

Łukasz BAŁK

PRZEBICIE ELEKTRYCZNE IZOLACYJNEJ WARSTWY TLENKU ALUMINIUM ELEKTRYCZNYCH PODZESPOŁÓW POJAZDÓW

Streszczenie. W artykule przedstawiono podstawowe zastosowania elektrolitycznych warstw tlenkowych jako izolatora uzwojeń elektromagnesów i transformatorów oraz uzwojeń elektrycznych siłowników służących do sterowania zaworów silników spalinowych pojazdów samochodowych. Opisano wyniki badań mechanizmu przebicia elektrycznego anodowych powłok tlenkowych wytworzonych na taśmach aluminiowych (Al99,5), przeznaczonych na uzwojenia elektrycznych urządzeń sterujących w pojazdach. W artykule opisano wyniki badań zjawisk zachodzących w powłoce tlenkowej oraz w warstwie powierzchniowej utlenionej taśmy aluminiowej (Al99,5), w miejscu przebicia elektrycznego. Do przebicia elektrycznego wykorzystano elektrodę stożkową, pozwalającą ściśle określić miejsce zniszczenia powłoki wskutek przepływu prądu elektrycznego. Podczas badań wykonano pomiary i rejestrację krzywych przebiegu napięcia i prądu przebicia w celu określenia energii zużytej na uszkodzenie warstwy tlenkowej. Ilość energii elektrycznej zużytej podczas przebicia jest wystarczająca do stopienia zarówno warstwy tlenkowej, jak i mikroobjętości aluminium pod warstwą.

ELECTRICAL BREAKDOWN OF ALUMINIUM OXIDE INSULATING LAYER ELECTRICAL SUB-ASSEMBLY VEHICLES

Summary. The thesis presents the basic applications of electrolytic oxide layers as insulator of electric winding of electromagnet and transformers and electric winding of cylinders used for steering the valve of combustion engines. The results of research describe the mechanism of avalanche breakdown of oxide layers anode produced on aluminum strip (Al99,5), designed for electric winding which steer the vehicle equipment and valve of combustion engines.

The phenomena occurring in the oxide layer and surface layer of oxidized aluminum strip (Al99,5) where the avalanche breakdown occurred are described. Conical electrode was used to define precisely the place of layer destruction due to electric current flow. During the research measurements and registration of voltage and current curve were made to define the energy used to destroy the oxide layer. The amount of energy used during the avalanche breakdown is enough to melt both the oxide layer and micro volume of aluminum under the layer.

1. WPROWADZENIE

Zmniejszenie masy pojazdów wywiera istotny wpływ na ich właściwości użytkowe, w tym pozwala zmniejszyć zużycie paliwa oraz ilość emitowanych spalin zanieczyszczających środowisko. Dlatego w wybranych dziedzinach przemysłu

maszynowego i budowy pojazdów są prowadzone badania nad zastosowaniem nowych materiałów o mniejszej gęstości, np. zastąpieniem miedzianych uzwojeń układów elektromagnetycznych aluminiowymi [1]. Dodatkową korzyścią z zastosowania uzwojeń aluminiowych jest możliwość zastąpienia dotychczasowych preszpanowych przekładek izolacyjnych elektrolityczną warstwą tlenkową, której jednostkowe napięcie przebicia jest większe niż preszpanów. Wszystko to wymaga badań podstawowych, dających nowe technologie lub rozwijających już istniejące na nowym polu zastosowań.

2. ELEKTROLITYCZNE WARSTWY TLENKOWE JAKO IZOLACJA UZWOJEŃ Z TAŚM ALUMINIOWYCH STOSOWANYCH W PODZESPOŁACH POJAZDÓW

Obecnie w wybranych dziedzinach przemysłu maszynowego i budowy pojazdów są prowadzone badania nad zmniejszeniem masy układów elektromagnetycznych. Ponieważ gęstości aluminium (2720 kg/m^3) jest mniejsza niż miedzi (8933 kg/m^3) i przewodność elektryczna aluminium ($38,2 \text{ MS/m}$) jest mniejsza około 1,6 razy od miedzi ($59,7 \text{ MS/m}$), więc masa elektrycznego układu sterowania rozrządem silnika spalinowego wykonanego z taśm aluminiowych jest o około połowę mniejsza niż układu wykonanego z drutów miedzianych.

W przemyśle niemieckim są już stosowane rozwiązania polegające na zastąpieniu uzwojeń z drutów miedzianych uzwojeniami z taśm aluminiowych. Taśmy aluminiowe znalazły zastosowanie do produkcji uzwojeń elektromagnesów [2] o masie znacznie mniejszej niż

z uzwojeniami miedzianymi. Jeszcze lepsze wyniki daje zastosowanie w budowie uzwojeń NN transformatorów wykonanych z folii aluminiowych i izolowanych tkaniną „prepreg” z włókna szklanego, aluminiowych 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 [3]. Doświadczenia zdobyte w energetyce mogą być bardzo pomocne przy zastosowaniu uzwojeń aluminiowych w budowie pojazdów.

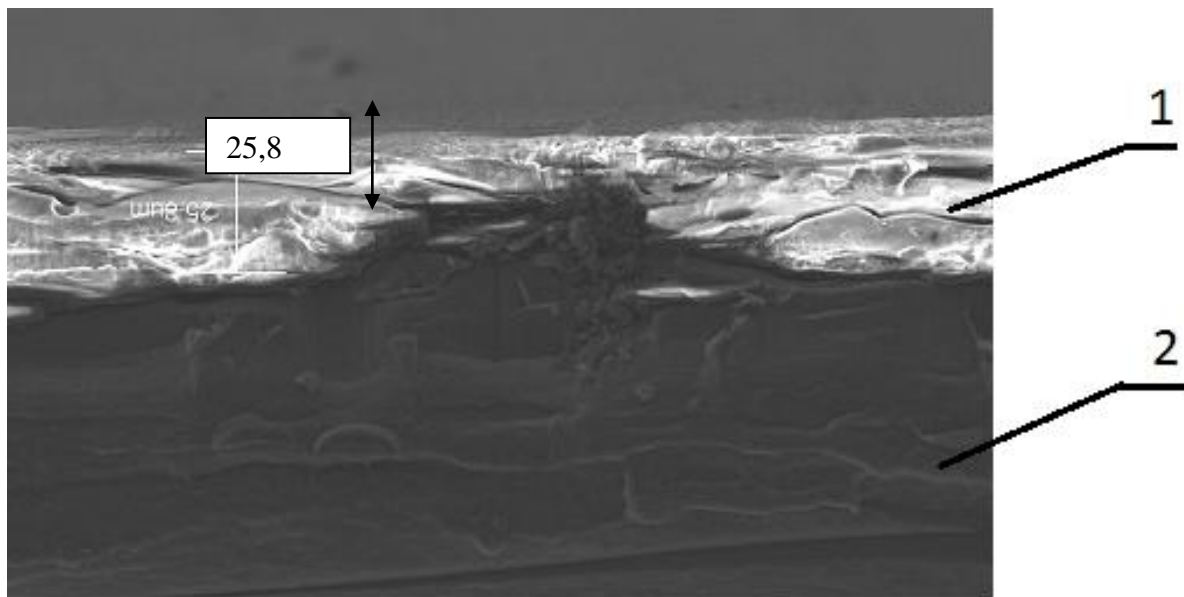
Wyniki zastosowania uzwojeń aluminiowych w elektromagnesach zachęciły producentów przemysłu samochodowego do podjęcia własnych prób wytwarzania uzwojeń z taśm aluminiowych [1, 6]. W laboratoriach ośrodków naukowych i wytwórców pojazdów są prowadzone badania nad elektromagnetycznymi układami sterowania zaworów [1]. Przez wprowadzenie takiego sterowania możliwe jest wyeliminowanie zużywających się i rozpraszających określone ilości energii na pokonanie oporów tarcia zaworów mechanicznych i ich rozrządu. Wyposażenie zaworów w siłowniki elektromagnetyczne umożliwi poprawę charakterystyki silnika poprzez sprawniejszą wymianę mieszanki paliwowo-powietrznej, co może zmniejszyć zużycie paliwa [1]. Poza układami rozrządu próbuje się już zastąpić dotychczasowe układy mechaniczne i mechaniczno-hydrauliczne układami elektromechanicznymi lub elektrycznymi, np. układy hamulcowe i serwomechanizmy układu kierowniczego, aczkolwiek wymusza to zwiększenie napięcia zasilania z 12 do 42 V [6].

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 $20 \mu\text{m}$). Dodatkowo dla zabezpieczenia przed lokalnym przebiciem muszą być stosowane dwie przekładki, co daje w sumie $40 \mu\text{m}$ izolacji. W dobie miniaturyzacji podzespołów pojazdów 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 elektrolitycznej warstwy tlenkowej (EWT), która charakteryzuje się wysokim jednostkowym napięciem przebicia (10 - 30 V/ μm grubości), a tym samym dobrymi właściwościami izolacyjnymi przy niewielkich grubościach (od 0,3 - 1 do 4 - 6 μm). Biorąc pod uwagę wysokie temperatury, przy których można stosować warstwy tlenkowe (1000 - 1200°C), można zauważyć ich zalety w porównaniu z izolacjami z tworzyw sztucznych. Używana jako izolator elektryczny powłoka tlenkowa nie jest znaną powszechnie powłoką anodową, ponieważ w większości zastosowań jest wytwarzana elektrolitycznie przy użyciu prądu przemiennego lub z nałożeniem prądów stałego i przemiennego lub impulsowego. Dlatego w dalszej części pracy będzie używane określenie elektrolityczna warstwa tlenkowa (EWT).

3. WARUNKI WYTWARZANIA ELEKTROLITYCZNYCH POWŁOK TLENKOWYCH (EWT)

Badania przeprowadzono na wytworzonych do tego celu próbkach. Utlenianie próbek miało miejsce na odpowiednio przygotowanej taśmie aluminiowej (A99,5), w wodnym, 10% roztworze kwasu siarkowego, w temperaturze elektrolitu 19°C (+/- 1°C). Czas utleniania to 45min. a gęstość prądu wynosiła 1 A/dm³. Utleniono próbki o grubości tlenku około 26 μm (+/- 2 μm). Grubość elektrolitycznej powłoki tlenkowej została zmierzona podczas badania na mikroskopie skaningowym (rys. 1) - jasna struktura (1) na podłożu z aluminium A199,5 (2).

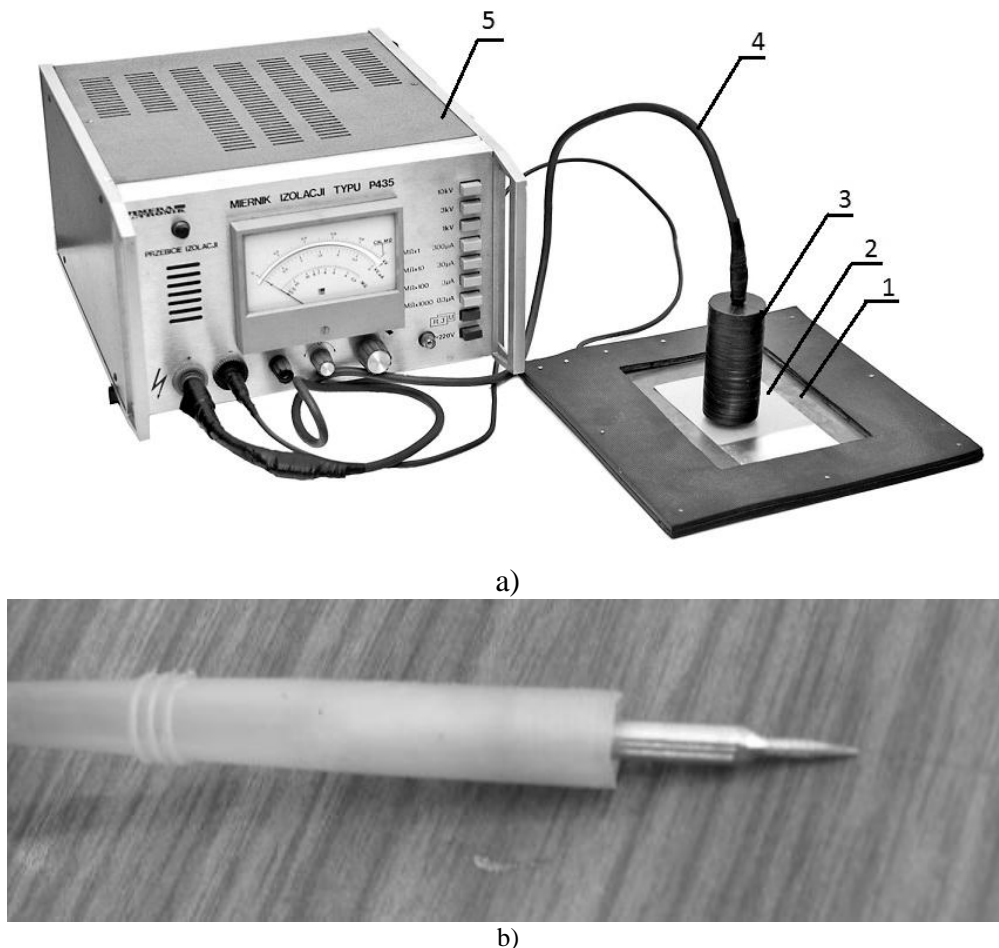


Rys. 1. Widok przełomu warstwy tlenkowej (1 - powłoka tlenkowa, 2 - aluminium)
Fig. 1. Fracture view of oxide layer (1 - oxide layer, 2 - aluminium)

4. BADANIE ZJAWISKA PRZEBICIA WARSTW TLENKOWYCH

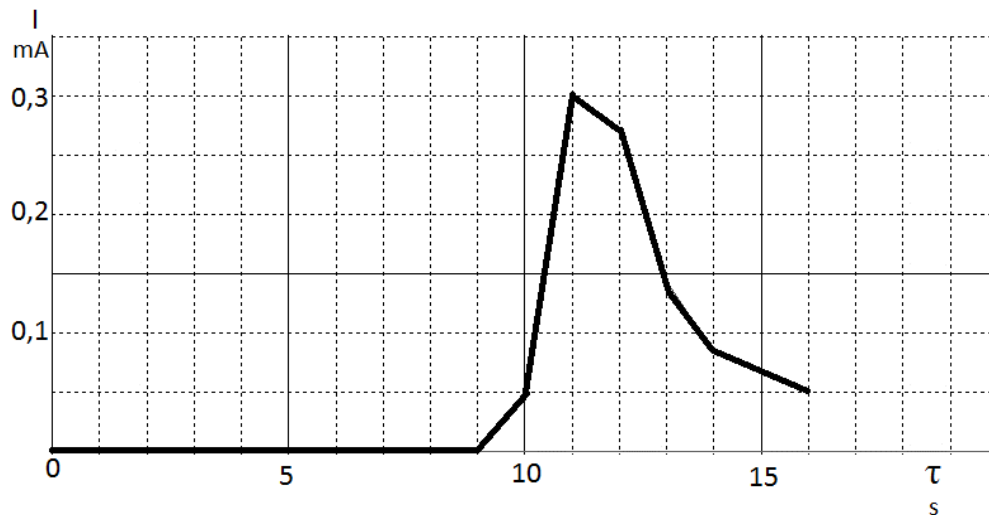
Chcąc stosować świadomie warstwy tlenkowe jako elektryczne materiały izolacyjne podzespołów pojazdów, należy poznać mechanizm ich przebicia. W celu poznania

zachowania się warstw podczas przebiecia elektrycznego i wpływu przebiecia na pracę podzespołów sąsiadujących z aluminiowymi uzwojeniami przeprowadzono badania pomiaru napięcia w znakowanych miejscach. Z punktu widzenia bezpieczeństwa pojazdów istotne są zjawiska towarzyszące przebieciu izolacji. Do badań użyto własnego stanowiska pomiarowego zbudowanego na podstawie o atestowanego miernika izolacji P435 (rys. 2a). Pomiar polega na płynnym zwiększaniu napięcia do wartości, przy której następuje przebiecie warstwy tlenkowej. Moment przebiecia jest sygnalizowany akustycznie i przez zapalenie czerwonej lampki. W celu precyzyjnego określenia miejsca przebiecia na powierzchnię warstwy tlenkowej naniesiono rastrowo znaczniki i użyto dwóch elektrod, tj. stożkowej (rys. 2b), dającej niewielką powierzchnię styku (styk punktowy) z powłoką, oraz walcowej (styk powierzchniowy), o powierzchni styku $0,8 \text{ mm}^2$ (rys. 2a). W ten sposób przebiecie zostało wymuszone w konkretnym punkcie na powierzchni wcześniej przygotowanej próbki, co ułatwiało odnalezienie miejsca (lub miejsc) przebiecia powłoki tlenkowej podczas późniejszych badań mikroskopowych.



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru napięcia przebiecia próbek: a) widok stanowiska, b) stożkowa elektroda pomiarowa (1 - płaska, izolowana od spodu katoda, 2 - utleniona próbka z badaną powłoką, 3 - cylindryczna lub stożkowa anoda, 4 - przewody wysokiego napięcia, 5 - miernik P435

Fig. 2. Equipment for the samples breakdown voltage measuring a) view of the equipment, b) conical measuring electrode (1 - a flat, insulated from the bottom cathode, 2 - oxidized sample with the examined coating, 3 - cylindrical or conical anode, 4 - high voltage cables, 5 - P435 meter

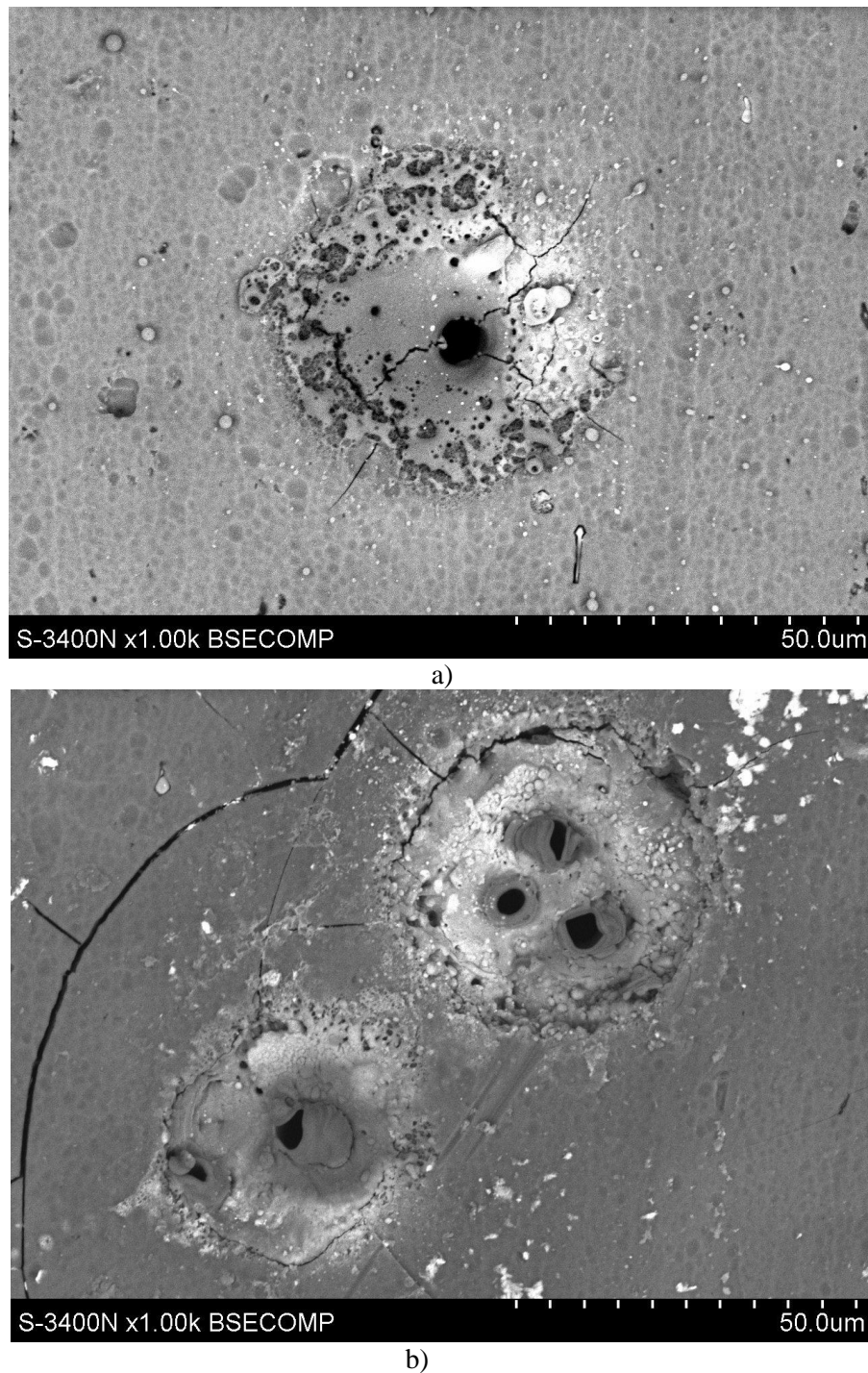


Rys. 3. Przebieg prądu podczas przebicia warstwy tlenkowej elektrodą stożkową, napięcie przebicia 1,4 kV

Fig. 3. Current flow during oxide layer break down using conical electrode, breakdown voltage 1,4 kV

Podczas pomiarów napięcia przebicia wykonano rejestrację cyfrową prądu w celu precyzyjnego określenia mocy potrzebnej do zniszczenia warstwy tlenkowej. Pomiarów i rejestracji dokonano z częstotliwością próbkowania $f = 1$ Hz i niedokładnością toru pomiarowego 5%, aby zarejestrować kształt krzywych prądu (rys. 3).

Badania mikroskopowe miejsc przebicia wykonano na mikroskopie skaningowym z sondą rentgenograficzną. Podczas badań obserwowano 10 miejsc przebicia z powierzchni i 10 na przełomach. Wybrane wyniki przedstawiono na rysunkach 4. Na rysunku 4a przedstawiono widok z powierzchni warstwy tlenkowej w miejscu przebicia elektrodą stożkową. Wokół krateru widać zakrzepły tlenek aluminium oraz wyrzuty ciekłego aluminium na odległość ponad 20 μm . Na rysunku 4b przedstawiono widok miejsca przebicia warstwy tlenkowej elektrodą cylindryczną o powierzchni 0,8 mm^2 . Przebieg powłoki nastąpiło w trzech miejscach otoczonych okręgiem spękań powłoki.



Rys. 4. Widok z powierzchni miejsc przebicia warstwy tlenkowej elektrodą stożkową (a) i cylindryczną (b) (SEM)

Fig. 4. View of oxide layer surface at conical (a) and cylindrical (b) electrode break down place (SEM)

5. OMÓWIENIE WYNIKÓW

Podobne do zaprezentowanych mechanizmy przebicia elektrycznego zachodzić będą podczas uszkodzeń elektrycznych podzespołów pojazdów, takich jak transformatory i cewki, aczkolwiek zjawisko to i efekty mu towarzyszące, ze względu na niższe prądy i napięcia w układach elektrycznych pojazdów, będą w mniejszym stopniu możliwe do zaobserwowania.

W badaniach świadomie wywołano zjawisko przebicia elektrycznego, aby zrozumieć zjawiska zachodzące i towarzyszące temu procesowi. Podczas użytkowania podzespołów elektrycznych pojazdów przebiecie elektryczne, a co za tym idzie trwałe uszkodzenie części pojazdów, może być spowodowane wcześniejszymi zanieczyszczeniami metalicznymi przy produkcji tychże podzespołów. Elementy te, dostawszy się pomiędzy uzwojenia z taśm aluminiowych, z biegiem czasu mogą spowodować uszkodzenie warstwy izolacyjnej, działając tak samo jak elektroda punktowa podczas opisanych badań. Większe zanieczyszczenia będą działały jak elektroda o niewielkiej powierzchni styku $0,8 \text{ mm}^2$.

Na podstawie krzywej prądowej i wartości napięcia przebicia wyznaczono przybliżoną energię przebicia $E = 4 \text{ kVA}$. Wyznaczenie wartości energii przebicia jest ważne, ponieważ podczas przebicia dochodzi do stopienia warstwy tlenkowej i niewielkiej objętości metalu podłoża. Stopiony metal nagrzewa się i zwiększa objętość do tego stopnia, że prowadzi to do pęknięć (wybrzuszeń) tlenku w formie krateru, a po uszkodzeniu tlenku mają miejsce erupcje ciekłego metalu na powierzchnię warstwy tlenku, co przedstawiono na rysunkach 4. Na rysunku 4a widoczne są rozlewiska zakrzepłego metalu bezpośrednio przy kraterze oraz małe kropelki zakrzepniętego metalu w odległości 30 do 40 μm od krateru. Na rysunku 4b widoczne są rozlewiska zakrzepłego metalu, sięgające ponad 60 μm od osi krateru, oraz spękania z wybrzuszeniami warstwy tlenkowej. Kratery na rysunkach (rys. 4) są otoczone cieniutkimi kołnierzami powstałymi ze stopionego tlenku aluminium, co świadczy o tym, że temperatura w miejscu przebicia przekroczyła temperaturę topnienia tlenku, tj. 2050°C . Pęknięcia na kołnierzach świadczą o tym, że erupcja stopionego metalu podłoża miała miejsce po stopieniu tlenku.

6. PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań wynika, że elektrolityczne warstwy tlenkowe, wytworzone w 10% wodnym roztworze kwasu siarkowego, posiadają bardzo dobre właściwości izolacyjne, zarówno elektryczne, jak i cieplne. Przebiecie elektryczne powłoki przy danym typie elektrody (elektroda punktowa) następuje przy napięciu 1400 V dla grubości powłoki około 26 μm (przebiecie jednostkowe ponad 50 V na 1 μm). Przy napięciu 1,4 kV i prądzie 300 μA następuje zniszczenie powłoki tlenkowej pod elektrodą. Procesowi temu towarzyszy wyzwolenie dużej ilości energii (4 kW), głównie w postaci ciepła, wskutek czego następuje gwałtowne stopienie aluminium znajdującego się w bliskim otoczeniu punktu przebicia pod warstwą tlenku. Podczas przebicia dochodzi do stopienia tlenku, co pokazuje gwałtowność samego procesu przebicia i zjawisk mu towarzyszących. Przy takim mechanizmie może dojść do obustronnego przebicia warstwy tlenkowej i zgrzania taśm aluminiowych, co wykluczałoby je z dalszej eksploatacji.

Jeżeli do przebicia warstwy tlenkowej dojdzie w podzespołach instalacji elektrycznej pojazdów, to skutki będą łagodniejsze, ponieważ napięcie zasilania wynosi 12 lub 24 V, co daje około 40 - krotnie mniejszą ilość energii przebicia przy założeniu, że prądy przebicia będą podobne. Badania właściwości izolacyjnych warstw tlenkowych pod napięciem zasilania pojazdów (do 48 V) są prowadzone, a ich wyniki zostaną przedstawione w następnym opracowaniu.

Bibliografia

1. Kossowski Z., Wajand J., Zbierski K.: Bezkrzywkowe napędzanie zaworów rozrządu tłokowego silnika spalinowego. Journal of KONES, Internal Combustion Engines, Vol. 7, No. 1 - 2, 2000, p.265-270.
2. ANO-FOL Eloxiertes Aluminium Leitermaterial Und Spulen, Aluminiumspaltband. Prospekt der Firma Steinert, Köln 2001.
3. Transformatory rozdzielcze suche żywiczne, resibloc 250 kVA do 40 000 kVA. Prospekt Firmy ABB, Zurich 2004.
4. <http://www.money.pl/gielda/surowce/>
5. Antoniewicz J.: Własności dielektryków. Tablice i wykresy. WNT, Warszawa 1971.
6. Zbierski K. Bezkrzywkowy magnetoelektryczny rozrząd czterosuwowego silnika spalinowego. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2007.
7. Posmyk A., Bąk Ł., Chmiela B. :Odporność na przebicie elektryczne izolacyjnej warstwy aluminium. W druku.

Praca wykonana w ramach badań BK-353/RT1/2011