciech ŚCIĘŻOR[1], Radosław KOWAL[1], Artur ROJEK[2], Wiesław MAJEWSKI[2], Marek KANIEWSKI[2], Roman MAJNUSZ[3], Romuald WYCISK[3], Michał ŚLIWKA[3]

Streszczenie
System dostarczania energii elektrycznej do kolejowych pojazdów trakcyjnych jest realizowany przez bezpośredni kontakt przewodów jezdnych z nakładkami stykowymi, w które wyposażony jest pantograf elektrowozu. Zgodnie ze specyfikacją interoperacyjności TSI Loc&Pas, w 2011 r. wycofano w Polsce dotychczas stosowane miedziane nakładki stykowe oraz wprowadzono nakaz stosowania węglowych nakładek stykowych. Ze względu na brak krajowych rozwiązań przeznaczonych do kolejowych sieci trakcyjnych zasilanych prądem stałym o napięciu 3 kV, adaptowano zagraniczne rozwiązania. Nakładki stykowe mogą być eksploatowane w polskich liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A., jeśli spełnią wiele wymagań dotyczących ich własności eksploatacyjnych. W pierwszej części artykułu opisano badania węglowych nakładek stykowych nowej generacji firmy Carbo-Graf, przeprowadzonych zgodnie z normą EN 50405:2006, którą wyszczególniono w dokumencie TSI Loc&Pas (Rozporządzenie Komisji UE nr 1302/2014).

Słowa kluczowe: węglowe nakładki stykowe, kompozyty węglowe, pantograf, kolej, sieć trakcyjna

1. Wstęp

Obserwowany w ostatnich latach rozwój infrastruktury kolejowej w Polsce jest podyktowany stałym zwiększeniem komfortu jazdy pasażerów przy skróconym czasie przejazdu oraz wzrostem tonażu transportowanych towarów przez tabor kolejowy. Przesył energii elektrycznej z sieci trakcyjnej do elektrowozów jest realizowany przez bezpośredni kontakt przewodów jezdnych z nakładkami stykowymi pantografu. Sprawność przesyłu energii elektrycznej w sieci trakcyjnej kolejowej zależy od jakości nakładek stykowych, przewodów jezdnych, lin nośnych oraz zastosowanych elementów osprzętu sieciowego [2, 4, 3, 6, 7, 8]. W Polsce, od 2011 roku wprowadzono obowiązek stosowania węglowych nakładek stykowych, wycofując jednocześnie z eksploatacji miedziane nakładki stykowe. Ze względu na brak krajowych rozwiązań dostosowanych do warunków panujących na polskich liniach kolejowych, gdzie trakcja jest zasilana prądem stałym o napięciu 3 kV, zaadaptowano zagraniczne nakładki stykowe, które są dostosowane do tamtejszych warunków sieci na prąd przemienny o napięciu 15/25 kV [5]. Obecnie eksploatowane węglowe nakładki stykowe powodują pewne problemy eksploatacyjne, zakłócając przesył energii elektrycznej w sieci trakcyjnej. Do najczęstszych problemów podczas eksploatacji węglowych nakładek stykowych zalicza się między innymi: wykruszanie i wyłamywanie materiału węglowego, nadtopienia profili nośnych spowodowane przeskokiem łuku elektrycznego, nierównomierne zużycie listew węglowych wynikające z nieprawidłowego montażu nakładek na ślizgaczu pantografu [11].

Nakładki stykowe eksploatowane na liniach z trakcją elektryczną, których zarządcą jest PKP PLK S.A, muszą spełniać wiele wymagań zapisanych w dwóch dokumentach: TSI Loc&Pas (Rozporządzenie Komisji UE nr 1302/2014) [10] oraz „Lista Prezesa UTK w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań do-

[1] Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Metali Nieżelaznych, Kraków; e-mail: kwas@agh.edu.pl.
[2] Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki, Warszawa.
[3] Carbo-Graf, Sp. z o.o., Racibórz.

tyczących interoperacyjności" z dnia 19.01.2017 roku (dokument dotyczący nakładek stykowych – załącznik TE-1) [9, 12]. Zgodnie z dokumentem TSI Loc&Pas, należy przeprowadzić ocenę węglowych nakładek stykowych zgodnie z normą EN 50405:2006 [1], która w punktach: 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4, 5.2.6 i 5.2.7 (przywołanych w TSI Loc&Pas) definiuje następujący sposób przeprowadzania testów i badań:

- 5.2.2 – Badania deformacji i wydłużania nakładek stykowych pod wpływem skrajnych temperatur (–40°C – maksymalna temperatura pracy nakładki stykowej);
- 5.2.3 – Badania nakładki stykowej pod kątem charakterystyki jej zginania przy zadanej sile;
- 5.2.4 – Badania wytrzymałości na ścinanie połączenia kompozyt węglowy – aluminiowy profil nośny nakładki stykowej;
- 5.2.6 – Badania odporności zmęczeniowej nakładki stykowej;
- 5.2.7 – Badania rezystancji elektrycznej nakładki stykowej.

W pierwszej części artykułu przedstawiono badania nakładek stykowych firmy Carbo-Graf, które wykonano zgodnie z normą EN 50405:2006.

2. Metodyka badań

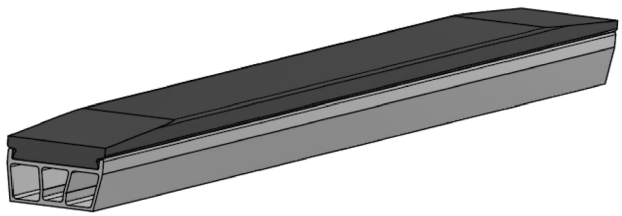
Przedmiotem badań były trzy typy węglowych nakładek stykowych, produkcji firmy Carbo-Graf Sp. z o.o. z Raciborza, wytwarzanych w różnych technologiach impregnowania metalem kompozytu węglowego, których cechy przedstawiono w tablicy 1, natomiast model nakładki stykowej pokazano na rysunku 1. Badania nakładek stykowych przeprowadzono w laboratorium Wydziału Metali Nieżelaznych w Katedrze Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Tablica 1

Charakterystyki badanych nakładek stykowych

Typ nakładki stykowej	Typ kompozytu węglowo-metalicznego	Szacowana zawartość metalu w kompozycie węglowo-metalicznym
F20E10 SCu	Nasycany ciekłą miedzią	35–39% wt.
F20E10 20SCu	Nasycany ciekłą miedzią z dodatkiem proszku miedzi	35–39% wt. (w równych częściach)
F20E10 Cu40	Z dodatkiem proszku miedzi	39% wt.

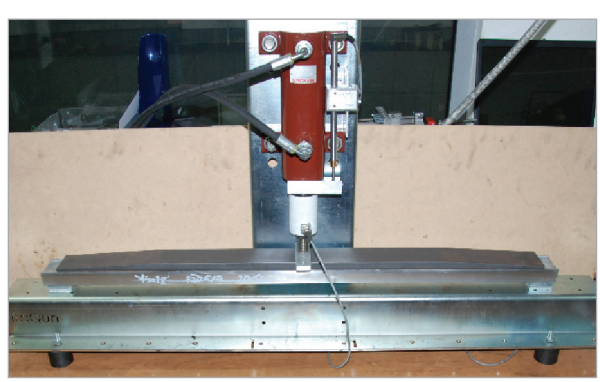
[Opracowanie własne]



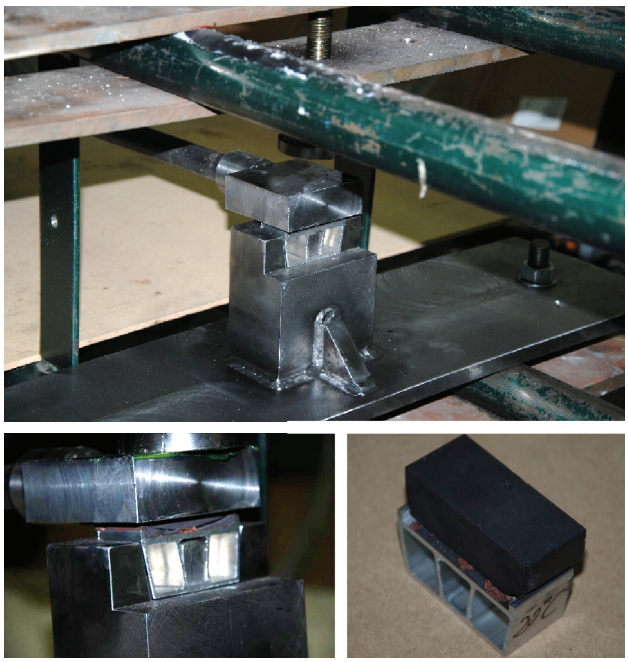
Rys. 1. Model 3D badanej nakładki stykowej firmy Carbo-Graf [opracowanie własne K. Franczak]

Zgodnie z punktem 5.2.2 normy EN 50405:2006 przeprowadzono badania deformacji nakładki stykowej pod wpływem skrajnych temperatur. W tym punkcie norma nie określa żadnych kryteriów, lecz nakazuje wyznaczenie skrajnych temperatur roboczych: ujemnej wynoszącej –40°C oraz dodatniej 200°C, zgodnie z wartością podaną przez producenta, przy których następuje rozerwanie połączenia listwy węglowej i profilu nośnego. Do badań wykorzystano komorę klimatyczną, w celu obniżenia temperatury do –40°C oraz pręty grzewcze w celu ogrzania nakładki stykowej do 200°C.

Wyznaczenie charakterystyki ugięcia nakładki stykowej przeprowadzono na specjalistycznym stanowisku wyposażonym w czujnik siły typu EMS-150-50 kN oraz czujnik drogi HBM WAL 50, aby wyznaczyć charakterystykę siły w funkcji przemieszczenia (rys. 2). Testy wyznaczenia charakterystyki ugięcia przeprowadzono na nakładce stykowej jednego typu ze względu na identyczne geometrie profilu nośnego i kompozytu węglowego dla każdego typu nakładki. Pomiar wytrzymałości na ścinanie nakładek stykowych wykonano na maszynie wytężeniowej wyposażonej w czujnik siły EMS-150-50 kN oraz w oprzyrządowanie do mocowania próbek nakładek stykowych. Profil nakładki stykowej mocowano w oprzyrządowaniu, natomiast siłę zadawano przez kompozyt węglowy, zgodnie z normą EN 50405:2006 pkt. 5.2.3 (rys. 3). W normie podano kryterium, iż połączenie w nakładce stykowej powinno wynosić minimum 5 MPa w temperaturze pokojowej (20°C). Dodatkowo należy wyznaczyć wytrzymałość na ścinanie nakładek stykowych w następujących temperaturach: –40°C, 100°C, 200°C i 250°C.

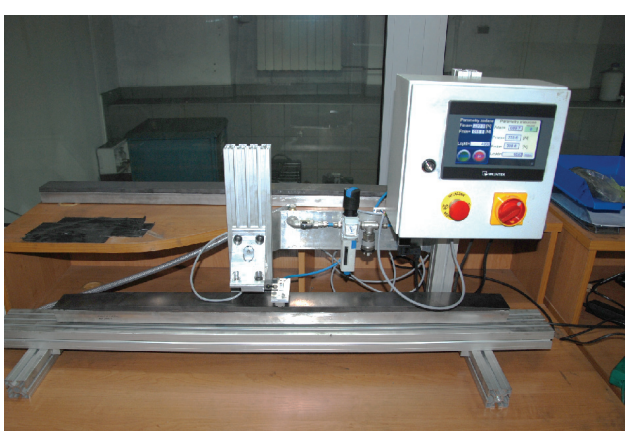


Rys. 2. Widok stanowiska do wyznaczania charakterystyki ugięcia nakładek stykowych [fot. K. Franczak]



Rys. 3. Widok stanowiska do badań wytrzymałości na ścinanie nakładek stykowych [fot. K. Franczak]

Badania odporności zmęczeniowej nakładki stykowej nowej generacji przeprowadzono zgodnie z normą EN 50405:2006, która zakłada 11,2 mln cykli obciążeń, wywołanych w centralnym miejscu nakładki stykowej. Pierwszą część badań (1,2 mln cykli) należy przeprowadzić z maksymalną siłą min. 220 N, natomiast minimalna siła po odciążeniu nakładki powinna wynosić max 15 N. W drugiej części badań, nakładkę stykową należy poddać 10 mln dodatkowych cykli z maksymalną siłą min. 160 N oraz minimalną max 15 N. Badania wykonano za pomocą specjalistycznego urządzenia do badań zmęczeniowych nakładek stykowych (rys. 4).



Rys. 4. Widok stanowiska do badań odporności zmęczeniowej nakładki stykowej [fot. K. Franczak]

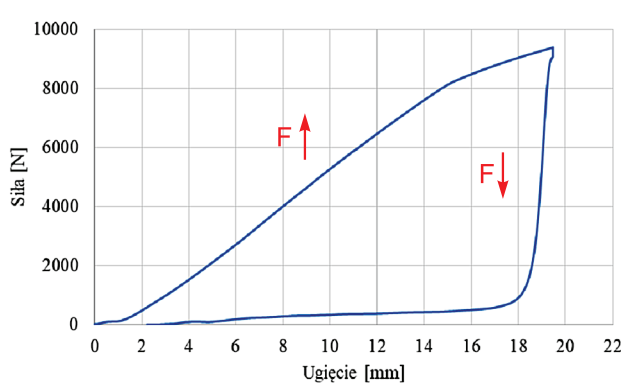
Ostatnim testem opisanym w pierwszej części artykułu były badania rezystancji przejścia nowej generacji nakładek stykowych, które przeprowadzono zgodnie z pkt. 5.2.7 normy EN 50405:2006. Badania przeprowadzono przez przyłożenie sondy pomiarowej do powierzchni listwy węglowej przy nacisku nakładki stykowej 110 N (zgodnie ze statycznymi warunkami sieciowymi). Pomiar rezystancji przejścia wykonano przy przepływie prądu 4 A, 6 A oraz 10 A. Wynikiem badania jest średnia z poszczególnych pomiarów. Norma w tym punkcie nie określa żadnych kryteriów, natomiast należy wyznaczyć rezystancje przejścia układu listwa węglowa – połączenie adhezyjne – aluminiowy profil nośny.

3. Wyniki i analiza badań

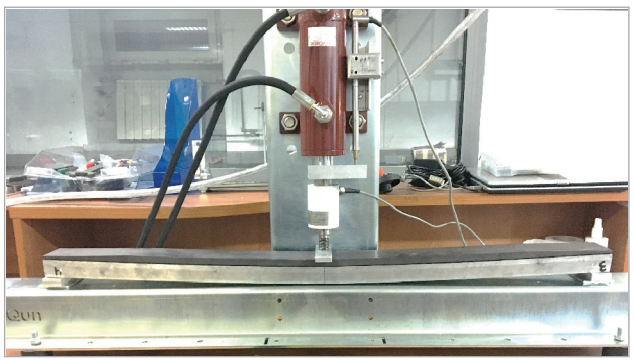
W artykule przedstawiono wybrane przykłady badań nakładek stykowych, które są podstawą do ich dopuszczenia do eksploatacji na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A.

Badania deformacji i wydłużania nakładek stykowych pod wpływem skrajnych temperatur wykazały, iż w wyniku nagrzewania dwóch różnych materiałów połączonych ze sobą przez połączenie adhezyjne, deformacja wyniosła 6,5 mm. Badania nagrzewania nakładek węglowych wykazały, że przy temperaturach w granicach od 125°C do 135°C rozpoczyna się stopniowy proces odklejania listwy węglowej od profilu nośnego. W przypadku ochładzania nakładek stykowych do temperatury –40°C badania wykazały, że strzałka ugięcia wyniosła 2,5 mm w kierunku przeciwnym niż w przypadku temperatur dodatnich.

Badania wyznaczenia charakterystyki, którą zaprezentowano na rysunku 5 wykazały, iż nakładka stykowa typu F20E10 Cu40 poddana testom przy zadanej sile ponad 9,3 kN nie uległa zniszczeniu, a połączenie kompozyt węglowy – profil nośny pozostało nienaruszone. Maksymalne ugięcie nakładki stykowej wyniosło 19,47 mm. Przy wartości 8,1 kN nastąpiło trwałe odkształcenie plastyczne aluminiowego profilu nośnego. Po odciążeniu układu, stała deformacja nakładki wyniosła 2,22 mm. Widok nakładki stykowej pod obciążeniem 9,3 kN przedstawiono na rysunku 6.

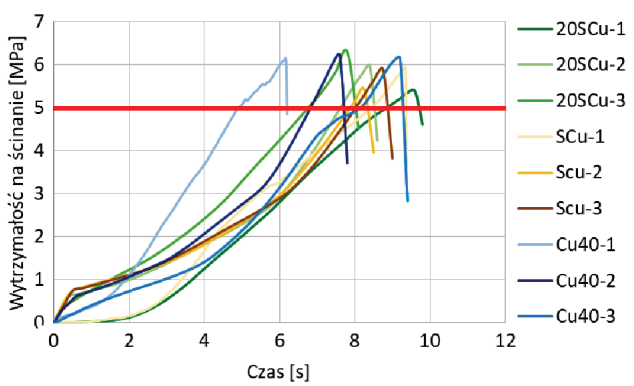


Rys. 5. Charakterystyka siły w funkcji ugięcia nakładki stykowej typ F20E10 Cu40 [opracowanie własne]



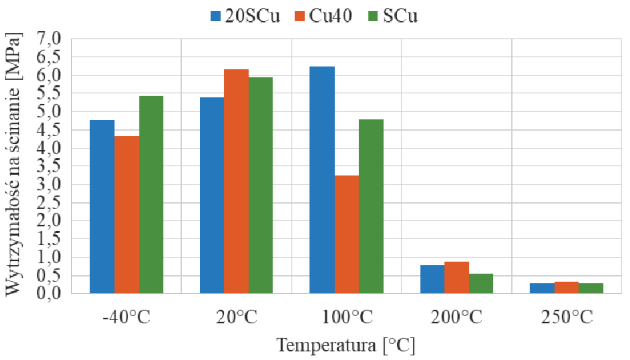
Rys. 6. Widok nakładki stykowej pod maksymalnym obciążeniem 9,3 kN [fot. K. Franczak]

Badanie wytrzymałości połączenia kompozyt węglowy – aluminiowy profil nośny przeprowadzono zgodnie z normą EN 50405:2006 pkt. 5.2.4. Badania wykonano za pomocą czujnika siły o dokładności 0,01% skonfigurowanego z urządzeniem pomiarowym Spider8. Do testów wykonano próbki o długości 30 mm, natomiast szerokość połączenia kompozytu węglowego z profilem nośnym wynosiła 60 mm. Badania wykonano na trzech typach nakładek stykowych, tj.: F20E10 SCu, F20E10 20SCu i F20E10 Cu40. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań wytrzymałości na ścinanie nakładek stykowych.



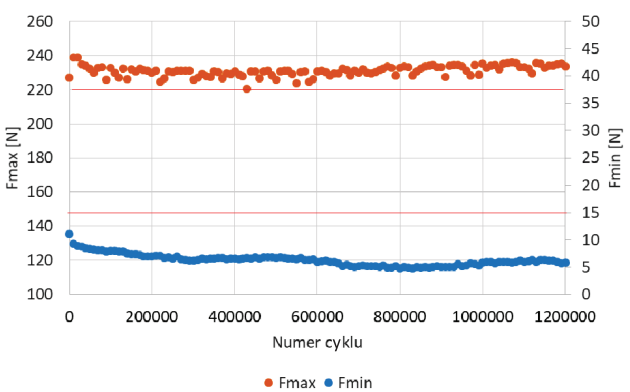
Rys. 7. Charakterystyki wytrzymałości na ścinanie nakładek stykowych w temperaturze otoczenia (20°C) [opracowanie własne]

Z przeprowadzonych badań wytrzymałości na ścinanie nakładek stykowych typu F20E10 SCu, F20E10 20SCu i F20E10 Cu40 wynika, iż wszystkie nakładki cechują się wytrzymałością na ścinanie na poziomie powyżej 5 MPa, a więc spełniają kryterium zapisane w normie EN 50405:2006. Na rysunku 8 przedstawiono zbiorcze zestawienie wytrzymałości na ścinanie nakładek w następujących temperaturach: –40°C, 100°C, 200°C i 250°C.

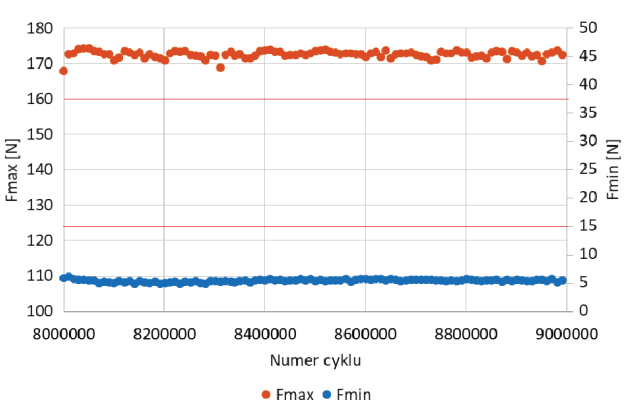


Rys. 8. Zestawienie wytrzymałości na ścinanie nakładek stykowych w różnych temperaturach [opracowanie własne]

Badania odporności zmęczeniowej nakładki stykowej nowej generacji wykazały, iż podczas pierwszej części badań 1,2 mln cykli z siłą maksymalną min. 220 N (rys. 9) nie stwierdzono uszkodzeń badanych konstrukcji. W drugiej części badań nakładka stykowa była poddana 10 mln dodatkowych cykli z maksymalną siłą min. 160 N (rys. 10), z których wynika, że sumaryczne 11,2 mln cykli nie spowodowało uszkodzeń struktury nakładki stykowej.



Rys. 9. Charakterystyka I etapu badań odporności zmęczeniowej nakładki stykowej (1,2 mln cykli) [opracowanie własne]



Rys. 10. Przykładowa charakterystyka II etapu badań odporności zmęczeniowej nakładki stykowej (8–9 mln cykli) [opracowanie własne]

Zgodnie z pkt. 5.2.7 normy EN 50405:2006 wyznaczono rezystancję przejścia dla nakładek różnego typu wytworzonych w ramach projektu. Dla nakładki typu SCu rezystancja przejścia przez cały układ tzn. listwę węglową, połączenie adhezyjne i aluminiowy profil nośny wynosi średnio 63,4 mΩ, nakładki stykowej typu 20SCu 130,9 mΩ oraz nakładki stykowej Cu40 79,5 mΩ.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono badania właściwości eksploatacyjnych nakładek stykowych nowej generacji firmy Carbo-Graf, wykonanych zgodnie z dokumentem TSI Loc&Pas (Rozporządzenie Komisji UE nr 1302/2014) odwołującym się do normy EN 50405:2006. Wymieniony dokument normatywny jest jednym z dwóch, które dają podstawę do dopuszczenia do eksploatacji nakładek stykowych na liniach kolejowych zarządzanych przez PKP PLK S.A. Nakładki stykowe firmy Carbo-Graf typu: F20E10 SCu, F20E10 20SCu i F20E10 Cu40 spełniają kryteria dotyczące ich właściwości.

Literatura

1. EN 50405:2006: Railway applications – Current collection systems – Pantographs, testing methods for carbon contact strips.
2. Jarzębowicz L., Judek S.: *Monitoring i diagnostyka nakładek stykowych kolejowych odbieraków prądu z wykorzystaniem systemu wizyjnego 3D,* Przegląd Elektrotechniczny, 2013, z. 8.
3. Judek S., Jarzębowicz L.: *Analysis of Measurement Errors in Rail Vehicles' Pantograph Inspection System,* // Elektronika Ir Elektrotechnika – Vol. 22, iss. 3 (2016), s. 20–23.
4. Judek S., Skibicki J.: *Visual method for detecting critical damage in railway contact strips,* Measurement Science & Technology. – Vol. 29, iss. 5 (2018), s. 1–8.
5. Kaniewski M.: *Nakładki węglowe – budowa, badania oraz wdrożenie w sieci Polskich Kolei Państwowych*, Elektrotechnika w zastosowaniach trakcyjnych, Wydawnictwo PK, Kraków, 2014.
6. Kiesiewicz G.: *Nowoczesny system podwieszenia kolejowej górnej sieci trakcyjnej*, Wydawnictwo Impuls, Kraków, 2018.
7. Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A.: *Conatct Lines for Electric Railways,* Publicis Corporate Publisching, Third edition, Monachium, 2018.
8. Kwaśniewski P.: *Nośno-przewodzący osprzęt górnej sieci trakcyjnej*, Kraków, Wydawnictwo Wzorek, 2016.
9. Lista Prezesa UTK w sprawie właściwych krajowych specyfikacji technicznych i dokumentów normalizacyjnych, których zastosowanie umożliwia spełnienie zasadniczych wymagań dotyczących interoperacyjności z dnia 19.01.2017 r.
10. Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „*Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski*" systemu kolei w Unii Europejskiej.
11. Sitarz M., Adamiec A., Mańka A.: *Uszkodzenia węglowych nakładek stykowych pantografów kolejowych stosowanych w Polsce*, TTS Technika Transportu Szynowego, r 2016, z. 1–2.
12. Załącznik TE-1 do Listy Prezesa UTK „Wymagania dla nakładek ślizgowych pantografów".

Opisane badania wykonano w ramach realizacji projektu dofinansowanego przez NCBiR z programu PBS3/B5/49/2015. Wkład poszczególnych autorów:

dr hab. inż. Paweł Kwaśniewski, prof. AGH – metodologia badawcza, analiza wyników badań,
mgr inż. Krystian Franczak – wykonanie badań, analiza wyników badań,
dr inż. Grzegorz Kiesiewicz – analiza literaturowa, tłumaczenie manuskryptu,
prof. dr hab. inż. Tadeusz Knych – metodologia badawcza, analiza wyników badań,
dr hab. inż. Andrzej Mamala, prof. AGH – metodologia badawcza, analiza wyników badań,
dr hab. inż. Artur Kawecki, prof. AGH – metodologia badawcza, tłumaczenie manuskryptu,
mgr inż. Szymon Kordaszewski – wykonanie badań,
dr inż. Wojciech Ściężor – analiza literaturowa,
mgr inż. Radosław Kowal – wykonanie badań,
dr inż. Artur Rojek – wykonanie badań,
mgr inż. Wiesław Majewski – wykonanie badań,
mgr inż. Marek Kaniewski – wykonanie badań
Roman Majnusz – wytworzenie materiałów do badań,
Romuald Wycisk – wytworzenie materiałów do badań,
inż. Michał Śliwka – wytworzenie materiałów do badań.