

Prof. dr hab. inż. Tomasz Węgrzyn  
Katedra Ruchu Drogowego  
Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej  
Politechnika Śląska  
ul. Krasińskiego 8  
40-019 Katowice  
e-mail: Tomasz.Wegrzyn@polsl.pl

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Radosława Pawłowskiego**

**nt.**

**„Opracowanie technologii kompozytu na bazie nanoproszku srebra do  
wytwarzania warstwy metalicznej na elementach zestykowych  
aluminiowych i miedzianych”**

### **1. Podstawa opracowania**

Niniejsza recenzja została opracowana na podstawie prośby zawartej w piśmie od Pana Dziekana Wydziału Mechatroniki w Politechnice Warszawskiej, z dnia 03.XII 2021 r.

### **2. Uwagi wstępne**

W czasach globalizacji obserwuje się stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną. Według Międzynarodowej Agencji Energii zapotrzebowanie na energię elektryczną do roku 2030 wzrośnie o około 30%. Będzie to efektem kilku ważnych czynników, takich jak rozwój gospodarczy, wzrost liczby ludności na ziemi (do 9 mld), rosnącej elektryfikacji przemysłu i domów mieszkalnych, postępującej urbanizacji. Aby sprostać zwiększonemu zapotrzebowaniu na energię elektryczną zostaną poniesione duże nakłady inwestycyjne w postaci budowy nowych elektrowni, rozbudowy istniejących elektrowni i ich ciągłej modernizacji. Zarówno modernizacja i budowa nowych elektrowni wiąże się z koniecznością usprawniania określonych komponentów. Jednym z nich są szynoprzewody, których ważną częścią są elementy zestykowe, którymi zajmuje się Doktorant.

Szynoprzewody służą do wyprowadzenia mocy z generatorów do transformatorów blokowych w elektrowniach. Szynoprzewody przewodzą prąd o bardzo wysokich parametrach, dochodzących nawet do 20 kV i 20 kA i więcej.

Szynoprzewody eksploatowane są w różnych warunkach otoczenia (w zakresie temperatur od -50° C do +50 °C) i zawsze muszą działać bezawaryjnie i bezobsługowo. Koszt

ewentualnego nieplanowanego postoju bloku energetycznego w elektrowni (na który składają się utracone korzyści jak również koszty usunięcia usterki) jest bardzo wysoki. W przypadku bloków o mocach znamionowych do 500 MW kwoty te wynoszą do 2 mln PLN netto na każdy dzień postoju bloku.

Do najważniejszych usterek występujących przy eksploatacji szynoprzewodów można zaliczyć pęknięcia spoin występujące pod wpływem naprężeń oraz usterki związane z prawidłowym działaniem elementów zestykowych. Szynoprzewody wykonane są najczęściej ze stopów aluminium, natomiast elementy zestykowe wytwarzane są zarówno z aluminium jak i miedzi. Głównym procesem przy produkcji i montażu szynoprzewodów są procesy spawalnicze. Opracowywane są wciąż nowe procesy spawalnicze, które pozwalają na obniżenie strat na mostach prądowych poprzez poprawę przewodności elektrycznej spoin nawet do 30 MS/m, czyli porównywalnych wartości do przewodności stopów aluminium. Równocześnie powinny być prowadzone działania pozwalające na poprawę jakości i trwałości elementów zestykowych, do których można zaliczyć osiągnięcia naukowe Doktoranta przedstawione w rozprawie doktorskiej i w jego licznych prestiżowych publikacjach naukowych.

Z uwagi na skłonność do pasywacji miedzianych i aluminiowych powierzchni zestykowych szynoprzewodów dochodzi często do awarii, których skutkiem jest przerwanie dostaw prądu. Wychodząc naprzeciw oczekiwaniom przemysłu została opracowana przez Doktoranta innowacyjna wielkoskalowa technologia wytwarzania warstw srebrowych na elementach zestykowych szynoprzewodów. Technologia ta wpływa bezpośrednio na poprawę właściwości elektrycznych złączy szynoprzewodu (mostu szynowego) i powinna gwarantować znacznie wydłużony czas bezawaryjnej eksploatacji szynoprzewodów.

Podjęcie przez Doktoranta badań nad efektami alternatywnej i autorskiej technologii wytwarzania warstw srebrowych na elementach zestykowych aluminiowych i miedzianych, za pomocą autorskiego opracowanego kompozytu na bazie nanoproszku srebra, jest zrozumiałe i w pełni uzasadnione. Dlatego też tematykę rozprawy i jej zakres należy ocenić jako aktualne, stanowiące ważny krok na drodze poprawy w projektowaniu elementów szynoprzewodów.

### **3. Charakterystyka i ocena rozprawy**

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Radosław Pawłowski podjął próbę opracowania technologii kompozytu na bazie nanoproszku srebra do wytwarzania warstwy metalicznej na elementach zestykowych aluminiowych i miedzianych elementów zestykowych w szynoprzewodach. Metoda srebrzenia z wykorzystaniem nanoproszku srebra zaproponowana przez Doktoranta stanowi alternatywę w stosunku do obecnie stosowanych metod galwanicznych pokrywania elementów zestykowych szynoprzewodów.

Rozprawa podzielona jest na 12 rozdziałów, całość liczy 183 strony, zawiera spis literatury obejmujący 117 aktualnych pozycji. Układ rozprawy jest prawidłowy, typowy dla tego rodzaju opracowań, tzn. składa się z przeglądu literatury, przeprowadzenia badań rozpoznawczych, postawienia celu i wykonaniu badań zasadniczych, dokładnego opisu

przeprowadzonych badań, opracowania ich wyników, precyzyjnego podsumowania wraz z wnioskami. W rozprawie można zauważyć racjonalne zaplanowanie eksperymentu, jak również staranne i dokładne opracowanie uzyskanych wyników badań rzeczywistych.

**W rozdziale 1.** pt. „Wprowadzenie” zawarto opis dotyczący roli jaką spełniają elementy zestykowe szynoprzewodów. Autor podaje wady dotychczas stosowanej metody galwanicznej. Uzasadnia potrzebę badań prowadzących do zmian i opracowania nowej metody pozwalającej na skuteczniejszą i trwalszą ochronę elementów zestykowych szynoprzewodów. Dobrze wykonana ochrona ma zasadniczy wpływ na eliminację strat na mostach prądowych.

**W rozdziale 2.** pt. „Cel i zakres pracy” Autor wyjaśnił, że przedmiotem badań zawartych w rozprawie jest opracowanie kompozytu srebrowego oraz wytworzenia powłok srebrowych na elementach zestykowych szynoprzewodów. Za cel pracy Autor uznał opracowanie składu kompozytu srebrowego, metody jego aplikacji oraz parametrów i sposobu spiekania warstw i ścieżek srebrowych. Proces badawczy podzielono na dwa obszary. W pierwszym z nich było opracowanie metody otrzymywania nanoproszku srebra na skalę przemysłową. Drugim etapem było opracowanie kompozytu w postaci półpłynnej pasty oraz zbadanie właściwości mechanicznych i elektrycznych warstw srebrowych na elementach zestykowych pokrytych nowo opracowanym materiałem przy użyciu autorskiej technologii. Autor opisał dokładnie metody i etapy badań prowadzące do realizacji celu pracy.

**W rozdziale 3.** pt. „Metody wytwarzania i aplikacji nanoproszku srebra na podstawie analizy literaturowej” Autor scharakteryzował dokładnie metody fizyczne i chemiczne wytwarzania nanocząstek. Opisał metody otrzymywania nanocząstek srebra i tworzenia kompozytu na bazie nanocząstek srebra.

**W rozdziale 4.** pt. „Opracowanie wielkoskalowej technologii wytwarzania nanoproszku srebra” Autor postanowił zastosować fizyczną metodę termicznej redukcji prekursora w celu pozyskiwania nanocząstek srebra. Wykonał i scharakteryzował różne prekursory srebra, które laboratoryjnie wykonał: kaprylan srebra, pelargonian srebra, laurynian srebra, palmitynian srebra, stearynian srebra. Zamieszczono dokumentację zdjęciową, w tym obrazy SEM dla każdego prekursora. Wykonano pomiary kalorymetryczne i termogravimetryczne DSC-TG. Analizowano widmo FTIR dla palmitynianu srebra w celu sprawdzenia poprawności reakcji syntezy badanego prekursora nanoproszku srebra. Badania wykonano ze względu na najkorzystniejsze charakterystyki, które zauważono w badaniach termogravimetrycznych. Udowodniono, że liczba płukań otrzymywanego prekursora ma wpływ na zawartość metalicznego srebra w prekursorze. Podobne obserwacje dokonano dla 4 pozostałych badanych prekursorów.

**W rozdziale 5.** pt. „Opracowanie technologii wytwarzania nanoproszku srebra” przeprowadzono w celu zaprojektowania i wykonania reaktora przemysłowego do uzyskania nanoproszku srebra. Wykonano redukcję termiczną wszystkich badanych prekursorów w atmosferze gazu ochronnego, którym był azot. Uznano, że na jakość uzyskiwanego nanoproszku srebra największy wpływ ma temperatura rozkładu, czas procesu rozkładu i masa materiału wsadu. Po wytworzeniu nanoproszku srebra analizowano rozkład jego uziarnienia w zależności od zastosowanego prekursora (kaprylan srebra, pelargonian srebra, laurynian srebra, palmitynian srebra, stearynian srebra). Wykonano analizy SEM morfologii nanoproszków srebra w celu sprawdzenia średniej wielkości występujących nanocząstek w funkcji wyboru prekursora. Przeważnie średnia wielkość cząstki wynosiła ok 9 nm. W dalszej części rozdziału przeprowadzono skalowanie wytwarzania nanoproszku srebra, w celu sprawdzenia wad reaktora laboratoryjnego i zaprojektowania reaktora na skalę przemysłową pozbawionego laboratoryjnych niezgodności. Następnie przeprowadzono analizę rentgenografii strukturalnej nanoproszków srebra w celu określenia wielkości krystalitów. Wykonano też analizy NMR, w celu sprawdzenia poprawności syntezy badanych pięciu prekursorów reaktora laboratoryjnego dla uzyskania dodatkowych informacji użytych w procesie skalowania.

**W rozdziale 6.** pt. „Opracowanie technologii wytwarzania kompozytu na bazie nanoproszku srebra” Doktorant wykonał kompozyt, którego najważniejszym elementem był nanoproszek srebra oraz inne dodatki takie jak: roztwór polimetakrylanu metylu (PMMA) w octanie karbitolu butylowego (OKB), ftalan dibutyłu, palmitynian srebra, dynol 960 (emulgator). Kompozyt miał postać pasty w stanie „semi-solid”. Przeprowadzono badania stabilności i zawieszalności nanocząstek srebra w medium reakcji w zależności od zastosowanych rodzajów homogenizacji. Z badań tych wynikało, że najkorzystniejszym prekursorem nanoproszku srebra jest palmitynian srebra, co potwierdziło obserwacje w wynikach badań zamieszczonych w rozdziale 4 rozprawy. W rozdziale tym przeprowadzono dodatkowo charakterystyki termogravimetryczne dla kompozycji nośnika organicznego. Wyniki badań pozwoliły na wytypowanie nośnika i prekursora do produkcji kompozytu na skale przemysłową.

**Rozdział 7.** pt „Proces wytwarzania warstw srebrowych na powierzchni szynotorów” zawiera schemat realizacji końcowej części badań zasadniczych. Doktorant naniósł autorski kompozyt na powierzchnię elementów zestykowych. Wskazał zasady przygotowania podłoża zestyku do nanoszenia kompozytu dwiema metodami: sitodruku i natrysku pneumatycznego. Przebadano najważniejsze parametry procesu, czyli wpływ temperatury i czasu trwania spiekania na adhezję kompozytu z podłożem. Badania wykonywano w temperaturze od 150° C do 500° C. Uznano, że w produkcji warstw srebrowych najlepsze efekty osiąga się w temperaturze spiekania na poziomie 300° C w metodzie sitodruku i na poziomie 500° C w metodzie natrysku. Wykonano także badania

adhezji warstwy kompozytu do podłoża zestyku aluminiowego i zestyku miedzianego. W obu metodach uzyskano pozytywne rezultaty badań adhezyjnych. Dodatkowo potwierdzono wysoką czystość warstwy kompozytu po procesie spiekania metodą analizy składu pierwiastkowego EDS.

**W rozdziale 8.** pt. „Badania własności wytworzonych warstw srebrowych” przedstawiono sposób sprawdzenia właściwości zestyków pokrytych kompozytem na bazie nanoproszku srebra. Analizowano wpływ natężenia prądu oraz siły docisku na rezystywność zestykową miedź-miedź, miedź/srebro-srebro/miedź, aluminium-aluminium, aluminium/srebro-srebro/aluminium. Badania rezystywności zestykowej wykonano bezpośrednio po naniesieniu warstwy kompozytu i po procesie przyspieszonego starzenia (w komorze). Wskazano, że zastosowanie warstwy kompozytu na bazie nanoproszku srebra zwłaszcza po procesie starzenia pozwalało na uzyskanie lepszej rezystywności w zestykach aluminiowych i miedzianych. Badano wpływ temperatury i czasu spiekania na rezystywność ścieżek srebrowych w zależności i warunków nakładania (PRINT lub PRINT-PRINT). Analizowano wpływ zastosowanego kompozytu na wzrost temperatury układu zestykowego pod wpływem przepływu prądu o natężeniu 400 A. Wszystkie próby wypadły pozytywnie, co potwierdziły badania termowizyjne. Temperatura zestyku aluminiowego z wykorzystaniem kompozytu jest wyraźnie niższa od zestyku niesrebrzonego po krótkim czasie przepływu prądu.

**W rozdziale 9.** pt. „Wdrożenie przedmiotu badań do przemysłu” Doktorant przedstawił zasady wdrożenia autorskiej koncepcji materiałowo-technologicznej do produkcji warstw srebrowych na zestykach aluminiowych i miedzianych szynoprzewodów. Wykonano pełną dokumentację technologiczną procesu nanoszenia warstwy. Zbudowano niezbędne urządzenia do produkcji kompozytu. Wykonano między innymi piec podajnikowy do spiekania warstw kompozytu na bazie proszku nanosrebra na skale przemysłową, zaprojektowano i wytworzono zespół reaktorów do syntezy prekursora (palmitynian srebra) na skalę przemysłową, wykonano zestaw do filtracji prekursora. Opracowano i wyprodukowano kompozyt srebrowy na bazie nanoproszku. Udokumentowano całościowe wdrożenie materiałowo-technologiczne.

**Rozdział 10.** pt. „Podsumowanie i wnioski z prac badawczych” Autor prawidłowo przedstawił wyniki poszczególnych etapów badań. Cel pracy został zrealizowany, gdyż technologia została opracowana a następnie wdrożona do produkcji szynoprzewodów.

**W rozdziale 11.** pt. „Literatura” Autor podał literaturę, z której korzystał podczas pisania rozprawy doktorskiej. Przeanalizował 117 pozycji literaturowych, które w olbrzymiej większości są ważnymi zagranicznymi i aktualnymi publikacjami.

W rozdziale 12. pt. „Załączniki” podano obrazy widma NMR, dyfraktogramy, korelogramy stabilności i zawieszalności nanoproszków srebra, karty produkcji prekursora i nanoproszku, karty techniczne, kryterium kontroli jakości warstw srebrowych, tymczasowe warunki techniczne wytwarzania warstw srebrowych, karty katalogowe kompozytu srebrowego, dowód wdrożenia technologii.

#### 4. Najważniejsze uwagi ogólne i szczegółowe

Całkowita koncepcja badań doświadczalnych została sformułowana przez Doktoranta starannie i poprawnie, a realizację pracy oceniam bardzo pozytywnie. Eksperymentalna część rozprawy jest obszerna, przejrzysta i zawiera szereg bardzo wartościowych wyników i informacji. Dotyczy to zwłaszcza kompleksowego podejścia do badań związanych z uzyskaniem kompozytu na bazie nanoproszku srebra. Opracowano autorską technologię produkcji kompozytu na bazie nanoproszku srebra na skalę przemysłową. Koncepcja materiałowo-technologiczna została doskonale opracowana i sprawdzona w warunkach przemysłowych.

Doceniam trafnie przyjęty zakres metod badawczych oraz dużą ilość przeprowadzonych badań. Forma prezentowania wyników, rzeczowy sposób ich analizy oraz przedstawione wnioski świadczą o dużej dojrzałości badawczej Doktoranta i jego obszernej wiedzy z kilku obszarów badawczych. Szata graficzna rozprawy jest bardzo profesjonalnie dopracowana i świadczy o dużej biegłości informatycznej Doktoranta. W trakcie analizy rozprawy nasunęły mi się dwie uwagi o charakterze ogólnym i kilka uwag szczegółowych nie mających wpływu na wysoką ocenę merytoryczną pracy.

Do uwag ogólnych zaliczam:

1. Brak postawienia tezy rozprawy (której można łatwo domyślić się czytając pracę).
2. Na stronie 13 podano, że materiałem, z którego wykonuje się „elementy szynotorów” jest aluminium lub miedź. Powinno się napisać precyzyjniej, że są to stopy aluminium, z których najważniejsze to 6060, 1050, 6082, 5251.

Do uwag szczegółowych zaliczam:

1. Na stronie 47 podano, że azot jest gazem obojętnym, podczas gdy w procesach spawalniczych osłania się ciekłe jezioro przed dostępem azotu, by nie powstawały azotki, węglikoazotki i nie zwiększała się ilość azotu międzywęzłowego w roztworze.
2. Czy „szyna prądowa” albo „tor prądowy” nie są właściwszymi terminami niż „szynotor prądowy” ? Na stronie 15 „szyno-tor” jest pisany inaczej niż na stronie 13 „szynotor”.
3. W kilku przypadkach nie ma spacji przy jednostkach (str. 26, 38, 39, 73, 112, 117).
4. Nie powinno się pisać w rozprawie doktorskiej w 1 osobie, np. str. 15, str. 26.

5. Co oznacza termin wodór pierwiastkowy (str. 28)? W stali przykładowo jest rozpuszczony wodór atomowy, dyfundujący, pozostały, w gazach występuje wodór cząsteczkowy.
6. W tytule rozdziału 7, 7.1 oraz 8.2 jest postawiona kropka.
7. W oznaczeniu azotanu srebra „3” powinno być zamieszczone w indeksie dolnym ( $\text{AgNO}_3$ ).

## 5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Radosława Pawłowskiego nt. „Opracowanie technologii kompozytu na bazie nanoproszku srebra do wytwarzania warstwy metalicznej na elementach zestykowych aluminiowych i miedzianych” jest interesującą pracą naukowo-badawczą o aktualnej tematyce. Praca doktorska reprezentuje dyscyplinę „Inżynieria Mechaniczna”. Niepodważalnym walorem pracy jest opracowanie nowego rozwiązania dotyczącego srebrzenia aluminiowych i miedzianych zestyków szynoprzewodów na bazie nanotechnologii. Podjęty temat w rozprawie doktorskiej jest ważny i wnosi wkład w rozwój przemysłu energetycznego i innych sektorów, w których coraz częściej wykorzystuje się nowe nanomateriały i nanotechnologię.

Doktorant wykazał się umiejętnością dobrego planowania i wykonywania badań oraz analizy merytorycznej uzyskanych wyników. Wymienione drobne uwagi ogólne i szczegółowe nie wpływają na wysoką wartość merytoryczną rozprawy doktorskiej. Stwierdzam, że Autor osiągnął cel postawiony w pracy, dochodząc do wyników mających znaczenie poznawcze i użytkowe, co jest podstawą realizacji doktoratów wdrożeniowych. Całość recenzowanej rozprawy w pełni potwierdza obszerną wiedzę teoretyczną Doktoranta z kilku dyscyplin naukowych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowo-badawczej.

**Podsumowując stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (z dnia 14 III 2003 (Dz. U. 2017 r., poz. 1789, z późn. zm.) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Uważam, że praca jest napisana na wysokim poziomie naukowym i nadaje się do wyróżnienia.**

Katowice, 21 XII 2021 r



