

Patryk CIEŻAK¹, Andrzej GĘBURA², Sergiusz SZAWŁOWSKI²,
 Tadeusz KWIATKOWSKI², Kacper HANDZEL², Sławomir PASZEK²,
 Maria MARCINKOWSKA², Henryk KOWALCZYK², Klaudia OLKOWICZ²

¹ *Military University of Technology (Wojskowa Akademia Techniczna)*

² *Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)*

PROBLEMY KOROZYJNE STRUKTURY POŁĄCZENIA METALIZACYJNEGO POSZYCIA STATKU POWIETRZNEGO – WYBRANE PROBLEMY

Corrosion problems of the metallized connection of the aircraft fabric covering – selected problems

Streszczenie: *Artykuł ujmuje kompleksowo problemy korozyjne związane ze strukturą obwodów powrotnych wojskowych statków powietrznych o metalowej konstrukcji kadłuba. Autorzy opisują problemy związane z wykorzystaniem kadłuba jako obwodu powrotnego prądu elektrycznego, w szczególności z przewodami minusowymi łączącymi kadłub z zaciskami minusowymi odbiornika lub źródła, rzadko poruszane w literaturze naukowej z uwagi na „trywialność” zagadnienia. Aby zmniejszyć błąd pomiarowy, autorzy do pomiarów rezystancji poszycia kadłuba wykorzystują metodę techniczną o natężeniu prądu probierczego zwiększonego proporcjonalnie do pola powierzchni i stopnia sfaldowania powierzchni stykowej.*

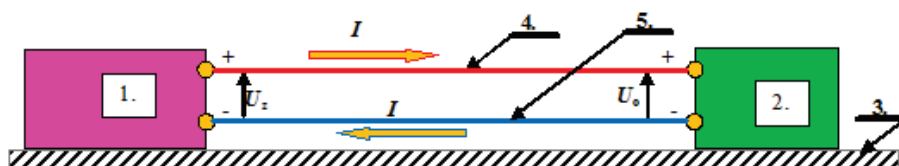
Słowa kluczowe: obwód powrotny, metalizacja, połączenie nitowane, potencjał elektrochemiczny, korozja elektrochemiczna, rezystancja styku, prądy błądzące

Abstract: *The article comprehensively describes corrosion problems related to the structure of ground-return circuits of military aircraft with metal fuselage structure. The authors describe problems related to the usage of the fuselage as a ground-return circuit of electric current, especially with negative circuits connecting the fuselage with negative terminals of the receiver or the source, rarely discussed in the scientific literature due to the triviality of the problem. Given the necessity to reduce the measurement error, the authors use a technical method for measuring the resistance of the fuselage fabric covering with the intensity of test current increased in proportion to the surface area and the degree of folding the contact surface.*

Keywords: ground-return circuit, metallization, riveted joint, electrochemical potential, electrochemical corrosion, contact resistance, stray current

1. Wprowadzenie

Po pierwszej wojnie światowej powstawały coraz liczniejsze konstrukcje wykonane z duraluminium – powoli rezygnowano z konstrukcji drewniano-płóciennych z uwagi na ich łatwopalność, stosunkowo niską wytrzymałość mechaniczną i higroskopijność (powodującą odkształcenia geometryczne pod wpływem wilgoci), co dla rozwijających się powietrznych przewozów towarowo-pasażerskich miało duże znaczenie [6, 13]. Wprowadzano coraz więcej urządzeń zasilanych elektrycznie (niższe gabaryty i ciężar, większy poziom bezpieczeństwa, zwiększenie szybkości działania), co pociągało za sobą zwiększanie grubości żył kabli elektrycznych – wyraźnie zwiększał się ciężar. W związku z tym konstruktorzy samolotów, wzorem przemysłu samochodowego, zaczęli wykorzystywać kadłub jako obwód powrotny prądu elektrycznego – rezygnowano (we wszystkich możliwych miejscach) z sieci dwuprzewodowej (rys. 1) i zaczęto stosować elektryczną sieć jedнопrzewodową (rys. 2), dzięki czemu ciężar okablowania zmniejszył się o połowę. Jednakże ten rewolucyjny spadek masy okablowania miał i swoje skutki negatywne związane m.in. ze zwiększeniem poziomu zakłóceń radiowych. Aluminiowy kadłub, w celu nadania mu swoistej elastyczności strukturalnej, został podzielony na liczne segmenty połączone nitami. Na stykach wytracały się szybkozmienne naprężenia mechaniczne [8, 9, 14], ale jednocześnie powstawały zmiany rezystancji stykowej [2, 5, 7, 10] powodujące m.in. zakłócenia radiowe oraz zmiany napięcia na zaciskach odbiorników energii elektrycznej [7].

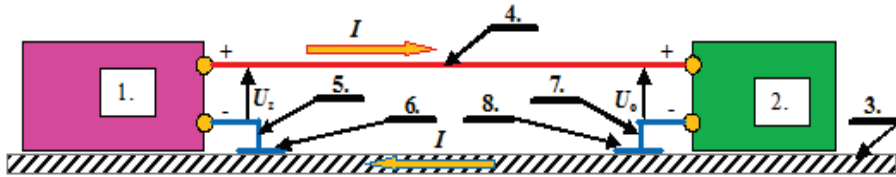


Rys. 1. Elektryczna instalacja dwuprzewodowa: 1 – źródło energii elektrycznej, 2 – odbiornik energii elektrycznej, 3 – kadłub statku powietrznego, 4 – przewód plusowy, 5 – przewód minusowy, I – natężenie prądu elektrycznego płynącego pomiędzy źródłem napięcia elektrycznego a odbiornikiem energii elektrycznej, U_z – napięcie na zaciskach źródła energii elektrycznej, U_o – napięcie na zaciskach odbiornika energii elektrycznej

Inne problemy pojawiły się przy podłączaniu zacisków minusowych¹ odbiorników lub źródeł energii elektrycznej do metalowego kadłuba statku powietrznego. Stopy aluminium stosowane powszechnie na konstrukcje płatowca SP mają naturalną skłonność do tworzenia pasywnej warstwy tlenków zwiększających znacznie rezystancję połączenia z miedzianymi

¹ Zaciski minusowe dla obwodów prądu stałego; dla obwodów prądu przemiennego zaciski neutralne.

przewodami minusowymi. Jednocześnie przyłączenie miedzianych oczek minusowych do aluminiowego kadłuba to znaczna różnica potencjałów elektrochemicznych wzmacniane jeszcze dodatkowa polaryzacja napięciową w czasie pracy prądnicy pokładowej.



Rys. 2. Elektryczna instalacja jedнопроводowa (dwupроводowa niez izolowana od masy): 1 – źródło energii elektrycznej, 2 – odbiornik energii elektrycznej, 3 – kadłub statku powietrznego, 4 – przewód plusowy, 5 – przewód minusowy źródła napięcia elektrycznego, 6 – miejsce połączenia przewodu minusowego źródła napięcia elektrycznego z kadłubem statku powietrznego, 7 – przewód minusowy odbiornika energii elektrycznej, 8 – miejsce połączenia przewodu minusowego odbiornika energii elektrycznej z kadłubem statku powietrznego, I – natężenie prądu elektrycznego płynącego pomiędzy źródłem napięcia elektrycznego a odbiornikiem energii elektrycznej, U_z – napięcie na zaciskach źródła energii elektrycznej, U_o – napięcie na zaciskach źródła energii elektrycznej

Powoduje to w warunkach podwyższonej wilgotności i odczynów alkalicznych (np. kwas węglowy zawarty w wodzie deszczowej) zjawiska korozji elektrolitycznej podczas postoju [1, 5, 6]. Znane są przypadki znacznego zwiększania rezystancji połączeń, niekiedy nawet takie zmiany korozyjne widoczne są okiem nieuzbrojonym. W strukturze materiałowej nowoczesnego statku powietrznego mamy wielką różnorodność materiałów – stopy magnezu, stal wysokowęglową, tantal, stal kwasoodporną, pokrycia powierzchniowe elementów: cynkowanie, chromowanie, srebrzenie, cynowanie. Połączenia takie powinny być systematycznie monitorowane – dla Su-22 ITWL wykonuje takie pomiary systematycznie w czasie prac remontowych, gdyż wzrost rezystancji połączenia skutkuje [5–7, 10]:

- dużymi stratami energetycznymi (przeciążanie prądnicy, zmniejszanie poziomu napięcia na wejściu odbiornika),
- pojawianiem się ognisk o zwiększonej temperaturze (przyspieszanie zjawisk korozyjnych i starzeniowych, niebezpieczeństwo pożaru zwłaszcza w pobliżu silnika lub instalacji paliwowej),
- możliwością wyparowania lutowni i rozerwania połączenia elektrycznego,
- zwiększeniem podatności instalacji elektroenergetycznej kadłuba na uderzenie pioruna [5, 12] – prąd o tak wielkim energetycznie ładunku, nie mogąc przepłynąć po kadłubie, wnika do wnętrza instalacji elektroenergetycznej, podobnie jak prądy błądzące m.in. z trakcji elektrycznej tramwajowej w instalacje podziemnej infrastruktury miejskiej [3].

Wszystkie te elementy składowe mają swój wydzźwięk ekonomiczny [15], gdyż:

- a) zmniejszają sprawność energetyczną pokładowych źródeł zasilania,
- b) mogą spowodować niespodziewaną awarię eliminującą wykonanie zadania przez statek powietrzny,
- c) mogą być niebezpieczne dla załogi i pasażerów.

Podsumowując, przejście w lotnictwie z sieci dwuprzewodowej na jedнопrzewodową zmniejszyło znacznie ciężar instalacji elektrycznej i koszty jej montażu, lecz spowodowało liczne kłopoty związane z utrzymaniem stabilnej i niskiej wartości rezystancji obwodu powrotnego realizowanego przez kadłub statku powietrznego [4, 5]. Powstała więc potrzeba monitorowania zjawisk korozyjnych w kadłubie statku powietrznego. W tym miejscu należy zwrócić uwagę na zastosowanie łączników elastycznych, tzn. linek splecionych z wielu cienkich drucików łączących dwa elementy. Często ten sposób jest nadużywany przez zakłady remontowe do poprawy rezystancji skorodowanych styków poszycia. Jest to naruszenie przepisów normatywnych [11, 12], które pozwalają na stosowanie tego typu metalizacji do elementów ruchomych, np. kłap, lotek, slotów, gdzie stosowanie połączeń mechanicznych stałych nie jest możliwe. Jednocześnie taka metalizacja ma wiele wad:

- a) ma niewielkie pole przekroju poprzecznego (najczęściej 6 mm²), co powoduje ograniczenia co do wielkości natężenia przepływającego prądu – przy uderzeniach pioruna notowane częste przypadki ich odparowania,
- b) posiadają pewną indukcyjność, co przy skokowym załączeniu prądu w obwodzie (np. o charakterze skoku jednostkowego Hevisaida albo impulsu szpilkowego Diraca [4]) powoduje przepięcia, a nawet (bardzo niebezpieczne dla aparatury elektronicznej) lokalne przebiegunowania.

2. Zjawisko korozji i jej skutki

Korozja [1] to oddziaływanie fizykochemiczne między metalem i środowiskiem, w wyniku którego powstają zmiany we właściwościach metalu, środowiska lub układu technicznego, którego są częściami. Korozja może zachodzić według mechanizmu chemicznego lub elektrochemicznego. Mechanizm chemiczny zachodzi w suchych gazach i bezwodnych środowiskach organicznych, natomiast elektrochemiczny zachodzi w środowisku przewodzącym prąd elektryczny. Poniżej zostaną przedstawione obydwie mechanizmy korozyjne na przykładzie cynku.

2.1. Mechanizm chemiczny

Korozja chemiczna zachodzi na granicy faz w nieelektrolitycznym środowisku lub suchych gazach. Ciekłe roztwory nieelektrolitów, które działają niszcząco na metale, to produkty przerobu ropy, bezwonne alkohole, benzen oraz chloroform. W przypadku korozji

chemicznej spowodowanej gazami lub parami może dojść do przejścia w korozję elektrochemiczną w przypadku skroplenia się gazów na powierzchni metalu.

W powietrzu, aluminium ulega pasywacji, czyli procesowi powstania cienkiej, ale szczelnej powłoki tlenkowej hamującej dalsze utlenianie. Powłoka pasywna składa się z wewnętrznej warstwy Al_2O_3 (równanie 1) oraz zewnętrznej warstwy $\text{Al}(\text{OH})_x$ [1,17,18].



Pasywacja powierzchni aluminium zwiększa odporność korozyjną. Glin pokryty warstwą pasywną jest odporny na działanie suchego i wilgotnego powietrza oraz dwutlenku siarki. Jednak powłoka pasywna nie zabezpiecza aluminium przed działaniem silnych zasad i kwasów, ponieważ jej grubość dochodzi maksymalnie do $0,005 \mu\text{m}$ [17, 18]. Na korozję w warunkach atmosferycznych najbardziej odporne jest czyste aluminium, najmniej zaś stopy aluminium z dodatkiem miedzi lub żelaza.

Korozja elektrochemiczna zachodzi w środowisku elektrolitów lub wilgotnych gazów na skutek reakcji elektrochemicznych. W tym przypadku korozja powstaje w wyniku pojawienia się ogniw galwanicznych pod wpływem wystąpienia wilgoci, tlenu a także niejednorodnej struktury ziarna, nierównomiernej obróbki powierzchni oraz wystąpienia stanu naprężeń. Najintensywniej korozja elektrochemiczna zachodzi w ogniwie galwanicznym powstałym w przypadku zetknięcia się różnych metali w środowisku elektrolitu (równania 2-5). W ogniwie tym jeden metal stanowi anodę, a drugi katodę. Na anodzie zachodzi proces utleniania (równanie 2), natomiast na katodzie proces redukcji (równanie 3) [2].

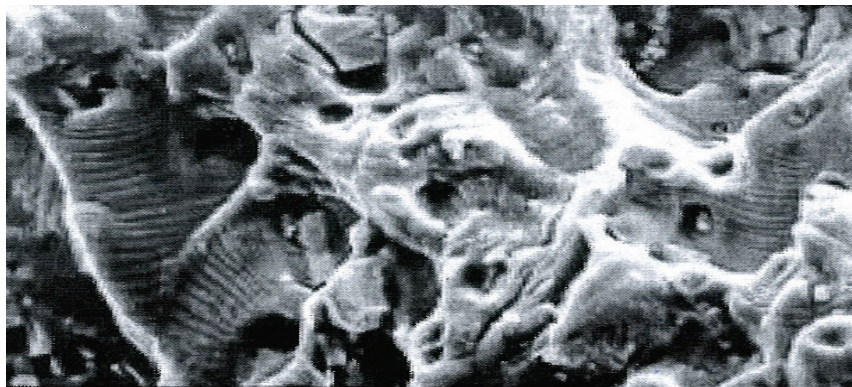


lub



W wyniku korozji aluminium powstaje wodorotlenek glinu, który jest nierozpuszczalny w wodzie i wytrąca się w postaci białego żelu (5) [17].

Usunięcie warstwy tlenku odsłania powierzchnię metalu i umożliwia ponowne rozpoczęcie procesu utleniania. Taka powierzchnia ma silnie pofałdowaną strukturę (rys. 3). Element o takiej powierzchni ma zwiększoną rezystancję styku (z drugim materiałem) i obniżoną wytrzymałość mechaniczną.



Rys. 3. Fotografia (powiększenie x1000) silnie pofałdowanej powierzchni lotniczego stopu aluminium pozbawionego warstwy ochronnej [fot. własna]

2.2. Mechanizm elektrochemiczny

W tym przypadku proces zachodzi w wyniku przepuszczenia prądu przez dwie elektrody: cynkową i tlenową zanurzone w roztworze elektrolitu w atmosferze powietrza i tworzące ogniwo. Prosty przykład korozji elektrochemicznej jest reakcja utleniania cynku tlenem atmosferycznym w ogniwie. Korozja galwaniczna zachodzi w ogniwie galwanicznym powstałym w środowisku korozyjnym, gdy przynajmniej dwa różne metale znajdują się w kontakcie elektrycznym. W ogniwie tym jeden metal stanowi anodę, a drugi katodę. Na anodzie zachodzi proces utleniania, natomiast na katodzie zachodzi proces redukcji. Korozja elektrochemiczna jest spowodowana przez procesy elektrochemiczne zachodzące na powierzchni metalu znajdującego się w środowisku elektrolitu w wyniku powstania na tej powierzchni ogniw korozyjnych [1, 2, 6]. O podatności metalu na korozję informuje szereg napięciowy metali, będący zestawieniem pierwiastków metalicznych według ich potencjału standardowego E^0 . Metale i ich stopy opisane w niniejszym artykule mają zróżnicowaną wartość potencjału elektrochemicznego:

– glin:	Al/Al^{3+}	$E^0 = -1,66 V$
– cynk:	Zn/Zn^{2+}	$E^0 = -0,76 V$
– żelazo:	Fe/Fe^{2+}	$E^0 = -0,45 V$
– cyna:	Sb/Sb^{2+}	$E^0 = -0,14 V$
– miedź:	Cu/Cu^{2+}	$E^0 = +0,34 V$

Dla powierzchni metali o niższym potencjale elektrochemicznym zachodzi utlenianie materiału i jego przejście do roztworu (korozja), natomiast dla powierzchni metali o wyższym potencjale – zachodzi redukcja. Metale o niższym potencjale elektrochemicznym są zatem bardziej podatne na korozję. Jeżeli w środowisku elektrolitu stykają się ze sobą powierzchnie dwóch metali o różnych wartościach potencjałów standardowych, to spowoduje to przyspieszenie korozji metalu o niższym potencjale standardowym oraz spowolnienie lub nawet zahamowanie korozji metalu o wyższym potencjale standardowym.

Niektóre metale, np.: glin lub chrom, ulegają pasywacji, tzn. pokrywają się szczelną warstwą tlenków chroniących powierzchnię metalu przed dalszym utlenianiem. Takie metale stosuje się jako dodatki do stopów w celu wywołania pasywacji na powierzchni metali, które w normalnych warunkach jej nie ulegają.

Przedstawiony mechanizm korozji elektrochemicznej można zastosować także w celu ochrony antykorozyjnej – jest to tzw. ochrona elektrochemiczna. Wprowadzenie tej metody nastąpiło w I połowie XIX wieku, gdy sir Humphrey Davy [1] jako pierwszy użył bloków żelaznych lub cynkowych do zmniejszania szybkości korozji blach miedzianych stosowanych wówczas na drewnianych okrętach wojennych. Blachy miedziane były stosowane już od końca XVIII wieku jako ochrona przed obrastaniem drewnianych kadłubów okrętów wojennych (przez algi i glony), co zmniejszało prędkość i manewrowość. Jednakże blachy te w słonym środowisku wodnym szybko korodowały. Dopiero przykręcenie do nich wspomnianych bloków żelaznych lub cynkowych spowodowało spowolnienie korozji. Oczywiście odbywało się to kosztem szybkiej korozji wspomnianych bloków, które jednak były łatwo wymienialne w czasie rejsu. Było to pierwsze udokumentowane zastosowanie tzw. ochrony elektrochemicznej. Powszechne stosowanie ochrony elektrochemicznej rozpoczęło się pod koniec XIX wieku.

Ochrona elektrochemiczna dzieli się na metodę katodową i metodę anodową. Ochronę metodą katodową uzyskujemy dzięki zastosowaniu:

- a) zewnętrznego źródła prądu, który powoduje obniżenie potencjału elektrochemicznego ochranianego elementu konstrukcji lub
- b) protektorów (elektrod poświęceniowych) [1], które są wykonane z materiałów mniej szlachetnych niż ochraniany element konstrukcji (w przypadku żelaza używa się protektorów ze stopów cynku, magnezu i aluminium).

Ochronę metodą anodową uzyskujemy dzięki wykorzystaniu zdolności metali do pasywacji. Na praktyczne jej zastosowanie do ochranianego elementu konstrukcji pozwoliło skonstruowanie potencjostatów.

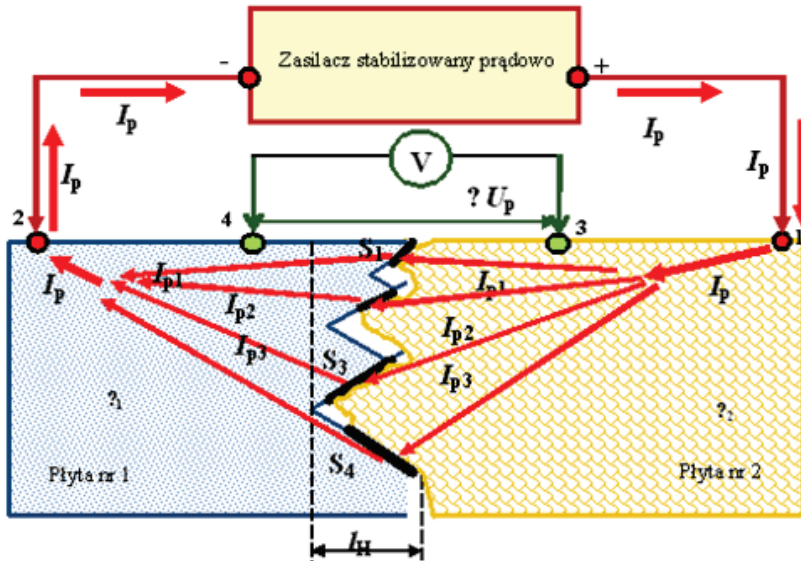
Inną, dosyć rozpowszechnioną metodą stosowaną na statkach powietrznych i pływających, jest stosowanie pomiędzy dwoma materiałami (o różnych potencjałach elektrochemicznych) przekładki z metalu o pośredniej wartości potencjału elektrochemicznego [5–7, 10, 11]. W lotnictwie pomiędzy elementem miedzianym a aluminiowym stosuje się przekładki tzw. kupalowe. Są one wykonane z dwóch blach: miedzianej i aluminiowej zgrzanych metodą wybuchową. Miejsca zgrzania nie korodują, ze względu na brak możliwości dotarcia wilgoci. Oczywiście podczas montażu część powierzchni miedziowanej przekładki powinna dotykać do elementu miedzianego instalacji elektrycznej, a aluminiowej do kadłuba statku powietrznego.

3. Pomiary rezystancji kadłuba statku powietrznego

Zaciski minusowe i neutralne elementów układu elektrycznego (zarówno źródła, jak i odbiornika) powinny być połączone ze wspólną masą wojskowego statku powietrznego. Jednocześnie wszystkie metalowe części konstrukcji metalowej statku powietrznego (zarówno na powierzchni zewnętrznej, jak i wewnątrz) o powierzchni $S \geq 0,01 \text{ m}^2$ lub długości $L \geq 0,25 \text{ m}$ powinny być połączone w celu utworzenia systemu metalizacji o niskiej i niezmiennej rezystancji. Połączenia te, zgodnie z przepisami normatywnymi [11, 12] powinny być systematycznie kontrolowane. Powinno się dokonywać pomiarów rezystancji styków poszczególnych połączeń, jak i rezystancji całego obwodu powrotnego. Do pomiarów zaleca się stosowanie mostków wysokoprądowych lub metodę techniczną, tj. metodę woltomierza i amperomierza, gdzie z prawa Oma obliczamy lokalną oporność otoczenia. Specjaliści w ITWL wykorzystują metodę techniczną, gdyż zapewnia ona znaczną uniwersalność i możliwość dostosowania parametrów pomiarowych do badanych obiektów. Pomiary zaleca się wykonywać przy prądzie probierczym nie niższym niż $I_p \geq 10 \text{ A}$ [5, 6, 10–12]. W tym miejscu warto zadać pytanie – po co do pomiarów rezystancji stosować tak znaczne natężenia prądu? Odpowiedź tkwi w poziomie wartości rezystancji styków poszczególnych połączeń oraz w ich strukturze. Rezystancja pojedynczego połączenia mechanicznego nieruchomego (nitowanego, śrubowego itp.) wynosi $R \leq 600 \mu\Omega$, zaś ruchomego² (połączenia elastycznego łącznika metalizacji z kadłubem lub obudową) $2000 \mu\Omega$. W związku z tym spadek napięcia nawet przy prądzie probierczym 10 A jest rzędu pojedynczych mV, a więc na poziomie progu czułości woltomierzy stosowanych w polowych warunkach pomiarowych.

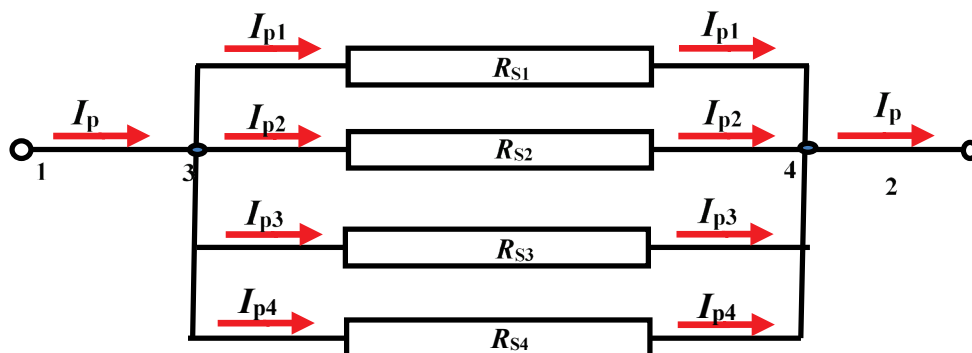
Rezystancja zastępcza styku połączenia będzie składała się z sumy równoległe połączonych gałęzi złożonych z rezystancji poszczególnych mikrostryków – przykład takiego połączenia dla trzech mikrostryków przedstawiono na rys. 5. W praktyce przy zastosowaniu do dużych powierzchni styku zbyt małych prądów probierczych, daje często wynik zupełnie odwrotny – odczytuje się znaczną wartość rezystancji o wiele większą niż przy wyższych wartościach natężenia prądu probierczego. Wynika to ze zróżnicowania długości przepływu prądu od miejsca przyłożenia sond prądowych do poszczególnych mikrostryków. Pokazuje to rys. 4, gdzie wektor natężenia prądu probierczego I_p rozkłada się na składowe I_{p1} , I_{p2} , I_{p3} . Prądy składowe (I_{p1} , I_{p2} , I_{p3}) mogą mieć bardzo zróżnicowane wartości. Najbardziej odległe od punktów przyłożenia sond prądowych (rys. 4, punkty 1-2) przy zbyt niskiej wartości natężenia prądu mogą nie być w ogóle „obmywane” przez składowe prądu probierczego.

² Połączenie ruchome, tj. w postaci elastycznych linek metalizacji, stosuje się tylko w ostateczności – w przypadku niemożliwości stosowania połączenia nitowanego, śrubowego lub spawanego. W zasadzie linki metalizacji wolno stosować tylko do funkcjonalnie ruchomych elementów płatowca, jak płyty nośne, lotki, statecznik poziomy, osłony, trapy. Zabrania się stosowania elastycznych linek metalizacji do zmniejszenia rezystancji skorodowanego połączenia nitowanego.



Rys. 4. Powierzchnie stykowe dwóch elementów pod powiększeniem [18]: 1 – zacisk plusowy przyłożenia sondy prądowej, ρ_1 – rezystancja właściwa materiału płyty nr 1, 1÷2 – zacisk minusowy przyłożenia sond prądowych, ρ_2 – rezystancja właściwa materiału płyty nr 2, 3÷4 – miejsca przyłożenia sond napięciowych, S₁ – powierzchnia stykowa mikro-styku nr 1, S₂ – powierzchnia stykowa mikro-styku nr 2, S₃ – powierzchnia stykowa mikro-styku nr 3, S₄ – powierzchnia stykowa mikro-styku nr 4, I_p – prąd probierczy wypływający z zasilacza stabilizowanego prądowo, I_{p1} – składowa prądu probierczego związana z powierzchnią stykową S₁, I_{p2} – składowa prądu probierczego związana z powierzchnią stykową S₂, I_{p3} – składowa prądu probierczego związana z powierzchnią stykową S₃, I_{p4} – składowa prądu probierczego związana z powierzchnią stykową S₄, V – woltmierz (miliwoltmierz) do pomiaru spadku napięcia styku, l_H – wysokość mikronierówności

W takiej sytuacji zwiększenie natężenia prądu probierczego I_p może znacznie poprawić sytuację. Zwiększenie prądu probierczego to zwiększenie (automatyczne) napięcia zasilacza stabilizowanego prądowo. Wówczas praktycznie wszystkie styki są „obmywane” przez strumień prądu probierczego. Z powyższych rozważań nasuwa się wniosek, że do pomiarów rezystancji metalizacji dwóch stykających się elementów należy stosować zasilacze stabilizowane prądowo o znacznych prądach probierczych I_p . Wartość tego prądu powinna być na tyle duża, aby spadek napięcia na mikro-styku o najmniejszej rezystancji i ekstremalnie długiej drodze prądowej (rys. 4) był powyżej progu czułości zastosowanego woltmierz pomiarowego. Przepisy lotnicze [8, 9] zalecają stosowanie prądu probierczego nie niższego niż 10 A. Jednocześnie w sieciach niskonapięciowych należy spodziewać się większych trudności z płynnością przepływu prądu przez kadłub statku powietrznego niż w sieciach wysokonapięciowych (rys. 5).



Rys. 5. Ideowy schemat zastępczy połączenia metalizacji z czterema mikrostrykami: R_{S1} – rezystancja mikrostryku nr 1, R_{S2} – rezystancja mikrostryku nr 2, R_{S3} – rezystancja mikrostryku nr 3, R_{S4} – rezystancja mikrostryku nr 4

4. Struktura rezystancji połączenia metalizacyjnego poszycia statku powietrznego

Konstrukcja samolotu lub śmigłowca składa się ze szkieletu złożonego z podłużnic i wrg. Nadaje on konstrukcji statku powietrznego odpowiednią sztywność i wytrzymałość. Na szkielet nakładane jest poszycie, zapewniające szczelność i opływowość aerodynamiczną w tym (głównie płyty nośne) także powstawanie siły nośnej. Wszystkie te elementy są ze sobą łączone głównie za pomocą połączeń nitowanych, nadających strukturze kadłuba swoistą elastyczność. Olbrzymi postęp technologiczny, jaki dokonał się w ostatnim półwieczu w lotnictwie (włókna węglowe, kompozyty, konstrukcje przekładkowe), nie zmienił faktu, że dalej jako materiał wyjściowy do produkcji szkieletu i poszycia stosowane jest duraluminium, zaś w technologii ich łączenia (zwłaszcza elementów poddanych silnym i zmiennym naprężeniom mechanicznym) króluje nadal nitowanie [2, 6, 8, 9, 13, 14]. Nitowanie zapewnia bowiem szczególnie dobre warunki wytracania energii wibracji (dyssypacja energii mechanicznej w ciepło). W wielu opracowaniach spotyka się wzmianki o śladach współpracy na powierzchniach połączeń nitowanych [5–7, 14]. Co więcej, powierzchnia mikrostryku metalicznego łączonych powierzchni nit – płyty poszycia, zgodnie z [6] nie jest ciągła, lecz cechuje ją wyspowy charakter. Powoduje to pewne zmiany rezystancji w zależności od chwilowej wartości lokalnej wokół rozpatrywanego połączenia nitowanego. Komplikuje to powtarzalność wyników pomiarów rezystancji poszycia połączeń pomiędzy płatami poszycia. Należy do tego dodać, że rozpatrywane mierzone odcinki pomiaru rezystancji poszycia, po którym przepływa prąd zwrotny danego pokładowego źródła zasilania składają się z wielu płatów poszycia i wielu połączeń nitowanych. Powoduje także zmienność wartości rezystancji pod wpływem zmian naprężeń mechanicznych i cieplnych.

5. Tabliczki minusowe, kable minusowe

5.1. Tabliczki minusowe

W rozbudowanych strukturach elektroenergetycznych statków powietrznych często tworzy się dla odbiorników małej i średniej mocy (zwykle o natężeniu prądu poniżej 100 A i polu powierzchni przekroju poprzecznego żyły przewodzącej poniżej 10 mm²) w różnych rejonach płatowca tzw. tabliczki minusowe [10, 11, 12]. Ich lokalizacja jest określana w instrukcjach opisowych, zaś w instrukcjach eksploatacji oraz w technologiach remontu są określane procedury kontroli i regeneracji ich stanu technicznego. Tabliczka minusowa to wycinek blachy duraluminiowej przykręcony lub przynitowany do konstrukcji nośnej statku powietrznego. Do tego wycinka blachy przykręcone są liczne przewody minusowe pobliskich odbiorników energii elektrycznej. Konstruktorzy starają się grupować przewody minusowe odbiorników energii elektrycznej o podobnych właściwościach elektroenergetycznych na oddzielnych tabliczkach minusowych: osobno przewody przenoszące moc impulsowo, osobno obwody o łagodnych charakterystykach dynamiki zmian natężenia prądu. Do osobnych tabliczek przyłącza się przewody minusowe analogowe, do osobnych obwody cyfrowe. Konstruktorzy starają się także grupować na danej tabliczce minusowej przewody minusowe odbiorników o podobnej mocy. Wszystko to zmniejsza poziom zakłóceń wzajemnych pracy odbiorników energii elektrycznej. Dzięki zastosowaniu tabliczek minusowych uzyskuje się:

- a) łatwość kontroli stanu technicznego,
- b) wyrównywanie potencjałów odniesienia – zmniejszenie strat na prądy wyrównawcze.

5.2. Kable minusowe wysokoprądowe

W praktyce lotniczej pojęcie kabla minusowego stosuje się dla przewodów elektrycznych zdolnych do długotrwałego przenoszenia natężenia prądu powyżej 100 A o polu powierzchni przekroju poprzecznego żyły przewodzącej powyżej 10 mm² [6, 10]. Łączą one źródło mocy elektrycznej albo odbiornik dużej mocy z konstrukcją samolotu. Z uwagi na znaczne natężenia prądu, jakie te kable przenoszą, łączy się je z konstrukcją statku powietrznego indywidualnie (nie grupuje się ich na tabliczkach minusowych). Miejsca przyłączane do konstrukcji statku powietrznego są starannie dobierane:

- z dala od miejsc przyłączenia tabliczek minusowych,
- z dala od miejsc o znacznych zmianach temperatury i wilgotności względnej.

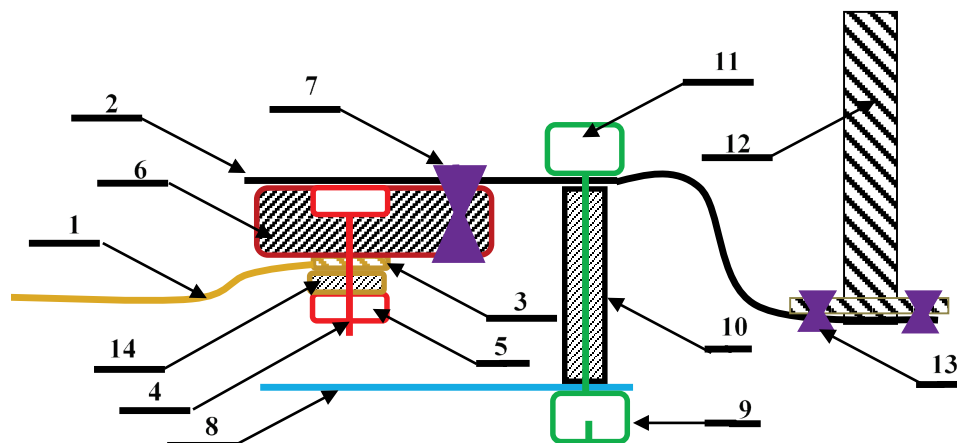
Przyłączane są do elementów konstrukcji o znacznym przekroju poprzecznym i znacznej sztywności mechanicznej – zazwyczaj miejsce to jest położone na wrędze lub podłużnicy.

Wszystkie przewody minusowe: zarówno te przyłączane do tabliczek minusowych, jak i dla dużych mocy, powinny mieć długość nie większą niż 0,6 m. W ten sposób zmniejszają się zakłócenia działania odbiornika podczas stanów przejściowych.

6. Tabliczki minusowe i ich rola w strukturze przesyłu energii elektrycznej Su-22

W eksploatacji Su-22 w miarę postępowania procesu starzeniowego często spotykane są awarie odbiorników energii elektrycznych małych i średnich mocy [5, 6, 10]. Zmusiło to ITWL do opracowania procedur sprawdzania poprawności rezystancji styków kabli minusowych na tabliczkach minusowych w czasie przedłużania resursów (rys. 6).

Zgodnie z zasadą „uelastyczniania” konstrukcji mechanicznej przyjętej z konstrukcji nakładkowej poszycia statków powietrznych przy montażu tabliczek minusowych w procesie montażu płatowca stosuje się dodatkowe połączenia nitowane w celu zmniejszenia naprężeń mechanicznych. Do tak skonstruowanych tabliczek przynitowuje się dopiero podstawki montażowe przewodów minusowych (rys. 6, element 6). Do nich z kolei przykręcane są elektryczne przewody minusowe (rys. 6, element 1).



Rys. 6. Tabliczka minusowa nr 3 samolotu Su-22UM, zblizenie (szczegol A): 1 – elektryczny przewód minusowy, 2 – płytka elektrycznie czynna tabliczki minusowej, 3 – końcówka oczkowa elektrycznego przewodu minusowego, 4 – śruba (stalowa), 5 – nakrętka (stalowa) mocująca oczko (miedź) elektrycznego przewodu minusowego do podstawy stykowej zacisku (odkwalka aluminiowa), 6 – podstawa przewodząca zacisku elektrycznego (odkwalka aluminiowa), 7 – nit (aluminiowy) łączący podstawę stykową zacisku z płytą elektrycznie czynną tabliczki minusowej, 8 – płytka osłonowa tabliczki minusowej, 9 – nakrętka mocująca płytę osłony, 10 – tuleja dystansowa, 11 – śruba montażowa (stalowa) mocująca płytę elektrycznie czynną tabliczki minusowej do wręgi samolotu, 12 – wręga samolotu (do której jest przynitowana tabliczka minusowa), 13 – nit (aluminio-wy) łączący płytę elektrycznie czynną tabliczki minusowej z wręga samolotu, 14 – podkładka stalowa (ocynkowana)

Znaczna liczba przypadków powiązanych ze sobą węzłów korozyjnych zwróciła uwagę autorów, że zjawiska korozyjne intensyfikują się w tym węzle montażowym

z powodu styku aż czterech rodzajów metali o różnym potencjale elektrochemicznym (rys.6):

- aluminium ($E^0 = -1,66$ V): podstawa przewodząca zacisku elektrycznego w postaci odkuwki aluminiowej (element 4), płytki elektrycznie czynna tabliczki minusowej (rys. 6, element 4), nity montażowe (element 7),
- żelazo ($E^0 = -0,45$ V): śruba montażowa (element 4) i nakrętka (element 5),
- miedź ($E^0 = +1,66$ V) oczko elektrycznego przewodu minusowego (element 3),
- cyna ($E^0 = -0,14$ V) pokrycie antykorozyjne oczka elektrycznego przewodu minusowego (element 4).

W tym układzie warstwa cynku na podkładkach (element 14) oraz warstwa cyny oczko elektrycznego przewodu minusowego (element 3) odnawiana podczas każdego remontu może stanowić elektrodę „poświęceniową” (patrz rozdział 3, p. b). Jednocześnie korzystne byłoby zamontowanie pomiędzy płytkę elektrycznie czynną tabliczki minusowej (element 2) a końcówkę oczkową elektrycznego przewodu minusowego (element 3) podkładkę Cu-Al, tzw. podkładkę kupalową [1, 2], tj. podkładkę ze zgrzanych wybuchowo blach miedzianej i aluminiowej.

7. Podsumowanie i wnioski

Korozję definiuje się jako niszczenie oraz pogorszenie właściwości metali na skutek reakcji chemicznej lub elektrochemicznej materiału ze środowiskiem zewnętrznym. Na zjawisko korozji wpływa wiele zmiennych, tj. temperatura, wilgotność, zanieczyszczenia oraz pasywność metali, przez co może ona zachodzić wg mechanizmu chemicznego lub elektrochemicznego [16,17]. W przypadku styku dwóch powierzchni metalicznych problemy rosną wielokrotnie. W celu skutecznego monitorowania rezystancji takiego styku autorzy sformułowali poniższe wnioski:

1. Przy pomiarze rezystancji połączeń metalizacyjnych należy stosować do dużych powierzchni duże wartości prądu probierczego – wówczas strumień prądowy „obmywa” równomiernie wszystkie mikrostryki.
2. Dla zmontowanych statków powietrznych pomiarom rezystancji powinny podlegać kompletne obwody prądowe od minusa źródła do minusa odbiornika.
3. Kable minusowe o konstrukcji wieloprzewodowych równoległych kabli połączonych wspólnymi końcówkami, wymagają systematycznych sprawdzeń symetrii rozptywu prądu (asymetrii rezystancji).
4. Tabliczki minusowe powinny mieć zapewniony naturalny lub wymuszony przepływ powietrza, uniemożliwiający kondensowanie się pary wodnej.
5. Dla łańcucha połączeń mechanicznych powierzchnie stykowe elementów wykonanych z metali o zbliżonym potencjale elektromechanicznym powinny mieć możliwie dużą i czystą powierzchnię styku.

6. Jeżeli w łańcuchu połączeń mechanicznych jest para elementów o zróżnicowanych (odległych wartościowo) potencjałach elektrochemicznych powinny, to:
7. jeżeli jeden (z tej pary) element może być wyłączony z obwodu prądowego, to należy go odizolować. Dlatego też na tabliczkach minusowych wielobiegunowych śruby stalowe montażowe powinny być elektrycznie izolowane od pozostałej części konstrukcji tabliczki minusowej;
8. jeżeli oba elementy mają za zadanie przewodzić prąd elektryczny, to między nimi należy zastosować przekładki rozkładające tą różnicę na dwa lub więcej hermetycznych styków, np. przy połączeniu miedzianych końcówek oczkowych przewodów minusowych z duraluminiowym elementem kadłuba zastosować podkładki kupalowe.
9. Końcówki przewodów minusowych powinny mieć przylegające do nich podkładki wykonane z cynku lub z miedzi, lub z miedzi pokrytej grubą warstwą cynku w celu utworzenia ochrony katodowej. Tak więc podkładka będzie pełniła rolę protektora, który będzie musiał być co pewien czas wymieniany w czasie eksploatacji.

8. Literatura

1. Baszkiewicz J., Kamiński M.: Korozja materiałów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
2. Bogucki K.: Corrosion testing of kinematic connection details from the jet engine in a seawater environment. Journal of KONBiN, Vol. 51, Iss. 1, 2021, DOI 10.2478/jok-2021-0012.
3. Chrabąszcz J., Buda P., Prusak J.: Ocena zagrożenia prądami błądzącymi w obszarze miejskim dla wybranego odcinka zelektryfikowanej linii kolejowej. Technika Transportu Szynowego, 10/2013.
4. Gessing R.: Podstawy Automatyki. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2001.
5. Gębura A., Radoń T.: Struktura rezystancji metalizacji płatowca – sposoby diagnozowania. [w:] Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej, t. 8, red. J. Lewitowicz, L. Cwojdzński, M. Kowalski, R. Szczepanik, Wydawnictwo ITWL, Warszawa 2012.
6. Gębura A., Mach-Cygankiewicz A.: Monitorowanie rezystancji kadłuba wojskowego statku powietrznego. Prace Naukowe Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, No. 39, 2016, DOI 10.1515/afit-2016-0021.
7. Gębura A., Radoń T., Tokarski T.: Cechy diagnostyczne parametrów napięcia wyjściowego lotniczych prądnic pokładowych prądu stałego. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Mechanika Z.63 Awionika, tom 2, 2004.
8. Jachimowicz J., Kajka R., Kaniowski J., Karliński W.: Fretting w konstrukcjach lotniczych. Tribologia, 3(201), SIMPRESS Oficyna Wydawnicza SIMP, 2005.

9. Jachimowicz J., Szymczak E., Sławiński G., Derewońko A., Wronicz W.: Modele globalne i lokalne w analizie struktury lotniczych na przykładzie fragmentu skrzydła samolotu PZL-M28 Skytruck, 2010.
10. Leśniczak A., Gębura A.: Struktura obwodów powrotnych wojskowych statków powietrznych – wybrane problemy na przykładzie samolotu Su-22. Journal of KONBiN Vol. 48, 2018, DOI 10.2478/jok-2018-0065.
11. Norma Obronna NO-15_A200:2016: Wojskowe statki powietrzne – Pokładowe układy zasilania elektrycznego _ Wymagania i badania.
12. NO-16-A002: 2006 Wojskowe statki powietrzne – Ochrona przed skutkami wyładowań atmosferycznych – Wymagania ogólne.
13. Poradnik galwanotechnika. Warszawa 2002, WNT Wydawnictwo Naukowo-techniczne, ISBN 8320426103, 9788320426106.
14. Reinhardt K.A, Kern W.: Handbook of Silicon Wafer Cleaning Technology, Elsevier 2018, ISBN 978-0-3235-1085-1
15. Sapiro D.N.: Elektroobodurowanije somolietov. Wyd. „Maszynostrojenie”, Moskwa 1977.
16. Szymczak E., Jachimowicz J.: Analiza powierzchni kontaktu w połączeniu nitowanym. Biuletyn WAT, Vol. LVI, nr 4, 2007.
17. Vargel C, Germain J.M, Dunlop H.: Corrosion of aluminium, Elsevier 2020, ISBN 978-0-08-099927-2.
18. Zieja M., Zieja M.: Ekonomiczny aspekt kształtowania niezawodności i bezpieczeństwa systemu „pilot – statek powietrzny”. Journal of KONBiN 4(20), 2011.

