

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Bąka pt. „Właściwości izolacyjne elektrolitycznych warstw tlenkowych na aluminiowych taśmach uzwojeń elektrycznych podzespołów pojazdów”

Recenzja opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej

Wybór tematyki rozprawy

Aluminiowe powłoki tlenkowe są coraz częściej stosowane w wielu gałęziach przemysłu. Ich rola nie ogranicza się głównie do wytworzenia powłoki odpornej na korozję, ułatwiającej barwienie lub zwiększającej przyczepność powłok lakierniczych. Coraz częściej nanoszona galwanicznie powłoka z tlenku glinu jest wykorzystywana jako powłoka o podwyższonej odporności na ścieranie i twardości, bariera cieplna a w szczególności jako powłoka elektroizolacyjna. Wysokie napięcie przebicia powłoki tlenkowej przy niewielkich grubościach nałożonych na podłożu aluminium i jego stopów pozwala na znaczące zmniejszenie masy uzwojeń, uproszczenie technologii wytwarzania i montażu, wynikające z eliminacji stosowanych przekładek izolacyjnych z preszpanu, preimpregnantów kompozytowych, tworzyw sztucznych. Powoduje to, że coraz częściej wdrażane są rozwiązania pozwalające zastąpić uzwojenia miedziane uzwojeniami z anodowanych taśm aluminiowych, które zaczęto wykorzystywać w transformatorach, elektromagnesach, układach elektromagnetycznych sterowania zaworów silników spalinowych, siłowników elektromagnetycznych. Szczególnie zainteresowanie tego typu rozwiązaniem pojawiło się w przemyśle samochodowym, gdzie chodzi nie tylko zmniejszenie masy pojazdów, ale również zwiększenie sprawności silnika i zmniejszenie zużycia paliwa, ale także wydłużenie czasu eksploatacji podzespołów.

Przedstawione w pracy wyniki badań właściwości elektroizolacyjnych powłok tlenkowych są aktualne i zbieżne z tematyką badań prowadzonych w wielu ośrodkach

naukowych i badawczo-rozwojowych. Charakteryzujące się dużą oryginalnością uzyskane wyniki badań posiadają aspekty naukowe i użyteczne.

Charakterystyka rozprawy

Układ pracy jest zgodny z zasadami przyjętymi dla rozpraw doktorskich. Rozprawa doktorska zawiera 137 stron. Praca składa się z 8 rozdziałów zasadniczych i 5 rozdziałów obejmujących spis literatury, wykaz tabel i rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Do pracy dołączono wersję elektroniczną, utworzoną na płycie CD. Praca jest bogato ilustrowana wykresami, rysunkami i mikrostrukturami oraz tabelaryzowanymi danymi pomiarowymi (zawiera 96 rysunków i 22 tabele). W rozdziale pierwszym przedstawiono cel, zakres pracy oraz sformułowano jej tezę. Aktualny stan wiedzy zawarto w kolejnych trzech rozdziałach.

W rozdziale piątym „Badania własne” określono i przyjęto plan badań, opisano zastosowaną metodykę badań i warunki ich realizacji. Przedstawiono wyniki badań obejmujące określenie napięcia przebicia, dyfuzyjności, struktury i topografii powierzchni. Wytworzone powłoki tlenkowe poddane zostały dodatkowej obróbce, mającej na celu zwiększenie właściwości elektroizolacyjnych powłok tlenkowych (rozdział 6). Rozdział 7 i 8 obejmuje analizę uzyskanych wyników, krótkie podsumowanie oraz wnioski. Pozostałe rozdziały zawierają wykaz literatury, spisy tabel i rysunków oraz streszczenia pracy.

Praca pod względem językowym jest napisana poprawnie. Zawiera niewielką ilość błędów edytorskich. W głównej mierze dotyczy to skrótów myślowych, braku znaków przestankowych w zdaniach podrzędnie złożonych, co utrudnia zrozumienie intencji przekazu Autora. Wykaz zauważonych niedociągnięć przedstawiono w dalszej części opinii zatytułowanej Uwagi szczegółowe.

Uwagi merytoryczne

W rozdziale pierwszym podano cel i zakres pracy, sformułowano jej tezę oraz przedstawiono plan pracy. Przyjęta teza pracy, pozwalającą na podstawie charakterystyki topografii powierzchni warstwy anodowanej, związanej głównie z liczbą wierzchołków nierówności, określić właściwości elektroizolacyjne warstwy anodowanej, powinna zostać poprzedzona komentarzem wyjaśniającym oraz opisem zjawisk fizycznych uzasadniających przyjęte założenia.

W części literaturowej, opartej na analizie 78 pozycji (całkowita ilość pozycji 89), Doktorant dokonał analizy dotyczącej procesów wytwarzania anodowych powłok tlenkowych i przedstawił możliwości ich praktycznego wykorzystania.

Aktualny stan wiedzy został rozdzielony na trzy rozdziały. W dwóch omówiono właściwości elektroizolacyjne powłok tlenkowych na taśmach aluminiowych, dokonano porównania właściwości izolacyjnych uzwojeń, w odniesieniu materiałów konwencjonalnych stosowanych jako uzwojenia. Podano przykłady zastosowań w różnych rozwiązaniach technicznych dotyczących układów wykorzystania uzwojeń z powłoką tlenkową w układach sterowania stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym oraz w budowie elektromagnesów. W kolejnym rozdziale opisano mechanizm tworzenia się powłoki tlenkowej, dokonano oceny wpływu parametrów procesu elektrolitycznego oraz składu kąpieli galwanicznej na tworzenie się powłoki. Przedstawiono budowę i mechanizm tworzenia się powłoki oraz scharakteryzowano jej właściwości elektroizolacyjne, korozyjne i tribologiczne. Informacje zawarte w rozdziale 4.4.5. „Właściwości izolacyjne warstw tlenkowych” należałoby rozszerzyć o charakterystykę właściwości cieplnych powłoki anodowanej. Jest to tym bardziej zasadne, że w programie badań Doktoranta uwzględniono pomiar właściwości izolacyjnych zarówno elektrycznych jak i cieplnych. Również w tezie pracy mówi się o właściwościach izolacyjnych związanych nie tylko z właściwościami elektrycznymi. W zakończeniu rozdziału przedstawiono analizę technicznych wymagań związanych z napięciem przebicia, opisując stosowane metody pomiaru oraz wpływ warunków realizacji badań na wyniki pomiarów.

Tę część pracy oceniam wysoko. Przeprowadzona analiza świadczy o dobrej znajomości problematyki dotyczącej wykorzystania właściwości elektroizolacyjnych powłok tlenkowych w najnowszych rozwiązaniach układów elektrycznych lub elektromechanicznych, obecnie stosowanych głównie w przemyśle samochodowym. Analiza literaturowa potwierdza teoretyczną i fachową wiedzę Doktoranta w zakresie najnowszych rozwiązań technicznych wykorzystujących uzwojenia aluminiowe.

W rozdziale piątym „Badania własne” określono cel i zakres badań, metodykę badań oraz przyjęto plan badań. Należy zaznaczyć, że przedstawiony zakres badań jest niewłaściwy. Odnosi się on raczej do zastosowanych materiałów, a nie problematyki badawczej.

W badaniach skoncentrowano się na określeniu wpływu parametrów elektrolitycznego procesu wytwarzania powłok, tj. anodowej gęstości prądowej, stężenia elektrolitu oraz temperatury, zapewniających najlepsze właściwości elektroizolacyjne wyrażane maksymalną wartością napięcia przebicia. Parametry wytwarzania powłok zostały wybrane w oparciu

o poliselekcyjny plan eksperymentu Hartleya. Wykorzystanie metod planowania statystycznego eksperymentu pozwoliło na określenie wpływu analizowanych parametrów tworzenia powłoki na wybrane właściwości powłoki oraz pozwoliło na znaczące zmniejszenie ilości próbek użytych w badaniach.

Na podkreślenie zasługuje zawarty w części badań własnych Doktoranta rozdział dotyczący metodyki pomiaru napięcia przebicia. Dokonano w nim weryfikacji warunków badań przedstawionych w różnych normach, przygotowano stanowisko do badań oraz na podstawie badań właściwości elektroizolacyjnych wybranych tworzyw polimerowych określono warunki realizacji pomiaru napięcia przebicia z uwzględnieniem wpływu pola, kształtu i masy elektrody, wykorzystane w przygotowaniu stanowiska do badań napięcia przebicia. Podjęte działania miały zapewnić uzyskanie wyników zgodnych z wymaganiami jakościowymi pomiaru, a także zapewnić możliwość porównania z wynikami uzyskanymi w innych ośrodkach badawczych.

Do udowodnienia przyjętej tezy pracy przeprowadzony został szeroki zakres badań. Obejmował on pomiar napięcia przebicia w układzie powierzchniowym i punktowym, badania topografii powierzchni tlenku glinu, badania właściwości cieplnych w oparciu o pomiar dyfuzyjności. Na podstawie badań profilometrycznych oraz analizy mikrostruktury, z wykorzystaniem metod mikroskopii skaningowej, określono budowę, ilość i rozmieszczenie komórek tlenkowych w powłoce.

W celu uwzględnienia wpływu parametrów technologii wytwarzania uzwojeń z taśm aluminiowych przeprowadzono badania napięcia przebicia taśm, w których powłoka została uszkodzona w wyniku odkształcenia o kąt 30, 60 i 90°. Ten rodzaj badań przeprowadzono z uwagi na technologię wytwarzania uzwojeń. Podczas nawijania na karkas może dochodzić do uszkodzenia lub zniszczenia powłoki wytworzonej na taśmach i zmiany jej właściwości elektroizolacyjnych.

Bardzo dobrze udało się udokumentować mechanizm zniszczenia warstwy tlenkowej w wyniku przebicia punkowego i powierzchniowego (rys. 44 i 45). Stwierdzono, że wydzielające się podczas przebicia ciepło prowadzi do stopienia komórek tlenku glinu i ich zniszczenia oraz do stopienia aluminium do 1/3 grubości taśmy. Stopione aluminium wydostaje się przez uszkodzoną warstwę tlenków na tworząc kratery zbliżone kształtem do stożka wulkanu.

Wyniki pomiaru napięcia przebicia warstw tlenkowych po wygięciu taśm mające na celu ocenę wpływu zniszczenia warstwy na napięcie przebicia wymagają szerszego komentarza. Różnice napięcia przebicia warstwy tlenkowej pomiędzy warstwą odkształconą na skutek

rozciągania lub ściskania są niewielkie, wynoszą 5-8%. Sugeruje to że zniszczenie powłoki i oderwanie jej od podłoża nie przyczynia się do pogorszenia właściwości elektroizolacyjnych. Jednak na rysunku 79 można zauważyć, że w powłoce poddanej naprężeniem rozciągającym pojawiają się wyraźne pęknięcia i fragmentacja powłoki, których nie zaobserwowano w warstwie ściskanej. Wynika to z różnic pomiędzy mechanizmami zniszczenia ceramiki poddawanej ściskaniu i rozciąganiu. Ponadto w analizie literaturowej (rys. 14) różnice pomiędzy punktowym napięciem przebicia nieodkształconej i odkształconej warstwy tlenku są o wiele większe, osiągając wartości na poziomie kilkudziesięciu procent. Jak należy interpretować wyniki badań chropowatości przedstawione w tabeli 16 odnoszące się do stosunku punktów mierzalnych do niemierzalnych i czy wartość tego ilorazu może decydować o ilości wierzchołków chropowatości ?

W rozdziale 6 przedstawiono wyniki badań dotyczące możliwościami zwiększenia właściwości elektroizolacyjnych powłok poprzez dodatkową obróbkę powierzchniową. Zastosowano dwa rodzaje obróbki. Powłokę tlenkową uszczelniano poprzez gotowanie w wodzie oraz poprzez impregnację silanami. W przypadku powłoki uszczelnianej w wodzie uzyskano podwyższenie wartości napięcia przebicia, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 20. Natomiast w przypadku nałożenia warstwy polimeru stwierdzono jedynie, że utworzona warstwa silanowa nie spowodowała zmiany wartości napięcia przebicia, uzasadniając to rodzajem zastosowanego silanu. W przypadku impregnacji polimerami krzemoorganicznymi należy również zwrócić uwagę na sposób ich utwardzenia, który można uzyskać poprzez dodatkową obróbkę termiczną.

W rozdziale 7 dokonano analizy uzyskanych wyników, starano się określić w jaki sposób parametry technologii (gęstość prądowa, stężenie elektrolitu, temperatura) wpływają na właściwości elektroizolacyjne powłoki, jej strukturę i topografię powierzchni. Zastosowana metoda planowania eksperymentu pozwoliła określić optymalne parametry wytwarzania powłok tlenkowych oraz ustalić zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami procesu elektrolitycznego a napięciem przebicia, chropowatością powierzchni, ilością i rozmieszczeniem komórek w powłoce oraz dyfuzyjnością.

Również w rozdziale podsumowującym wyniki badań należałoby ściśle sprecyzować o jakie parametry związane z topografią warstwy tlenkowej chodzi.

W analizie uzyskanych wyników badań starano się znaleźć wpływ budowy powłoki na zmianę właściwości elektroizolacyjnych anodowych powłok tlenkowych. Podano, że przyczyny zmian wartości napięcia przebicia związane są z „różnicą w: średnicy porów tlenku, liczbie wierzchołków chropowatości (tab.19.str. 101), grubości tlenku W podsumowaniu

należałoby poświęcić więcej uwagi na wyznaczone zależności pomiędzy omawianymi wielkościami.

Wyniki pomiarowe zebrane w tabeli 21 miały być potwierdzeniem, że mniejsza ilość wierzchołków chropowatości przyczynia się do zwiększenia napięcia przebicia. W tabeli podane zostały wartości dla trzech próbek 3, 6, 10, które potwierdzają przyjętą tezę pracy. Natomiast w tabeli 19, gdzie przedstawiono wyniki badań wszystkich próbek, próbka 7, charakteryzuje się bardzo dużą ilością wierzchołków, a napięcie przebicia jest porównywalne z napięciem przebicia próbek, w których liczba wierzchołków jest prawie trzy razy mniejsza. Być może do oceny wyników należałoby wykorzystać nie tylko liczbę wierzchołków, ale także inne parametry charakteryzujące budowę komórki czy topografię powierzchni takie jak wysokość wierzchołków nierówności R_p oraz R_a - średnie odchylenie profilu.

Pomimo zawartych w opinii uwag i niedociągnięć edytorskich, biorąc pod uwagę nie tylko ogrom pracy poświęconej na zaplanowanie i przeprowadzenie badań, opisanie ich wyników i wyciągnięcie wniosków, ale również wartość naukową rozprawy, oceniam bardzo pozytywnie przedstawioną do oceny pracę doktorską.

Uwagi szczegółowe

str. 12₂ – niejasne zdanie, z którego wynika że stosowanie folii z tworzyw sztucznych jako przekładki w uzwojeniach ma na celu ochronę folii przed hydrolizą i utlenianiem,

str. 24 – niepoprawna jednostka siły nacisku w opisie rysunku 11, również w przypadku jednostki dotyczącej nacisku - str. 25₂,

str. 27₃, 20₇, tytuł rozdziału 5.8 – należy przyjąć jednoznaczne określenia związane z odkształceniem warstw tlenkowych, określa się je jako odkształcenia plastyczne, odkształcenia elastyczne czy też jako „granica odkształcenia”, w jaki sposób realizowano „badanie elastyczności”,

str. 29¹ – jak należy interpretować pojęcie „łagodzenie tarcia”,

str. 56₁, str. 57 – tabele 10, 11 powinno być „Powierzchnia”,

str. 59¹ – niejasne sformułowanie, z którego wynika, że anodowa gęstość prądu jest zależna od właściwości warstwy tlenkowej,

str. 68₄ – co oznacza „nagle odejmowanie napięcia od układu”,

str. 69₇ – niejasne zadanie, należy wyjaśnić o jaki gaz w przypadku tworzenia się krateru chodzi, str. 74¹¹ – zamiast Z, powinno być „z”, jak podano w dalszej części opisu dotyczącego pomiaru w osi „z”, w pracy jako Z oznaczono ilość wierzchołków chropowatości,

str. 77 – brak oznaczeń w opisie rys. 57, z podziałem na część a i b rysunku,

str. 105 – niejasny opis rysunku 83, na osi „x” podano numery próbek, a nie ich grubość,

str. 120 – w tabeli 22 zamieniono wartości średnicy porów tlenku z grubością powłoki.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Bąka stanowi obszerne i wartościowe opracowanie opisujące możliwości kształtowania właściwości elektroizolacyjnych anodowych powłok tlenkowych na taśmach aluminiowych i warunkujące wykorzystanie uzyskanych wyników w rozwiązaniach praktycznych dotyczących konstrukcji układów elektromechanicznych. Uzyskane wyniki badań Doktoranta stanowią oryginalny dorobek o dużym znaczeniu teoretyczno-poznawczym i praktycznym.

Doktorant wykazał się wiedzą pozwalającą na zdefiniowanie problemu oraz umiejętnością realizacji szeroko i logicznie zaplanowanych trudnych prac eksperymentalnych i badawczych. Potrafił wykorzystać metody planowania eksperymentu oraz analizy matematycznej do określenia planu badań i opracowania obszernych wyników badań. Wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac naukowo-badawczych i krytycznej analizy uzyskiwanych wyników. W szczególności odnosi się to weryfikacji zaleceń przedstawionych w normach dotyczących pomiaru napięcia przebicia, które były pomocne przy skonstruowaniu układu pomiarowego napięcia przebicia.

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Bąka spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zapisane w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki z dnia 14 marca 2003 r.

Wnioskuje o dopuszczenie **mgr inż. Łukasza Bąka** do publicznej obrony rozprawy doktorskiej przed Radą Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii Politechniki Śląskiej.

