

Andrzej POSMYK, Łukasz BĄK

POWŁOKI TLENKOWE I WYTWORZONE NA ICH OSNOWIE POWŁOKI KOMPOZYTOWE PRZEZNACZONE NA ALUMINIOWE ELEMENTY UKŁADU ELEKTRYCZNEGO STEROWANIA ZAWORÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono wpływ technologii wytwarzania anodowych powłok tlenkowych (APT) i wytworzonych na ich osnowie powłok kompozytowych typu APT+MI na ich właściwości izolacyjne. Powłoki te są przeznaczone na aluminium uzwojeń elektromagnetycznego sterowania zaworami silników spalinowych. Zastosowanie tych powłok pozwoli na zmniejszenie masy i wymiarów elektromagnesów. Wymaga to opracowania nowej metody pomiaru napięcia przebicia, które jest podstawową wielkością charakteryzującą właściwości elektroizolacyjne powłok.

OXIDE LAYER AND COMPOSITE LAYER PRODUCED ON THEIR MATRIX DESTINRD FOR ALUMINIUM ELEMENTS IN ELECTRICAL STEERING OF ENGINE VALVES

Summary. The influence of producing technology on insulating properties of anodic hard coatings (AHC) and on their matrix produced composite layer AHC+MI has been presented in the paper. Those layers are destined for aluminium winding in electromagnetic steering of engine valves. Using of these layers allows to reduce of electromagnets mass and dimensions, which reduces the fuel consumption. This desire to elaborate a new measurement method of breakdown voltage which is a elementary characteristics of insulating properties of layer.

1. WSTĘP

W przemyśle motoryzacyjnym są prowadzone badania nad elektromagnetycznymi układami sterowania zaworami. Podstawowym celem takiego rodzaju sterowania jest wyeliminowanie zużywających się i wymagających określonej ilości energii do pokonania oporów tarcia zaworów mechanicznych i ich rozrządu. Jak wynika z badań autorów pracy [1], wyznaczony metodą „strip-down” moment tarcia w mechanizmach zaworów zależy od prędkości obrotowej silnika i może dochodzić do 35% całkowitego momentu tarcia w silniku przy 700 min^{-1} , a 15% przy 6500 min^{-1} . Istotnym czynnikiem przemawiającym za wprowadzeniem zaworów elektromagnetycznych jest poprawienie ich charakterystyki umożliwiające sprawniejszą wymianę mieszanki paliwowo-powietrznej, co może zmniejszyć zużycie paliwa. Drugim elementem jest zmniejszenie masy samego silnika w celu ograniczenia zużycia drogiego paliwa. Masa prototypowych uzwojeń sterujących elektrycznym rozrządem zaworów

samochodowych jest około 4,5 kg mniejsza w wersji z uzwojeniem aluminiowym niż z miedzianym. Uzwojenia aluminiowe powodują mniejsze straty energii niż uzwojenia miedziane, co zwiększa sprawność silnika.

Zastosowanie aluminium zmniejsza masę uzwojeń, ale stosowane dotychczas izolacje przekładkowe z nasączanych tworzyw sztucznych zwiększają istotnie wymiary samych uzwojeń, ponieważ ich grubość jest dość znaczna (do 20 μm) oraz muszą być stosowane dwie przekładki, co daje w sumie 40 μm . W dobie miniaturyzacji podzespołów maszyn i urządzeń dąży się do zmniejszenia wymiarów i uzyskania zwartej konstrukcji wyrobu. W przypadku opisanych uzwojeń możliwość zmniejszenia wymiarów daje znana z innych zastosowań anodowa powłoka tlenkowa (APT), która charakteryzuje się wysokim napięciem przebicia (10 – 30 V/ μm grubości), a tym samym dobrymi właściwościami izolacyjnymi przy małych grubościach (od 0,3-1 do 4-6 μm). Możliwości zwiększenia napięcia przebicia powłok tlenkowych daje wprowadzenie do porów tej powłoki substancji izolacyjnych, w wyniku którego uzyskuje się powłoki kompozytowe typu APT+MI. Istotnym argumentem przemawiającym za izolacją w postaci anodowej powłoki tlenkowej lub wytworzonej na jej podstawie powłoki kompozytowej jest istotna różnica przewodności cieplnej izolacji lakierowej (około 2 W/mK) i powłoki tlenkowej (około 24 W/mK) [2], co ułatwia odprowadzanie ciepła i znacznie obniża temperaturę samego uzwojenia [3, 4, 5, 6].

Artykuł jest poświęcony możliwościom kształtowania właściwości izolacyjnych i zastosowania wytwarzanych elektrolitycznie powłok tlenkowych (APT) i powłok kompozytowych (APT+MI) jako izolacji uzwojeń przeznaczonych do sterowania zaworami silników spalinyowych, a także omawia metody pomiaru podstawowego parametru decydującego o właściwościach izolacyjnych powłok, tj. napięcia przebicia.

2. WYTWARZANIE POWŁOK TLENKOWYCH DO CELÓW IZOLACYJNYCH

Anodowaniem lub anodowym utlenianiem nazywamy wytworzenie cienkiej, ceramicznej powłoki tlenkowej na powierzchni metalu. Powłoka ta jest wytworzona podczas elektrochemicznego oddziaływania roztworu elektrolitu na metal, skutkiem czego jest on utleniany. Najczęściej utlenianym elektrolitycznie materiałem jest aluminium i jego stopy. Anodowanie można przeprowadzić na technicznie czystym aluminium i wybranych jego stopach o małej zawartości składników stopowych, ponieważ pogarszają one wygląd i właściwości utlenianego przedmiotu, a czasem całkowicie uniemożliwiają utlenianie. Do utleniania stopów o określonym składzie chemicznym stosuje się elektrolity o dostosowanym odpowiednio do składu stopu i jego przeznaczenia składzie chemicznym. W przypadku uzwojeń do elektromagnetycznego sterowania zaworami silników spalinowych problem czystości utlenianych materiałów nie ma istotnego znaczenia, ponieważ uzwojenia wykonuje się z walcowanych folii z czystego aluminium 99,99% w stanie półtwardym [3, 4].

Wytworzenie anodowej powłoki tlenkowej na aluminium wywiera istotny wpływ na podstawowe właściwości części maszyn wykonanych z utlenianego stopu, tj.:

- poprawia właściwości elektroizolacyjne i termoizolacyjne,
- zwiększa twardość powierzchni,

- zwiększa odporność na korozję, zużycie, szoki termiczne,
- poprawia estetykę produktów,
- nadaje barwę własną lub pozwala na zabarwienie powierzchni szeroką gamą barw oraz tworzy podkład pod różnego rodzaju lakiery.

Ze względu na główne składniki elektrolitu używanego do anodowania rozróżniamy następujące metody anodowania:

- anodowanie w wodnym roztworze kwasu chromowego,
- anodowanie w wodnym roztworze kwasu siarkowego,
- anodowanie w wodnym roztworze kwasu szczawowego,
- anodowanie w mieszaninach różnych kwasów.

Anodowanie w kwasie chromowym, potocznie zwane również jako anodowanie pierwszego stopnia, polega na wytworzeniu powłoki tlenkowej przede wszystkim przy użyciu elektrolitu w postaci wodnego roztworu z kwasu chromowego. W metodzie tej stosuje się 2,5-3% wodny roztwór kwasu chromowego przy $\text{pH}=0,6$, temperaturze elektrolitu 313 K i gęstości prądu $1 - 5 \text{ A/dm}^2$. Przy czasie utleniania od 30 do 60 min uzyskuje się powłoki o grubości $3 - 8 \text{ }\mu\text{m}$. Średnica porów powłok tlenkowych wytworzonych w kwasie chromowym mieści się w przedziale $20 - 25 \text{ nm}$ [7, 8, 9]. Powłoki te charakteryzują się małą twardością, co zapewnia im większą elastyczność potrzebną przy nawijaniu uzwojeń.

Powłoki tlenkowe wytworzone w elektrolicie kwasu chromowego charakteryzują się małą porowatością i dużą zwartością, dzięki czemu stanowią dobry materiał izolacyjny. Podstawową ich wadą jest dość mała prędkość wzrostu do $8 \text{ }\mu\text{m/h}$, co zwiększa ich cenę.

W kolejnym rodzaju anodowania (anodowanie drugiego rodzaju) stosuje się elektrolit z kwasu siarkowego, który jest o wiele bardziej agresywny od elektrolitu z kwasu chromowego, o czym może świadczyć sposób narastania powłoki tlenkowej, tj. w przybliżeniu $2/3$ grubości wrasta w materiał utleniany, a $1/3$ wystaje nad powierzchnię utlenianego materiału. Powłoka po utlenianiu w elektrolicie z kwasu siarkowego jest stosunkowo gruba i odporna na zużycie ścierane, porowata o jasnym kolorze. Jej właściwości izolacyjne zależą od grubości i budowy. Składa się z dwóch warstw, tj. przylegającej do podłoża szczelnej warstwy barierowej i znajdującej się od strony elektrolitu warstwy porowatej. Dzięki porowatości anodowych powłok tlenkowych można wytwarzać na ich osnowie powłoki kompozytowe poprzez wprowadzenie do porów np. materiałów izolacyjnych. Zależność średnicy porów od rodzaju elektrolitu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Zależność średnicy i liczby porów tlenku od rodzaju elektrolitu*

Elektrolit	H_2CrO_3	H_2SO_4	$(\text{COOH})_2$	H_3PO_4	Boraks
Średnica porów [nm]	24	10 - 20	15 - 25	25 - 35	13 - 235
Liczba porów na jednostkę powierzchni [μm^2]	40 - 190	240 - 800	50-310	30 - 150	

* Opracowano na podstawie danych zaczerpniętych z kilkudziesięciu artykułów przyjmując wartości ekstremalne

Elektrolity o mniejszym stężeniu kwasu siarkowego są stosowane w celu wytworzenia twardszych i grubszych powłok tlenkowych. Elektrolity o wyższych stężeniach stosuje się w

procesach utleniania ciągłego taśm i drutów, na których są wymagane elastyczniejsze powłoki tlenkowe. Zadaniem dodatków, w tym kwasów, np. do 10% kwasu octowego, jest ograniczenie zdolności wtórnego rozpuszczania tlenku przez H_2SO_4 , co pozwala na uzyskanie grubszych i elastyczniejszych powłok. Takie powłoki mają duże znaczenie w zastosowaniach na uzwojenia układów sterowania zaworami.

Właściwości izolacyjne powłok tlenkowych znalazły zastosowanie przy produkcji kondensatorów elektrolitycznych. Większość kondensatorów dzisiejszego przemysłu elektronicznego pracuje na niskie napięcia. Dlatego do odizolowania ich uzwojeń wystarczy powłoka tlenkowa o grubość około 1 μm . Powłoka ta musi mieć małą porowatość i być elastyczna, żeby podczas nawijania nie powstawały rysy lub pęknięcia zmniejszające napięcie przebicia. Dlatego skład chemiczny elektrolitu do utleniania kondensatorów powinien zapewnić małe rozpuszczanie tlenku i niewielką jego porowatość. Praktycznie dąży się do wytwarzania tylko części barierowej anodowej powłoki tlenkowej. Elektrolit powinien dać możliwość pogrubiania warstwy barierowej do tego stopnia, żeby powłoka nie zawierała porów.

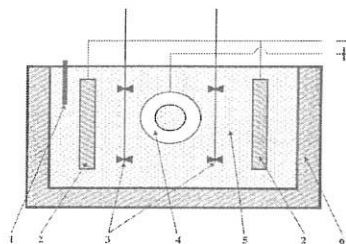
Najczęściej do utleniania folii kondensatorowej stosuje się elektrolit na bazie kwasu borowego z dodatkami, np. boraksu albo wodorotlenku amonowego [7, 8]. W wodnym elektrolicie kwasu borowego (15 – 18 g /l wody) i boraksu (0,05 – 0,25 g/l), temperaturze 95 – 100°C, prądem w pierwszym etapie 0,25 – 0,8 A/dm² i 0,7 – 2 A/dm² w drugim etapie, można wytworzyć powłoki tlenkowe o napięciu roboczym 500 – 700 V, co oznacza, że napięcie przebicia jest jeszcze wyższe. W skład elektrolitów do utleniania folii kondensatorowej może wchodzić też sam elektrolit z kondensatora.

Do produkcji uzwojeń transformatorów i elektromagnesów jest wymagana grubsza taśma aluminiowa, która po utlenieniu jest formowana w uzwojenia. Dlatego od powłok tlenkowych oprócz dużej odporności na przebicie elektryczne jest jeszcze wymagana określona elastyczność, pozwalająca nawijać uzwojenia na karkasy pod odpowiednim naciąganiem i wyginać taśmę wraz z powłoką tlenkową bez powstawania rys i pęknięć obniżających napięcie przebicia i odporność na korozję.

W większości literatury poświęconej utlenianiu do celów elektroizolacji można znaleźć informacje, że stosuje się do tego elektrolity na bazie kwasu siarkowego z dodatkiem do 25% gliceryny [7, 9]. Jednak nie można w nich znaleźć informacji, na temat budowy, dzięki której powłoki stają się miękkie, ani na temat mechanizmu działania gliceryny jako zmiękczacza powłok tlenkowych. Termin zmiękczacza odnośnie do gliceryny jest powszechnie stosowany w przemyśle spożywczym i kosmetycznym.

Samo anodowanie to dwa przebiegające w tym samym czasie procesy, tzn. wytwarzanie i narastanie oraz rozpuszczanie powłoki tlenkowej, zwane wtórnym. Chcąc uzyskać powłokę o określonej grubości i wymaganych właściwościach izolacyjnych należy utrzymać przewagę procesu powłokotwórczego (narastania) nad wtórnym rozpuszczaniem tlenku. Intensywność tych procesów zależy od parametrów utleniania. Gęstość prądu i temperatura procesu wpływają na porowatość powłoki tlenkowej. Im wyższa temperatura, tym większa porowatość natomiast przy zwiększaniu gęstości prądu następuje zmniejszenie średnicy porów. Powłoki o większej porowatości i większych średnicach porów mają gorsze właściwości izolacyjne.

Jednak na ich osnowie można łatwiej wytworzyć powłoki kompozytowe. Schemat układu do anodowania aluminium przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu do anodowego utleniania aluminium: 1 - czujnik i regulator temperatury; 2 - katody; 3 - urządzenia mieszające elektrolit (mieszanie mechaniczne lub sprężonym powietrzem); 4 - anoda (utleniany przedmiot); 5 - elektrolit, 6 - elektrolizer

Fig. 1. Schema of the equipment for anodic oxidation of aluminium: 1 - temperature sensor and regler; 2 - cathodes; 3 - electrolyte's paddle; 4 - anode (oxidized sample); 5 - electrolyte; 6 - electrolyser

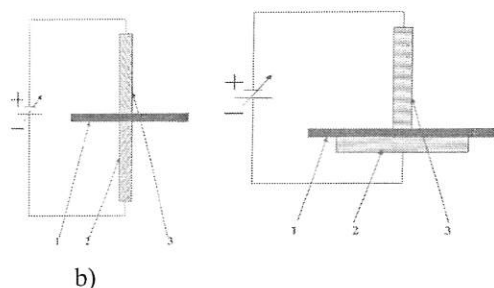
3. METODY BADANIA WŁAŚCIWOŚCI IZOLACYJNYCH

Jak wspomniano wcześniej, w wyniku anodowego utleniania aluminium jest wytwarzana powłoka tlenkowa o określonej grubości, o właściwościach elektro- i termoizolacyjnych, które mogą być wykorzystane w praktyce do wspomnianych we wstępie celów. Wyznaczenie wartości napięcia przebicia będącego pochodną oporności elektrycznej powłok tlenkowych oraz określenie zależności pomiędzy składem chemicznym elektrolitu, parametrami procesu utleniania a właściwościami izolacyjnymi powłok pozwolą określić ewentualne kierunki i zakres ich zastosowań.

W normie PN-EN 60343 [10] zostały opisane warunki badań wytrzymałości elektrycznej metodami napięcia przebicia dla konwencjonalnych materiałów izolacyjnych, tj. przede wszystkim tworzyw sztucznych. Według ww. normy napięciem przebicia nazywamy taką wartość przyłożonego do badanej próbki napięcia, przy której następuje jej zniszczenie pod względem warunków izolacji i przebicie elektryczne. Do wyznaczania napięcia przebicia służą różne urządzenia, których schematy przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 4. Pomiędzy dwoma zamocowanymi współosiowo elektrodami podłączonymi do źródła napięcia, którego wartość jest zwiększana potencjometrycznie, jest umieszczona badana próbka. Wskutek zwiększania napięcia od zera przy pewnej jego wartości następuje przebicie badanej próbki. Wartość ta jest przyjmowana jako napięcie przebicia.

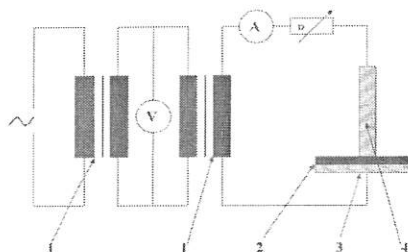
Zalecany przez normę układ pomiarowy napięcia przebicia jest zbudowany z dwóch umieszczonych współosiowo elektrod. Dodatkowo, aby uniknąć problemu umieszczenia elektrod w jednej osi, jeżeli miałyby one te same wymiary, elektroda dolna, zwykle przymocowana na stałe do stanowiska roboczego może mieć większy wymiar (rys. 2). Wymiary drugiej z elektrod zostały znormalizowane. Używane są dwa rodzaje elektrod, tj. cylindryczne, rys. 2a i płaskie, rys. 2b i 3. Elektrode cylindryczną tworzy walec o średnicy 6 mm (odchyłka $\pm 0,3$ mm) i zaokrąglonych brzegach o promieniu 1 mm. Pole powierzchni styku elektrody z badaną próbką ma wartość $P = 12,56 \text{ mm}^2$ ($\sigma = 0,07 \text{ mm}^2$). W przypadku, gdy występuje konieczność

zmniejszenia nagrzewania próbki podczas przeprowadzonego badania dopuszcza się użycie elektrody o średnicy mniejszej niż podana powyżej.



Rys. 2. Schemat układu do pomiaru napięcia przebicia z elektrodami cylindrycznymi (a) oraz z cylindryczną i płaską (b); zasilanie prądem stałym, wg [10]: 1 - badana próbka; 2 - katoda; 3 - anoda

Fig. 2. Schema of the equipment for measuring of break-down voltage with cylindrical electrodes (a) and with cylindrical and flat electrode [10]: 1 - examined sample; 2 -cathode; 3 - anode



Rys. 3. Schemat układu do pomiaru wartości napięcia przebicia z wykorzystaniem galwanicznej separacji od źródła zasilania prądem zmiennym [10]: 1 - transformator; 2 - badana próbka; 3 - elektroda podłączona do fazy; 4 - elektroda podłączona do masy

Fig. 3. Schema of the equipment for measuring of break-down voltage using of galvanic separation of the AC-powering [10]: 1 - transformer; 2 - examined sample; 3 - phase-pole- electrode; 4 - mass-pole-electrode

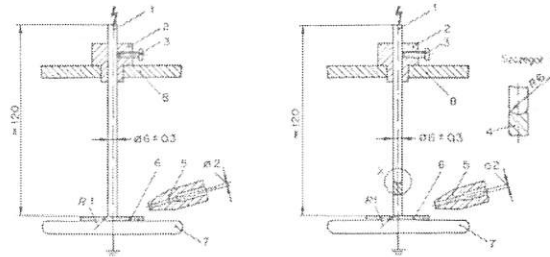
Elektrody płaskie zwykle mają kształt kwadratowej płyty, choć niekoniecznie o sfazowanych krawędziach jak w przypadku elektrod cylindrycznych, tzn. zaokrąglenie 1 mm. Warunkiem stosowania elektrod płaskich jest wielkość powierzchni takiej elektrody większa niż powierzchnia elektrody cylindrycznej, czyli $>12.56 \text{ mm}^2$.

Masa elektrody użytej do pomiarów - wywierającej nacisk na badaną próbkę - nie powinna przekraczać 30 g, ponieważ powodowałoby to powierzchniowe odkształcenia próbki, a tym samym zmieniało w pewnym stopniu wyniki pomiarów. Dotyczy to zwłaszcza elektrod cylindrycznych, które mają mniejszą powierzchnię, na której rozłoży się ciężar w momencie umieszczenia na badanej próbce.

Wspomniany wcześniej konieczny współosiowy układ dwóch elektrod podczas przeprowadzania badania i ujednolicenie warunków zewnętrznych zapewniają powtarzalność pomiarów. Na tej samej próbce powinna być wykonywana seria powtarzalnych pomiarów. Są dwie metody zależne od aktualnie posiadanych możliwości sprzętowych:

- badania za pomocą jednego zestawu elektrod,
- badania za pomocą kilku elektrod.

Badania za pomocą jednego zestawu elektrod należy wykonać kilkakrotnie na tej samej próbce badanej w różnych jej częściach, ponieważ skutek przebicia występuje trwałe uszkodzenie badanego materiału.



Rys. 4. Przykład jednoczęściowej (a) i dwuczęściowej (b) elektrody cylindrycznej wg PN [10]: 1 - elektroda wysokonapięciowa; 2 - gniazdo prowadzące z elektrodą wysokonapięciową; 3 - śruba mocująca elektrodę; 4 - dolna część elektrody dwuczęściowej (rys. 2); 5 - dysza powietrza; 6 - próbka; 7 - elektroda niskonapięciowa; 8 - wspornik elektrody

Fig. 4. An example of cylindrical one-part (a) and two-parts (b) electrode according to PN [10]: 1 - high-voltage electrode; 2 - conducting-element with high voltage electrode; 3 - electrode fasting screw; 4 - bottom part of two-parts electrode; 5 - air nozzle; 6 - examined sample; 7 - low-voltage electrode; 8 - electrode bearer

Badanie za pomocą kilku elektrod jest pod względem ilościowym znacznie szybsze, lecz należy pamiętać o prawidłowym ich rozmieszczeniu, tzn. elektrody powinny znajdować się w takiej odległości od siebie, aby nie wywoływały niepożądanych oddziaływań między sobą. Minimalna odległość pomiędzy elektrodami powinna wynosić 50 mm. Wykonujemy serie pomiarów na próbkach tego samego rodzaju i różnych grubościach znamionowych próbek, tj.: 3,0; 1,6; 1,0 mm; 500; 100; i 25 μm . Ważną sprawą jest dobór materiału na elektrody. Należy stosować materiał, który nie reaguje z próbką zmieniając jej właściwości fizyczne bądź chemiczne. Najczęściej stosowane materiały to:

- aluminium, srebro lub złoto w postaci powłok nanoszonych na elektrodę metodą próżniową.
- folia aluminiowa lub cynkowa grubości 0,025 mm umocowana za pomocą specjalnych smarów lub olejów przeznaczonych do tego celu na powierzchni badanej próbki, do której to folii później przykładane zostaje napięcie.

Podczas wykonywania badań należy uwzględnić zalecane warunki zewnętrzne, wymagane do zapewnienia porównywalności wyników i minimalizacji błędów. Norma zaleca następujące warunki pomiaru napięcia przebicia:

- temperatura: 23^{+2} °C, dopuszczalne są również badania w temperaturze pracy materiałów;
- wilgotność względna powietrza: do 20%;
- stałe natężenie przepływu powietrza przez układ pomiarowy w miejscu umieszczenia próbki, około 0,5 l/min.;
- w przypadku badań próbek z naprężeniami mechanicznymi maksymalne odkształcenia dla materiałów sztywnych nie powinny przekroczyć 0,5%, a elastycznych 5%;
- prąd o częstotliwości 48-62 Hz.

4. WPLYW WYBRANYCH CZYNNIKÓW NA WARTOŚĆ NAPIĘCIA PRZEBICIA

Badanie wytrzymałości elektrycznej materiału może być przeprowadzone różnymi typami elektrod o różnych kształtach. Zgodnie z wspomnianą normą [10] typ elektrody nie ma poważnego wpływu na wyniki i ich powtarzalność, choć w zasadzie kształt ich został znormalizowany, aby wykluczyć choćby niewielkie odchyłki tym spowodowane.

Wielkość odchyłek i błędów pomiarowych w dużej mierze zależy od warunków zewnętrznych przeprowadzania pomiarów, które mają stosunkowo duży wpływ na wyniki pomiarów mogąc znacznie je zafałszować. Należą do nich takie czynniki jak:

- temperatura i ciśnienie otoczenia,
- wilgotność powietrza,
- naprężenia mechaniczne w powłoce.

Wzrost temperatury podczas pomiaru powoduje znaczne zmiany rezystancji wielu materiałów, a co za tym idzie, zmiany wytrzymałości elektrycznej, np. obniżenie wartości napięcia przebicia powłok tlenkowych. Według Franckensteina [11], rezystywność powłok tlenkowych zmienia się istotnie w funkcji temperatury, co pokazano w tabeli 2.

Tabela 2

Zależność rezystywności powłoki tlenkowej od temperatury
(wytworzonych prądem stałym w elektrolicie z $C_2H_2O_4$) [11]

Temperatura °C	20	100	200	300
Rezystywność ρ [Ωm]	40×10^{12}	8×10^{12}	$1,1 \times 10^{12}$	$0,09 \times 10^{12}$

Uwzględniając porowatość powłok i znajdujące się w porach powietrze oraz resztki elektrolitu mogące chłonać wilgoć w podwyższonych temperaturach, należy zapewnić stałą temperaturę pomiarów i odpowiednie sezonowanie badanych próbek, tj. umieszczenie ich w temperaturze badań przez odpowiednio długi czas przed pomiarami.

Wilgotność środowiska, w którym wykonuje się pomiar ma również wpływ na wartość wytrzymałości elektrycznej, jednak nie tak jednoznaczny, jak w przypadku wpływu temperatury. Wilgotność jest równie ważnym czynnikiem ze względu na możliwość absorpcji wilgoci przez dany materiał, co powoduje spadek jego wytrzymałości elektrycznej i wartości napięcia przebicia. W przypadku powłok tlenkowych wpływ wilgotności otoczenia zależy od tego, czy powłoki są uszczelniane. Jeżeli powłoki są uszczelniane, to wpływ wilgoci jest niewielki, ponieważ pory w tlenku są zamknięte, a warstwa wierzchnia tlenku jest uwodniona i nie sorbuje on wody. Jeżeli powłoka nie jest uszczelniona, to wpływ wilgoci jest znaczny, tabela 3. Dlatego w większości przypadków zastosowań do celów izolacji zaleca się stosować powłoki uszczelnione na gorąco. Powłoki uszczelniane solami metali nie powinny być stosowane jako materiały izolacyjne.

Tabela 3

Wpływ wilgotności względnej powietrza na rezystywność powierzchniową powłok tlenkowych (wytworzonych prądem stałym w elektrolicie z $C_2H_2O_4$) [11]

Wilgotność względna ϕ	0	20	30	40	60	80	100
Rezystywność $\rho \times 10^{10}$ [Ωm]	150	30	13	5	1,1	0,22	0,045

Naprężenia mechaniczne w próbce, rozciągające lub ściskające, wywołują różne, w tym niepożądane skutki. Naprężenia rozciągające wywołują spadek wytrzymałości elektrycznej, co jest efektem rozciągnięcia struktury próbki bądź w skrajnych przypadkach jej uszkodzenia. W obecności naprężeń ściskających, poniekąd „zagęszczających” strukturę, nie wykryto większych zmian, choć temu problemowi należałoby poświęcić więcej czasu i przeprowadzić dokładniejsze badania. W przypadku badań napięcia przebicia powłok tlenkowych naprężenia mechaniczne mogą wywołać mikropęknięcia tlenku sięgające do materiału podłoża, co obniża wartość napięcia przebicia.

Wzrost ciśnienia powoduje wzrost natężenia pola elektrycznego, przy którym zaczynają się wyładowania powierzchniowe, a tym samym wyładowania stają się bardziej intensywne, a przebicie następuje wcześniej, choć warunek ciśnienia jest zwykle pomijany, gdyż jedynie nieliczne badania są wykonywane przy ciśnieniu innym niż atmosferyczne.

Poza określonymi przez normę - dla klasycznych materiałów izolacyjnych - czynnikami przy badaniu właściwości izolacyjnych powłok tlenkowych należy uwzględnić wielkość powierzchni roboczej elektrody oraz siły docisku elektrod, ze względu na dużą różnicę twardości i anodowych powłok tlenkowych i tworzyw sztucznych. Jak wynika z wstępnych badań własnych i danych literaturowych wielkość napięcia przebicia maleje wraz ze wzrostem powierzchni styku elektrody i badanej próbki.

5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie aluminiowych uzwojeń do elektromagnetycznego sterowania zaworami silników spalinowych pozwoli na zmniejszenie ich masy oraz poprawę charakterystyki napełniania komory spalania, co może dać zmniejszenie zużycia paliwa. W celu zapewnienia wysokiej niezawodności silnika potrzebne są uzwojenia gwarantujące wystarczające właściwości izolacyjne elektryczne i cieplne. Dlatego należy opracować metodykę badania tych właściwości pod kątem zastosowań w motoryzacji.

Zalecana przez polską normę metodyka pomiaru napięcia przebicia materiałów izolacyjnych nie uwzględnia specyfiki budowy i właściwości powłok tlenkowych. Zawarte w niej zalecenia dotyczą przede wszystkim pomiarów napięcia przebicia konwencjonalnych materiałów izolacyjnych, tj. tworzyw sztucznych i niestety, nie mogą w pełni zostać zastosowane do pomiarów napięcia przebicia ceramicznych powłok tlenkowych wytworzonych w procesie elektrochemicznego utleniania w roztworach różnych kwasów.

Do podstawowych przyczyn ograniczonego zastosowania dotychczasowej normy należy zaliczyć:

- stwierdzenie w normie braku wpływu wielkości i kształtu pola powierzchni roboczych elektrod na wynik pomiarowy podczas powłok tlenkowych może nie mieć podstaw, gdyż podczas przeprowadzonych doświadczeń z użyciem elektrod o różnych powierzchniach styku z próbką badaną wystąpiły znaczne różnice w wynikach pomiarowych przy zachowanych warunkach zewnętrznych;
- zalecane w normie grubości próbek nie mają odniesienia do powłok tlenkowych, gdyż grubość powłoki tlenkowej spełniającej rolę izolacji mieści się w granicach kilku do kilkudziesięciu mikrometrów;

- na podstawie analizy dostępnej literatury i badań własnych stwierdzono, że najlepszym materiałem na elektrody w przeciwieństwie do zalecanych według normy PN-EN 60343 materiałów jest miedź.

Ponieważ powłoki tlenkowe zajmują coraz to więcej miejsca wśród materiałów izolacyjnych, istnieje konieczność opracowania metodyki ich badań. Metodyka ta powinna określić wielkość i kształt powierzchni roboczej oraz masę elektrod oraz warunki samego pomiaru gwarantujące powtarzalność i porównywalność wyników uzyskiwanych przez różne osoby w różnych laboratoriach, co jest podstawowym wymaganiem norm jakościowych [ISO 9001].

Literatura

1. Gaberscik G., Meldt W., Tripolt W., Trzesniowski M.: Der Beitrag der Reibungsoptimierung zur Verbrauchsreduktion bei Motoren. Tribosysteme in der Fahrzeugtechnik, Copy and Druck GmbH Verlag Österreichischer Tribologischer Gesellschaft ISBN 3-901657-19-3 (Buch), Wien/Graz 2005, 5-13.
2. Aluminium Oxide MEMS Exchange, www.memsnet.org/material/aluminiumoxide/al2o3bulk, 2004.
3. ANO-FOL Eloxiertes Aluminium Leitermaterial und Spulen, Aluminiumspaltband. Prospekt firmy Steinert, Köln 2001.
4. ANO-FOL im Detail. Firmen-Prospekt Steinert, Köln 2001.
5. Marschner G.: Anodized Aluminum Wire - High Temperature Insulation Light weight Conductors. Wydawnictwo Firmy Oxinal Corporation, Minden NV, 2000.
6. Walker H. D.: Lightweight insulated wire and strip. Wire Industry. England, June 1981, 401.
7. Biestek T., Weber J.: Powłoki konwersyjne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1968.
8. Zakgjem L. H.: Eljktroliticzjeskije kondensatory. Gosenergoisdat, Moskwa 1963
9. Hübner W., Speiser C. Th.: Die Praxis der anodischen Oxidation des Aluminiums. Aluminium-Verlag Düsseldorf 1988.
10. PN-EN 60343 12/96 „Zalecane metody określenia względnej odporności materiałów elektroizolacyjnych na przebicie w warunkach wyładowań powierzchniowych”.
11. Franckenstein G.: Gleichspannungsmessungen an elektrolytisch erzeugtem Aluminiumoxyd. Annalen Physik Nr. 26 (1936), 17-54.

Recenzent: Dr hab. Władysław Skoneczny