

Andrzej POSMYK, Łukasz BĄK

BADANIE WŁAŚCIWOŚCI IZOLACYJNYCH MATERIAŁÓW CERAMICZNYCH PRZEZNACZONYCH DLA PRZEMYSŁU MOTORYZACYJNEGO

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę pomiaru właściwości izolacyjnych wytworzonych na taśmach aluminiowych (A99,95) anodowych powłok tlenkowych przeznaczonych na uzwojenia elektrycznych urządzeń sterujących w pojazdach. Jako kryterium oceny elektrycznych właściwości izolacyjnych przyjęto, zgodnie z normami europejskimi, napięcie przebicia. Napięcie mierzono na wykonanym do tego celu stanowisku pomiarowym. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono istotny wpływ wielkości pola powierzchni styku elektrody pomiarowej i materiału izolacyjnego zarówno dla powłok tlenkowych, jak i konwencjonalnych materiałów izolacyjnych, tj. tworzyw sztucznych. Powierzchnia styku powyżej 10 cm^2 nie wywiera wpływu na mierzoną wartość napięcia przebicia. Wytrzymałość elektryczna powłok $20 \times 10^6 \text{ [V/m]}$ umożliwia wytworzenie przeznaczonych do pojazdów uzwojeń z izolacją o grubości $3 \text{ }\mu\text{m}$, co pozwala na redukcję wymiarów urządzeń elektrycznych.

INVESTIGATIONS OF INSULATING PROPERTIES OF CERAMIC MATERIALS DESTINED FOR AUTOMOTIVE INDUSTRY

Summary. The measuring method of insulating properties of anodic hard covering on aluminium strips destined for windings of steering equipment in vehicles has presented in this paper. As the criterion for estimation of insulating properties was, according to european standards, the breakdown voltage chosen. The breakdown voltage was measured using measuring equipment, for this aim made. On the base of results of the investigation a significant influence of the area of measuring electrode contact surface on level of measured voltage for plastic and anodic hard covering was stated. Only electrodes with contact area's surface greater then 10 cm^2 have any influence on the breakdown voltage level. Dielectrical strength of oxide layer $20 \times 10^6 \text{ [V/m]}$ make producing of windings with insulating oxide layer with $3 \text{ }\mu\text{m}$ thickness for vehicles possible. This allowed reducing the dimensions of electrical equipment.

WPROWADZENIE

W wybranych dziedzinach przemysłu maszynowego i budowy pojazdów są prowadzone badania nad zmniejszeniem masy układów elektromagnetycznych [1]. Nowatorskim rozwiązaniem znajdującymi już pojedyncze zastosowania w przemyśle są m. in. użycie metali amorficznych do wytwarzania rdzeni transformatorowych i cewek indukcyjnych [2] oraz zastapie-

nie uzwojeń z drutów miedzianych taśmami aluminium. Rdzenie z taśm z metali amorficznych posłużyły już do wytworzenia transformatorów o znacznie mniejszych stratach energetycznych (o ok. 75+80%) niż z rdzeniami z blach żelazowo-krzemowych. Połączenie zalet rdzeni z metali amorficznych i uzwojeń z taśm aluminium daje bardzo duże możliwości ograniczenia zużycia paliwa wszelkich pojazdów od naziemnych począwszy, a na kosmicznych skończywszy [2, 3]. Jednak to rozwiązanie jest ograniczone trudnościami technologicznymi i dość wysokimi kosztami wytwarzania amorficznych taśm metalowych do rdzeni o większych wymiarach. Dlatego na dzień dzisiejszy zmniejszenie masy układów elektromagnetycznych jest możliwe poprzez zastosowanie uzwojeń z taśm aluminium.

Bardziej praktyczne z ekonomicznego punktu widzenia przy dzisiejszym rozwoju techniki wysokiej skali integracji jest wytwarzanie uzwojeń z taśm aluminium zamiast z drutów lub taśm miedzianych. Taśmy aluminium są już stosowane do produkcji uzwojeń elektromagnesów o masie znacznie mniejszej niż z uzwojeniami miedzianymi. Jeszcze lepsze wyniki daje zastosowanie w budowie transformatorów uzwojeń DN wykonanych z folii aluminium i izolowanych tkaniną „prepreg” z włókna szklanego, aluminium uzwojeń krążkowych z podwójną izolacją warstwową zalewaną próżniowo żywicą epoksydową oraz uzwojeń „Resiblock” zatapianych w żywicy. Użycie tych uzwojeń pozwala na pracę transformatorów w temperaturach arktycznych (nawet do -65°C) oraz w warunkach szoków termicznych i silnie zmieniających się obciążeń [4, 5]. Takie warunki panują w pojazdach eksploatowanych w różnych porach roku na różnych szerokościach geograficznych. Doświadczenia zdobyte w energetyce mogą być bardzo pomocne przy zastosowaniu uzwojeń aluminium w budowie pojazdów.

Dobre wyniki zastosowania uzwojeń aluminium w elektromagnesach do podnoszenia blach stalowych lub złomu [1], w głośnikach wysokiej jakości [6] zachęciły przedstawicieli innych gałęzi przemysłu, w tym samochodowego, do podjęcia własnych prób [3, 7].

W laboratoriach ośrodków naukowych i wytwórców pojazdów są prowadzone badania nad elektromagnetycznymi układami sterowania zaworów [3, 6, 8]. Poprzez wprowadzenie takiego sterowania jest możliwe wyeliminowanie zużywających się i rozpraszających określone ilości energii na pokonanie oporów tarcia zaworów mechanicznych i ich rozrządu. Wprowadzenie zaworów elektromagnetycznych umożliwia poprawienie charakterystyki silnika poprzez sprawniejszą wymianę mieszanki paliwowo-powietrznej, co może zmniejszyć zużycie paliwa [3, 7]. Poza układami rozrządu próbuje się już zastąpić dotychczasowe układy mechaniczne i mechaniczno-hydrauliczne układami elektromechanicznymi lub elektrycznymi, np. układy hamulcowe i serwomechanizmy układu kierowniczego. Wprowadzenie takich układów wymaga jednak zwiększenia napięcia zasilania z 12 do 42 V [7]. Poza tym użycie uzwojeń z aluminium zamiast wykonanych ze stali stopowych elementów rozrządu mechanicznego umożliwi zmniejszenie masy samego silnika.

Zastosowanie aluminium zmniejsza masę uzwojeń, ale używane dotychczas izolacje przekładkowe z nasączanych tworzyw sztucznych zwiększają istotnie wymiary samych uzwojeń, ponieważ ich grubość jest dość znaczna (do 20 μm). Dodatkowo dla zabezpieczenia przed lokalnym przebicciem muszą być stosowane dwie przekładki, co daje w sumie 40 μm izolacji. W dobie miniaturyzacji podzespołów maszyn i urządzeń dąży się do zmniejszenia wymiarów i uzyskania zwartej konstrukcji wyrobu. Możliwość zmniejszenia wymiarów uzwojeń aluminium daje zastosowanie izolacyjnych powłok lakierowych oraz znanej z innych zastosowań anodowej powłoki tlenkowej (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). Biorąc pod uwagę wysokie temperatury, przy których można stosować powłoki tlenkowe (1000-1200 $^{\circ}\text{C}$), można zauważyć ich zalety w porównaniu z izolacjami z tworzyw sztucznych. W przypadku używanych w charakterze izolatora elektrycznego powłok tlenkowych nie można mówić o anodowej powłoce, lecz

o wytworzonej elektrolitycznie powłoce tlenkowej, ponieważ w większości przypadków jest ona wytwarzana prądem zmiennym lub z nałożeniem prądu stałego i zmiennego lub impulsowego. Dlatego w dalszej części pracy będzie używane określenie powłoka tlenkowa (PT).

Możliwości zwiększenia napięcia przebicia powłok tlenkowych daje wprowadzenie do porów tej powłoki substancji izolacyjnych, w wyniku czego uzyskuje się powłoki kompozytowe typu PT+MI. Istotnym argumentem przemawiającym za izolacją w postaci 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.

Jak już wspomniano, wytworzone elektrolitycznie powłoki tlenkowe charakteryzują się dobrymi właściwościami izolacyjnymi, które są wyrażane dużym napięciem przebicia (dużą wytrzymałością elektryczną). Na podstawie analizy dostępnej literatury można stwierdzić, że istnieje niewiele informacji na temat pomiaru tej wielkości. Obowiązujące normy [9] dotyczą przede wszystkim pomiaru napięcia przebicia klasycznych materiałów izolacyjnych, tj. gum, polimerów i izolatorów ceramicznych. Powłoki tlenkowe znajdują coraz szersze zastosowanie jako izolatory w różnych urządzeniach, w których pracują pod różnymi napięciami. Chcąc wytwarzać powłoki tlenkowe o określonych właściwościach izolacyjnych, należy poznać wpływ parametrów procesu ich wytwarzania na te właściwości. Chcąc mierzyć i porównywać uzyskane wartości w sposób powtarzalny, należy opracować metodykę pomiaru napięcia przebicia dla powłok tlenkowych, które są ceramikami o szczególnych właściwościach. Zagadnieniom związanym z metodami pomiaru napięcia przebicia powłok tlenkowych, a tym samym właściwości izolacyjnych, jest poświęcony niniejszy artykuł.

2. BADANIA ZALECANE PRZEZ POLSKIE NORMY

Zalecane przez polską normę [11] metody pomiaru napięcia przebicia materiałów izolacyjnych nie uwzględniają specyfiki budowy i właściwości wytworzonych elektrolitycznie 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 powłok tlenkowych wytworzonych w procesie elektrochemicznego utleniania w roztworach różnych kwasów oraz przy użyciu różnych prądów. Z doświadczeń autorów [10] wynika, że do podstawowych przyczyn ograniczonego zastosowania dotychczasowej normy należy zaliczyć:

- przyjęcie w normie założenia o braku wpływu wielkości i kształtu pola powierzchni roboczych elektrod na wynik pomiarów (z badań własnych autorów wynika, że ten wpływ istnieje zarówno przy pomiarach izolacji z tworzyw sztucznych, jak i powłok tlenkowych, co zostało przedstawione w następnym rozdziale artykułu);
- zalecane w normie grubości próbek nie mają odniesienia do powłok tlenkowych (powłoki tlenkowe są znacznie cieńsze niż klasycznych materiałów izolacyjnych),
- preferowanie w normie materiału na elektrody pomiarowe innego niż zalecany i stosowany dotychczas do badań właściwości powłok tlenkowych.

3. BADANIA WŁASNE

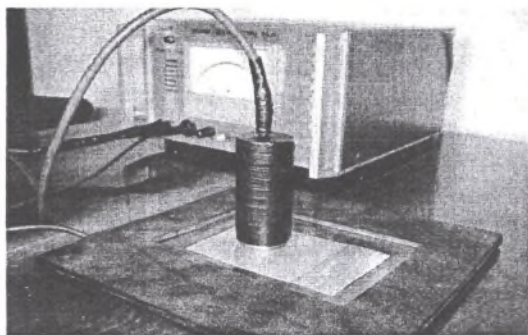
Chcąc stosować świadomie powłoki tlenkowe jako materiały izolacyjne w różnych układach elektrycznych pojazdów pracujących pod różnymi napięciami, należy poznać i opisać ich właściwości i wpływ parametrów wytwarzania na te właściwości. W tym celu zbudowano własne stanowisko pomiarowe w oparciu o istniejący miernik izolacji P435, na którym wykonano szereg badań laboratoryjnych. W pierwszym etapie badań sprawdzono poprawność przyjętej metody pomiarów właściwości izolacyjnych powłok, w tym napięcia przebicia. Dla

porównania wykonano równoległe pomiary na foliach z tworzyw sztucznych, dla których istnieją zalecenia polskich norm dotyczące pomiaru napięcia przebicia.

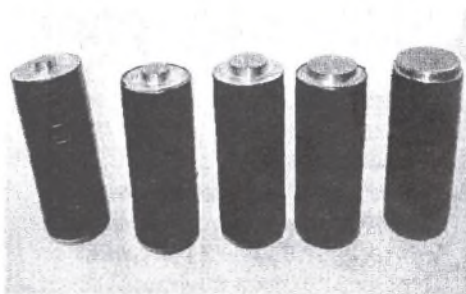
3.1. Stanowisko pomiarowe

W ramach przeprowadzonych badań [12] wykonano stanowisko pomiarowe, opracowano podstawy metody pomiarów oraz dokonano sprawdzenia opracowanej metody na różnych materiałach izolacyjnych, tj. na tworzywach sztucznych, których dotyczy PN-EN 60343 12/96 oraz na powłokach tlenkowych. W celu zbadania wpływu pola powierzchni elektrody na zmierzoną wartość napięcia przebicia przyjęto trzy grupy elektrod, tj. o małym ($S = 1, 2, 3 \text{ cm}^2$), średnim ($S = 6, 10, 12 \text{ cm}^2$) i dużym ($S = 16, 20, 24 \text{ cm}^2$) polu powierzchni. Kształt i wymiary elektrod dobrano tak, żeby miały taką samą masę (1 kg), co pozwala przeprowadzić pomiary przy takim samym obciążeniu powłoki tlenkowej. Kształt poszczególnych grup elektrod zależy od wielkości powierzchni pomiarowej. Dla przedziału od $1\text{-}10 \text{ cm}^2$ użyto jednolitych elektrod walcowych o powierzchni styku w kształcie koła, natomiast zakres od $12\text{-}24 \text{ cm}^2$ to elektrody płaskie zrobione z blachy miedzianej o kształcie prostokątnym. Kształt elektrod użytych do badań (podłączonych do dodatniego bieguna zasilania) pokazano na rysunku 2.

Pomiary napięcia przebicia wykonano za pomocą miernika izolacji typu P435 z trójstopniowym zakresem pomiarowym 1, 3 i 10 kV, co zapewnia pomiary w liniowym zakresie charakterystyki przyrządu. Badania wykonano dla powłok i foli z polietylenu o zakresie grubości od 20 do $40 \mu\text{m}$, dla których wartość napięcia przebicia nie przekroczyła 3 kV. Miernik wyposażono w elektrody pomiarowe. Jedną z nich podłączoną do ujemnego bieguna źródła napięcia wykonano jako izolowaną płytę miedzianą o polu pomiarowym 160×100 , a drugą stanowił zestaw walców lub prostopadłościanów, rys. 1 i 2.



Rys. 1. Stanowisko do pomiaru napięcia przebicia (1 - płaska, izolowana od spodu katoda, 2 - cylindryczna/prostopadłościenna anoda, 3 - przewody wysokiego napięcia, 4 - miernik P435)
Fig. 1. View of the breakdown voltage's measuring stand (1 - flat, from bottom insulated cathode, 2 - cylindrical/ rectangular anode, 3-high voltage wire, 4 - measuring instrument P435)



Rys. 2. Widok powierzchni pomiarowych użytych do badań elektrod o masie 1 kg i powierzchniach styku 1, 2, 3, 6 i 10 cm^2
Fig. 2. View of measuring surfaces of the investigating electrodes with mass of 1 kg and a contact surface's area 1, 2, 3, 6 i 10 cm^2

Próbki do badań wykonano z aluminium A99,95 w stanie twardym używanego do produkcji uzwojeń elektromagnesów. Utlenianie anodowe wykonano w wodnym roztworze kwasu szczawiowego o stężeniu 5,56% przy anodowej gęstości prądu $I = 1,5 \text{ A/dm}^2$ w temperaturze elektrolitu $t = 19^{\pm 1} \text{ }^{\circ}\text{C}$. Próbkę przed utlenianiem zostały przygotowane zgodnie z zaleceniami

Zrzeszenia Qualanod [13]. Czas utleniania dobrano tak, żeby uzyskać grubość powłoki $g=25^{±1} \mu\text{m}$.

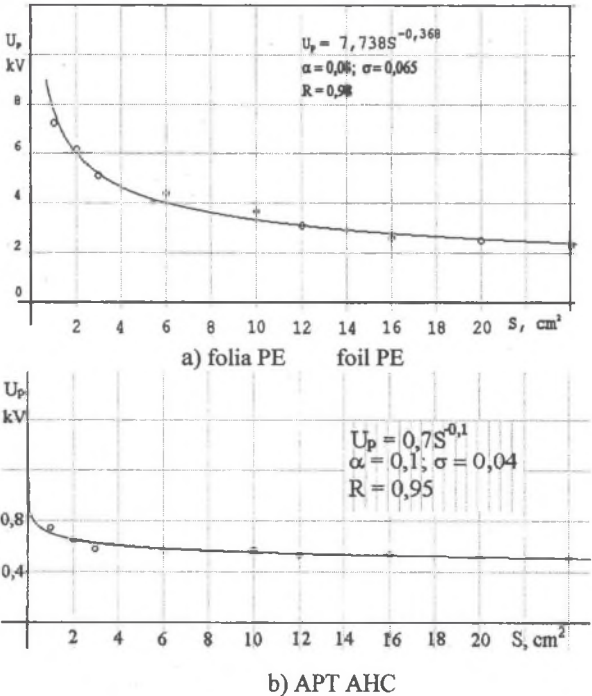
3.2. Wyniki badań

Badania napięcia przebicia przeprowadzono według ustalonej metody, mianowicie badaną próbkę z warstwą tlenku na jej powierzchni umieszczano na płaskiej katodzie, następnie na próbce umieszczano drugą elektrodę (anodę) o masie 1 kg.

Tabela 1

Napięcia przebicia folii PE/PA o grubości 25 μm dla różnych wielkości powierzchni elektrody

Nr próby	Wartość napięcia przebicia folii U_p [kV] dla elektrody o powierzchni styku S [cm ²]								
	1	2	3	6	10	12	16	20	24
1.	7	6	5,2	4,6	3,8	3,2	2,8	2,6	2,4
2.	7,2	6,2	4,8	4,4	4,0	3,0	2,8	2,6	2,3
3.	7,4	6,1	5,3	4,5	3,7	3,2	2,7	2,6	2,4
4.	7,1	6,4	5,1	4,4	3,7	3,1	2,6	2,5	2,5
5.	7,0	6,5	4,9	4,2	3,4	3,0	2,4	2,3	2,3
6.	7,4	5,8	5,0	4,4	3,7	3,1	2,6	2,4	2,4
7.	7,3	6,0	5,1	4,3	3,5	3,0	2,5	2,4	2,3
8.	7,2	6,1	5,2	4,3	3,6	3,2	2,6	2,3	2,1
9.	7,3	6,3	5,2	4,5	3,4	3,2	2,7	2,5	2,1
10.	7,1	6,2	5,1	4,3	3,4	3,1	2,5	2,6	2,2
U_p śr.	7,2	6,16	5,1	4,4	3,63	3,11	2,62	2,48	2,3
odch. stand. U_p śr.	0,14	0,20	0,15	0,12	0,20	0,09	0,12	0,12	0,12



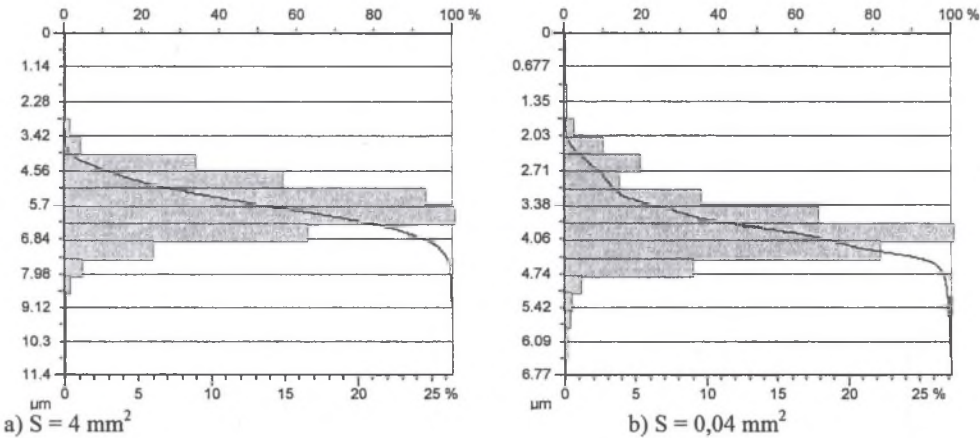
Rys. 3. Wpływ pola powierzchni styku elektrody na wartość napięcia przebicia
Fig. 3. Influence of the electrode contact surface's area on the breakdown voltage

Podczas płynnego zwiększania napięcia w o stałą wartość w czasie dochodzi w pewnym momencie do przebicia elektrycznego powłoki tlenkowej, co jest sygnalizowane świeceniem czerwonej lampki na urządzeniu pomiarowym oraz wyraźnym brzęczeniem dodatkowego sygnalizatora akustycznego. Wszystkie próbki przed badaniem były suszone w tych samych warunkach, tj. w powietrzu o temperaturze 105° C. Pomiaru wykonano w ten sposób, że elektrody zawsze były ustawiane na obszarze powłoki tlenkowej lub folii PE nie mającym wcześniej kontaktu z elektrodą pomiarową. Wybrane wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w tabelach 1 i 2 oraz na rysunkach 3 i 4.

Tabela 2

Napięcia przebicia powłoki tlenkowej o grubości 25 µm dla różnych wielkości powierzchni elektrody

Nr próby	Wartość napięcia przebicia powłoki tlenkowej U_p [V] dla elektrody o powierzchni styku S [cm ²]								
	1	2	3	6	10	12	16	20	24
1.	740	620	560	540	560	560	570	540	510
2.	740	610	570	600	560	530	560	520	520
3.	760	610	560	570	590	560	510	520	500
4.	750	600	610	570	580	530	540	520	520
5.	740	710	620	590	580				
6.	750	720	580	600	540				
7.	730	720	590	550	560				
$U_{p\text{sr}}$	744	655	584	574	567	545	545	525	512
odch. stand. $U_{p\text{sr}}$	9,5	53,0	23,7	23,7	17	17,3	22,4	10	9,6
Wytrzymałość elektryczna $\times 10^6$ [V/m]	29,76	26,2	23,36	22,96	22,68	21,8	21,8	21	20,48

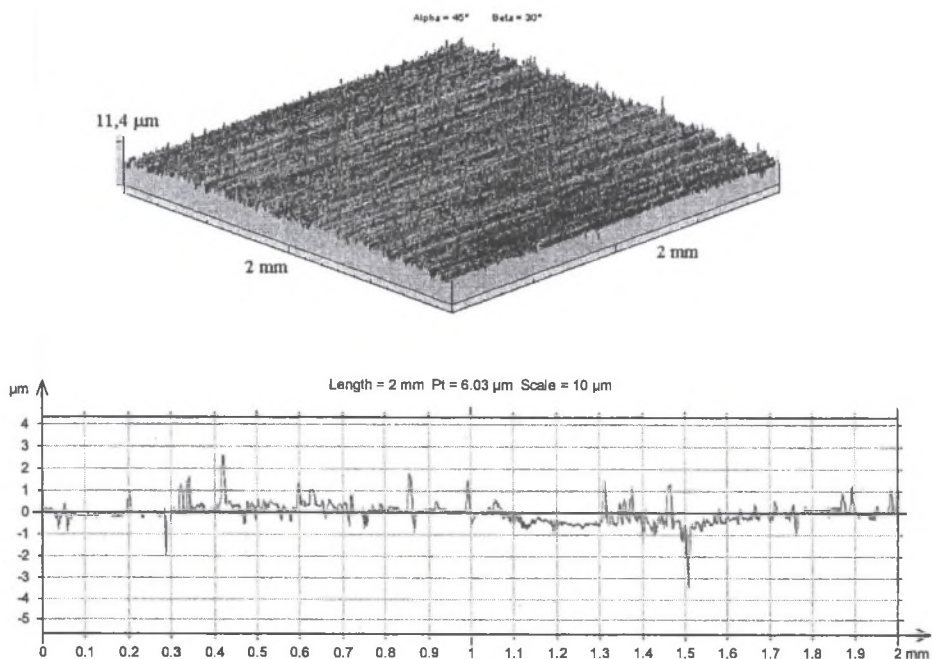


Rys. 4. Krzywa nośności (Abbotta) badanej powłoki tlenkowej o różnej powierzchni
Fig. 4. Abbott-Firestone curve of the anodic hard coating with different area

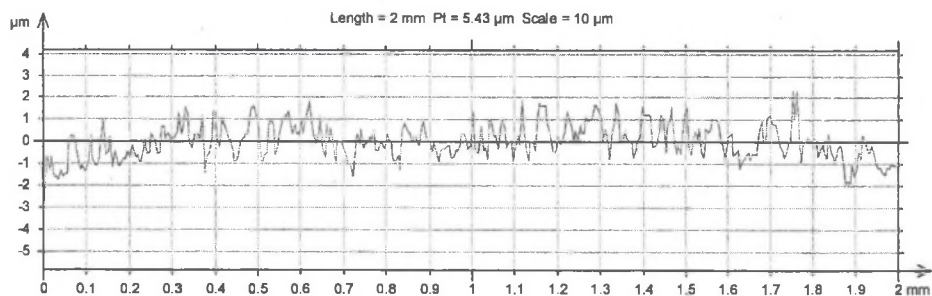
3.3. Omówienie wyników badań

Jak wynika z przedstawionych w tabelach 1 i 2 oraz na rysunku 3 wyników, zmierzona wartość napięcia przebicia zależy od wielkości pola powierzchni styku elektrody pomiarowej do około 10 cm² zarówno dla folii PE, jak i anodowej powłoki tlenkowej. W przypadku

folii napięcie przebicia zmierzone elektrodą o powierzchni 1 cm^2 jest prawie dwukrotnie wyższe niż zmierzone elektrodą o powierzchni styku 10 cm^2 ($7,2 \text{ kV}$ do $3,63 \text{ kV}$). Dla anodowej powłoki tlenkowej stosunek ten jest korzystniejszy: 744 V do 567 V , co stanowi ponad 30% większą wartość napięcia przy mniejszej elektrodzie. Pomiary elektrodami o powierzchni styku powyżej 10 cm^2 są obarczone już tylko błędem poniżej 4% przy pomiarach elektrodami o powierzchni $S = 10 \text{ cm}^2$ i 12 cm^2 ($567:545 \text{ V}$) oraz poniżej 6% przy $S = 10 \text{ cm}^2$ i $S = 24 \text{ cm}^2$ ($545:512 \text{ V}$) dla powłoki tlenkowej. Pomiary napięcia przebicia folii elektrodami o powierzchni $S > 10 \text{ cm}^2$ są obarczone nadal dużym błędem, tj. prawie 60% mniejsze napięcie dla $S = 24 \text{ cm}^2$ w porównaniu z $S = 10 \text{ cm}^2$. Konwencjonalne materiały izolacyjne, tj. tworzywa sztuczne, nie są przedmiotem naszych badań, ponieważ ze względu na niskie temperatury zastosowań nie nadają się do elementów sterowania silników spalinowych.



a) równoległe do kierunku polerowania

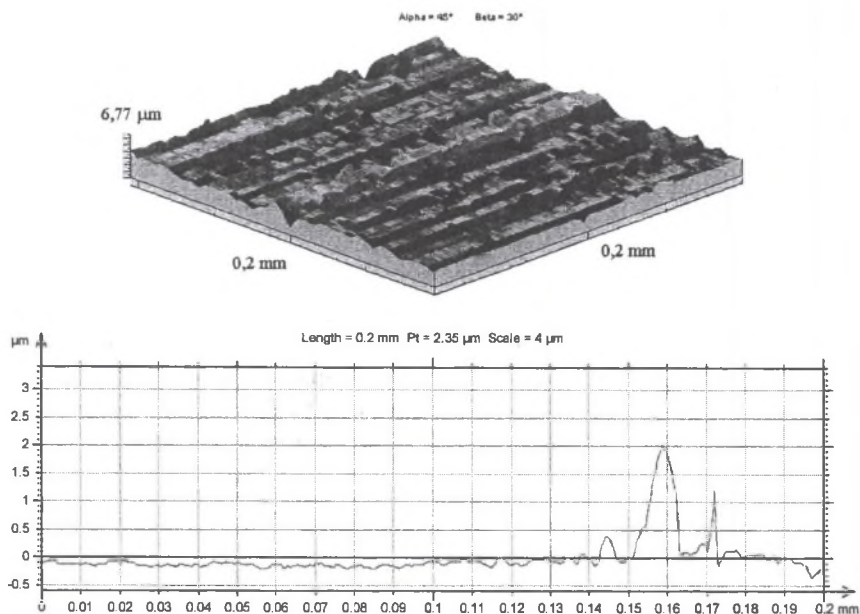


b) prostopadłe do kierunku polerowania

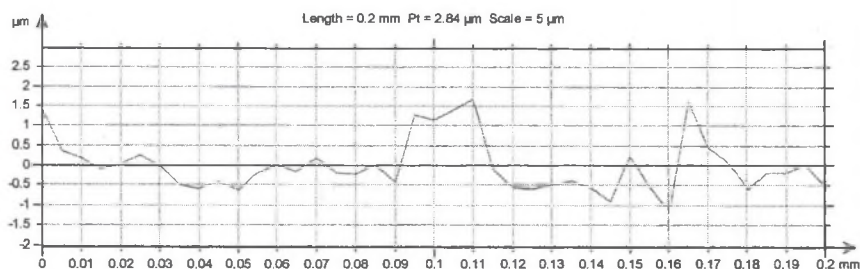
Rys. 5. Profile chropowatości 3D i 2D powierzchni powłoki tlenkowej $S = 4 \text{ mm}^2$
Fig. 5. Roughness 3D and 2D profiles of anodic oxide layer with $S = 4 \text{ mm}^2$

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że błędy pomiarów napięcia przebicia anodowych powłok tlenkowych elektrodami o polu powierzchni powyżej 10 cm^2 są mniejsze niż 5%, co odpowiada miernikom klasy przemysłowej. Dlatego należy przyjąć, że minimalne pole powierzchni elektrody powinno wynosić 10 cm^2 .

W tym miejscu należy zadać sobie pytanie: co jest przyczyną przebicia elektrycznego materiałów izolacyjnych niższym napięciem przy większej powierzchni styku elektrody z badanym materiałem? Poszukując odpowiedzi na to pytanie, wykonano profilografometryczne badania topografii powierzchni powłok tlenkowych o dwóch różnych wielkościach, tj. 4 i $0,4 \text{ mm}^2$, w wyniku których stwierdzono, że wraz ze wzrostem pola powierzchni elektrody zwiększa się liczba rzeczywistych punktów styku elektrody z badanym materiałem, rys. 5 i 6.



a) równoległe do kierunku polerowania



b) prostopadłe do kierunku polerowania

Rys. 6. Profile chropowatości 3D i 2D powierzchni powłoki tlenkowej $S = 0,04 \text{ mm}^2$
Fig. 6. Roughness 3D and 2D profiles of anodic oxide layer with $S = 0,4 \text{ mm}^2$

Pomiary chropowatości 2D wykonano w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, tj. równoległe i prostopadłe do kierunku polerowania taśmy. Średnia liczba wierzchołków nierówności przypadająca na jednostkę powierzchni jest stała, a więc wraz ze wzrostem po-

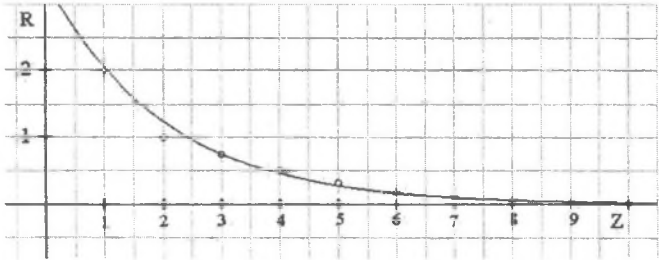
wierzchni styku zwiększa się liczba wierzchołków, na których opiera się elektroda pomiarowa. Przedstawiono to na profilach dwuwymiarowych (2D) oraz trójwymiarowych (3D), rys. 5 i 6. Z rysunku 4 wynika, że większość wysokości wierzchołków nierówności mieści się w przedziale od 4,6 do 6,8 μm dla powierzchni 4 mm^2 oraz w przedziale 3,38 do 4,7 μm dla powierzchni 0,04 mm^2 . Na mniejszej powierzchni występują tylko nieliczne wierzchołki o wysokości 6 μm . Jednak maksymalna wysokość chropowatości R_{max} zależy od wyboru miejsca pomiaru. W tabeli 3 przedstawiono wybrane 4 wyniki z pomiarów w miejscach o powierzchni 0,04 mm^2 (A, B, C i D) oraz z jednego o powierzchni 4 mm^2 . Jak wynika z danych zawartych w tabeli, tylko na jednym z czterech pól pomiarowych występują wierzchołki o wysokości zbliżonej do wysokości zmierzonych na polu $S = 4 \text{ mm}^2$.

Z doświadczeń inżynierii powierzchni wynika, że styk elektrody z tlenkiem ma miejsce na wierzchołkach chropowatości o maksymalnych wysokościach. Każdy wierzchołek nierówności powierzchni tlenku stykający się z elektrodą stanowi opór dla przepływu prądu. Całkowita rezystancja powłoki tlenkowej jest sumą rezystancji wierzchołków nierówności (R) i części nieporowatej powłoki (R). Wszystkie stykające się z elektrodą wierzchołki stanowią równoległe połączenie rezystorów, których opór zastępczy maleje wraz ze wzrostem liczby rezystorów, rys. 7. Podczas pomiaru napięcia przebicia na większych powierzchniach (więcej rezystorów połączonych równoległe) opór pomiędzy elektrodą pomiarową i powłoką tlenkową maleje do wartości rezystancji części nieporowatej, co przyczynia się do spadku wartości napięcia, przy którym zaczyna płynąć prąd.

Tabela 3

Parametry wysokościowe chropowatości zmierzone na powierzchniach różnej wielkości

S = 4 mm ²	S = 0,04 mm ²			
	A	B	C	D
Sa = 0,6 μm	Sa = 0,46 μm	Sa = 0,33 μm	Sa = 1,04 μm	Sa = 1,28 μm
Smax = 14,34 μm	Smax = 3,9 μm	Smax = 2,9 μm	Smax = 7,2 μm	Smax = 11,0 μm
Sz = 12,7 μm	Sz = 2,9 μm	Sz = 2,35 μm	Sz = 7,61 μm	Sz = 9,64 μm



Rys. 7. Zależność rezystancji zastępczej (R) od liczby wierzchołków (Z) chropowatości anodowej powłoki tlenkowej w styku z elektrodą pomiarową

Fig. 7. Equivalent resistance (R) dependent on roughness picks number (Z) of anodic hard coating in contact with measuring electrode

4. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika, że wytrzymałość elektryczna anodowych powłok tlenkowych wytworzonych w określonym elektrolicie (5% wodny roztwór $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) na stosowanych na uzwojenia urządzeń elektrycznych taśmach zdąża asymptotycznie do wartości 20

$\times 10^6$ V/m (20 V/ μ m). Biorąc pod uwagę napięcie zasilania większości dzisiejszych pojazdów samochodowych 12 V, można założyć, że do skutecznego odizolowania uzwojeń aluminiowych wystarczy powłoka tlenkowa o grubości 1 μ m. Porównując opisane we wstępie dotychczasowe technologie wykonywania izolacji folii aluminiowych, tj. nawijanie wraz z folią tkaniny „prepreg” i późniejsze próżniowe jej impregnowanie żywicami, można wyciągnąć wnioski, że stosowanie wytworzonych w prosty sposób, jedną z dobrze poznanych technologii powierzchni, tj. przez elektrolityczne utlenianie, powłok tlenkowych jako izolatorów daje nieporównywalne korzyści. Dlatego należy dokładnie zbadać wpływ parametrów utleniania na właściwości izolacyjne powłok tlenkowych i dokonać optymalizacji procesu utleniania w celu zwiększenia wytrzymałości elektrycznej powłok tlenkowych.

Opracowana metoda badania wytrzymałości elektrycznej powłok tlenkowych pozwala na pomiar napięcia przebicia z niedokładnością nieprzekraczającą 5%, co umożliwi kontrolę wytwarzania uzwojeń z izolacją o grubości dobranej do wartości napięć w układach elektrycznych pojazdów.

Literatura

1. ANO-FOL Eloxiertes Aluminium Leitermaterial und Spulen, Aluminiumspaltband. Prospekty Firmy Steinert, Köln 2001.
2. Lachowicz H.: Magnetyki amorficzne. Wiedza i Życie nr 9/1997.
3. Innovative Ventilsteuerung spart Kraftstoff. Projekt LSP Innovative Automotive Systems GmbH Aachen, Aachen 2005.
4. Transformatory rozdzielcze suche żywiczne Resiblock. Broszura firmowa ABB Transformers Power Technology Division, Zürich 2006.
5. Transformatory rozdzielcze suche żywiczne w technologii Cast Coil. Broszura firmowa ABB Transformers Power Technology Division, Zürich 2006.
6. Marschner G.: Anodized Aluminum Wire - High Temperature Insulation Light weight Conductors. Publisher of Oxinal Corporation, Minden NV, 2000.
7. 42-V Bordnetzspannung. Jahresbericht 2002, Verband der Automobilindustrie. Auto and Umwelt.
8. Anodierte Aluminiumbänder als Wickelleiter für Transformatorensulen. Verbundprojekt BMWa, TU Chemnitz, Chemnitz 2002-2003.
9. 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.
10. Posmyk A., Bąk Ł.: Powłoki tlenkowe i wytworzone na ich osnowie powłoki kompozytowe przeznaczone na aluminiowe elementy układu elektrycznego sterowania zaworów silników spalinowych.
11. PN-EN 60343 12/96 „Zalecane metody określenia względnej odporności materiałów elektroizolacyjnych na przebicie w warunkach wyładowań powierzchniowych”.
12. Posmyk A.: Materiały kompozytowe w budowie pojazdów. Badania własne Katedry Eksploatacji Pojazdów, Wydział Transportu, Politechnika Śląska, Katowice 2006.
13. Vorschriften für das Gütezeichen für anodisch erzeugte Oxidschichten auf Aluminium-Halbzeug in der Architektur. Ausgabe Oktober 1999, Zürich.

Recenzent: Dr hab. Władysław Skoneczny