

Wpływ dodatków stopowych i obróbki na właściwości elektromagnetyczne stopów aluminium oraz na proces detekcji nieciągłości z wykorzystaniem defektoskopu wiroprowodowego

Małgorzata Milczarek, Piotr Maj, Wioleta Serweta

Wojskowe Zakłady Lotnicze Nr 1 S.A., ul. Dubois 119, 93-465 Łódź

Streszczenie: Prezentowana praca przedstawia rezultaty badań i analizę związane z wpływem dodatków stopowych oraz obróbki materiału na skuteczność badań nieniszczących metodą prądów wirowych oraz związane z tym bezpieczeństwo eksploatacji statków powietrznych. Skuteczność tych badań, realizowanych z użyciem specjalistycznej aparatury, ma kluczowe znaczenie dla wykrywania defektów materiałowych w elementach części lotniczych. W pracy przeanalizowano wpływ składu chemicznego i obróbki cieplno-mechanicznej na przewodność stopów, co bezpośrednio rzutuje na jakość diagnostyki wykorzystującej metodę prądów wirowych. Uzyskane wyniki podkreślają potrzebę precyzyjnej kalibracji oraz stosowania pomiaru przewodności jako elementu zwiększającego niezawodność badań w lotnictwie.

Słowa kluczowe: prądy wirowe, diagnostyka lotnicza, przewodność

1. Wprowadzenie

Badania nieniszczące (NDT) umożliwiają kontrolę stanu technicznego elementów konstrukcyjnych bez konieczności ich demontażu lub niszczenia, co pozwala na wczesne wykrywanie defektów i zapobieganie awariom. Badania NDT w sektorze lotniczym realizowane są z zastosowaniem zaawansowanej aparatury diagnostycznej, obsługiwanej przez wysoko wykwalifikowany personel techniczny. Ich niezawodność to kluczowy element systemu zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacji statków powietrznych. Badania diagnostyczne konstrukcji realizowane są według opracowanych procedur, ze ściśle zdefiniowanymi kryteriami akceptacji, w celu minimalizacji ryzyka przeoczenia wad materiałowych, potencjalnie skutkujących awariami o katastrofalnych konsekwencjach. Jedną z metod nieniszczących stosowanych w ocenie stanu technicznego komponentów metalowych, w tym poszyc wykonanych ze stopów aluminium, jest metoda prądów wirowych ET (ang. *Eddy Current Testing*). Metoda ta, oparta na indukcji elektromagnetycznej i analizie impedancji sondy pomiarowej, pozwala na detekcję wad powierzchniowych i podpowierzchniowych i jest

powszechnie stosowana w defektoskopii konstrukcji, instalacji i urządzeń. Możliwości tej metody umożliwiają ocenę zmian właściwości fizycznych materiału, takich jak przewodność elektryczna i przenikalności magnetycznej, powstałych w efekcie obróbki cieplnej czy cieplnochemicznej, ale także wskutek eksploatacji w warunkach dynamicznych lub statycznych obciążeń mechanicznych i termicznych prowadzących do degradacji struktury. W tym obszarze metoda prądów wirowych wykorzystana jest np. do oceny rozwoju degradacji zmęczeniowej jako funkcji przewodności, co wykazano dla próbek ze stopu aluminium 2024 zginanych rewersyjnie [7]. Opisano także rozwój uszkodzenia zmęczeniowego, zdefiniowanego przyrostem odkształcenia, na podstawie zmian rezystancji mierzonej podczas wzbudzenia próbek zmęczeniowych, po różnej liczbie cykli obciążenia [8]. Badania w tym zakresie realizowane są za pomocą komercyjnych mierników czy „strukturoskopów” (np. grubościomierze, ferrytoskopy) w obszarze jakościowej oceny efektów obróbki cieplnej [9], czy porowatości [10]. Można je też zrealizować za pomocą zaawansowanych defektoskopów, które posiadają funkcję rejestracji zmian parametrów impedancji w efekcie oddalenia sondy od powierzchni badanej, co było przedmiotem niniejszej pracy.

Efektywność badań prowadzonych metodą prądów wirowych zależy od wielu czynników, w tym od: przewodności elektrycznej badanego materiału, jego składu chemicznego, mikrostruktury, przeprowadzonej obróbki cieplnej i/lub mechanicznej, a także geometrii badanego detalu i stanu powierzchni. Szczególnie istotna jest przewodność elektryczna, która wpływa nie tylko na intensywność generowanych prądów wirowych, ale również na głębokość ich indukcji oraz czułość wykrywania defektów.

Autor korespondujący:

Małgorzata Milczarek, malgorzata.milczarek@wzl1.mil.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 02.10.2025 r., przyjęty do druku 18.11.2025 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 4.0 Int.

W pracy przeanalizowano wpływ przewodności elektrycznej wybranych przemysłowych stopów aluminium na sygnał defektoskopowy w badaniach metodą prądów wirowych. Uwzględniono również wpływ obróbki cieplnej i mechanicznej na zmianę przewodności oraz możliwość fałszywych wskazań wynikających z lokalnych zaburzeń strukturalnych. Celem pracy jest określenie, w jakim stopniu przewodność materiału wpływa na interpretację sygnału oraz jakie działania powinny zostać podjęte, aby zwiększyć wiarygodność badań w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

2. Metodyka badania

Do badań wybrano dostępne standardowo wykorzystywane stopy aluminium: EN AW-2017, EN AW-5083, EN AW-5754, EN AW-6082, EN AW-7075 (fot. 1). W tabeli 1 przedstawiono podstawowe informacje dotyczące badanych stopów aluminium, w tym skład chemiczny.

Zróżnicowanie składu chemicznego oraz metody umocnienia wpływają nie tylko na właściwości mechaniczne stopów,

ale również na ich przewodność elektryczną, a w konsekwencji na interpretację wyników badań nieniszczących metodą prądów wirowych (ET).

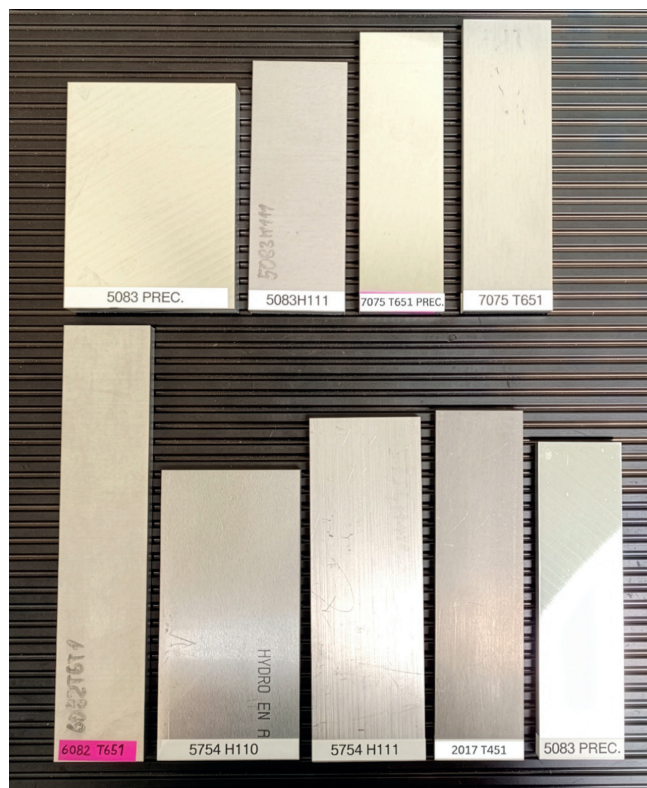
Stopy EN AW-2017, EN AW-6082 oraz EN AW-7075 należą do grupy stopów aluminium utwardzanych wydzieleniowo, poprzez obróbkę cieplną, polegającą na przesycaniu i starzeniu, w celu wytworzenia w ich strukturze dyspersyjnych faz międzymetalicznych. Te wydzielenia blokują ruch dyslokacji, co zwiększa wytrzymałość i twardość stopu, przy jednoczesnym obniżeniu ciągliwości. Stopy te charakteryzują się przy tym niższą przewodnością elektryczną (konduktywnością) w porównaniu do stopów aluminium umacnianych w procesie obróbki mechanicznej.

Z kolei stopy EN AW-5083 i EN AW-5754, zaliczane do grupy stopów aluminium z dodatkiem magnezu, uzyskują swoje właściwości poprzez umocnienie przez zgniot (np. walcowanie na zimno) i są często stosowane tam, gdzie wymagana jest dobra odporność na korozję i stabilność strukturalna, bez konieczności stosowania obróbki cieplnej.

W metodzie prądów wirowych sonda z cewką pomiarową jest zasilana prądem zmiennym o określonej częstotliwości. Pole elektromagnetyczne generowane przez cewkę indukuje w badanym materiale prądy wirowe, których natężenie i rozkład zależą od właściwości elektrycznych i magnetycznych materiału (m.in. przewodności σ i przenikalności magnetycznej μ), geometrii próbki oraz obecności nieciągłości.

W badaniach wykorzystano defektoskop prądowirowy NORTEC 600D. Jest to zaawansowane urządzenie przeznaczone do nieniszczących badań materiałów przewodzących prąd elektryczny. Zastosowana w nim nowoczesna elektronika, wysoka czułość układów pomiarowych oraz cyfrowe przetwarzanie sygnałów umożliwiają prowadzenie pomiarów z dużą dokładnością, powtarzalnością i stabilnością. Urządzenie wykorzystuje zasadę indukowania prądów wirowych w materiale badanego obiektu oraz rejestracji zmian impedancji cewki pomiarowej w funkcji lokalnych niejednorodności strukturalnych i geometrycznych. Podstawowe funkcje urządzenia pozwalają na badania powierzchniowe techniką stykową, badania otworów techniką obrotową, badanie przewodności i badanie grubości powłok.

Urządzenie NORTEC 600D umożliwia realizację badań powierzchniowych za pomocą średnich i wysokich częstotliwości prądów wirowych. Wśród podstawowych funkcji można wymienić: wizualizację na płaszczyźnie impedancyjnej, siatkę odniesienia 10×10 , tryb rejestracji przebiegu czasowego (ang. *sweep/strip chart*), różne konfiguracje alarmów progowych oraz automatyczną kompensację efektu podniesienia sondy (ang. *lift-off*). NORTEC 600D pozwala na precyzyjne wykrywanie i ocenę nieciągłości powierzchniowych w materiałach przewodzących prąd, w tym pęknięć, nadtopień i lokalnych zmian przewodności. Wykonując badania powierzchniowe wykorzystujemy wpływ zmian prądów wirowych na impedancję cewki pomiarowej. Wartość impedancji jest wyświetlana na płaszczyźnie impedancyjnej (ang. *impedance plane*) jako wektor Z, a jego zmiany podczas



Fot. 1. Zestaw wzorców konduktywności, ze wskazaniem typu stopu Al oraz rodzaju obróbki

Photo 1. Set of conductivity reference standards indicating the type of aluminum alloy and the heat treatment condition

Tabela 1. Skład chemiczny wybranych stopów aluminium (w % mas.)

Tab. 1. Chemical composition of selected aluminum alloys (wt. %)

Stop	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Inne	Al
EN AW-2017	0,2–0,8	≤ 0,7	3,5–4,5	0,4–1,0	0,4–0,8	≤ 0,1	≤ 0,25	≤ 0,15	≤ 0,15	reszta
EN AW-5083	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,1	0,4–1,0	4,0–4,9	0,05–0,25	≤ 0,25	≤ 0,15	≤ 0,15	reszta
EN AW-5754	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,1	≤ 0,5	2,6–3,6	≤ 0,3	≤ 0,2	≤ 0,15	≤ 0,15	reszta
EN AW-6082	0,7–1,3	≤ 0,5	≤ 0,1	0,4–1,0	0,6–1,2	0,04–0,35	≤ 0,2	≤ 0,1	≤ 0,15	reszta
EN AW-7075	≤ 0,4	≤ 0,5	1,2–2,0	≤ 0,3	2,1–2,9	≤ 0,18	5,1–6,1	≤ 0,2	≤ 0,15	reszta

pomiaru tworzą charakterystyczne trajektorie. Na ekranie defektoskopu (np. NORTEC 600D) wykres impedancji przedstawia:

- oś pozioma H (ang. *horizontal*) – zmiany rezystancyjne (R) związane głównie z przewodnością elektryczną i stratami energii w materiale,
- oś pionowa V (ang. *vertical*) – zmiany reaktancyjne (X) zależne od przenikalności magnetycznej, geometrii i efektów sprężenia pola (np. lift-off).

Każdy punkt na ekranie odpowiada pewnemu stanowi elektromagnetycznemu w obszarze pod sondą. Zmiana położenia wektora impedancji (lub jego toru) na wykresie oznacza zmianę właściwości materiału lub warunków pomiaru. NORTEC 600D umożliwia wzmocnienie sygnału wejściowego z sondy (GAIN). Urządzenie umożliwia regulację wzmocnienia w decybelach (dB), a każdy przyrost o 20 dB oznacza 10-krotne zwiększenie amplitudy sygnału. Wartość wzmocnienia nie oznacza silniejszego sygnału od wady – tylko to, że sygnał z sondy trzeba wzmocnić, aby był widoczny na ekranie.

Defektoskop umożliwia też pomiar przewodności elektrycznej oraz grubości nieprzewodzących powłok ochronnych na materiałach niemagnetycznych. Zastosowany tryb pomiarowy pozwala na definiowanie wartości referencyjnych i porównawczych, co ułatwia ocenę stanu materiału, identyfikację jego gatunku lub stopnia utwardzenia cieplnego. Urządzenie umożliwia pomiar przewodności oraz grubości powłoki do 0,64 mm. Funkcja ta jest szczególnie przydatna w kontroli jakości elementów aluminiowych, w tym w ocenie warstw anodowych, lakierniczych i ochronnych.

Przewodnością elektryczną właściwą (konduktywnością) określamy łatwość, z jaką elektrony przemieszczają się w przewodniku po przyłożeniu zewnętrznego napięcia. Jednostką przewodności elektrycznej w układzie SI jest S/m, $1\text{ S} = 1/\Omega$, czyli

jednostka odwrotna do jednostki oporności Ω , zwana konduktywnością. W źródłach amerykańskich przyjęto skalę konduktywności, opierając się na wzorcu wykonanym z miedzi. Dla takiego wzorca przyjęto że posiada on przewodność elektryczną właściwą (konduktywność) 100 % IACS = 58 MS/m w temperaturze 20 °C. Symbolem konduktywności jest litera grecka s, a jednostkę określa się jako % IACS, co oznacza *International Annealed Copper Standard* (Międzynarodowy Wzorec Konduktywności dla Miedzi Wyżarzanej). Przewodność elektryczna właściwa materiału ma istotne znaczenie dla dokładności badania ze względu na to, że im większa konduktywność tym mniejsza jest głębokość wnikania prądów wirowych w materiał. Znając przewodność elektryczną właściwą materiału badanej części możemy określić na jakiej maksymalnie głębokości będzie można przeprowadzić badanie.

Do pomiaru przewodności elektrycznej badanych stopów aluminium zastosowano defektoskop prądowirowy NORTEC 600D, a pomiar realizowano za pomocą sondy SPO-887L o częstotliwości pracy 60 kHz. Kalibrację urządzenia przeprowadzono na wzorcu odniesienia CREF3-172942, zgodnie z zaleceniami producenta. Pomiar przewodności zrealizowany z wykorzystaniem stanowiska (fot. 2) stanowił pierwszy etap określenia wpływu przewodności na wyniki badań.

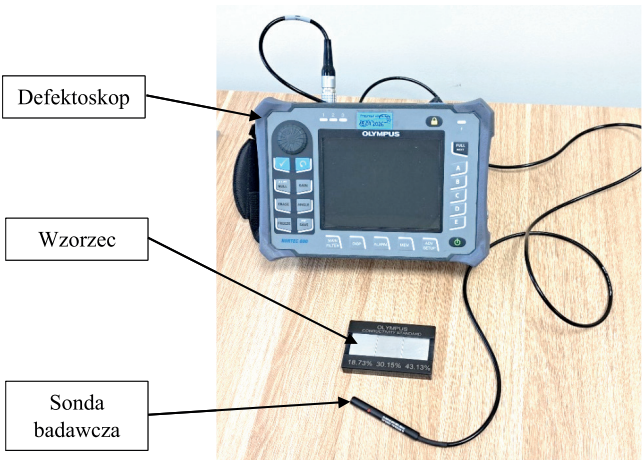
Drugi etap prac stanowiło określenia wpływu przewodności na interpretację wyników badań. Do badań sygnału impedancji stopów aluminium wykorzystano defektoskop prądowirowy NORTEC 600D. Pomiar realizowano za pomocą sondy ML/100 kHz/A/90.5/6 o częstotliwości pracy 400 kHz. Kalibrację urządzenia przeprowadzono na wzorcu AEROFAB NDT AFNDT-2003-1AL (fot. 3), która stanowiła wzorec odniesienia dla pozostałych próbek.

3. Wpływ dodatków stopowych na interpretację wyników badań metodą prądów wirowych

W tabeli 2. zestawiono wybrane właściwości, udział pierwiastków stopowych oraz zastosowanie stopów aluminium podanych badaniom.

Na podstawie danych zestawionych w tabeli 2. można zauważyć wyraźną zależność między zawartością określonych pierwiastków stopowych a przewodnością elektryczną stopów aluminium. Stopy zawierające większe ilości pierwiastków stopowych wykazują niższą konduktywność w porównaniu ze stopami o mniejszym udziale dodatków stopowych. W stopach aluminium przewodność elektryczna maleje wraz ze wzrostem zawartości pierwiastków stopowych, takich jak: miedź (Cu), cynk (Zn), magnez (Mg), mangan (Mn), krzem (Si), żelazo (Fe) i innych. Zjawisko to wynika z faktu, że atomy pierwiastków stopowych zaburzają regularność sieci krystalicznej aluminium, co zwiększa rozpraszanie elektronów swobodnych, prowadząc do zmniejszenia ich efektywnej ruchliwości i, w konsekwencji, do obniżenia przewodności elektrycznej.

Wysoka przewodność elektryczna materiału sprzyja generowaniu silniejszych prądów wirowych w obszarze przypowierzchniowym, co może prowadzić do uzyskania wyraźniejszego sygnału w przypadku wad powierzchniowych. Należy jednak zauważyć, że wraz ze wzrostem przewodności maleje głębokość penetracji pola wirowego, co ogranicza możliwość detekcji wad położonych głębiej. Stopy aluminium z serii 5xxx, takie jak EN AW-5083 i EN AW-5754, charakteryzują się wyższą przewodnością niż np. EN AW-7075 (seria 7xxx), co przekłada się na lepszy kontrast sygnału w standardowych warunkach badania. Z kolei w przypadku stopów o niższej przewodności, takich jak EN AW-7075, może być konieczne zastosowanie procedur korekcyjnych, takich jak zwiększenie wzmocnienia czy dostosowanie częstotliwości



Fot. 2. Defektoskop prądowirowy NORTEC 600D
Photo 2. NORTEC 600D eddy current flaw detector



Fot. 3. Wzorec AEROFAB NDT AFNDT-2003-1AL
Photo 3. AEROFAB NDT reference standard, model AFNDT-2003-1AL

Tab. 2. Charakterystyki materiału badawczego
Tab. 2. Properties of the test material

Stop	Standardowe zastosowania	Główne pierwiastki stopowe	Zakres przewodności [MS/m]
EN AW-2017	Lotnictwo, konstrukcje	Al-Cu-Mg	17–22
EN AW-5083	Konstrukcje morskie, zbiorniki	Al-Mg-Mn	27–30
EN AW-5754	Motoryzacja, konstrukcje lekkie	Al-Mg	28–32
EN AW-6082	Konstrukcje maszynowe	Al-Mg-Si-Mn	23–28
EN AW-7075	Lotnictwo, części poddawane obciążeniom dynamicznym	Al-Zn-Mg-Cu	16–20

sondy, w celu zapewnienia odpowiedniej czułości badania i uniknięcia błędów interpretacyjnych.

Wpływ pierwiastków takich jak Mg i Si, jak ma to miejsce w przypadku stopu EN AW-6082, powoduje umiarkowane obniżenie przewodności, co przekłada się na średnią czułość detekcji. W tym przypadku interpretacja wyników badania metodą prądów wirowych powinna być wsparta kalibracją względem przewodności próbki referencyjnej.

Za pomocą defektoskopu NORTEC 600 porównano sygnał od uniesienia oraz efekt krawędziowy badanych próbek do wzorca kalibracyjnego AEROFAB NDT AFNDT-2003-1AL. Dobrane parametry badania przedstawia tabela 3. W trakcie badań nieniszczących metodą prądów wirowych, uzyskano charakterystyczne krzywe zamknięte na płaszczyźnie impedancji, przypominające pętle histerezy. Krzywe te powstały w wyniku dynamicznej zmiany wektorowej impedancji cewki pomiarowej podczas przesuwania sondy nad powierzchnią badanego materiału.

Proces pomiaru rozpoczyna się od kalibracji urządzenia na wzorcu referencyjnym, w miejscu wolnym od wad materiałowych. Sondę pomiarową umieszcza się w stałym położeniu nad wzorcem, gdzie definiowany jest punkt zerowy (ang. *null point*) jako baza odniesienia impedancji. Następnie sonda jest przesuwana liniowo w sposób kontrolowany względem wzorca z defektami wzorcowymi (np. nacięcia). Podczas tego ruchu rejestrowane są w czasie rzeczywistym zmiany wartości części rzeczywistej (rezystancji) oraz urojonej (reaktancji) impedancji cewki, co pozwala na uzyskanie trajektorii zmian wektorowych. Na ekranie defektoskopu widzimy tzw. tor impedancyjny – kształt pętli, linii lub elipsy. Na tym etapie dobiera się wzmocnienie sygnału na próbce wzorcowej odnosząc się do znanych wad na wzorcu.

Urządzenie zapamiętuje położenie sygnału wzorca i pokazuje odchylenia jako:

- przesunięcia na osi X (rezystancja),
- przesunięcia na osi Y (reaktancja).

Te przesunięcia mają znaczenie porównawcze, a nie absolutne. Sygnał odbierany przez sondę zależy od wielu czynników jednocześnie: przewodności elektrycznej materiału, jego własności magnetycznych, częstotliwości pomiaru, głębokości defektu, odległości sondy, wzmocnienia (ang. *gain*) fazy (ang. *phase rotation*), filtra, temperatury, grubości powłok itd. W praktyce oznacza to, że nie da się jednoznacznie przeliczyć każdej zmiany sygnału na konkretną wartość. Zamiast tego analizuje się zmiany kierunku i kształtu wektora impedancji – czyli względne różnice.

Urządzenie skalibrowano na wzorcu zgodnie z tabelą 3, które dobrano odpowiednio do materiału, dobrano kąt oraz wzmocnienie tak, aby sygnał generowany na wskazaniach wzorcowych (nacięciach o określonej głębokości i szerokości) był skierowany pionowo do góry, a największe nacięcie (0,030 ca) generowało wskazanie sięgające 90 % wysokości ekranu defek-

Tab. 3. Parametry kalibracji
Tab. 3. Calibration parameters

Opis	Wartość
Częstotliwość	400 kHz
Kąt	284°
Wzmocnienie poziome H	49,4 dB
Wzmocnienie pionowe V	71,2 dB
Filtr górnoprzepustowy	OFF
Filtr dolnoprzepustowy	200 Hz

toskopu. Zmiana któregośkolwiek z tych parametrów zmienia skalę wykresu.

Charakterystyczne krzywe zamknięte powstają, gdy sonda przechodzi kilkakrotnie nad tym samym defektem lub gdy występują cykliczne zmiany odległości sondy od powierzchni. Powoduje to przesunięcia fazowe i amplitudowe sygnału, skutkujące powstaniem pętli zamkniętej na płaszczyźnie R–X, co jest analogiczne do zjawiska histerezy.

Podczas rzeczywistego badania nieniszczącego sonda jest przesuwana po powierzchni badanej próbki lub wzdłuż osi otworu (np. w badaniu nitów) ruchem liniowym bądź obrotowym. W trakcie tego ruchu impedancja cewki ulega ciągłym, dynamicznym zmianom pod wpływem lokalnych nieciągłości materiałowych, zmienności właściwości fizykochemicznych. Mierzone wartości są wyświetlane w czasie rzeczywistym na płaszczyźnie impedancji, gdzie zmieniająca się pozycja sondy i zmiany właściwości materiału powodują powstawanie zamkniętych krzywych.

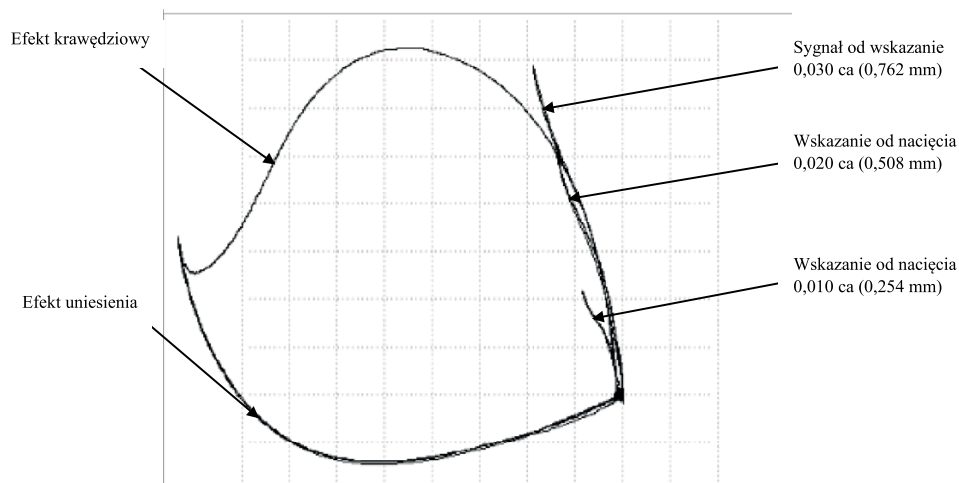
Analiza tych krzywych umożliwia ocenę rodzaju i lokalizacji defektów, ponieważ kształt i rozmiar pętli jest silnie zależny od parametrów defektu, jak również od warunków pomiaru, takich jak prędkość przesuwu sondy, częstotliwość pomiarowa oraz zastosowane filtry sygnału.

Zobrazowanie zmian impedancji na wzorcu AEROFAB NDT AFNDT-2003-1AL przedstawia rys. 1.

Na przedstawionym obrazie widoczny jest wykres impedancji (ang. *impedance plane*) uzyskany z defektoskopu NORTEC 600. Wykres ten otrzymano podczas kalibracji urządzenia pomiarowego na wzorcu referencyjnym z nacięciami o znanej głębokości.

Opis osi wykresu impedancji:

- oś pozioma H – przedstawia składową rezystancyjną (*R*) impedancji, czyli część rzeczywistą. Zmiany w tym kierunku zwykle odpowiadają zmianom przewodności elektrycznej, geometrii próbki lub efektom związanym z odległością sondy od powierzchni.



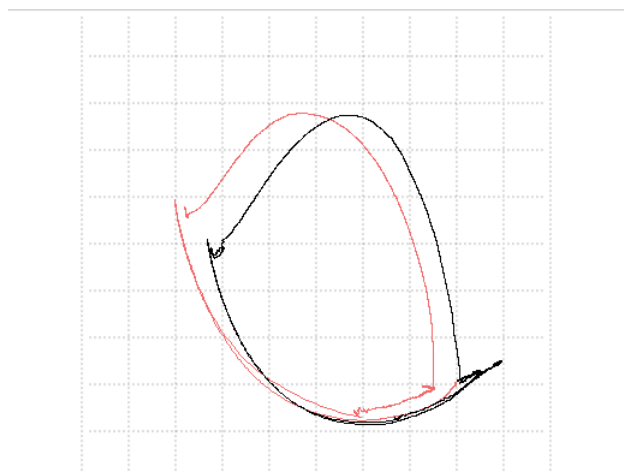
Rys. 1. Wykres impedancji $X(R)$ uzyskany na defektoskopie podczas kalibracji na wzorcu
Fig. 1. Impedance diagram $X(R)$ obtained using the flaw detector during calibration with the reference standard

— oś pionowa V – przedstawia składową reaktancyjną (X) impedancji, czyli część urojoną. Zmiany w tym kierunku są najczęściej związane z różnicami w głębokości wady, właściwościach magnetycznych materiału lub zmianami częstotliwości.

Zatem każdy punkt na wykresie reprezentuje wektor impedancji:

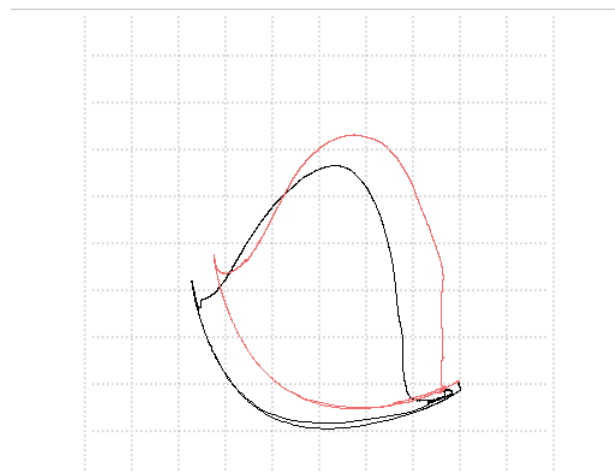
$$Z = R + jX$$

gdzie: Z – impedancja zespolona $[\Omega]$, R – rezystancja rzeczywista $[\Omega]$, X – reaktancja $[\Omega]$, j – jednostka urojona.



Rys. 2. Wykres impedancji $X(R)$ dla próbki wykonanej ze stopu EN AW-5083 H111

Fig. 2. Impedance diagram $X(R)$ for the sample made of EN AW-5083 H111 alloy



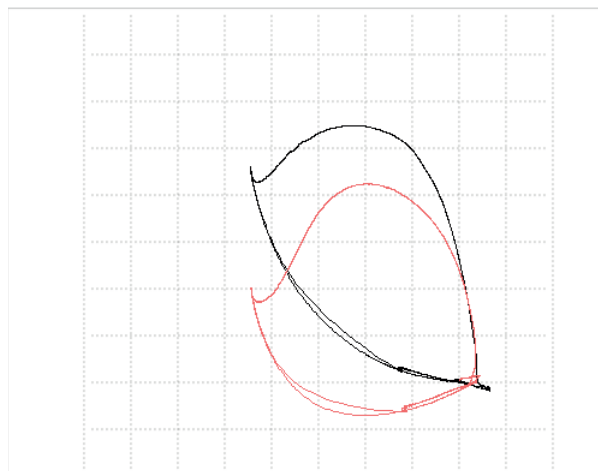
Rys. 3. Wykres impedancji $X(R)$ dla próbki wykonanej ze stopu EN AW-7075 T651

Fig. 3. Impedance diagram $X(R)$ for the sample made of EN AW-7075 T651 alloy



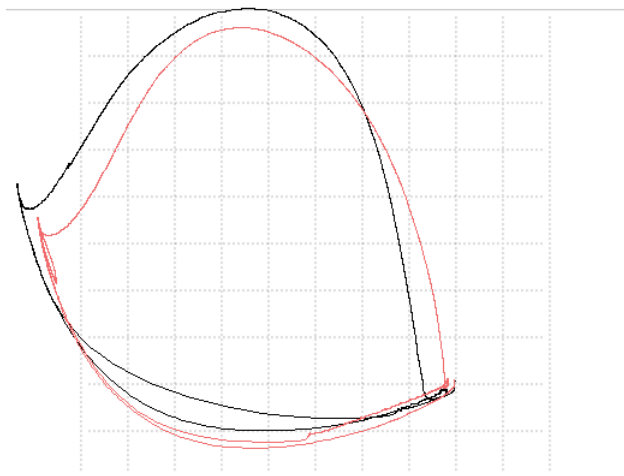
Rys. 4. Wykres impedancji $X(R)$ dla próbki wykonanej ze stopu EN AW-2017 T451

Fig. 4. Impedance diagram $X(R)$ for the sample made of EN AW-2017 T451 alloy



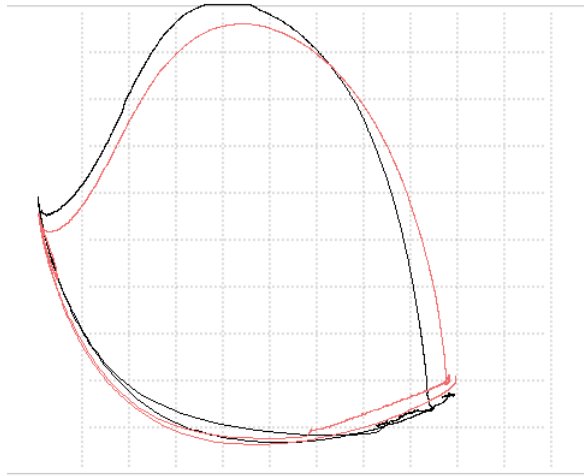
Rys. 5. Wykres impedancji $X(R)$ dla próbki ze stopu EN AW-6082 T651

Fig. 5. Impedance diagram $X(R)$ for the sample made of EN AW-6082 T651 alloy



Rys. 6. Wykres impedancji $X(R)$ dla próbki wykonanej ze stopu EN AW-5754 H110

Fig. 6. Impedance diagram $X(R)$ for the sample made of EN AW-5754 H110 alloy



Rys. 7. Wykres impedancji $X(R)$ dla próbki wykonanej ze stopu EN AW-5754H111

Fig. 7. Impedance diagram $X(R)$ for the sample made of EN AW-5754 H111 alloy

Położenie punktu impedancji zmienia się w zależności od sygnału indukowanego w sondzie przez zmiany w materiale (np. wady, pęknięcia, różnice materiałowe). Celem kalibracji jest określenie odpowiedzi sygnałowej systemu pomiarowego na znane defekty, co umożliwia prawidłową interpretację rzeczywistych pomiarów.

Na wykresie wyróżniono:

- efekt krawędziowy – charakterystyczne zakłócenie sygnału związane z przejściem przez granicę badanego obiektu,
- efekt uniesienia – zakłócenie sygnału wynikające z niedokładnego przylegania głowicy pomiarowej do powierzchni badanego materiału,
- sygnały od nacięć – trzy wyraźne piki odpowiadające nacięciom referencyjnym o znanej głębokości:
 - 1) 0,030 cala (0,762 mm),
 - 2) 0,020 cala (0,508 mm),
 - 3) 0,010 cala (0,254 mm).

Wyniki pomiarów przeprowadzonych na próbkach – zmiany trajektorii sygnału impedancji przedstawiono w postaci wykresów na ekranie defektoskopu NORTEC 6000D (rys. 2–7) w funkcji $X(R)$. Badania przeprowadzono na parametrach dobranych w trakcie kalibracji, zmieniając wzmocnienie sygnału w celu analizy wyników, np. jeżeli wykres uzyskany na badanej próbce wykraczał poza zakres ekranu defektoskopu. W tym przypadku zmiana wzmocnienia nie wpływa negatywnie na interpretację wyników, ponieważ próbki porównano pod kątem efektu uniesienia i efektu krawędziowego zwracając uwagę na fazę oraz kształt sygnału. Sygnał uzyskany na badanej próbce zobrazony jest kolorem czarnym, natomiast na wzorcu referencyjnym kolorem czerwonym.

4. Wpływ obróbki na interpretację wyników badań metodą prądów wirowych

W praktyce eksploatacyjnej istotnym problemem jest zmienność sygnału spowodowana lokalnymi zmianami przewodności, wynikającymi m.in. z wcześniejszych napraw, obróbki mechanicznej (np. prostowania wgnieceń) czy zmian mikrostrukturalnych związanych z umocnieniem materiału. Zjawisko to może prowadzić do przemieszczenia punktu impedancyjnego na ekranie defektoskopu nawet w przypadku braku rzeczywistych nieciągłości materiałowych, co w warunkach eksploatacyjnych

może prowadzić do błędnych wskazań, fałszywych alarmów lub przeoczenia defektów.

W związku z powyższym, właściwa interpretacja wyników badań wymaga nie tylko odpowiedniej kalibracji systemu detekcyjnego względem przewodności, ale również dobrej znajomości charakterystyki badanych materiałów, ich stanu technologicznego oraz historii eksploatacyjnej. Kluczową rolę odgrywa tu kompetencja operatora – zarówno w zakresie znajomości fizycznych podstaw metody, jak i zrozumienia, w jaki sposób zmienne materiałowe wpływają na sygnał. Bez takiej wiedzy, nawet precyzyjnie wykonane badanie może prowadzić do niewłaściwych wniosków diagnostycznych.

Podczas prowadzenia standardowych badań nieniszczących z wykorzystaniem prądów wirowych o wysokiej częstotliwości, przeprowadzonych na poszyciu statku powietrznego wykonanym ze stopu aluminium, zaobserwowano przemieszczenie punktu impedancyjnego na ekranie defektoskopu, mimo braku wykrycia nieciągłości materiałowej. W celu wyjaśnienia przyczyny tego zjawiska wykonano pomiary przewodności elektrycznej badanego obszaru, które wykazały jego niejednorodność w zakresie przewodnictwa. Analiza historii eksploatacyjnej komponentu ujawniła, iż fragment ten był wcześniej poddany oddziaływaniu mechanicznemu, mającemu na celu usunięcie wgniecenia poszycia. Zmiana położenia punktu impedancyjnego może istotnie utrudniać jednoznaczną interpretację wyników badań nieniszczących, co wskazuje na konieczność poszerzania wiedzy operatorów w zakresie czynników wpływających na jakość oraz wiarygodność pomiarów prądami wirowymi. W celu zweryfikowania wpływu obróbki mechanicznej na przewodność przeprowadzono pomiary na wytypowanych próbkach. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Procesy przesycania i starzenia (np. stany T4 i T6 w stopach 2017 i 7075) nie spowodowały widocznej na defektoskopie zmiany przewodności. Badania wykazały natomiast, że wpływ obróbki mechanicznej na właściwości materiału jest znaczący. Różnicowanie sygnału w zależności od stanu umocnienia wymaga uwzględnienia historii obróbki badanego materiału przy kalibracji systemu.

Dodatkowo, wykazano wpływ stanu umocnienia na położenie punktu impedancji na ekranie defektoskopu. Dwa stopy o zbliżonym składzie chemicznym – EN AW-5083 i EN AW-5754 – po walcowaniu na zimno wykazywały inny sygnał niż w stanie wyżarzonym. Zmienność mikrostrukturalna wynikająca z obróbki mechanicznej (np. tekstura krystalograficzna, rozkład naprężeń własnych) stanowi istotne

Tab. 4. Pomiar przewodności badanych próbek
Tab. 4. Measured electrical conductivity of the tested samples

Oznaczenie próbki	Zastosowana obróbka	Pomiar przewodności [% IACS]	Przewodność przed obróbką [MS/m]	Przewodność po obróbce [MS/m]
EN AW-5083 H111	umocnienie przez zgniot	26,25	27–30	15,225▼
EN AW-5754 H111	umocnienie przez zgniot	33,90	28–32	19,662▼
EN AW-5754 H110	umocnienie przez zgniot	34,17	28–32	19,819▼
EN AW-2017 T451	przesycenie, naturalne starzenie, odpężanie przez rozciąganie	31,76	17–22	18,421
EN AW-6082 T651	przesycenie, sztuczne starzenie i odpężony przez rozciąganie	45,28	23–28	26,262
EN AW-7075 T651	przesycenie, sztuczne starzenie i odpężony przez rozciąganie	32,02	16–20	18,572

Oznaczenie ▼ oznacza zastosowano dla próbek, których przewodność po badaniu uległa zmianie – pomiar był niższy po obróbce

utrudnienie w kalibracji detekcji i może wprowadzać dodatkowe niepewności interpretacyjne [1].

W obserwacjach eksperymentalnych stwierdzono zmienność położenia punktu impedancji na ekranie defektoskopu mimo identycznych wad. Przykładowo, defekt w postaci nacięcia o głębokości 1 mm generował sygnał na różnych wysokościach dla stopów EN AW-5083 i EN AW-7075. Wskazuje to jednoznacznie, że sygnał jest silnie modulowany nie tylko przez geometrię nieciągłości, ale także przez przewodność, mikrostrukturę oraz obecność wydzieleni [3]. Zjawisko to może prowadzić do fałszywych wskazań lub zaniżenia czułości, jeśli nie zostanie uwzględnione podczas interpretacji wyników.

W kontekście stosowania metody prądów wirowych w warunkach rzeczywistych, wykazano, że metoda może być użyteczna nawet przy ograniczonej wiedzy o materiale, o ile sygnał od efektu uniesienia oraz efektu krawędziowego nie odbiega znacząco od sygnału uzyskanego na wzorcu kalibracyjnym. W tym przypadku pomiar konduktancji może umożliwić wstępną kalibrację oraz wiarygodną interpretację wyników, nawet w przypadku niepełnych danych dotyczących składu czy stanu obróbki [4]. Tym samym znajomość przewodności zwiększa skuteczność wykrywania defektów metodą prądów wirowych.

W warunkach eksploatacyjnych, metoda prądów wirowych może być skuteczna bez stosowania wzorców, w zakresie oceny jakościowej, bez oceny wielkości wskazania, pod warunkiem spełnienia kilku istotnych kryteriów. Materiał powinien być homogeniczny pod względem przewodności lub mieścić się w zakresie tolerancji przewidzianej dla danej procedury. Jeśli dodatkowo znana jest typowa geometria spodziewanych wad, a system wyposażony jest w algorytmy korekcyjne lub progowe (np. modele empiryczne, algorytmy AI), detekcja może być prowadzona z wysoką skutecznością [2].

5. Podsumowanie

Skład chemiczny, a także różnice w stanie materiału, jego eksploatacja i naprawy, jakie przeprowadzono na danej części, mają bezpośredni wpływ na odpowiedź materiału w badaniach metodą prądów wirowych, co wymaga indywidualnego podejścia do kalibracji i interpretacji wyników defektoskopii. Szczególnie znaczenie ma to w przypadku stopów utwardzanych wydzieleniowo, w których obecność wydzieleni faz międzymetalicznych istotnie modyfikuje lokalne właściwości fizyczne. Badania wykazały, że stopy z grupy Al-Mg (5083, 5754) cha-

rakteryzują się wysoką przewodnością i stabilnym sygnałem defektoskopu prądowirowego. Natomiast stopy zawierające Cu i Zn (2017, 7075) mają niską przewodność i dużą zmienność sygnału w zależności od stanu obróbki, co wymaga zaawansowanej kalibracji i kompensacji sygnału.

Obróbka cieplna i mechaniczna powodują zmiany mikrostruktury materiału, takie jak przemiany fazowe, odkształcenia czy powstawanie naprężeń wewnętrznych. Te zmiany wpływają na przewodność elektryczną, ponieważ modyfikują sposób, w jaki elektrony swobodne przemieszczają się przez materiał. W badaniach metodą prądów wirowych sygnał zależy bezpośrednio od przewodności badanego obiektu, dlatego zmiany stanu materiału przekładają się na zmiany w pomiarach. Nawet jeśli fizyczny defekt pozostaje taki sam, różnice w przewodności mogą powodować przesunięcia punktu impedancji na wykresie defektoskopu. Jeśli te zmiany nie zostaną uwzględnione podczas kalibracji i interpretacji, może to prowadzić do błędnych wniosków dotyczących wielkości lub obecności wad. Dlatego ważne jest indywidualne podejście do kalibracji uwzględniające aktualny stan materiału. Badania potwierdziły znaczenie pomiaru przewodności jako parametru referencyjnego dla poprawy jakości badań, szczególnie w warunkach eksploatacyjnych. Wykonując badania, należy zwrócić szczególną uwagę na to, iż przewodność elektryczna materiału zmienia się w zależności od jego stanu po obróbce cieplnej lub mechanicznej (np. po wyżarzaniu, przesycaniu, starzeniu czy walcowaniu), a sygnał otrzymywany podczas badania metodą prądów wirowych (ET) również będzie się różnił, nawet jeśli defekt jest taki sam. W warunkach eksploatacyjnych oznacza to, że punkt impedancji może zmieniać swoje położenie na ekranie defektoskopu nie ze względu na występującą wadę w materiale, a wskutek zmiany przewodności materiału w tym miejscu spowodowane wykonaną naprawą, np. usuwanie usterki w postaci wgniotu przez wywieranie przeciwnego nacisku w celu przywrócenia pierwotnego kształtu materiału. W praktyce oznacza to, że bez uwzględnienia tych zmian w przewodności, sygnał widoczny na ekranie defektoskopu, może być mylący – defekt może wyglądać na mniejszy lub większy niż jest w rzeczywistości albo w ogóle może być niewidoczny. Ze względu na to kalibracja powinna być przeprowadzona na wzorcach, które jak najwierniej odzwierciedlają aktualny stan materiału (uwzględniający jego ewentualne odkształcenia, zmiany strukturalne czy inne czynniki wpływające na przewodność), aby zapewnić wiarygodność wykrywania i oceny defektów.

Najważniejszymi osiągnięciami pracy jest wskazanie praktycznych wskazówek dla operatorów wykonujących badania nieniszczące metodą prądów wirowych:

- Skład chemiczny oraz stan materiału (w tym eksploatacja i naprawy) mają bezpośredni wpływ na odpowiedź sygnału w badaniach metodą prądów wirowych, co wymaga indywidualnego podejścia do kalibracji i interpretacji wyników.
- Obróbka cieplna i mechaniczna zmieniają mikrostrukturę materiału, co wpływa na jego przewodność elektryczną. W badaniach prądów wirowych te zmiany mogą powodować przesunięcia sygnału, dlatego kalibracja i interpretacja wyników muszą uwzględniać aktualny stan materiału.
- Pomiar przewodności jest kluczowy dla poprawy jakości badań metodą prądów wirowych, zwłaszcza w warunkach eksploatacyjnych, gdzie materiał może mieć zmieniony stan.
- Zmiany przewodności spowodowane, np. naprawami czy odkształceniami powodują przesunięcia punktu impedancji na ekranie defektoskopu, co może być mylące w interpretacji defektów.
- Kalibracja powinna być przeprowadzana na wzorcach odzwierciedlających rzeczywisty stan materiału, aby zapewnić wiarygodność wykrywania i oceny defektów.

Podziękowania

Konsultacja merytoryczna: dr hab. inż. Dominik Kukła, mgr inż. Andrzej Szewc. Praca była wspierana przez Centrum Obsługi Przedsiębiorcy w ramach realizacji projektu „Powstanie działu badawczo-rozwojowego w Wojskowych Zakładach Lotniczych nr 1 S.A. w celu wprowadzenia innowacyjnej działalności z zakresu badań nieniszczących”.

Bibliografia

1. Babul T., Jończyk S., Samborski T., *Ocena lokalnych wad mikrostruktury – korelacja wyników pomiarów wiopryądowych i oznaczeń mikrotrwałości*, „Przegląd Spawalnictwa”, Nr 3, 2014, 11–17.
2. Machado M.A., *Eddy Currents Probe Design for NDT Applications: A Review*, „Sensors”, Vol. 24, No. 17, 2024, DOI: 10.3390/s24175819.
3. Zbrowski A., Matecki K., *Zastosowanie metody prądów wirowych w diagnostyce materiałów i elementów konstrukcyjnych*, „TTS Technika Transportu Szybowego”, Nr 10, 2013, 951–962.
4. International Atomic Energy Agency, *Eddy current testing at Level 2: Manual for Syllabi Contained in IAEA-TEC-DOC-628.Rev. 2*, “Training Guidelines for Non Destructive Testing Techniques”, 2011.
5. García-Martín J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E., *Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing*, “Sensors”, Vol. 11, No. 3, 2011, 2525–2565, DOI: 10.3390/s110302525.
7. *Eddy Current Testing (ECT)*, “NDT Corner”, 2022.
8. Rajic N., Tsoi K., *Methods of Early Fatigue Detection*, 1997, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory.
9. Constable J.H., Sahay C., *Electrical Resistance as an Indicator of Fatigue*, “IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology”, Vol. 15, No. 6, 1992, 1138–1145, DOI: 10.1109/33.206940.
10. Bakunov A.S., Muzhitskii V.F., Shubochkin C.E., *VE-26NP eddy-current structuroscope*, “Russian Journal of Nondestructive Testing”, Vol. 39, No. 11, 2003, 866–870, DOI: 10.1023/B:RUNT.0000023757.34685.13
11. Skrbek B., Nosek V., *Combined non-destructive structuroscopy of dispersion metallic materials*, 11th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2014), October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic.

Effect of Alloying Additions and Processing on the Electromagnetic Properties of Aluminum Alloys and on Discontinuity Detection Using an Eddy Current Flaw Detector

Abstract: The presented work outlines the results of research and analysis related to the influence of alloying additives and material processing on the effectiveness of non-destructive testing using the eddy current (ET) method, as well as the associated operational safety of aircraft. The effectiveness of these tests, carried out using specialized equipment, is crucial for detecting material defects in aircraft components. This study analyzes the impact of chemical composition and thermo-mechanical treatment on the conductivity of alloys, which directly affects the quality of diagnostics using the eddy current method. The results highlight the need for precise calibration and the use of conductivity measurements as a factor enhancing the reliability of testing in aviation.

Keywords: eddy currents, aircraft diagnostics, conductivity

mgr inż. Małgorzata Milczarek

malgorzata.milczarek@wzl1.mil.pl
ORCID: 0009-0004-7378-1298

Absolwentka Politechniki Poznańskiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn o specjalności Silniki Lotnicze w stopniu inżynierskim i Politechniki Łódzkiej na kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji w stopniu magisterskim. Zawodowo specjalizuje się w badaniach nieniszczących w zakresie metod: prądów wirowych, magnetyczno-proszkowej i penetracyjnej. Aktualnie prowadzi Zespół Badań Nieniszczących w Wojskowych Zakładach Lotniczych Nr 1 S.A.

**inż. Piotr Maj**

piotr.maj@wzl1.mil.pl
ORCID: 0009-0004-4218-4327

Absolwent Politechniki Łódzkiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn w stopniu inżynierskim. Zawodowo specjalizuje się w badaniach nieniszczących w zakresie metod: prądów wirowych, magnetyczno-proszkowej, penetracyjnej i radiograficznej oraz w technologiach addytywnych. Aktualnie pracuje w Zespole Badań Nieniszczących w Wojskowych Zakładach Lotniczych Nr 1 S.A.

**dr Wioleta Serweta**

wioleta.serweta@wzl1.mil.pl
ORCID: 0000-0001-6679-9933

Doktor nauk technicznych w dyscyplinie mechanika. Praca doktorska, przygotowana i obroniona na Wydziale Mechanicznym Politechniki Łódzkiej, obejmowała badania zagadnień dynamiki układów mechanicznych z jednostronnymi i dwustronnymi zderzeniami typu Hertza wraz z opracowaniem procedur numerycznych wyznaczania ich spektrów wykładników Lapunowa. Obecnie jest pracownikiem Działu Badań i Rozwoju w Wojskowych Zakładach Lotniczych Nr 1 S. A.

